

Institut für Luft- und Kältetechnik  
gemeinnützige Gesellschaft mbH

## **Wissenschaftliche Begleitung des Ersteinsatzes einer Wasser/Lithiumbromid-Kleinabsorptionskältemaschine**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem AZ: 22416 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dipl.-Ing. E. Wobst & Dr.-Ing. Mathias Safarik

Dresden, Mai 2007

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Az	<b>22416</b>	Referat	<b>34</b>	Fördersumme	<b>117.225,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Wissenschaftliche Begleitung des Ersteinsatzes einer Wasser/Lithiumbromid-Kleinabsorptionskältemaschine</b>				
<b>Stichworte</b>	Energie, Kühlung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>25 Monate</b>	<b>20.11.2004</b>	<b>19.12.2006</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH Bertolt-Brecht-Allee 20			Tel	0351/4081-520
	01309 Dresden			Fax	0351/4081-525
				Projektleitung	Dr.-Ing. Mathias Safarik
<b>Kooperationspartner</b>	WEGRA Anlagenbau Oberes Tor 106			Bearbeiter	
	98631 Westenfeld				

### **Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens**

Der Energiebedarf zur Kühlung bzw. Klimatisierung von Wohn- und Arbeitsbereichen nimmt weltweit stark zu. Gegenwärtig wird der steigende Kältebedarf im Wesentlichen durch elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen gedeckt, was zu einem Anstieg der Kohlendioxidemissionen führt. Der stark ausgeprägte tageszeitliche Verlauf der benötigten Kälteleistung führt außerdem zu einer Lastspitze in der Stromversorgung, die zu einer hohen Belastung und zu Ausfällen der Stromversorgungsnetze im Sommer führt. Eine Alternative dazu ist die solarthermische Kälteerzeugung mit Absorptionskältemaschinen.

Ziel des Projektes ist es, die Markteinführung einer neuen Technologie im Bereich der Klimatechnik für kleine und mittlere Leistungen durch eine messtechnische Begleitung des Ersteinsatzes der vom ILK Dresden und WEGRA Anlagenbau GmbH entwickelten Kleinabsorptionskältemaschine (KAKM) zu unterstützen und deren Leistungsfähigkeit im Praxiseinsatz nachzuweisen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die KAKM kann mit beliebigen Wärmequellen (Solarthermie, BHKW, Fernwärme) betrieben werden. Im Rahmen des Projektes sollen drei, bezüglich Wärmequelle und Rückkühlung verschiedenartige Systeme zur thermischen Kälteerzeugung über einen Zeitraum von 2 Jahren (Kühlperioden) messtechnisch begleitet werden. Der Einsatz folgender Wärmequellen ist vorgesehen: Flachkollektoren, Abwärme eines motorischen BHKW, ggf. Vakuumröhrenkollektoren. Zur Rückkühlung sollen marktverfügbare offene Nasskühlwerke sowie trockene Rückkühlwerke eingesetzt werden.

Die Anlagen werden messtechnisch so ausgerüstet, dass Aussagen über die erzeugten Kältemengen, über die vom BHKW bzw. der Solarthermieanlage bezogenen Wärmemengen, Temperaturniveaus der Wärmen, Wasser- bzw. Stromverbrauch des Rückkühlers usw. getroffen werden können.

Die KAKM kann über große Temperaturbereiche betrieben werden. Der zweite Schwerpunkt des Projekts ist die detaillierte Vermessung der KAKM innerhalb eines geeigneten Versuchsstands, um detaillierte Messwerte über den gesamten Arbeitsbereich zu gewinnen und die Auswirkungen extremer Randbedingungen beurteilen zu können.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Innerhalb dieses Projektes wurde die Kleinabsorptionskältemaschine Wegracal SE 15 auf einem Leistungsprüfstand detailliert vermessen. Die dabei gewonnenen Daten dienen als Grundlage zur Planung von Gesamtsystemen zur solaren Heizung und Kühlung bzw. zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung.

Innerhalb des zweiten Projektschwerpunktes wurden drei Demonstrationsanlagen aufgebaut und deren Betrieb wissenschaftlich begleitet. Beim Aufbau dieser Systeme konnten wie vorgesehen, verschiedene Technologien der Wärmebereitstellung, Rückkühlung und Raumkühlung umgesetzt werden.

Bei der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage gelang es wegen hydraulischer und regelungstechnischer Probleme nicht, die potentiell hohen Heizwassertemperaturen des Blockheizkraftwerkes der Absorptionskältemaschine zur Verfügung zu stellen. Da für die Fußbodenkühlung nur relativ hohe Kaltwassertemperaturen benötigt werden, konnte die Anlage trotzdem betrieben werden, allerdings in Teillast mit max. 50 % der Nennleistung. Die hohe Verfügbarkeit der Heizwärme aus dem BHKW ermöglicht deutlich längere Betriebszeiten als mit solarthermischen Antrieb, was sich günstig auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Das System mit Flachkollektoren arbeitete mit vergleichsweise niedrigen Antriebstemperaturen. Durch den offenen Verdunstungskühler wurden typische Kühlwassertemperaturen im Bereich von 27°C mit geringem Hilfsenergiebedarf bereitgestellt, was den Betrieb mit niedrigen Antriebstemperaturen ermöglichte. Da weniger Räume an die Kälteversorgung angeschlossen wurden als geplant, war der Kältebedarf in der Regel geringer als die Kälteleistung. Dies führte zu niedrigen durchschnittlichen Kaltwassertemperaturen und damit zu einem etwas geringeren Wärmeverhältnis. Durch die Nutzung eines Holzpelletkessels kann ein CO<sub>2</sub>-freies thermisches Back-up realisiert werden.

Bei der dritten Anlage wurde ein trockenes Rückkühlwerk in Kombination mit Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt. Durch die Nutzung drehzahlvariabler Ventilatoren konnte der Strombedarf für die Rückkühlung auf ein der Verdunstungskühlung vergleichbares Niveau gesenkt werden. Die höheren Kühlwassertemperaturen können durch höhere Heizmedientemperaturen größtenteils kompensiert werden, solange nicht sehr niedrige Kaltwassertemperaturen bereitgestellt werden müssen. Damit stellt diese Kombination eine interessante Option für Regionen mit Wasserknappheit oder zur Reduzierung des Wartungsaufwandes dar. Die direkte Beheizung der Kältemaschine mit dem Solarfluid und die Realisierung einer Notkühlung unter Nutzung des Rückkühlers haben sich bewährt.

Die Demonstrationsanlagen erzielten insgesamt gute Betriebsergebnisse. Gleichzeitig konnten wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der Betriebssicherheit der Anlagen und zur Optimierung der Gesamtsysteme gewonnen werden. Die Abstimmung der Systemkomponenten und deren Regelung ist eine wichtige Voraussetzung, um die angestrebten Parameter zu erreichen sowie eine hohe Effizienz und Betriebssicherheit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse wurden sowohl vom Bewilligungsempfänger ILK Dresden als auch vom Kooperationspartner Wegra eine Reihe von Vorträgen auf Symposien, Konferenzen und Workshops gehalten.

Ergänzt wurde dies durch die Teilnahme an Messen und Ausstellungen. Die Fa. Wegra stellte die KAKM zur solaren Kühlung und KWKK, teilweise in Verbindung mit Kooperationspartnern, u.a. auf folgenden Messen aus: Intersolar 2004, 2005 und 2006; 3. und 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis in Stuttgart; IKK/Enkon 2005 und 2007, Solarmesse Mailand 2006.

Anlässlich der Einweihung der solarthermischen Kälteanlage am ILK Dresden wurde am 18. Juli 2006 eine Veranstaltung durchgeführt, in der die Anlage und die Technologie der solarthermischen Kälteerzeugung der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Mehr als 60 Teilnehmer aus Planung, Industrie und Forschung informierten sich im Rahmen eines Vortragsprogramms über aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Solarthermie und solarthermische und photovoltaische Kälteerzeugung.

## **Fazit**

Die solare Kühlung im kleinen Leistungsbereich stellt eine interessante Option zur Vermeidung der durch sommerliche Nutzung von Kompressionskältemaschinen hervorgerufenen Probleme (Stromverbrauch und elektrischer Leistungsbedarf) dar und ist gleichzeitig eine sinnvolle Ergänzung solarthermischer Anlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung. Die Nutzbarkeit der Absorptionskältetechnik in Kombination mit verschiedenen Solarkollektortypen, Blockheizkraftwerken und unterschiedlichen Rückkühlssystemen konnte innerhalb des Projektes erfolgreich demonstriert werden.

Für die stärkere Nutzung dieser Technologie ist es notwendig, die Systemkosten zu senken, Standardsysteme mit aufeinander abgestimmten Komponenten zu entwickeln, Synergien zu erschließen sowie Betriebserfahrungen an Referenzanlagen in Südeuropa zu gewinnen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3 Hauptteil</b>	<b>11</b>
3.1 Erstellung eines Leistungskennfeldes der Kleinabsorptionskältemaschine	11
3.2 Wissenschaftliche Begleitung von drei Demonstrationsanlagen	14
3.2.1 Übersicht	14
3.2.2 Aufbau der Demonstrationsanlagen	14
3.2.3 Projektverlauf und Ergebnisse	20
3.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	36
<b>4 Fazit</b>	<b>38</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>Anhang</b>	<b>42</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau des Versuchstandes zur Vermessung der Kleinabsorptionskältemaschine WEGRACAL SE 15	11
Abbildung 2:	Kälteleistung der KAKM in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur für verschiedene Kühlwassertemperaturen	12
Abbildung 3:	Heizwasseraustrittstemperatur in Abhängigkeit der Kaltwassertemperatur bei Verringerung des Heizwasservolumenstroms	13
Abbildung 4:	Präsentationsraum des Autohauses Roßbach während der Bauphase und nach Fertigstellung	15
Abbildung 5:	Vereinfachte schematische Darstellung der Anlagenkonfiguration zur Klimakälteerzeugung im Autohaus Roßbach in Hamburg	15
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Konfiguration des solaren Kühlsystems in Moosburg [4]	16
Abbildung 7:	Kollektorfeld bei der <i>Fa. Citrin Solar</i> in Moosburg, Bayern	17
Abbildung 8:	links – KAKM im Schulungsraum der <i>Fa. Citrin Solar</i> rechts – offener Verdunstungskühler zur Rückkühlung	17
Abbildung 9:	Vergleich des Wirkungsgradverlaufs für einen typischen Flachkollektor und des in der Dresdner Anlage eingesetzten Vakuumröhrenkollektors	18
Abbildung 10:	Schema der solaren Kälteerzeugungsanlage am ILK Dresden	19
Abbildung 11:	links – Kollektorfeld und Rückkühler der solaren Kälteanlage Dresden rechts – KAKM in Dresden während der Inbetriebnahme	20
Abbildung 12:	Tagesgang der Temperaturen und Leistungen der KWKK-Anlage Hamburg (3.8.2006)	21
Abbildung 13:	Betriebsdaten der Anlage Moosburg für den 18.7.2005	26
Abbildung 14:	Verlauf charakteristischer Temperaturen und Leistungen der solaren Kühlung am ILK Dresden – 27.7.2006	30
Abbildung 15:	Verlauf charakteristischer Temperaturen und Leistungen der solaren Kühlung am ILK Dresden – 02.8.2006	32
Abbildung 16:	Spezifischer Stromverbrauch für den Betrieb des „reduzierten“ Trockenkühlers	34
Abbildung 17:	Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 27°C	42
Abbildung 18:	Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 29°C	43
Abbildung 19:	Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 32°C	44
Abbildung 20:	Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 36°C	45
Abbildung 21:	Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 40°C	46

Abbildung 22: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und Heizwasseraustrittstemperatur der KAKM bei einer Heizwassereintrittstemperatur von 85°C sowie verschiedenen Heizwasservolumenströmen und Kühlwassertemperaturen	47
Abbildung 23: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und Heizwasseraustrittstemperatur der KAKM bei einer Heizwassereintrittstemperatur von 85°C, Kühlwassereintrittstemperatur von 29°C sowie verschiedenen Heizwasservolumenströmen	48
Abbildung 24: Ausschnitt der Einladung zur Einweihungsveranstaltung am ILK Dresden	50
Abbildung 25: Presseberichte zur Einweihungsveranstaltung am ILK Dresden	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung des Energiebedarfes für Raumklimageräte in den EU-Staaten	8
Tabelle 2: Betriebsdaten der KWKK-Anlage in Hamburg für die Kühlsaison 2006	23
Tabelle 3: Ausgewählte Betriebsdaten der Anlage in Moosburg für die Kühlsaison 2005	24
Tabelle 4: Mittlere externe Temperaturen und Leistungen der WEGRACAL SE 15 für einen Betriebstag (18.7.05)	25
Tabelle 5: Betriebsdaten der solaren Kühlanlage in Moosburg für die Kühlsaison 2006 [4]	27
Tabelle 6: Betriebsdaten der solaren Kühlung am ILK Dresden für die Kühlsaison 2006 [4]	29
Tabelle 7: Betriebsergebnisse der solaren Kühlung am ILK Dresden für Juli 2006 [4]	29
Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchungen zur Beeinflussung des Strombedarfs zur Rückkühlung (unveränderter Trockenkühler)	33
Tabelle 9: Ergebnisse der Untersuchungen zur Beeinflussung des Strombedarfs zur Rückkühlung („reduzierter“ Trockenkühler)	34
Tabelle 10: Vortragsübersicht zur Thematik der Solaren Kühlung und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung von 2005-2007	37
Tabelle 11: Übersicht der Messstellen der solaren Kälteanlage am ILK Dresden	49

## Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

### Formelzeichen

<u>Formelzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
Q	kWh	Wärmemenge
$\dot{Q}$	kW	Wärmestrom, Wärmeleistung
t; T	°C; K	Temperatur
ζ; zetta	-	Wärmeverhältnis

### Indizes

0	Kälte-; Verdampfung-
H	Heiz
HeWa	Heizwasser
KaWa	Kaltwasser
KüWa	Kühlwasser

### Abkürzungen

AKM	Absorptionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
FB	Fußbodenheizung/ -kühlung
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
ILK	Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden
KAKM	Kleinabsorptionskältemaschine
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

## 1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes „Wissenschaftliche Begleitung des Ersteinsatzes einer Wasser/Lithiumbromid-Kleinabsorptionskältemaschine“ wurde ein detailliertes Leistungskennfeld der von der Fa. WEGRA hergestellten AKM WEGRACAL SE 15 auf einem dafür errichteten Versuchsstand aufgenommen. Die Einflüsse der externen Temperaturen (Heiz-, Kühl- und Kaltwasser) sowie des Heizwasservolumenstroms auf die Leistung und das Wärmeverhältnis der Anlage können aus den Leistungsdiagrammen entnommen werden. Diese Daten bilden eine wichtige Grundlage zur Planung und Dimensionierung von Systemen zur solaren Kühlung bzw. zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung und tragen zu einem verstärkten Einsatz dieser Technologie bei.

Innerhalb des zweiten Projektschwerpunktes wurden drei verschiedene Systeme zur Klimakälteerzeugung mittels der Kleinabsorptionskältemaschine errichtet und messtechnisch begleitet. Dabei konnten die typischen Varianten der peripheren Anlagen (Wärmequelle, Rückkühlung, Kälteverteilung) umgesetzt werden. Die erste Anlage wird mit der Abwärme eines motorischen Blockheizkraftwerkes kleiner Leistung betrieben. Die Rückkühlung erfolgt über einen Verdunstungskühler, die Kälteverteilung über die Nutzung der Fußbodenheizung als Fußbodenkühlung. In der zweiten Anlage dienen Flachkollektoren als Wärmequelle. Die Rückkühlung erfolgte ebenfalls über einen Verdunstungskühler, die Kälteverteilung über Gebläsekonvektoren. Innerhalb der dritten Anlage wurde ein trockener Rückkühler eingesetzt. Zur Kompensation der daraus resultierenden höheren Kühlwassertemperaturen werden Vakuumröhrenkollektoren als Wärmequelle genutzt. Die Kälteverteilung erfolgt über einen Gebläsekonvektor.

Die Absorptionskältemaschine arbeitete in allen drei Einsatzfällen effizient und betriebssicher. Aufgrund der Besonderheiten einiger peripherer Anlagen bzw. ungünstiger Regelungseinstellungen arbeitete die Absorptionskältemaschine mit gegenüber den Nennbedingungen teilweise deutlich niedrigeren Antriebstemperaturen, was zu einer niedrigeren Kälteleistung als im Nennbetrieb führte. Aus den Messergebnissen wurden wichtige Erkenntnisse zur weiteren Optimierung der Absorptionskältemaschine und v.a. zum Aufbau entsprechender Gesamtsysteme abgeleitet.

Der Kooperationspartner in diesem Projekt, die Fa. WEGRA, wird zusammen mit der Tochterfirma EAW und dem ILK Dresden die Vermarktung und Weiterentwicklung solarer Kälteanlagen forcieren. Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ: 22416).

## 2 Einleitung

Der Energiebedarf zur Kühlung bzw. Klimatisierung von Wohn- und Arbeitsbereichen nimmt weltweit stark zu, was u.a. auf steigende interne Lasten, die dynamische wirtschaftliche Entwicklung südlicher Regionen, höhere Lebensstandards und Komfortansprüche der Gebäudenutzer sowie architektonische Trends (Zunahme des Anteils verglaster Fassaden) zurückzuführen ist. Gegenwärtig wird der steigende Kältebedarf im Wesentlichen durch elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen gedeckt, was zu einem Anstieg der Kohlendioxidemissionen führt. Der stark ausgeprägte tageszeitliche Verlauf der benötigten Kälteleistung führt außerdem zu einer Lastspitze in der Stromversorgung, die zu einer hohen Belastung und zu Ausfällen der Stromversorgungsnetze im Sommer führt.

Eine Alternative dazu ist die solarthermische Kälteerzeugung mit Absorptionskältemaschinen (AKM). Bei der Kälteerzeugung aus Solarwärme besteht eine hohe zeitliche Übereinstimmung von Kältebedarf und Solarangebot. In vielen Fällen könnte die sommerliche Überschusswärme von Systemen zur solaren Heizungsunterstützung zum Antrieb der AKM genutzt werden.

Bisher waren AKM nur in großen Leistungen (ab ca. 50 kW) verfügbar, wodurch eine stärkere Anwendung der solaren Kühlung behindert wird. Das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK) hat gemeinsam mit der Fa. EAW / Wegra eine Wasser/Lithiumbromid-AKM mit einer Kälteleistung von 15 kW entwickelt, die für den Antrieb mit Solarwärme bzw. BHKW-Abwärme angepasst ist (niedriges Temperaturniveau der Antriebswärme). Prototypen dieser AKM wurden in Kopplung mit Flachkollektoren und BHKW-Abwärme erfolgreich getestet.

Der weltweite Energiebedarf zur Klimatisierung ist stark steigend. Der zur Klimatisierung notwendige Kältebedarf wird derzeit im Wesentlichen durch elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen gedeckt. Die folgenden Beispiele unterstreichen diese Entwicklung:

- a) In Kalifornien beträgt der sommerliche Spitzenstrombedarf mehr als 50.000 MW. Davon werden allein 15 % durch gewerbliche Klimakälteanlagen verursacht [1].
- b) In Italien stieg die Zahl der installierten Raumklimageräte von ca. 2,2 Mio. im Jahr 1999 auf fast 7 Mio. im Jahr 2003 [2].
- c) Die 1999 veröffentlichte Studie „Energy Efficiency of Room Air-Conditioners (EERAC)“ [3] wurde im Auftrag des Generaldirektorates für Energie der EU-Kommission erarbeitet. Die

Basis bildet eine europaweite Raumklimageräte-Erhebung für das Jahr 1996. Nach Tabelle 1 wird der geschätzte Energiebedarf für den Betrieb von Raumklimageräten in den EU-Staaten von 1990 bis 2020 um mehr als das Zwanzigfache von 1.928 GWh/a auf 44.430 GWh/a ansteigen.

Tabelle 1: Entwicklung des Energiebedarfes für Raumklimageräte in den EU-Staaten

EU-Land/Jahr	1990	1996	2010	2020
Österreich	68,6	121,3	235,0	364,5
Frankreich	331,6	1.782,1	5.517,2	8.975,5
Deutschland	155,9	672,4	1.914,0	3.197,3
Griechenland	208,0	1.006,6	2.281,3	3.478,6
Italien	761,0	4.494,1	5.743,6	7.033,9
Portugal	162,4	713,8	1.806,8	2.552,2
Spanien	-	2.496,4	9.366,4	15.146,6
England	120,0	446,0	1.135,7	1.783,8
andere EU-Länd.	119,6	443,5	1.159,1	1.897,7
EU gesamt	1.927,9	12.176,2	29.159,1	44.430,2

Der Beitrag des Projektes zur Umweltentlastung besteht in der Reduzierung des Strombedarfs zur Klimakälteerzeugung mittels Kompressionskältemaschinen. Elektrischer Strom wird durch Solarwärme bzw. Abwärme von BHKW ersetzt. Das Gesamtsystem der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) erreicht eine sehr gute Ausnutzung der Primärenergie. Daraus ergibt sich eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des damit verbundenen anthropogenen Treibhauseffekts.

In den bisher den Markt dominierenden Kompressionskältemaschinen werden Kältemittel mit hohem Treibhauspotential (GWP) eingesetzt. In der Kleinabsorptionskältemaschine wird hingegen das natürliche Kältemittel Wasser verwendet, das kein Treibhauspotential besitzt. Dies trägt neben den umweltfreundlichen Antriebsenergien zusätzlich zur Minimierung des Einflusses von Klimageräten auf den Treibhauseffekt bei.

Das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden hat gemeinsam mit der Fa. EAW/Wegra eine Wasser/Lithiumbromid-AKM mit einer Kälteleistung von 15 kW entwickelt, die für den Antrieb mit So-

larwärme bzw. BHKW-Abwärme angepasst ist (niedriges Temperaturniveau der Antriebswärme). Prototypen dieser AKM wurden in Kopplung mit Flachkollektoren und BHKW-Abwärme erfolgreich getestet, die Funktionsfähigkeit nachgewiesen.

Ziel des Projektes war es, die Markteinführung einer neuen Technologie im Bereich der Klimatechnik für kleine und mittlere Leistungen durch eine messtechnische Begleitung des Ersteinsatzes der Kleinabsorptionskältemaschine (KAKM) zu unterstützen und deren Leistungsfähigkeit im Praxis-einsatz nachzuweisen. Dazu sollten drei, bezüglich Wärmequelle und Rückkühlung verschiedenartige Systeme, über einen Zeitraum von 2 Jahren (Kühlperioden) begleitet werden. Der Einsatz folgender Wärmequellen war vorgesehen: Flachkollektoren, Abwärme eines motorischen BHKW, ggf. Vakuumröhrenkollektoren. Zur Rückkühlung sollen marktverfügbare offene Nasskühlwerke sowie trockene Rückkühlwerke eingesetzt werden.

Die im Rahmen dieses Projektes installierten Anlagen wurden messtechnisch so ausgerüstet, dass Aussagen über die erzeugten Kältemengen, über die vom BHKW bzw. der Solarthermieanlage bezogenen Wärmemengen, Temperaturniveaus der Wärmen, Stromverbrauch des Rückkühlers usw. getroffen werden können. Nach Ende der Kühlsaison wurden die Ergebnisse anlagenbezogen ausgewertet und entsprechend publiziert. Gleichzeitig dienen die zu errichtenden Systeme als Referenzanlagen, um die Bekanntheit der Absorptionskältetechnik zu steigern und die Vorteile der thermischen Kälteerzeugung zu demonstrieren. Zielgruppen des Projektes sind Planer, Installateure und Hersteller der Gebäude-, Klima-, Kälte- und Solartechnik sowie potentielle gewerbliche Nutzer aus vielen Bereichen, z.B. Landwirtschaft, Tourismus, Industrie. Die intensive messtechnische Betreuung der Demonstrationsanlagen bot zudem die Möglichkeit, im Vorfeld entwickelte Regelungskonzepte zum effizienten Betrieb derartiger Systeme umzusetzen, zu bewerten und weiter zu verbessern.

Die KAKM kann unter sehr variablen Bedingungen (z.B. unterschiedliche Antriebstemperaturen entsprechend der Kollektortechnologie) eingesetzt werden. Bisher fehlen jedoch Messwerte und Erfahrungen, wie sich „extreme“ externe Bedingungen auf die Leistung und das Wärmeverhältnis der AKM auswirken. Der zweite Schwerpunkt des Projekts war daher die detaillierte Vermessung der KAKM innerhalb eines geeigneten Versuchsstands. Derartige Messwerte sind Voraussetzung zur Aufnahme der KAKM in Auslegungstools zur solaren Kälteerzeugung, z.B. Design Tool der IEA Task 25 oder TRNSYS, wodurch der vermehrte Einsatz der KAKM gefördert wird.

Zur intensiven Vermessung wurde im Rahmen des Projektes im ILK ein geeigneter Versuchsstand aufgebaut, mit dem die benötigten Parameter der externen Medien eingestellt werden können. Dazu wurde die am ILK vorhandene Infrastruktur (wie Kalt- und Warmwassernetz) sowie Ausrüstungen (Messtechnik) genutzt.

Folgendes Messprogramm wurde durchgeführt:

- Temperaturvariation der drei äußeren Medien
- Volumenstromvariation der äußeren Medien
- Variation des Lösungsvolumenstroms

Dabei sollten jeweils die Auswirkungen auf die Kälteleistung und das Wärmeverhältnis bewertet und Aussagen zu Möglichkeiten der Leistungsregelung getroffen werden. Im Ergebnis dieser Messungen können außerdem Aussagen zur Realisierbarkeit besonderer Anwendungsfälle getroffen werden, z.B. Möglichkeit des Erreichens tiefer Verdampfungstemperaturen oder Anheben der Rückkühltemperatur auf ein nutzbares Temperaturniveau (WW-Vorwärmung) durch höhere Heiztemperaturen. Die ermittelten Daten können gleichzeitig zur Erstellung detaillierter Planungsunterlagen für Kunden bzw. zur Integration der Klein-AKM in entsprechende Auslegungsprogramme (z.B. TRNSYS, Tsol oder Auslegungstool der Task 25) genutzt werden und somit zu einer stärkeren Verbreitung des Kleinabsorbers beitragen.

### 3 Hauptteil

#### 3.1 Erstellung eines Leistungskennfeldes der Kleinabsorptionskältemaschine

Innerhalb des ersten Projektschwerpunktes wurde ein detailliertes Leistungskennfeld der KAKM für weite Bereiche externer Temperaturen aufgenommen. Dazu wurde ein geeigneter Versuchsstand aufgebaut, der in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist. Auf dem Versuchsstand können die externen Medien der Absorptionskältemaschine (Heiz-, Kalt- und Kühlwasser) hinsichtlich Temperatur und Volumenstrom variiert werden. In allen drei Kreisläufen werden der Volumenstrom sowie die Ein- und Austrittstemperaturen direkt an den entsprechenden Stutzen gemessen. Die Heizwärme wird durch elektrische Heizer bereitgestellt. Kalt- und Kühlwasser werden in einem Mischbehälter zusammengeführt. Dieser Mischbehälter wird über das Kaltwassernetz des ILK gekühlt. Sämtliche Sensoren sind an einen Datenlogger angeschlossen. Dieser ist mit einem PC verbunden, auf dem die Messwerte adaptiv mit einer minimalen zeitlichen Auflösung von einer Sekunde gespeichert werden.

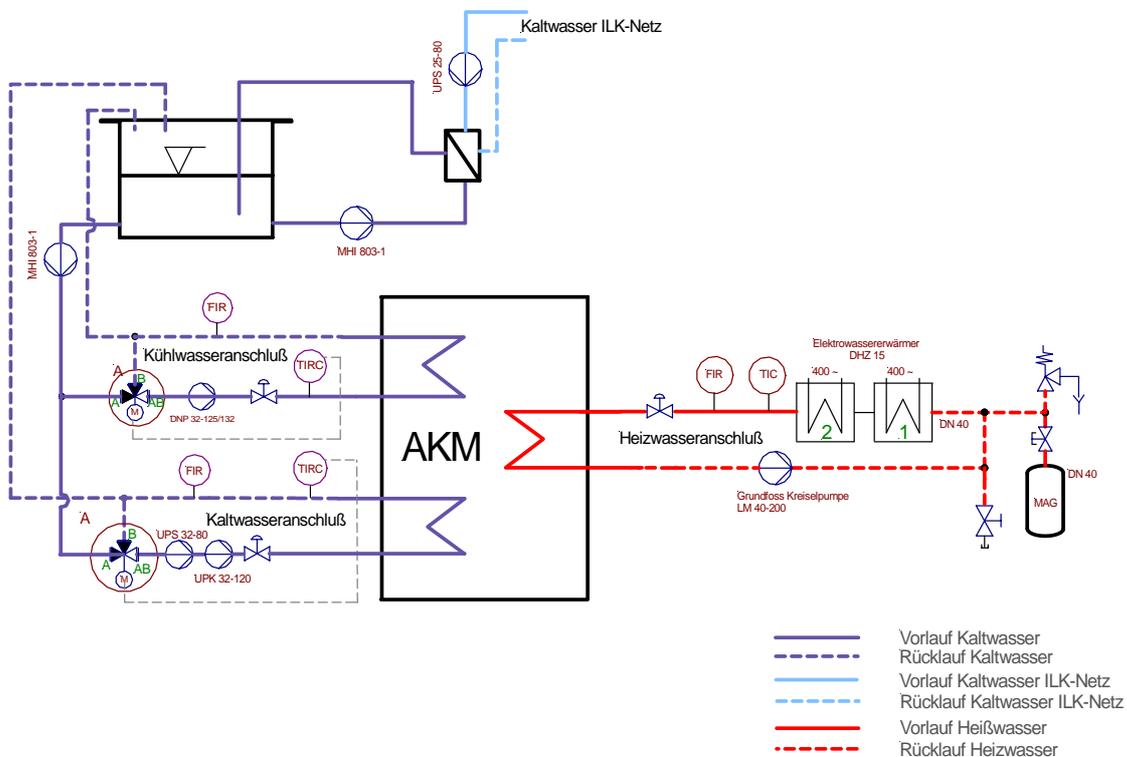


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes zur Vermessung der Kleinabsorptionskältemaschine WEGRACAL SE 15

Mit den Messungen wurde das stationäre Verhalten der Anlage abgebildet. Die Anlage wurde täglich vor Betriebsbeginn evakuiert. Nach Anfahren eines neuen Messpunktes wurde ein stationärer Betrieb der Anlage abgewartet (mindestens 30 min). Dann wurde die eigentliche Messung gestartet. Der Messzeitraum betrug für jeden Messpunkt mindestens 15 min. Wenn innerhalb dieses Zeitraumes eine wesentliche Änderung einer Temperatur festgestellt wurde, wurde die Messung verworfen und wiederholt. Für die Auswertung wurden dann Mittelwerte der Temperaturen, Volumenströme und Leistungen gebildet.

In Abbildung 17 bis Abbildung 21 im Anhang sind die Ergebnisse aller Messungen nach Kühlwassertemperaturen geordnet für die Nennvolumenströme der KAKM dargestellt. Neben der Kälteleistung ( $\dot{Q}_0$ ) werden das Wärmeverhältnis (zetta) und die aufgenommene Heizleistung ( $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ ) gezeigt.

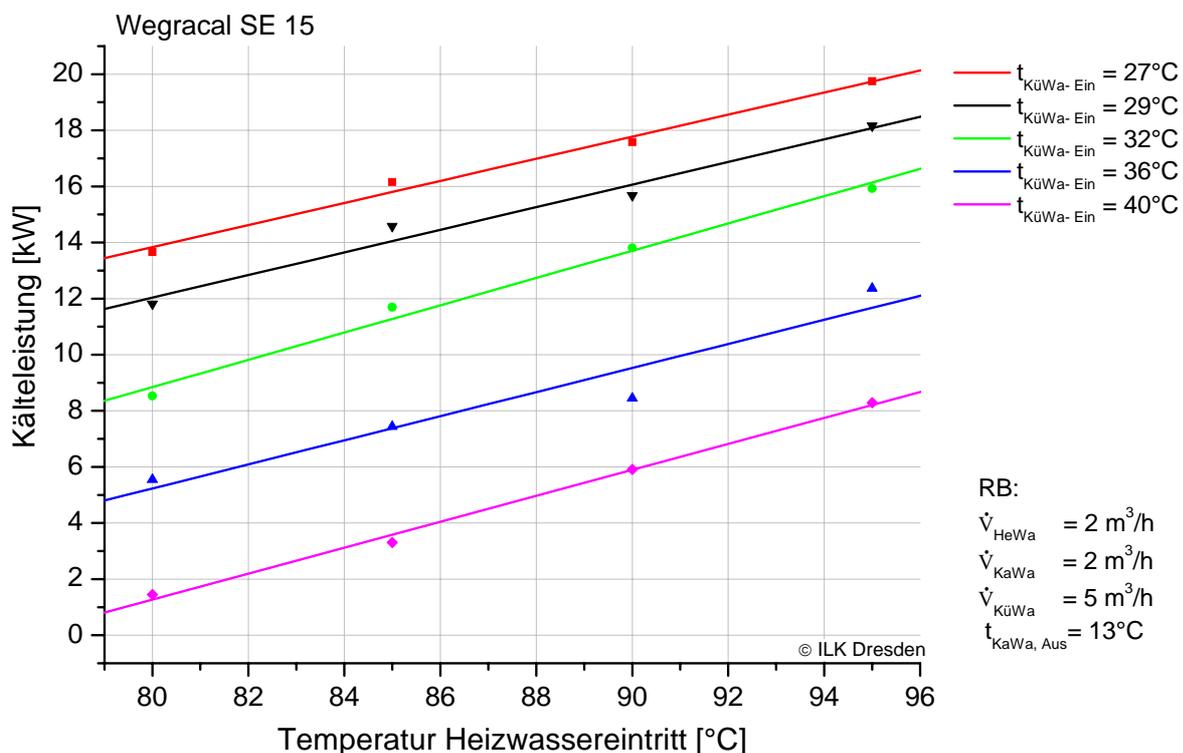


Abbildung 2: Kälteleistung der KAKM in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur für verschiedene Kühlwassertemperaturen

Abbildung 2 zeigt beispielhaft die Kälteleistung der KAKM als Funktion der Heizwassertemperatur für verschiedene Kühlwassertemperaturen für eine feste Kaltwasseraustrittstemperatur von  $13^\circ\text{C}$ . Der starke Einfluss der externen Temperaturen auf die Kälteleistung wird deutlich. Ebenfalls wird deutlich, dass die Kühlwassertemperatur einen größeren Einfluss auf die Anlagenleistung als die

Heizwassertemperatur hat. Wird beispielsweise ausgehend von 14 kW Kälteleistung bei 80°C Heizwasser- und 27°C Kühlwassertemperatur die Kühlwassertemperatur um 5 K auf 32°C erhöht, muss die Heizwassertemperatur um 10 K auf 90°C gesteigert werden, um die gleiche Kälteleistung von 14 kW zu erzielen. Dieser Umstand erschwert die Nutzung der Absorptionskältetechnik zur solaren Kühlung mit trockenen Rückkühlwerken. Trockene Rückkühler erreichen bei gleichen Außenluftbedingungen nur deutlich höhere Kühlwassertemperaturen wodurch letztendlich höhere Antriebstemperaturen durch die Solarkollektoren bereitgestellt werden müssen.

Bei der Nutzung anderer Wärmequellen, wie BHKW oder Fernwärme, ergeben sich in diesem Zusammenhang zusätzliche Probleme, da das Temperaturniveau der Wärme hier grundsätzlichen Beschränkungen unterliegt. Die meisten BHKW stellen Wärme auf einem Temperaturniveau von 86 / 71°C bereit. Für einen störungsfreien Betrieb des BHKW und eine vollständige Nutzung der Abwärme (Verzicht auf Betrieb des Notkühlers) muss die Kältemaschine in der Lage sein, den Heizwasserstrom auf das erforderliche Rücklauf temperaturniveau (71°C) auszukühlen. Dies kann durch eine Verringerung des Heizwasservolumenstroms erreicht werden. Dazu wurden Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse beispielhaft in Abbildung 3 dargestellt sind. Umfangreichere Messergebnisse sind im Anhang in Abbildung 22 und Abbildung 23 enthalten.

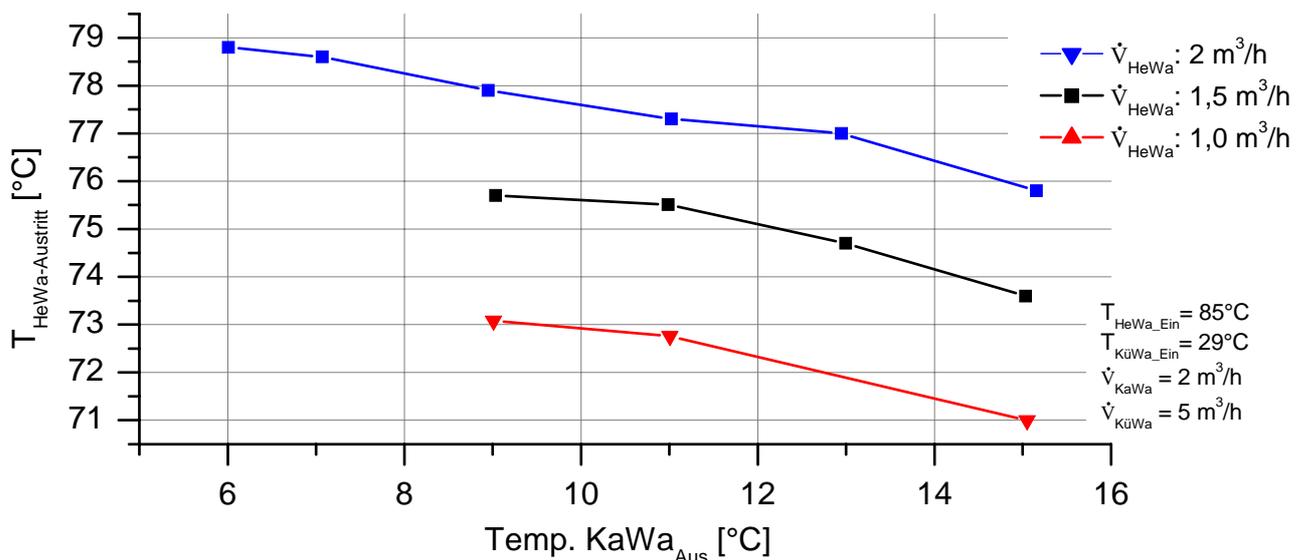


Abbildung 3: Heizwasseraustrittstemperatur in Abhängigkeit der Kaltwassertemperatur bei Verringerung des Heizwasservolumenstroms

Durch die Reduktion des Heizwasservolumenstroms kann die Auskühlung des Heizmediums deutlich erhöht und somit die Rücklaufemperatur gesenkt werden. Die Verringerung des Heizwasservolumenstroms ist allerdings mit einem Rückgang der Kälteleistung verbunden, die bei der Planung des Gesamtsystems berücksichtigt werden muss. Trotzdem kann mit dieser Maßnahme eine vollständige Nutzung der BHKW-Wärme erreicht und der Gesamtnutzungsgrad eines KWKK-Systems gesteigert werden.

## **3.2 Wissenschaftliche Begleitung von drei Demonstrationsanlagen**

### **3.2.1 Übersicht**

Ziel dieses Vorhabens war die Untersuchung der Leistungsfähigkeit der neu entwickelten Kleinabsorptionskältemaschine unter den verschiedenen Randbedingungen unterschiedlicher Gesamtsysteme. Entsprechend dieser Zielstellung konnten drei Standorte gefunden werden, welche typische Einsatzfälle für diese Anlage darstellen. Wesentlicher Unterschied ist die zum Antrieb der KAKM verwendete Wärmequelle. Es kamen Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren sowie ein BHKW zum Einsatz. Zur Rückkühlung der Maschine wurden Verdunstungskühler sowie ein Trockenkühler verwendet. Die Übergabe der erzeugten Klimakälte an die Räume erfolgte in zwei Fällen mittels Gebläsekonvektoren und bei einem System mittels Fußbodenkühlung. Im folgenden Abschnitt wird der Aufbau der Systeme detailliert beschrieben.

### **3.2.2 Aufbau der Demonstrationsanlagen**

#### **3.2.2.1 Hamburg**

Im Autohaus Roßbach wurde eine KWKK-Anlage installiert, die Strom, Wärme zur Heizung und Warmwasserbereitung sowie Klimakälte zur Sicherstellung angenehmer Raumtemperaturen im Präsentationsraum (Abbildung 4) erzeugt. Als Primärenergieträger dient Erdgas. Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Systems. Das BHKW speist einen Wärmepufferspeicher, an dem zwei separate Heizkreisverteiler angeschlossen sind, die unterschiedliche Gebäudeteile versorgen. Die Heizwärmeversorgung der KAKM erfolgt über einen der beiden Heizkreisverteiler. Am gleichen Verteiler ist auch die Fußbodenheizung des Verkauftraumes angebunden. Dieser Strang verfügt zusätzlich über eine Umschalteneinheit, über die im Sommer eine Einbindung des Kaltwasserspeichers sowie die Einstellung der Vorlauftemperaturen im Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt.



Abbildung 4: Präsentationsraum des Autohauses Roßbach während der Bauphase und nach Fertigstellung

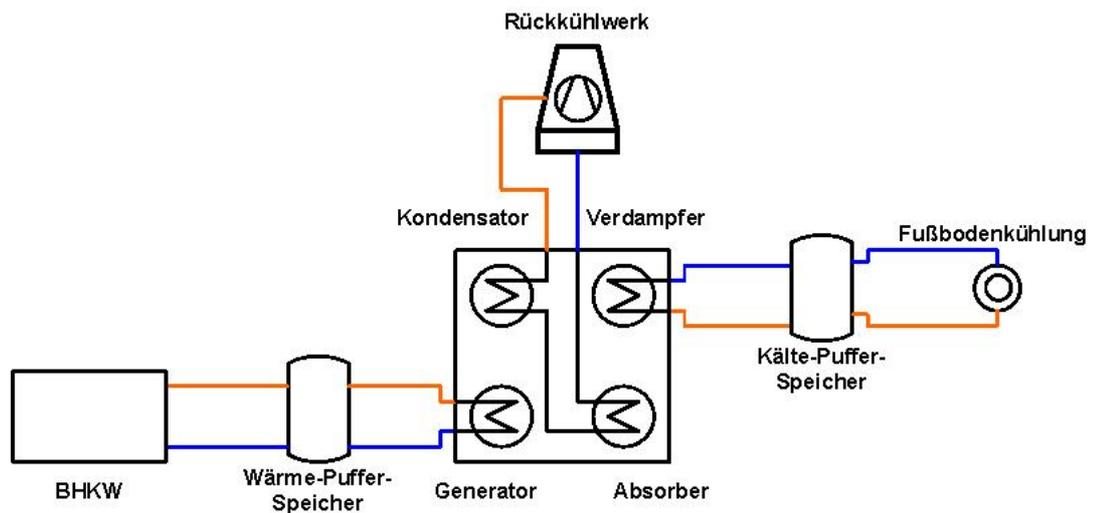


Abbildung 5: Vereinfachte schematische Darstellung der Anlagenkonfiguration zur Klimakälteerzeugung im Autohaus Roßbach in Hamburg [4]

Zur Strom- und Wärmeerzeugung wird das leistungsmodulierende BHKW *Powertherm* der Fa. *Spilling Energie Systeme* mit Synchrongenerator eingesetzt. Die elektrische Leistung beträgt 7...20 kW, die thermische Leistung 12...38 kW. Das BHKW wird wärmegeführt betrieben. Die maximale Vorlauftemperatur beträgt nach Herstellerangaben 95°C, die maximale Rücklauftemperatur 85°C. Zur Rückkühlung wird ein Verdunstungskühler, Typ: *EWK 36/06* der Fa. *Axima*, mit einem max. elektrischen Leistungsbedarf von 0,33 kW eingesetzt.

Zur Vermessung der KAKM innerhalb des Gesamtsystems wurde ein Messwerterfassungssystem mit Datenlogger und PC aufgebaut, dass über ein Modem ausgelesen werden kann. Folgende Größen werden gemessen:

#### BHKW

- Temperaturen Heizwasser (Ein- und Austritt)
- elektrische Leistung

#### KAKM

- Temperaturen Heizwasser, Kühlwasser, Kaltwasser (jeweils Ein- und Austritt)
- Volumenströme Heizwasser und Kaltwasser

#### Fußbodenheizung/-kühlung

- Temperaturen Vor- und Rücklauf

### 3.2.2.2 Moosburg

Bei der Fa. *Citrin Solar* in Moosburg wurde ein System zur solaren Klimakälteerzeugung errichtet (Abbildung 6). Am und auf dem Firmengebäude sind 89 m<sup>2</sup> Flachkollektoren für die solare Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung installiert (Abbildung 7). Der Wärmeertrag eines Teils der Kollektorfläche (42 m<sup>2</sup>) wird zur solaren Kälteerzeugung genutzt. Als CO<sub>2</sub>-neutrale Ersatzwärmequelle steht ein Holzpelletkessel mit einer thermischen Leistung von 27 kW zur Verfügung. In das System sind außerdem mehrere Wärmespeicher und ein Kaltwasserpuffer (800 l) integriert. Das erzeugte Kaltwasser wird zur Klimatisierung von Büros und eines Schulungsraumes mit Hilfe von Gebläsekonvektoren genutzt.

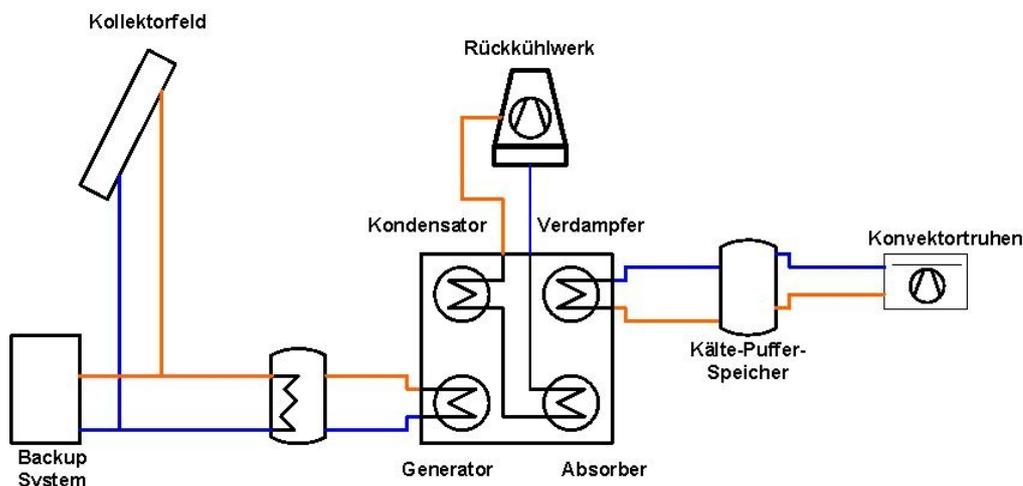


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Konfiguration des solaren Kühlsystems in Moosburg [4]



Abbildung 7: Kollektorfeld bei der Fa. Citrin Solar in Moosburg, Bayern



Abbildung 8: links – KAKM im Schulungsraum der Fa. Citrin Solar  
rechts – offener Verdunstungskühler zur Rückkühlung

Zur Datenerfassung wurde ein Messwerterfassungssystem bestehend aus einem Datenlogger mit internem Speicher und Modem zur Fernabfrage installiert. Folgende Größen werden gemessen:

#### KAKM

- Temperaturen Heizwasser, Kühlwasser, Kaltwasser (jeweils Ein- und Austritt)
- Volumenströme Heizwasser und Kaltwasser

### 3.2.2.3 Dresden

Am ILK Dresden wurde ein System zur solaren Kälteerzeugung mit einem geschlossenen, trockenem Rückkühlwerk und Vakuumröhrenkollektoren installiert, um auch mit einer Konfiguration ohne Verdunstungskühler Betriebserfahrungen zu sammeln. In einigen Anwendungen kann ein Verdunstungskühler wegen der damit verbundenen Anforderungen wie Wasserverbrauch oder Wartungsaufwand nicht genutzt werden. Ein trockener Rückkühler kann bei gleichen Außenluftbedingungen nur deutlich höhere Kühlwassertemperaturen bereitstellen und hat einen höheren elektrischen Leistungsbedarf. Um die KAKM trotz höherer Kühlwassertemperaturen betreiben zu können, werden zur solaren Wärmeenerzeugung Vakuumröhrenkollektoren eingesetzt, die insbesondere bei hohen Arbeitstemperaturen einen höheren Wirkungsgrad als Flachkollektoren aufweisen (vgl. Abbildung 9).

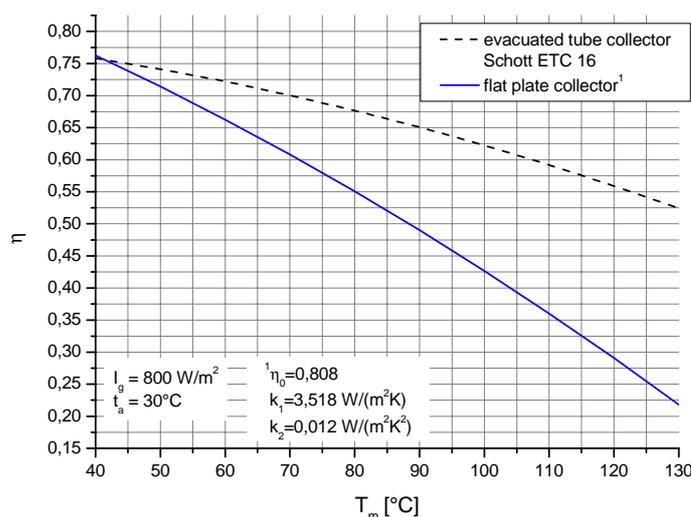


Abbildung 9: Vergleich des Wirkungsgradverlaufs für einen typischen Flachkollektor und des in der Dresdner Anlage eingesetzten Vakuumröhrenkollektors

Der Aufbau der Anlage ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt. Die Klimakälte wird zur Kühlung der ILK-Versuchshalle mittels Gebläsekonvektor genutzt. Die Halle bietet aufgrund ihrer Größe eine ausreichende Last, so dass auf eine Speicherung auf der Kaltwasserseite verzichtet werden konnte. Die Dimensionierung des Kollektorfeldes erfolgte mit der Zielstellung, auch auf der Heizseite auf einen Speicher zu verzichten. Es wurden 56 Kollektoren des Typs *ETC 16*, Fa. *Schott* installiert, was eine Gesamtapertur von  $45 \text{ m}^2$  ergibt (Abbildung 11).

Der die Kollektoren durchströmende Wärmeträger wird direkt zur Beheizung des Generators der KAKM genutzt. Eine hydraulische Weiche ermöglicht die Einstellung der Vorlauftemperatur zum Generator. Im Winter wird die solar erzeugte Wärme über einen Wärmeübertrager im Kollektor-



analysiert und die Auswirkungen von Parameteränderungen direkt beobachtet werden. Das System dient zudem der Visualisierung sowohl lokal als auch über das Internet.



Abbildung 11: links – Kollektorfeld und Rückkühler der solaren Kälteanlage Dresden  
rechts – KAKM in Dresden während der Inbetriebnahme

### 3.2.3 Projektverlauf und Ergebnisse

#### 3.2.3.1 Hamburg

Die Installation der KWKK Anlage in Hamburg wurde von den beteiligten Firmen im Herbst 2005 abgeschlossen. In der Kühlsaison 2006 konnte die Anlage erstmals betrieben werden. Während der Inbetriebnahmephase mussten einige hydraulische und regelungstechnische Unzulänglichkeiten behoben werden, bevor das System Mitte Juli den Regelbetrieb aufnehmen konnte.

Die KAKM wurde im Zeitraum vom 17.7.06 bis 4.9.06 an insgesamt 897 von 1176 Stunden betrieben (76%) und erreichte damit eine sehr gute Auslastung. Dafür gab es zwei wesentliche Ursachen: die kontinuierliche Verfügbarkeit von Antriebswärme aus dem Betrieb des BHKW und die relativ niedrige Kälteleistung der Anlage. Die Abschalt-/Zieltemperatur im Kaltwasserspeicher wurde im Normalbetrieb nie erreicht, da die Kühllast stets größer war als die Kälteleistung der KAKM. Abbildung 12 zeigt einen typischen Tagesgang der Temperaturen und Leistungen dieser Anlage. Die Heizwassertemperatur erreichte maximal 70°C. Dies liegt nur geringfügig über der eingestellten minimal erforderlichen Heiztemperatur und deutlich unter der Nennantriebstemperatur von

85°C. Die Fußbodenkühlung arbeitet mit einer relativ hohen (Kaltwasser-)Vorlauftemperatur (Mittelwert am 3.8.06: 17,4°C). Dies wirkt sich positiv auf die Betriebsbedingungen der KAKM aus, so dass die Kälteanlage trotz der niedrigen Antriebstemperatur und einer durchschnittlichen Kühlwassertemperatur von 29,5°C noch eine mittlere Kälteleistung von 7,8 kW, also ca. 50% der Nennleistung erreicht.

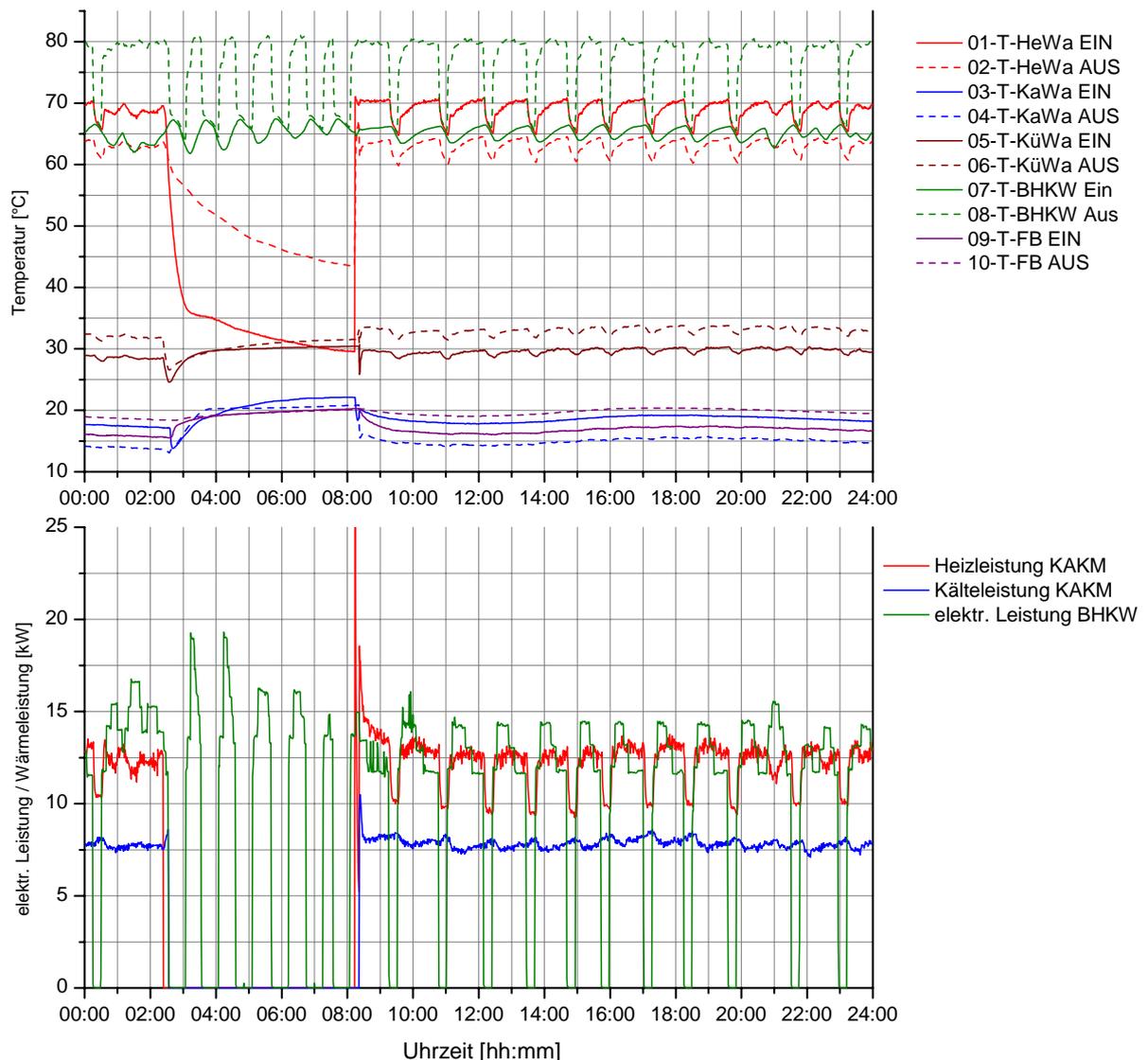


Abbildung 12: Tagesgang der Temperaturen und Leistungen der KWKK-Anlage Hamburg (3.8.2006)

Die niedrige Heizwassertemperatur der KAKM führt zu einem ungünstigen Betriebsverhalten des Gesamtsystems. Wegen der zu geringen Kälteleistung kann der Kaltwasserspeicher nicht beladen werden, um Schwankungen im Kältebedarf auszugleichen. Wie in Abbildung 12 zu erkennen,

kommt es trotz der leistungsmodulierenden Betriebsweise zu einem regelmäßigen Takten des BHKW. Die Wärmeleistung des BHKW bei der kleinsten elektrischen Leistung ist größer als der durchschnittliche Wärmebedarf der KAKM und der weiteren Verbraucher<sup>1</sup>. Würde die KAKM mit einer höheren Heizwassertemperatur betrieben, wäre auch deren Wärmeaufnahme größer. Das BHKW könnte dann im Dauerbetrieb oder zumindest in längeren Intervallen betrieben werden. Weiterhin ist anzunehmen, dass die erzeugte Kälteleistung nicht zur vollständigen Deckung der Kühllast ausreichte. Es können allerdings keine detaillierten Aussagen zum tatsächlichen Kältebedarf bzw. zur Sicherstellung komfortabler Raumtemperaturen getroffen werden, da keine diesbezüglichen Messungen durchgeführt wurden. Während der Kühlsaison 2006 wurden jedoch keine Beschwerden der Nutzer bekannt. Schließlich führt ein Betrieb der KAKM bei Teillast zu einem höheren anteiligen Hilfsenergiebedarf (interne und externe Pumpen, Ventilator des Rückkühlers) als im Nennbetrieb.

Es gibt zwei Ursachen für die zu geringe Heizmedientemperatur. Wie in Abbildung 12 zu erkennen, liegt die Austrittstemperatur des Heizwassers aus dem BHKW ca. 10 K über der Temperatur des Heizwassers, das über den Wärmepufferspeicher und den Heizkreisverteiler der KAKM zur Verfügung gestellt wird. Dies ist offenbar auf eine Störung der Temperaturschichtung im Wärmepufferspeicher zwischen dem BHKW und den verschiedenen Wärmeverbrauchern zurückzuführen. Die genaue Ursache konnte aufgrund des komplexen Systemaufbaus vom Heizungsbauer bisher nicht ermittelt und abgestellt werden, so dass dieses Problem weiterhin besteht. Die zweite Ursache liegt in der niedrigen Austrittstemperatur aus dem BHKW. Laut Herstellerangaben kann das BHKW Temperaturen bis 95°C erzeugen. Diese Angaben konnten in der Inbetriebnahmephase auch bestätigt werden. Als problematisch stellte sich aber eine bauseits installierte Regelstrecke zur Einstellung der VL-Temperatur zum BHKW heraus. Die verwendete Kombination aus Drei-Wege-Ventil und Regler ist nicht geeignet, die Vorlauftemperatur zum BHKW schnell und sicher auf den Zielwert einzustellen. Dies führte immer wieder zum Abschalten des BHKW während der Anlaufphase, da die zulässige Maximaltemperatur überschritten und der Überhitzungsschutz ausgelöst wurden. Um einen regulären Betrieb des BHKW überhaupt zu ermöglichen, musste die Soll-Vorlauftemperatur zum BHKW entsprechend abgesenkt werden. Somit konnte das Temperaturpotenzial des BHKW bisher nicht ausgeschöpft werden.

---

<sup>1</sup> Bei der Vermessung in der Kühlsaison 2006 erfolgte die Abschaltung des BHKW bereits bei einer minimalen elektrischen Leistung von ca. 10 kW. Laut Datenblatt wäre ein Betrieb bis 7 kW möglich, was auch zu einer entsprechend geringeren Wärmeleistung führen würde.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Betriebsdaten der Hamburger Anlage enthält Tabelle 2.

Tabelle 2: Betriebsdaten der KWKK-Anlage in Hamburg für die Kühlsaison 2006

Monat	Laufzeit [hh:mm]	$Q_H$ [kWh]	$Q_0$ [kWh]	$\bar{Q}_H$ [kW]	$\bar{Q}_0$ [kW]	$\zeta$	$t_{\text{HeWa, Ein}} / t_{\text{HeWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KaWa, Ein}} / t_{\text{KaWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KüWa, Ein}} / t_{\text{KüWa, Aus}}$ [°C]
Juli	328:54	3849	2510	11,7	7,6	0,65	69,1 / 63,7	21,5 / 17,9	31,6 / 34,9
August	493:03	5564	3426	11,3	6,9	0,62	69,8 / 63,3	18,0 / 14,7	28,8 / 32,0
Sept.	74:53	793	476	10,6	6,4	0,60	69,0 / 63,8	16,0 / 13,3	27,8 / 30,5

Insgesamt können die Ergebnisse der KWKK-Anlage im Autohaus Roßbach positiv bewertet werden. Die KAKM lief während der gesamten Kühlsaison 2006 ohne Störung. Trotz ungünstiger Betriebsbedingungen (niedrige Heizwassertemperatur) wurde eine akzeptable Kälteleistung erreicht. Während der Inbetriebnahmephase aufgetretene Probleme sind auf periphere Komponenten sowie auf die mangelnde Erfahrung der Ausführenden mit dieser im kleinen Leistungsbereich neuen Technologie der Kälteerzeugung zurückzuführen. Die Kombination aus BHKW, Absorptionskältemaschine, Verdunstungskühler und Fußbodenkühlung hat sich bewährt. Die Fußbodenkühlung als eine Form der thermischen Bauteilaktivierung konnte aufgrund ihrer Speicherwirksamkeit die für die Abdeckung der Spitzenkühlleistung zu geringe Kälteleistung der KAKM (teilweise) kompensieren.

Gleichzeitig weist die Gesamtanlage ein beachtliches Optimierungspotenzial auf. Dies betrifft insbesondere die Lösung der hydraulischen und regelungstechnischen Probleme, um eine Erhöhung der Heizwassertemperatur der KAKM zu erreichen. Dadurch könnten die Kälteleistung und die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert werden. Bei der Umsetzung weiterer Anlagen, die ein derartiges BHKW (Heizwassertemperatur bis 95°C) als Wärmequelle verwenden und bei denen die Kühlung über ein „Flächensystem“ mit hohen Vorlauftemperaturen erfolgt (Fußboden, Wand, Kühldecken etc.), ist unter den deutschen oder vergleichbaren Klimabedingungen auch die Nutzung eines trockenen Rückkühlers möglich. Ein solches System hätte einen geringeren Wartungsaufwand, da keine Verschmutzung des Kühlwassers auftritt. Bei Befüllung mit einem Frostschutzmittel entfällt außerdem die jährliche Entleerung und Wiederbefüllung des Rückkühlkreislaufs. Zudem entsteht kein Wasserbedarf. Bei einer Außenlufttemperatur von 30°C könnte ein trockenes Rückkühlwerk eine Kühlwassertemperatur von 36°C mit vertretbarem Strombedarf für die Ventilatoren bereitstellen. Bei einer Heizwassertemperatur von 95°C und einer Kaltwasseraustrittstemperatur

von 15°C erzeugt die KAKM dann eine Kälteleistung von ca. 14 kW (vgl. Abbildung 20), also rund 94 % der Nennleistung. Die Investitionskosten wären ähnlich. Der Trockenkühler ist zwar etwas teurer, dafür entfallen die Kosten für die Absalz- bzw. die Wasseraufbereitungsanlage.

### 3.2.3.2 Moosburg

Die Anlage zur solaren Kühlung in Moosburg nahm am 27.6.2005 den Probebetrieb auf. Der Regelbetrieb in der Kühlsaison 2005 begann am 5.7.2005 und endete am 5.9.2005. Die Ergebnisse der Betriebstage mit signifikanten Laufzeiten der KAKM enthält Tabelle 3. Insgesamt wurde die Anlage in der Kühlsaison 2005 ca. 80 h betrieben.

Tabelle 3: Ausgewählte Betriebsdaten der Anlage in Moosburg für die Kühlsaison 2005

Monat	Laufzeit [hh:mm]	$Q_H$ [kWh]	$Q_0$ [kWh]	$\bar{Q}_H$ [kW]	$\bar{Q}_0$ [kW]	$\zeta$	$t_{HeWa, Ein} / t_{HeWa, Aus}$ [°C]	$t_{KaWa, Ein} / t_{KaWa, Aus}$ [°C]	$t_{KüWa, Ein} / t_{KüWa, Aus}$ [°C]
06.07.05	2:11	23,20	37,93	17,47	10,15	0,60	77,1 / 66,8	13,0 / 7,8	24,1 / 28,3
13.07.05	2:48	26,67	51,87	18,35	9,58	0,51	78,9 / 69,0	13,8 / 8,9	25,8 / 30,1
14.07.05	1:42	15,30	28,90	16,96	9,10	0,53	79,2 / 70,0	12,1 / 7,4	26,1 / 30,1
15.07.05	1:18	9,55	18,88	18,88	9,55	0,53	83,5 / 73,1	12,9 / 8,0	27,1 / 31,5
16.07.05	3:12	29,73	47,47	13,95	9,68	0,70	73,8 / 66,1	15,4 / 10,4	26,6 / 30,7
17.07.05	4:24	32,55	59,53	14,61	8,34	0,56	76,0 / 67,3	14,0 / 9,1	26,4 / 30,1
18.07.05	5:09	46,35	80,83	15,28	9,41	0,58	76,2 / 68,0	13,1 / 8,3	26,7 / 30,5
20.07.05	1:06	13,20	19,80	17,98	11,93	0,67	76,2 / 65,8	16,4 / 10,3	25,0 / 29,8
22.07.05	1:24	13,13	25,53	18,13	9,71	0,53	73,6 / 62,3	15,9 / 10,9	24,5 / 28,8
27.07.05	4:33	36,40	77,35	17,20	8,19	0,47	75,1 / 65,8	15,0 / 10,7	27,2 / 31,3
28.07.05	6:06	39,47	82,17	13,73	6,84	0,50	74,4 / 67,0	13,0 / 9,3	27,4 / 30,9
29.07.05	6:05	27,92	59,42	9,71	4,47	0,48	65,4 / 60,1	13,2 / 10,9	26,5 / 29,7
01.08.05	6:07	51,42	100,35	16,43	8,28	0,51	73,9 / 65,0	12,4 / 8,1	25,0 / 29,3
02.08.05	3:33	23,27	40,80	13,73	7,22	0,56	66,0 / 58,2	14,9 / 11,0	24,8 / 28,4
11.08.05	4:18	17,20	47,30	10,99	4,30	0,36	66,7 / 60,7	18,0 / 16,2	24,0 / 31,1
12.08.05	2:17	15,47	36,38	16,51	7,07	0,42	71,7 / 62,9	10,8 / 6,9	24,2 / 28,2

Ein typischer Tagesgang der Anlage ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Kältemaschine nimmt um 10:25 Uhr den Betrieb auf. Da vom Betrieb am Vortag noch freies Kältemittel im Verdampfer vorliegt, wird bereits nach wenigen Minuten Kälteleistung bereitgestellt. Vom Speicher der Solaranlage wird bei Betriebsbeginn ca. 70°C warmes Wasser zur Verfügung gestellt. Die Antriebstemperatur steigt im weiteren Verlauf an. Gleichzeitig sinkt die Kaltwasseraustrittstemperatur, so dass die KAKM eine gleich bleibende Kälteleistung von ca. 10 kW bereitstellt. Gegen 12:15 Uhr kommt es wahrscheinlich aufgrund eines durchziehenden Wolkenfeldes zu einem vorübergehendem Abfall der Heizwassertemperatur, bis nach ca. 35 min wieder der Ausgangswert erreicht wird. Dieser kurzzeitige Einbruch führt nicht zu einem erkennbaren Abfall der Kälteleistung. Die KAKM wirkt als zusätzlicher Puffer im Gesamtsystem und kann kurzzeitige Strahlungsschwankungen ausgleichen. Aufgrund einer zu geringen Kälteabnahme sinkt die Kaltwassertemperatur stetig, bis ca. 13:50 Uhr die Abschalttemperatur im Kaltwasserspeicher erreicht wird. Während des zehninütigen Nachlaufs der KAKM wird ohne Heizwärmezufuhr noch eine Kälteleistung erzeugt. Zwischen 14:03 Uhr und 15:15 Uhr wurde der gesamte Kältebedarf vom Kaltwasserspeicher gedeckt. Nach dem die Einschalttemperatur im Kaltwasserspeicher wieder überschritten wurde, geht die KAKM um 15:15 Uhr erneut bis 16:49 Uhr in Betrieb. Im oberen Teil von Abbildung 13 ist das momentane Wärmeverhältnis der KAKM dargestellt. Die Auswirkungen der Änderungen der externen Temperaturen sind deutlich erkennbar.

Während des gesamten Tages wurden 46 kWh Kälte mit einem Heizenergieeinsatz von 77 kWh erzeugt. Dies entspricht einem mittleren Wärmeverhältnis von 0,6. Ursachen für die Minderung gegenüber dem nominalen Wärmeverhältnis von 0,75 sind der Teillastbetrieb, die Taktung und die überwiegend niedrige Kaltwassertemperatur. Die Mittelwerte für die Temperaturen der externen Medien sowie der Leistungen sind in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Mittlere externe Temperaturen und Leistungen der WEGRACAL SE 15 für einen Betriebstag (18.7.05)

	Heizwasser	Kaltwasser	Kühlwasser	Leistungen
Eintrittstemperatur	75,8 °C	13,4 °C	26,7°C	$Q_H = 16,3 \text{ kW}$
Austrittstemperatur	67,5 °C	8,5 °C	30,7 °C	$Q_0 = 9,7 \text{ kW}$

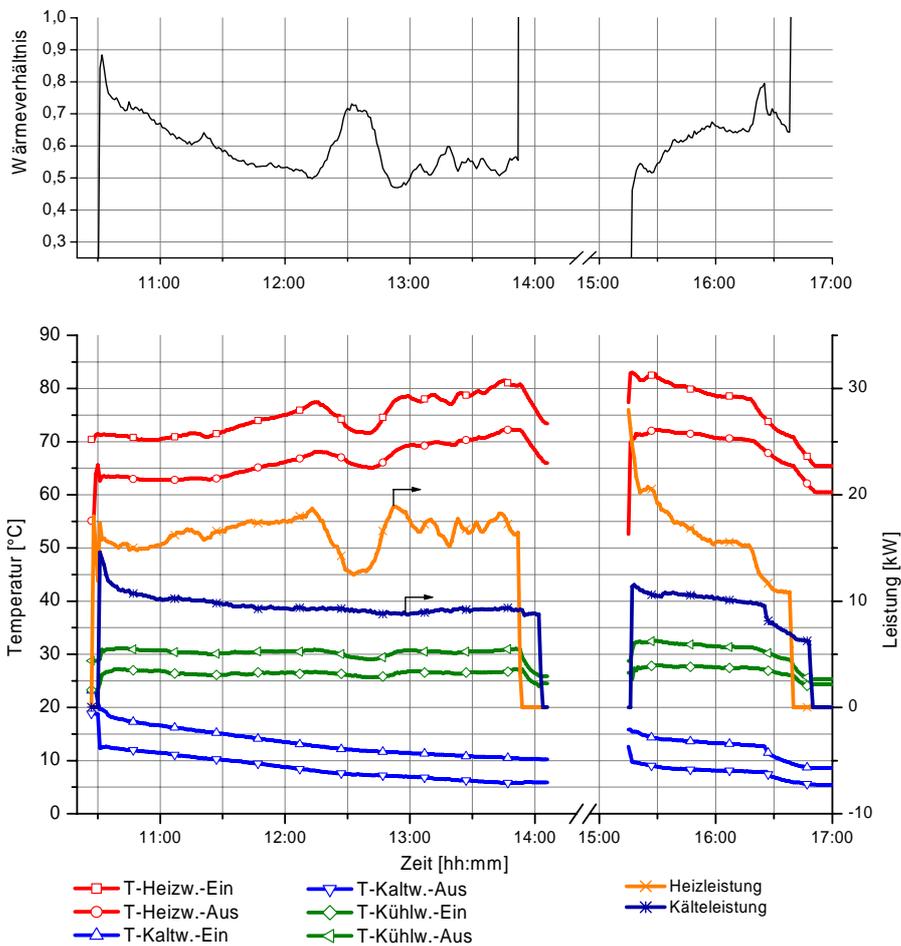


Abbildung 13: Betriebsdaten der Anlage Moosburg für den 18.7.2005

An vielen Betriebstagen wurde die Abschalttemperatur des Kaltwasserspeicher schon deutlich früher bzw. mehrmals am Tag erreicht. Dies ist auf eine unzureichende Abnahme zurückzuführen, da anfangs nur wenige Büros und der nur sporadisch genutzte Seminarraum gekühlt wurden. Ende August wurden weitere Räume mit Gebläsekonvektoren ausgestattet und an den Kaltwasserspeicher angeschlossen. Aufgrund fehlender Sonnenstrahlung konnte die Anlage im Rest der Kühlsaison jedoch kaum noch betrieben werden.

Während der ersten Kühlperiode wurden einige Probleme identifiziert, die innerhalb der Kühlsaison 2005 oder vor Beginn der Kühlsaison 2006 abgestellt wurden. Dies betraf insbesondere die Einstellung und Abstimmung der verschiedenen Regler im System. Folgende Probleme traten auf:

- Die Abschaltung der KAKM bei Erreichen der Abschalttemperatur funktionierte anfangs nicht zuverlässig, so dass im Nachlauf teilweise sehr niedrige Kaltwassertemperaturen erreicht wurden.
- Das Regelventil im Kühlwasserkreis reagierte zu langsam, so dass im Nachlaufbetrieb (verminderte Rückkühlleistung) zu niedrige Kühlwassertemperaturen auftraten (Kristallisationsgefahr).
- Manuelle Eingriffe in das Ablauf- und Regelschema hatten teilweise unerwünschte Folgen bzw. führten zur Reduktion der Betriebszeit.
- Die KAKM wurde vom übergeordneten Regler eingeschaltet, obwohl der Heizwasserspeicher nicht das erforderliche Temperaturniveau aufwies. Dadurch konnte die Lösungsgrenztemperatur innerhalb der KAKM nicht erreicht werden (unnötige Wärmeverluste im Gesamtsystem und Kristallisationsgefahr für KAKM)

Zu Anfang der Kühlsaison 2006 verzögerte sich der Beginn des Betriebes und der Vermessung, da ein Defekt am Datenlogger auftrat, der Ende Mai behoben wurde. Die solare Kühlanlage wurde vom 13.6.06 bis 20.7.06 betrieben. Am 20.7. trat ein Defekt am Ventilator des Rückkühlwerkes auf, wodurch der weitere Betrieb der Anlage verhindert wurde. Ein Ersatzventilator wurde binnen einer Woche bereitgestellt. Wegen beginnender Umbauarbeiten am Gebäude wurde die Gesamtanlage vom Betreiber jedoch nicht wieder in Betrieb genommen. Die Betriebsdaten der Kühlperiode 2006 sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Betriebsdaten der solaren Kühlanlage in Moosburg für die Kühlsaison 2006 [4]

Monat	Laufzeit [hh:mm]	$Q_H$ [kWh]	$Q_0$ [kWh]	$\bar{Q}_H$ [kW]	$\bar{Q}_0$ [kW]	$\zeta$	$t_{\text{HeWa, Ein}} / t_{\text{HeWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KaWa, Ein}} / t_{\text{KaWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KüWa, Ein}} / t_{\text{KüWa, Aus}}$ [°C]
Juni	69:14	973	555	14,0	8,0	0,57	79,5 / 68,9	15,7 / 11,0	27,3 / 33,5
Juli	73:33	1083	674	14,7	9,2	0,62	76,6 / 66,2	15,9 / 10,5	27,4 / 32,5

Die Betriebscharakteristik änderte sich in der Saison 2006 gegenüber der Saison 2005 nicht grundsätzlich. Die von der KAKM bereitgestellte Kälteleistung war stets größer als der Kühlbedarf der angeschlossenen Räume. Dies führte zu einem häufigen Takten der Maschine und zu einem Teillastbetrieb bei niedrigen Kaltwassertemperaturen und meist geringen Heizwassertemperaturen.

Dies sind gleichzeitig die Ursachen für ein gegenüber dem Nennwert geringeres Wärmeverhältnis der KAKM.

Insgesamt kann aus der Felderprobung der KAKM in Moosburg ein positives Fazit gezogen werden. Die Kombination der KAKM mit Flachkollektoren und einem Verdunstungskühler war erfolgreich. Die KAKM stellte niedrige Kaltwassertemperaturen bereit, obwohl die Heizwassertemperatur unter den Nennbedingungen lag. Zur Kälteerzeugung wurde eine Kollektorfläche von 42 m<sup>2</sup> verwendet. Da nur wenige Räume mit insgesamt geringer Kühllast versorgt wurden, war die von den Kollektoren bereitgestellte Wärme zum Betrieb der KAKM ausreichend. Die Anlage schaltete i.A. nach Erreichen der Minimaltemperatur im Kaltwasserspeicher ab, jedoch nicht wegen fehlender Wärmeversorgung. Es zeigte sich, dass die KAKM aufgrund der vom Verdunstungskühler bereitgestellten niedrigen Kühlwassertemperaturen bereits bei Heizwassertemperaturen betrieben werden kann, die deutlich unter den Nennbedingungen liegen. Dies wird zukünftig bei der Planung weiterer Systeme sowie bei der Parametrierung der Anlagensteuerung berücksichtigt. Durch die messtechnische Begleitung des Anlagenbetriebes konnten wichtige Erkenntnisse zum Zusammenspiel der verschiedenen Anlagenkomponenten gewonnen und entsprechende Optimierungen umgesetzt werden.

Der als Ersatzwärmequelle zur Verfügung stehende Holzpelletkessel wurde nicht zur Wärmeversorgung der KAKM im Regelbetrieb verwendet, da ausreichend solare Wärme zur Verfügung stand (s.o.). Unabhängig davon ist dies jedoch eine interessante Option, ein thermisches Back-up zu realisieren, das zudem CO<sub>2</sub>-neutral ist. Dadurch kann in Anwendungen mit einem höheren Komfortanspruch (Versorgungssicherheit) auf eine fossile Nachheizung oder die zusätzliche Installation einer Kompressionskältemaschine verzichtet werden.

### **3.2.3.3 Dresden**

Die Installation der solaren Kälteanlage am ILK Dresden wurde Ende August 2005 abgeschlossen. In der Kühlsaison 2005 konnte somit nur die Inbetriebnahme des Gesamtsystems realisiert werden. Der Regelbetrieb begann mit der Kühlsaison 2006. Die solare Kühlung wurde vom 5.7.-22.9.2006 betrieben. Eine Zusammenfassung des Anlagenbetriebes enthält Tabelle 6. Um neben den Mittelwerten auch die Bandbreite der Betriebsbedingungen zu verdeutlichen, enthält Tabelle 7 die detaillierten (Tages-)Betriebsergebnisse vom Juli. Daraus ist ersichtlich, dass z.B. die mittlere Kühlwassertemperatur über einen Tag im Minimum 29,2°C und im Maximum 41,4 °C betrug.

Tabelle 6: Betriebsdaten der solaren Kühlung am ILK Dresden für die Kühlsaison 2006 [4]

Monat	Laufzeit [hh:mm]	$Q_H$ [kWh]	$Q_0$ [kWh]	$\bar{Q}_H$ [kW]	$\bar{Q}_0$ [kW]	$\zeta$	$t_{\text{HeWa, Ein}} / t_{\text{HeWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KaWa, Ein}} / t_{\text{KaWa, Aus}}$ [°C]	$t_{\text{KüWa, Ein}} / t_{\text{KüWa, Aus}}$ [°C]
Juli	154:07	2231	1569	14,5	10,2	0,7	92,5 / 85,2	20,9 / 16,8	35,6 / 40,6
August	80:21	784	483	9,8	6,0	0,62	83,1 / 77,3	19,9 / 17,4	29,3 / 32,9
Sept.	144:40	1948	1390	13,5	9,6	0,71	88,4 / 81,6	17,2 / 13,5	30,3 / 34,9

Tabelle 7: Betriebsergebnisse der solaren Kühlung am ILK Dresden für Juli 2006 [4]

Datum	Tageslaufzeit hh:mm:ss	Heizarbeit kWh	Kältearbeit kWh	COP	$t_{\text{HeWa EIN}}$ °C	$t_{\text{HeWa AUS}}$ °C	$t_{\text{KaWa EIN}}$ °C	$t_{\text{KaWa AUS}}$ °C	$t_{\text{KüWa EIN}}$ °C	$t_{\text{KüWa AUS}}$ °C
07.07.06	09:41:00	171,07	115,56	0,68	95,22	86,45	19,94	15,08	35,66	41,86
08.07.06	00:41:00	10,64	3,60	0,34	77,65	68,33	22,79	19,46	29,16	35,19
10.07.06	10:00:00	133,02	85,15	0,64	88,50	81,92	21,72	18,27	35,40	39,90
12.07.06	07:25:00	101,91	70,22	0,69	85,57	78,69	20,32	16,42	35,15	40,00
13.07.06	09:22:11	137,99	95,18	0,69	93,41	86,24	21,03	16,91	36,81	41,90
14.07.06	06:27:00	83,42	61,74	0,74	80,13	73,59	18,78	14,82	31,49	36,40
15.07.06	09:23:00	148,31	108,14	0,73	91,15	83,34	17,55	12,92	30,89	36,68
16.07.06	09:57:00	172,58	124,56	0,72	98,66	90,09	16,62	11,62	29,52	35,82
17.07.06	10:01:00	169,56	121,89	0,72	99,88	91,46	16,63	11,73	33,63	39,66
19.07.06	10:23:00	156,00	112,24	0,72	100,47	93,01	21,79	17,46	38,94	44,20
21.07.06	10:03:00	146,17	108,04	0,74	96,44	89,19	22,45	18,10	38,65	43,88
22.07.06	10:28:00	155,38	111,21	0,72	103,45	96,06	21,51	17,23	38,98	44,17
23.07.06	04:22:00	45,42	31,98	0,70	87,54	82,15	23,04	19,99	36,69	40,52
26.07.06	05:11:00	69,02	47,40	0,69	91,39	84,53	23,75	19,86	40,47	45,10
27.07.06	10:11:00	157,55	109,14	0,69	101,24	93,56	22,18	17,81	41,41	46,56
28.07.06	05:56:00	72,87	51,50	0,71	90,18	83,88	22,17	18,48	38,17	42,49
29.07.06	07:07:00	68,74	50,28	0,73	79,84	74,12	22,14	18,90	32,04	36,02
30.07.06	09:57:00	136,19	96,27	0,71	98,85	92,04	20,96	17,08	37,17	41,76
31.07.06	07:32:00	94,90	65,12	0,69	97,12	90,72	20,94	17,48	35,14	39,38
<b>SUMME</b>	<b>154:07:11</b>	<b>2230,75</b>	<b>1569,24</b>	<b>0,70</b>	<b>92,46</b>	<b>85,23</b>	<b>20,86</b>	<b>16,82</b>	<b>35,55</b>	<b>40,61</b>

Wie aufgrund der Anlagenkonfiguration zu erwarten, führte die Nutzung eines trockenen Rückkühlers zu sehr hohen Kühlwassertemperaturen, insbesondere während des heißen Juli. Die Kaltwassertemperaturen stellten sich entsprechend der Raumtemperatur in der gekühlten Versuchshalle sowie der Kälteleistung der KAKM ein. Im Mittel lagen die Kaltwassertemperaturen auf dem Niveau der Hamburger Anlage, in der die Kühlung über den Fußboden erfolgt. Durch die Nutzung von Vakuumröhrenkollektoren erreichten die Heizmedientemperaturen ein deutlich höheres Niveau als in den beiden anderen Demonstrationsanlagen. Dadurch konnten die höheren Kühlwassertemperaturen z.T. kompensiert werden. Die Heiztemperatur kann allerdings nicht beliebig erhöht werden, da es sonst in der Anlage zur Kristallisation von LiBr kommt und die Anlage in Störung geht. Die maximal mögliche Heiztemperatur ist neben der Kühlwassertemperatur auch von der Kaltwassertemperatur abhängig. Je niedriger die Kaltwassertemperatur umso geringer die maximale Heiztempe-

ratur. Bei der Nutzung des Stoffpaares Wasser/LiBr ist der Temperaturhub (Differenz aus Kondensations-/Absorptionstemperatur und Verdampfungstemperatur) aufgrund des Lösungsfeldes begrenzt.

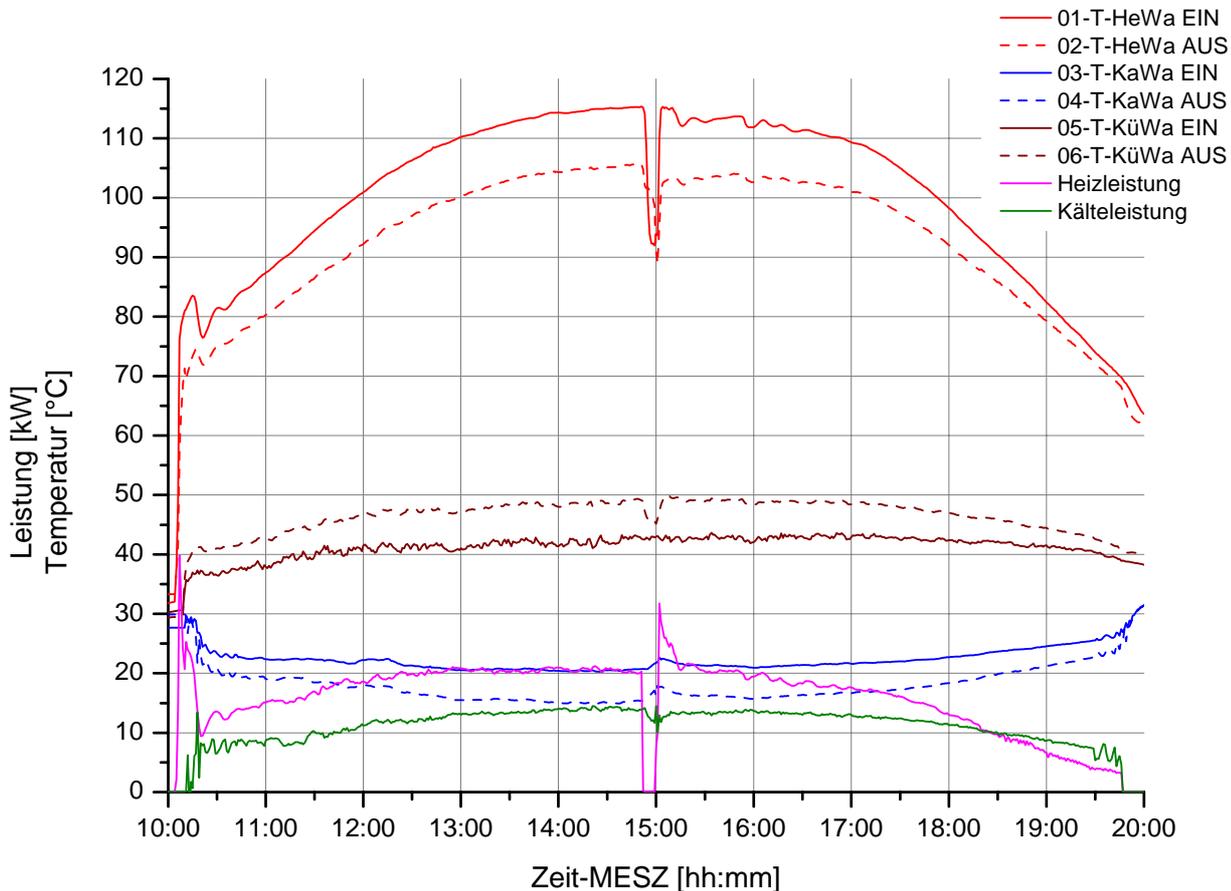


Abbildung 14: Verlauf charakteristischer Temperaturen und Leistungen der solaren Kühlung am ILK Dresden – 27.7.2006

Ein typischer Tagesverlauf der Temperaturen und Leistungen für einen sonnenreichen Tag ist in Abbildung 14 dargestellt. Die KAKM startet kurz nach 10:05 Uhr, nachdem im Kollektorkreis ein Temperaturniveau von 80°C erreicht wurde. Die Heiztemperatur steigt in der Folge an und wird durch das Dreiwegeventil ab 14:30 Uhr auf den Maximalwert von 115°C begrenzt. Um 14:52 Uhr kommt es zu einem regelungstechnisch bedingten Ausschalten der Kollektorpumpe, wodurch auch die Anforderung/Wärmeversorgung der Kältemaschine für wenige Minuten unterbrochen wird. Bei einer maximalen Lufteintrittstemperatur in den Rückkühler von 37°C wird eine maximale Kühlwassertemperatur von 43°C erreicht. Trotz dieser sehr hohen Kühlwassertemperaturen erreicht die KAKM eine maximale Kälteleistung von 14,5 kW.

Insgesamt wurden an diesem Tag 109 kWh Kälte erzeugt. Das mittlere Wärmeverhältnis betrug 0,69. Die solar erzeugte Wärme konnte vollständig zu Kälteerzeugung eingesetzt werden. Die Aktivierung der Notkühlfunktion war an diesem Tag nicht notwendig. Die mittlere Kälteleistung betrug 10,7 kW. Wie auch aus Abbildung 14 ersichtlich, arbeitet die KAKM damit überwiegend im Teillastbetrieb. Daher ist die Möglichkeit des drehzahlvariablen Betriebes des Trockenkühlers besonders wichtig, um den Strombedarf für die Rückkühlung so gering wie möglich zu halten. Der mittlere elektrische Leistungsbedarf der Ventilatoren im Rückkühler am 27.7.06 (Abbildung 14) betrug 0,236 kW. Insgesamt wurden 2,38 kWh Strom verbraucht. Dies ergibt einen spezifischen Strombedarf für die Rückkühlung<sup>2</sup> von 0,022 kWh<sub>elektr</sub>/kWh<sub>Kälte</sub>. Der elektr. Leistungsbedarf des in Moosburg und Hamburg verwendeten Verdunstungskühlers liegt bei Betrieb in Stufe 2 bei 0,33 kW, bei Stufe 1 bei 0,1 kW und damit in der gleichen Größenordnung wie der durchschnittliche Bedarf des Trockenkühlers in Dresden.

Die charakteristischen Temperatur- und Leistungsverläufe für einen Tag mit wechselhaften Einstrahlungsbedingungen sind in Abbildung 15 dargestellt. Die Strahlungsschwankungen führen zu schwankenden Heiztemperaturen für die KAKM, da kein Pufferspeicher verwendet wird. Dennoch kommt es nur zu vergleichsweise geringen Schwankungen der Kälteleistung. Die KAKM wirkt wie ein Puffer innerhalb des solaren Kühlsystems. An diesem Tag (2.8.06) wurden insgesamt 61 kWh Kälte erzeugt. Dabei wurde trotz der instationären Betriebsbedingungen ein mittleres Wärmeverhältnis von 0,68 erreicht. Der Strombedarf für die Rückkühlung betrug 1,03 kWh, was einem spezifischen Strombedarf von 0,017 kWh<sub>elektr</sub>/kWh<sub>Kälte</sub> entspricht.

Zur Bewertung des Einflusses verschiedener Parameter auf den Strombedarf zur Rückkühlung wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Es wurde ein Kühlabstand ( $\Delta T_{KA}$ ) definiert, der als Sollwert für die Drehzahlregelung der Ventilatoren dient:

$$\Delta T_{KA} = t_{\text{Luft\_Eintritt\_Rückkühler}} - t_{\text{Kühlwasser\_Eintritt\_KAKM}} \quad (1)$$

Der Kühlabstand beschreibt also die minimale Annäherung der Kühlwassertemperatur an die Temperatur der Außenluft. Je kleiner der Kühlabstand, umso mehr Luft muss bei gleicher Rückkühlleistung von den Ventilatoren durch den Lamellenwärmeübertrager des Trockenkühlers gefördert werden. Um zu niedrige Kühlwassertemperaturen bei niedrigen Außenlufttemperaturen zu vermeiden, wurde der Sollwert für „ $t_{\text{Kühlwasser\_Eintritt\_KAKM}}$ “ auf 28°C begrenzt.

<sup>2</sup> ohne Berücksichtigung der Kühlwasserpumpe

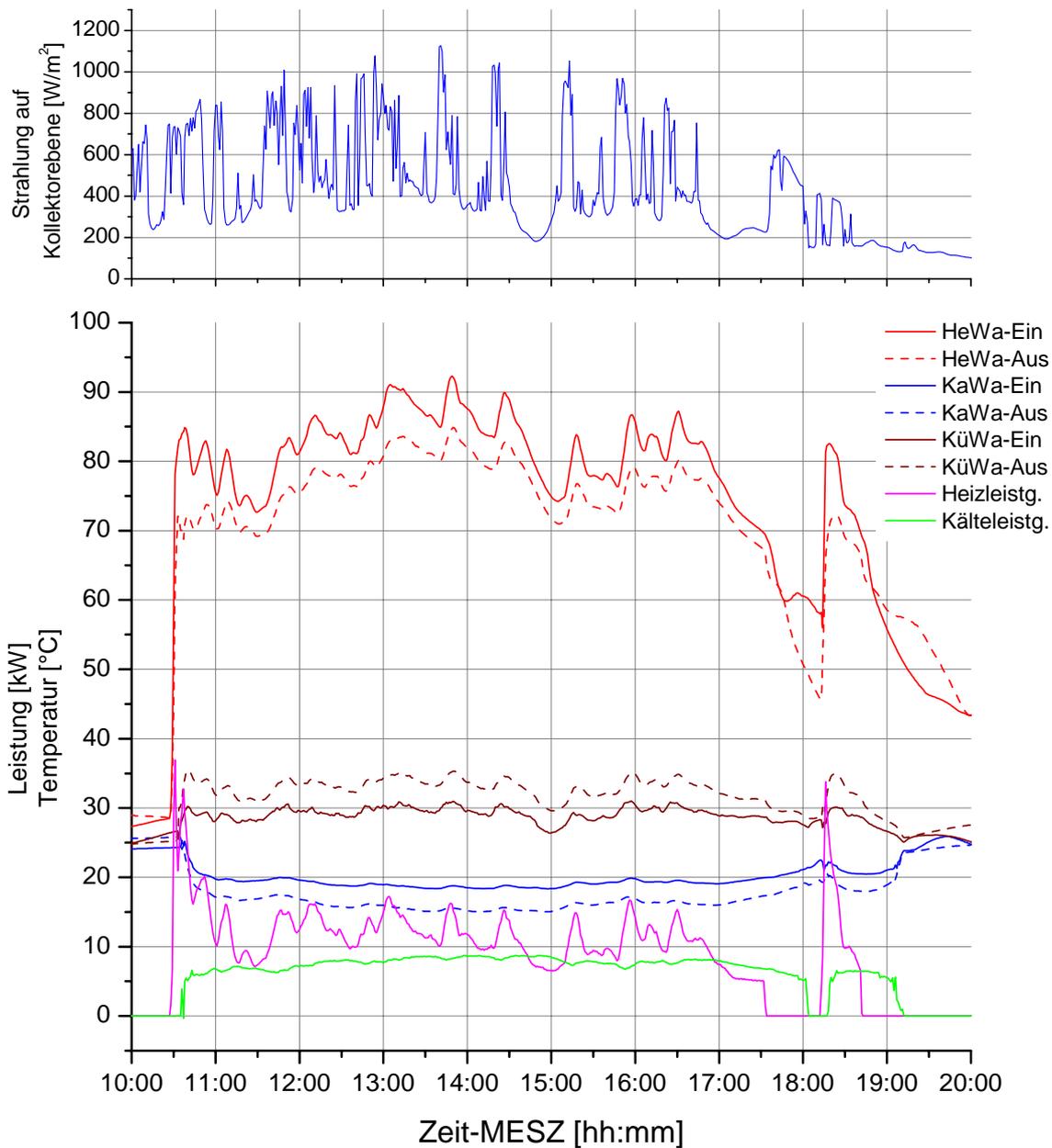


Abbildung 15: Verlauf charakteristischer Temperaturen und Leistungen der solaren Kühlung am ILK Dresden – 02.8.2006

Tabelle 8 enthält die Ergebnisse für 4 Betriebstage, an denen der Kühlabstand 5,5 bzw. 6,5 K betrug und zwar: die maximal zulässige Heizwassereintrittstemperatur in die KAKM, die Tagesmittelwerte für die Heiz- und Kühlwassereintrittstemperatur, die Tagessummen der Heizwärme zum Antrieb der KAKM und die erzeugte Kälte, die Tagessumme an elektrischer Arbeit für den Betrieb des Rückkühlers (Trockenkühler) sowie den Quotienten aus elektrischer Arbeit und Tagessumme Käl-

te. Der Einfluss des Kühlabstandes auf den Stromverbrauch der Ventilatoren ist deutlich erkennbar. Bei einem Kühlabstand von 5,5 K beträgt der spezifische Stromverbrauch  $0,026 \text{ kWh}_{\text{elektr}}/\text{kWh}_{\text{Kälte}}$ . Dies würde einem lediglich auf die Rückkühlung bezogenen elektrischen COP von 38,5 entsprechen. Durch Erhöhung des Kühlabstandes auf 6,5 K kann der spezifische Stromverbrauch um ca. 27 % ca.  $0,019 \text{ kWh}_{\text{elektr}}/\text{kWh}_{\text{Kälte}}$  gesenkt werden. Dies entspräche einem COP von 52,6.

Tabelle 8: Ergebnisse der Untersuchungen zur Beeinflussung des Strombedarfs zur Rückkühlung (unveränderter Trockenkühler)

Datum	$\Delta T_{KA}$ [K]	$t_{HeWa,Soll/max}$ [°C]	$t_{HeWa,Ein}$ <sup>3</sup> [°C]	$t_{KüWa,Ein}$ <sup>4</sup> [°C]	$Q_{Heiz}$ [kWh]	$Q_{Kälte}$ [kWh]	$W_{el}$ [kWh]	$W_{el}/Q_0$ [kWh/kWh]
10.07.	5,5	110	88,5	35,4	133,0	85,2	2,24	0,026
12.07.	5,5	110	85,6	35,2	101,9	70,2	1,80	0,026
23.07	6,5	115	87,5	35,4	45,4	32,0	0,57	0,018
30.07.	6,5	115	98,8	37,2	136,2	96,3	1,86	0,019

Im nächsten Schritt wurde untersucht, wie sich der spezifische Stromverbrauch bei Verkleinerung des Trockenkühlers entwickelt. Durch einen Rückkühler mit geringerer Fläche bzw. weniger Ventilatoren könnten die Investitionskosten für das Gesamtsystem gesenkt werden. Dazu wurde der mittlere Ventilator des dreigeteilten Trockenkühlers von der Spannungsversorgung getrennt und abgedeckt, so dass der Lamellenwärmeübertrager dieses Abschnitts auch nicht durch natürliche Konvektion wirksam wurde. In der Folge wurden verschiedene Kühlabstände vorgegeben. Die solare Kühlanlage wurde dann mindestens einen ganzen oder mehrere Tage mit dieser Vorgabe betrieben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen enthält Tabelle 9. Neben der Vorgabe für den Kühlabstand wird auch der tatsächliche Tagesmittelwert angegeben. Auf Grundlage dieser Werte wurde das Diagramm in Abbildung 16 erstellt.

Die Abhängigkeit des Strombedarfs zur Rückkühlung vom tatsächlichen Kühlabstand ist deutlich zu erkennen. Am 16.8. wurde die Kältemaschine aufgrund geringer Einstrahlung nur mit einer durchschnittlichen Kälteleistung von 6,8 kW betrieben. Dieser Tag ist daher nicht mit den anderen vergleichbar. Durch die Reduktion der wärmeübertragenden Fläche und die Abschaltung eines Ventilators ergibt sich ein deutlicher Anstieg des spezifischen Strombedarfs zur Rückkühlung (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 9). Bei einem Kühlabstand von 6,5 K erhöht sich der Strombedarf ca. um den Faktor 3 bei einem Kühlabstand von 5,5 K steigt er ungefähr auf den vierfachen Wert. Bei dem

<sup>3</sup> mittlere Heizmediumtemperatur in die KAKM

<sup>4</sup> mittlere Kühlwassereintrittstemperatur in die KAKM

kleinsten vermessenen Kühlabstand von 5,1 K wurde mit 0,114 kWh<sub>elektr</sub>/kWh<sub>Kälte</sub> der höchste spezifische Strombedarf ermittelt. Dies würde einem nur auf die Rückkühlung bezogenen elektr. COP von nur noch 8,8 entsprechen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Untersuchungen zur Beeinflussung des Strombedarfs zur Rückkühlung („reduzierter“ Trockenkühler)

Datum	$\Delta T_{KA}$ [K]	$t_{HeWa,Soll/max}$ [°C]	$t_{HeWa,Ein}^3$ [°C]	$t_{KüWa,Ein}^4$ [°C]	$Q_{Heiz}$ [kWh]	$Q_{Kälte}$ [kWh]	$W_{el}$ [kWh]	$W_{el}/Q_0$ [kWh/kWh]
04.09.	5,0 (5,1) <sup>5</sup>	110	85,0	29,2	97,2	70,3	8,0	0,114
05.09.	5,5 (6,8)	110	85,4	28,0	104,1	73,6	3,5	0,047
07.09.	5,5 (5,45)	110	99,2	34,8	129,0	89,6	9,24	0,103
11.09.	5,5 (5,6)	110	100,5	30,3	137,8	97,8	10,43	0,107
16.08.	6,5 (6,35)	115	88,9	30,9	71,9	46,2	1,35	0,029
14.09.	6,5 (6,22)	110	94,6	31,6	86,4	62,2	4,09	0,066
18.09.	6,5 (6,45)	110	92,0	31,5	111,5	82,0	4,37	0,053
21.09.	7,0 (6,95)	110	95,7	30,0	123,7	87,4	3,97	0,045

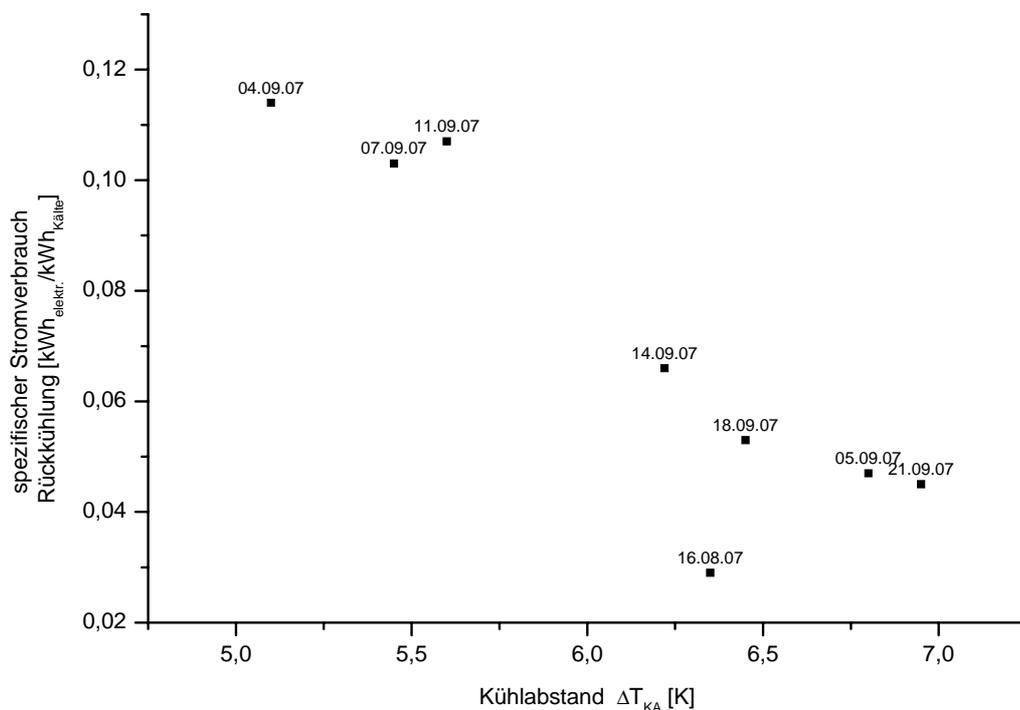


Abbildung 16: Spezifischer Stromverbrauch für den Betrieb des „reduzierten“ Trockenkühlers

<sup>5</sup> Der erste Wert ist der vorgegebene Sollwert. Der Wert in Klammern ist der tatsächliche Kühlabstand als Tagesmittelwert. Dieser kann z.B. aufgrund einer niedrigen Lufttemperatur und der Begrenzung der minimalen Kühlwassertemperatur deutlich vom Sollwert abweichen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass eine deutliche Verkleinerung des Rückkühlers zu einem erhöhten Stromverbrauch führt. Dadurch wird der primärenergetische Vorteil der solaren Kühlung gegenüber der Kälteerzeugung mit Kompressionskältemaschinen verringert. Bei einer günstigen Konfiguration des Gesamtsystems kann der Trockenkühler jedoch zugunsten geringerer Investitionskosten kleiner ausgeführt und die Anlage mit einem höheren Kühlabstand von z.B. 7 K betrieben werden. Dies betrifft insbesondere Systeme, die eine relativ hohe Kaltwassertemperatur benötigen (z.B. Bauteilaktivierung oder Flächenkühlsysteme) und gleichzeitig hohe Antriebstemperaturen auf der Heizseite (z.B. Vakuumröhrenkollektoren) bereitstellen.

Die Aufstellung des Rückkühlers erfolgte auf dem Dach der Versuchshalle, neben den Kollektoren zur Wärmeerzeugung. Dadurch konnten kurze Leitungslängen zur Kältemaschine realisiert werden. Das ILK verfügt über eine separate Wetterstation, an der u.a. die Lufttemperatur gemessen wird. Aus dem Vergleich der dort gemessenen Temperaturen mit den Lufteintrittstemperaturen in den Rückkühler ergab sich, dass die Temperatur am Rückkühler bei Sonnenschein über der „allgemeinen“ Lufttemperatur lag. Anhand der Messwerte der solaren Kühlanlage wurde an Tagen mit wechselhafter Einstrahlung beobachtet, dass die Lufteintrittstemperatur in den Rückkühler während der Sonnenperioden höhere Werte erreichte als während bewölkter Abschnitte. U.U. könnte durch die Aufstellung des Rückkühlwerkes im Schattenbereich, soweit dies baulich möglich ist, eine etwas niedrigere Lufteintrittstemperatur in den Rückkühler erreicht werden.

Die Ergebnisse der Demonstrationsanlage in Dresden können insgesamt sehr positiv eingeschätzt werden. Es wurde gezeigt, dass ein solarthermisches Kältesystem mit der Absorptionskältemaschine Wegracal SE 15 auch mit einem Trockenkühler betrieben werden kann. Wenn ein entsprechend hoher Kühlabstand eingehalten wird, ist der Strombedarf des Trockenkühlers moderat und liegt auf dem gleichen Niveau wie bei einem Verdunstungskühler. Der Wartungsaufwand des Systems mit Trockenkühler ist geringer. Es tritt keine Verschmutzung innerhalb des Kreislaufs auf und aufgrund der Frostsicherheit des Fluids entfällt die jährliche Entleerung und Wiederbefüllung. Allerdings ist das erreichbare Temperaturniveau der Rückkühlung deutlich höher. Dies muss durch eine höhere Antriebstemperatur kompensiert werden. Sollen sehr niedrige Kaltwassertemperaturen bereitgestellt werden, ist die Nutzbarkeit eines solchen Systems aufgrund der Beschränkungen des Arbeitsstoffpaares Wasser/Lithiumbromid begrenzt. Bei der umgesetzten Demonstrationsanlage wurde die Kältemaschine direkt mit dem Solarkreisfluid beheizt. Dadurch kann das vom Kollektorfeld erzeugte Temperaturniveau ohne Triebkraftverluste eines Zwischenwärme-

übertragers genutzt werden und die Realisierung hoher Antriebstemperaturen wird vereinfacht. Dabei wurde auf einen Speicher verzichtet. Soll ein derartiges System zur Erhöhung der Kälteproduktion mit einem Speicher auf der Heizseite ausgerüstet werden, ist die Installation von Komponenten (v.a. Speicher) notwendig, die über 100°C betrieben werden können. Dies ist technisch möglich, derzeit aber innerhalb der Solartechnik wenig verbreitet. Die Komplexität des Gesamtsystems würde dadurch erhöht.

Die Nutzung des Trockenkühlers zur Umsetzung einer „Notkühlfunktion“ hat sich ebenfalls bewährt und ist innerhalb eines solarthermischen Heiz- und Kühlsystems mit geringem zusätzlichem Aufwand umsetzbar. Der Rückkühlkreis ist mit einem Glykolgemisch befüllt und muss deshalb im Winter nicht abgelassen werden. Somit ist die Notkühlfunktion ganzjährig verfügbar. Durch die Notkühlung kann die thermische Belastung des Wärmeträgers im Kollektorkreis sowie der verwendeten Komponenten deutlich verringert werden. Die Lebensdauer, der Ertrag und die Verfügbarkeit des Gesamtsystems können dadurch gesteigert werden.

### **3.3 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse**

Zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse wurden sowohl vom Antragsteller ILK Dresden als auch vom Kooperationspartner Wegra eine Reihe von Vorträgen auf Symposien, Konferenzen und Workshops gehalten (siehe Tabelle 10). Auch nach Abschluss des Projektes ist eine Publikation der Vorhabensergebnisse geplant. Teilweise sind entsprechende Vorträge schon in Tabelle 10 enthalten. Weiterhin ist geplant, nach Schaffung der technischen Voraussetzungen die Echtzeit-Betriebsparameter der solarthermischen Kälteanlage in Dresden im Internet zu präsentieren.

Ergänzt wird dies durch die Teilnahme an Messen und Ausstellungen. Die Fa. Wegra stellte die KAKM zur solaren Kühlung und KWKK, teilweise in Verbindung mit Kooperationspartnern, u.a. auf folgenden Messen aus: Intersolar 2004, 2005 und 2006; 3. und 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis in Stuttgart; IKK/Enkon 2005 und 2007, Solarmesse Mailand 2006.

Anlässlich der Einweihung der solarthermischen Kälteanlage am ILK Dresden wurde am 18. Juli 2006 eine Veranstaltung durchgeführt, in der die Anlage und die Technologie der solarthermischen Kälteerzeugung der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Mehr als 60 Teilnehmer aus

Planung, Industrie und Forschung informierten sich im Rahmen eines Vortragsprogramms über aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Solarthermie und solarthermische und photovoltaische Kälteerzeugung. Über diese Veranstaltung wurde in regionalen Medien sowie in überregionalen Fachmedien (u.a. *CCI; Sonne, Wind und Wärme; Die Kälte und Klimatechnik*) berichtet (siehe auch Abbildung 24 und Abbildung 25 im Anhang). Die Vorträge stehen auf der ILK-Internetseite zur Verfügung ([www.ilkdresden.de](http://www.ilkdresden.de)).

Tabelle 10: Vortragsübersicht zur Thematik der Solaren Kühlung und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung von 2005-2007

Termin	Veranstaltung	Autor	Ort	Veranstalter	Titel
<b>2005</b>					
17.02.2005		Richter, Safarik	Halle/Saale	DKV-Bezirksverein Sachsen-Anhalt	Nutzung von Solarwärme und Brennstoffzellenabwärme mit Absorptionskälteanlagen im Leistungsbereich 15 bis 200 kWo- Stand der ILK-Entwicklungen -
08.04.2005	Festveranstaltung zum dreijährigen Firmenjubiläum	Safarik	Moosburg	Citrin Solar, Moosburg	Solare Klimakälteerzeugung
21.06.2005	Energietammtisch der Lokalen Agenda 21	Safarik; Gassel	Dresden	Lokalen Agenda 21 für Dresden e.V	Solare Klimakälteerzeugung
22.09.2005	Dresdner Kolloquium der Kältetechnik - Energieeffiziente Kältetechnik	Safarik, Seifert, Hein	Dresden	ILK Dresden; FKW Hannover	Synergiebetrachtung Wärmelast und solare Kühlung
28.09.2005	Innovative Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	Safarik, Richter	Erfurt	BHKW Consult, Rastatt	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung - Funktionsprinzipien und Technologien
6.-7.10.2005	International Conference Solar Air-Conditioning	Safarik; Richter; Naumann, Otto	Bad Staffelstein	Otti Kolleg, Regensburg	Experiences with a 15 kW absorption chiller in solar cooling installations
6.-7.10.2006	International Conference Solar Air-Conditioning	Safarik; Richter; Möckel; Kretschmar	Bad Staffelstein	Otti Kolleg, Regensburg	Performance data of a small capacity absorption chiller
6.-7.10.2007	International Conference Solar Air-Conditioning	Otto, Weidner, Safarik, Richter	Bad Staffelstein	Otti Kolleg, Regensburg	Solar cooling applications with water/lithium-bromide absorption chillers
6.-7.10.2008	International Conference Solar Air-Conditioning	Richter, Safarik	Bad Staffelstein	Otti Kolleg, Regensburg	Solar Cooling with Ammonia Water Absorption Chillers
29.11.2005	Innovative Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung	Safarik, Richter	Köln	BHKW Consult, Rastatt	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung - Funktionsprinzipien und Technologien
16.-18.11.2005	Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2005	Safarik; Richter; Weidner; Otto; Naumann; Möckel	Würzburg	DKV	Stand der Felderprobung einer Kleinabsorptionskältemaschine
<b>2006</b>					
03.-04.04.2006	Viertes Symposium - Solares Kühlen in der Praxis	Safarik, Richter, Otto	Stuttgart	HFT Stuttgart	Entwicklung einer 30 kW H <sub>2</sub> O/LiBr-Absorptionskältemaschine für den Einsatz in der solaren Kühlung
Mai 06	16. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein	Safarik, Richter	Bad Staffelstein	Otti Kolleg, Regensburg	Solare Kühlung mit Absorptionskältemaschinen im kleinen Leistungsbereich
22.06.2006	Otti Seminar im Rahmen der Intersolar 2006	Safarik, Richter, Weidner, Otto	Freiburg	Otti Kolleg, Regensburg	Experiences with a 15 kW absorption chiller in solar cooling installations
18.07.2006	Kolloquium zur Einweihung der Solarthermischen Klimakälteanlage am ILK Dresden	Safarik	Dresden	ILK Dresden	Solare Klimakälteanlage am ILK Dresden-Zielstellung und Besonderheiten
28.09.2006	Renexpo Augsburg, 2. Fachforum "Solare Kühlung und Klimatisierung"	Safarik	Augsburg	Reeco GmbH, Reutlingen	Erfahrungen mit Niedertemperatur-Absorptionskältemaschinen in Anlagen der solaren Kühlung
20.10.2006	Kolloquium HS Anhalt	Safarik	Köthen	HS Anhalt	Thermische Kälteerzeugung mit Absorptionskältemaschinen im kleinen Leistungsbereich
23.10.2006		Richter, Safarik	Dresden	DKV-Bezirksverein Sachsen	Neue Entwicklungen in der Absorptionskältetechnik
<b>2007</b>					
01.03.2007	Rahmenprogramm zur Messe "Haus 2007"	Safarik	Dresden	Sächs. Landesamt für Umwelt und Geologie, Energieeffizienzszentrum	Solare Klimatisierung
09.05.2007	Berliner Energietage 2007 - Workshop: Heizung bzw. Kühlung unter Verwendung EE im Gebäudebereich	Safarik	Berlin	DENA + Berliner Energieagentur	Entwicklung, Anwendung u. Demonstration solar betriebener Absorptionskältemaschinen im kleinen Leistungsbereich
18.-19.10.2007	2nd International Conference Solar Air-Conditioning	Safarik, Richter, Thomas, Otto	Tarragona, E	Otti Kolleg, Regensburg	Results of monitoring the EAW SE 15 absorption chiller in solar cooling installations
18.-19.10.2008	2nd International Conference Solar Air-Conditioning	Weidner, Otto, Safarik, Richter	Tarragona, E	Otti Kolleg, Regensburg	Solar cooling applications with the EAW SE 15 absorption chiller

## 4 Fazit

Innerhalb dieses Projektes wurde die Kleinabsorptionskältemaschine Wegracal SE 15 auf einem Leistungsprüfstand detailliert vermessen. Die dabei gewonnenen Daten dienen als Grundlage zur Planung von Gesamtsystemen zur solaren Heizung und Kühlung bzw. zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Innerhalb des zweiten Projektschwerpunktes wurden drei Demonstrationsanlagen aufgebaut und deren Betrieb wissenschaftlich begleitet. Die Demonstrationsanlagen erzielten gute Betriebsergebnisse. Gleichzeitig konnten wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der Betriebssicherheit der Anlage und zur Optimierung der Gesamtsysteme gewonnen werden. Durch vielfältige Aktivitäten im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit wurde die Zielstellung des Projektes, eine verstärkte Nutzung dieser energieeffizienten Technologie zu unterstützen, erreicht.

Nachfolgend sollen einige Problemfelder benannt werden, deren Bearbeitung bzw. Beachtung zu einer Erhöhung der Effizienz und Betriebssicherheit sowie zu einer stärkeren Verbreitung dieser Technologie beitragen können:

Die Abstimmung der Regelung der einzelnen Komponenten eines solarthermischen Heiz- und Kühlsystems oder eines KWKK-Systems bereitet oft Schwierigkeiten und führt dazu, dass einzelne Teilsysteme nicht optimal arbeiten. Ein Beispiel ist das Problem der zu niedrigen Heizwassertemperatur in der Anlage in Hamburg. Eine Ursache dafür ist, dass aufgrund eines zu langsam arbeitenden Dreiwegeventils, die maximal mögliche Vorlauftemperatur des BHKW nicht ausgeschöpft wird. In der Moosburger Anlage kam es aufgrund einer ungünstigen Parametrierung eines Regelventils zu zu niedrigen Kühlwassertemperaturen, insbesondere während des Nachlaufbetriebes. Derartige Probleme können durch die Standardisierung von solaren Heiz-/Kühlsystemen und KWKK-Anlagen vermieden werden. Dazu sind eine enge Kooperation der beteiligten Komponentenhersteller und die vermehrte Realisierung dieser Systeme notwendig. Dabei lassen sich gleichzeitig Kostensenkungen erzielen, in dem z.B. eine Regelung alle Aufgaben erfüllt, die bisher mehrere voneinander unabhängige Regelungen übernehmen. Im Bereich des solarthermischen Antriebes gibt es bereits erste Ansätze der Fa. Wegra/EAW zusammen mit Solarthermieunternehmen „Solar-Kombi-Plus-Systeme“ (Warmwasserbereitung, Heizungsunterstützung, Kühlung, thermisches Back-up) zu entwickeln und zu vermarkten.

Eine verbreitete Nutzung der solaren Kühlung lässt sich wahrscheinlich insbesondere durch die Einbeziehung der Solarthermieunternehmen erreichen. Diese Unternehmen sehen darin ein zusätzliches Geschäftsfeld und sind bereit, die Synergien in der Nutzung der thermischen Kältetechnologie

nik zu erschließen. Im Gegensatz dazu haben klassische Kälte-/Klimaanlagenbauern meist nur geringes Interesse an dieser Technologie. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Mitarbeiter der Solar- und Installationsfirmen mit den Erfordernissen der kaltwasserbasierten Klimatechnik, der Absorptionskältetechnik sowie der benötigten Peripherie (z.B. Rückkühlwerk) vertraut zu machen. Dies kann z.B. im Rahmen von Schulungen erfolgen, die verschiedene Solarthermieunternehmen für die eigenen Mitarbeiter und Partnerbetriebe anbieten. Diese Qualitätssicherungsmaßnahmen sind von großer Bedeutung für den langfristigen Erfolg dieser Technik.

Solange es noch keine standardisierten Systeme am Markt gibt und die beteiligten Planer und Installateure über wenig bis keine Erfahrungen mit dieser Technologie verfügen, ist eine intensive Inbetriebnahmephase von außerordentlicher Wichtigkeit, um Mängel in der Abstimmung des Gesamtsystems aufzudecken und so vorhandene Optimierungspotenziale auszuschöpfen und dem Betreiber/Nutzer letztendlich ein gut abgestimmtes, betriebssicheres System zu übergeben.

Die Nutzung der Fußbodenheizung zur Kühlung/thermischen Bauteilaktivierung in Kombination mit solarthermisch oder mit BHKW-Abwärme angetriebenen Absorptionskältemaschinen stellt eine interessante Option im Neubau als auch in der Nachrüstung dar. Durch die Nutzung der Fußbodenheizung zum Kühlen können die Investitionskosten reduziert werden, da keine zusätzlichen Komponenten (z.B. Gebläsekonvektoren) installiert werden müssen. Durch die Speicherfunktion des Fußbodens/Gebäudes kann zudem auf eine Wärme- oder Kältespeicherung in Pufferspeichern verzichtet oder zumindest deren Größe deutlich reduziert werden. Gleichzeitig bietet das vergleichsweise hohe Temperaturniveau des Kaltwassers günstige Betriebsbedingungen für die Absorptionskältemaschine.

Der Mehrzahl der bisher in Europa installierten solar betriebenen Kälteanlagen befindet sich in Deutschland. Das Hauptanwendungsgebiet liegt jedoch eher in Südeuropa, da dort günstigere Randbedingungen vorliegen, um eine wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der solaren Kühlung zu erreichen. Auch die Kleinabsorptionskältemaschine Wegracal SE 15 konnte innerhalb dieses Projektes nur in deutschen Demonstrationsanlagen vermessen werden. Die Umsetzung von Anlagen in Südeuropa und die messtechnische Begleitung einiger Projekte sind dringend notwendig, um Erfahrungen mit den länderspezifischen und klimatischen Randbedingungen zu sammeln und Referenzobjekte zu schaffen. Mit der Durchführung eines entsprechenden Projektes unter Einbeziehung lokaler Partner, der Ableitung von Planungs- und Auslegungshinweisen und der Publikation der Ergebnisse könnte ein entscheidender Beitrag zur weiteren Verbreitung der solaren Kühlung in Südeuropa geleistet werden.

Eine Kostenreduktion kleiner Absorptionskältemaschinen würde zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der solaren Kühlung im Vergleich zur elektrisch betriebenen Kompressionskälteerzeugung beitragen. Dies kann einerseits durch höhere Stückzahlen und andererseits durch weitere Entwicklungsschritte (Anlagenoptimierung) erreicht werden, wobei sich der starke Anstieg der Rohstoffpreise (Kupfer, Stahl) in den letzten Jahren negativ auswirkt. Zur Umsetzung weiterer Entwicklungsschritte sind die betroffenen KMU und Forschungseinrichtungen auf eine öffentliche Zufinanzierung angewiesen, da der Bereich der solaren Kühlung aufgrund der geringen Stückzahlen momentan noch nicht wirtschaftlich tragfähig ist. Bei der Betrachtung der Kosten-/Wirtschaftlichkeit muss jedoch beachtet werden, dass die Kältemaschine zwar einen großen Anteil an den Systemkosten ausmacht, Kostensenkungen jedoch auch durch Maßnahmen im Gesamtsystem erzielt werden müssen.

## Literaturverzeichnis

- 1 Krist, K.; Jayaweera, P.: *Removing the key technical barrier to widespread use of advanced absorption cooling*. California Energy Commission Report, 2004
- 2 Indagne statistica sul mercato dei componenti del mercato di condizionamento dell'aria - CO.AER. - April 2004 and May 2003 - [www.coaer.it](http://www.coaer.it)
- 3 ...: EU-Studie „Energieeffizienz von Raumklimageräten“ – Das ist die Basis für das Label-System. CCI 11/2001, S. 50, 52
- 4 Thomas, Carsten: *Messtechnische Betreuung und Bewertung solarthermisch betriebener Kälteanlagen*. Diplomarbeit am Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden, 2006, S. 55

Anhang

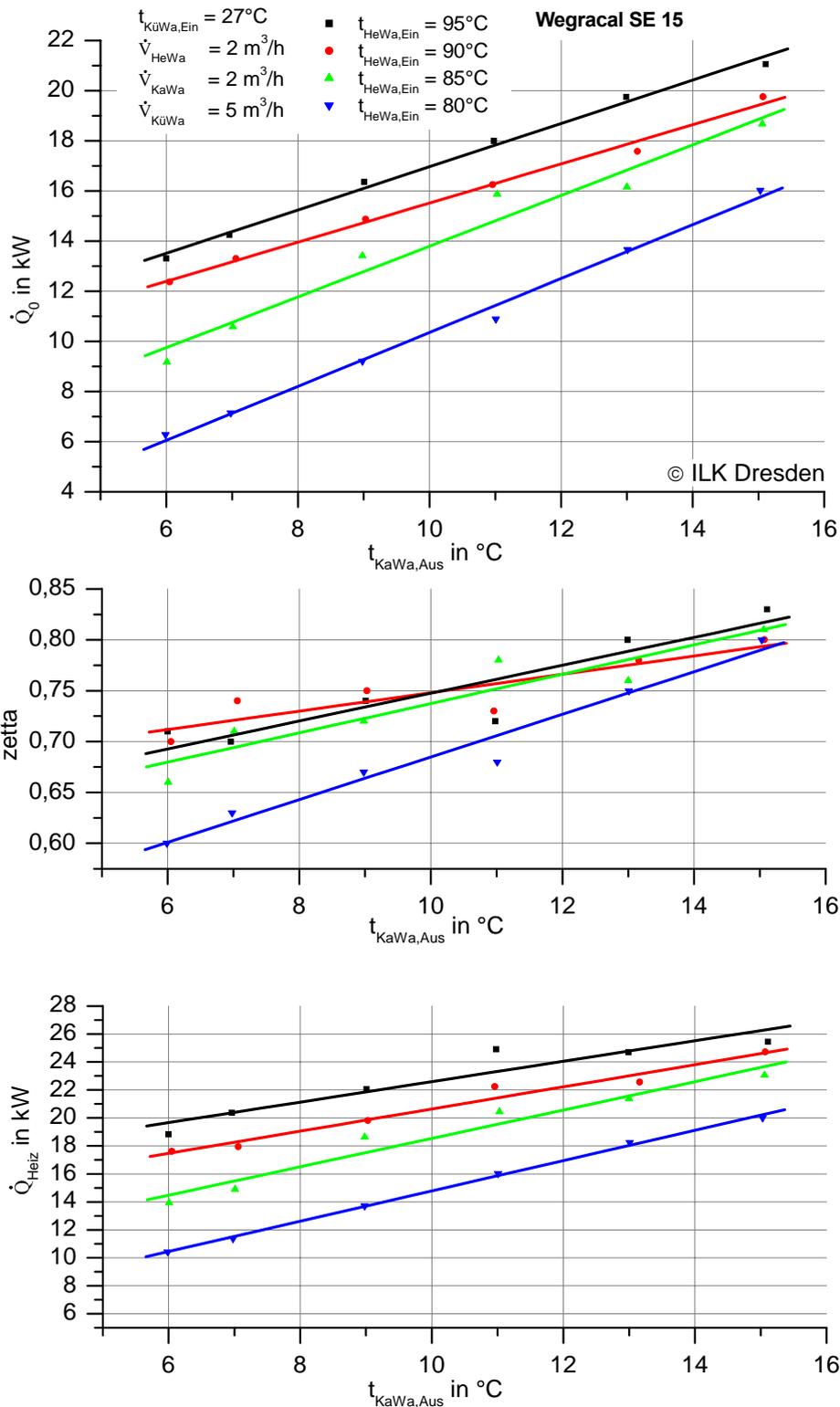


Abbildung 17: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 27°C

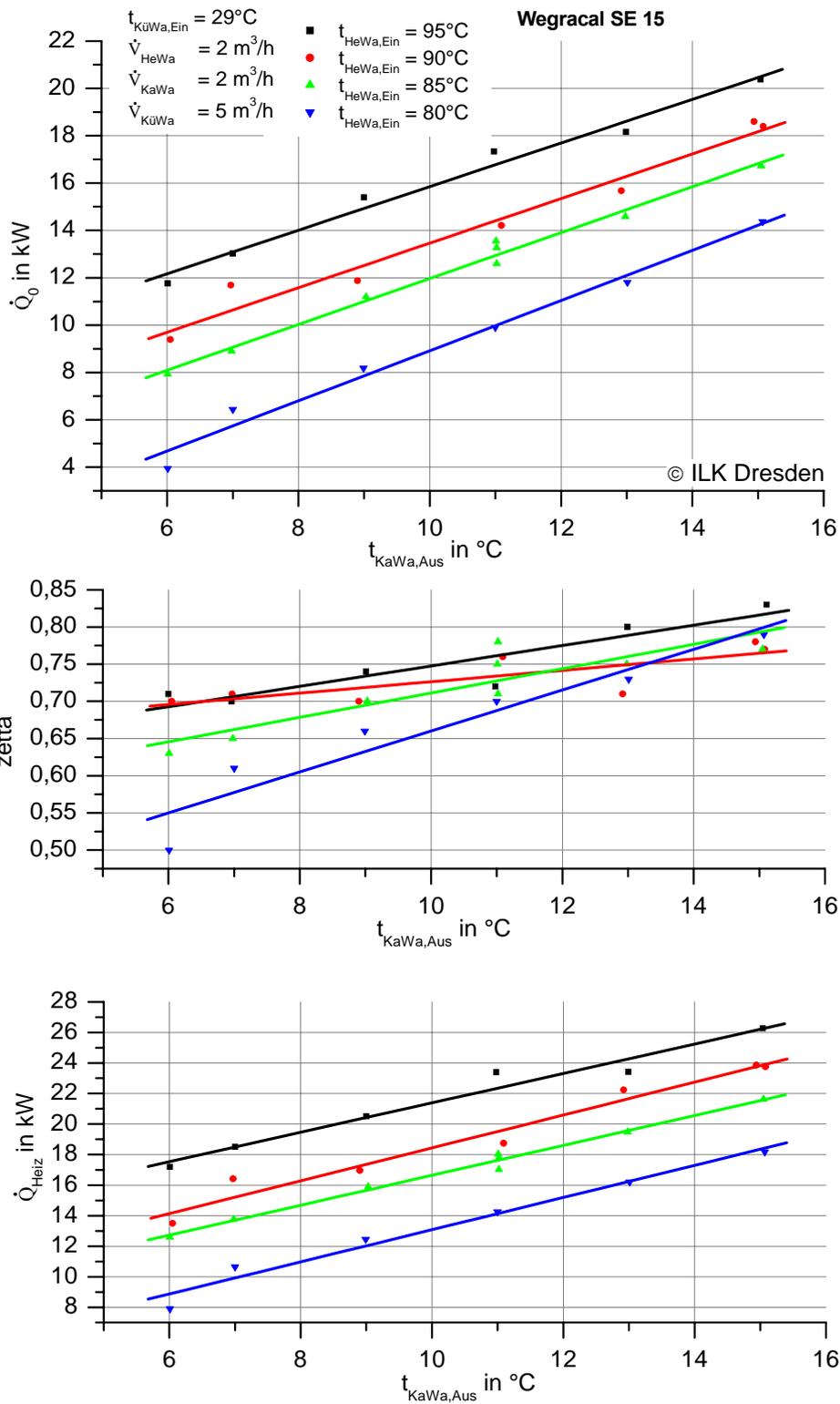


Abbildung 18: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 29°C

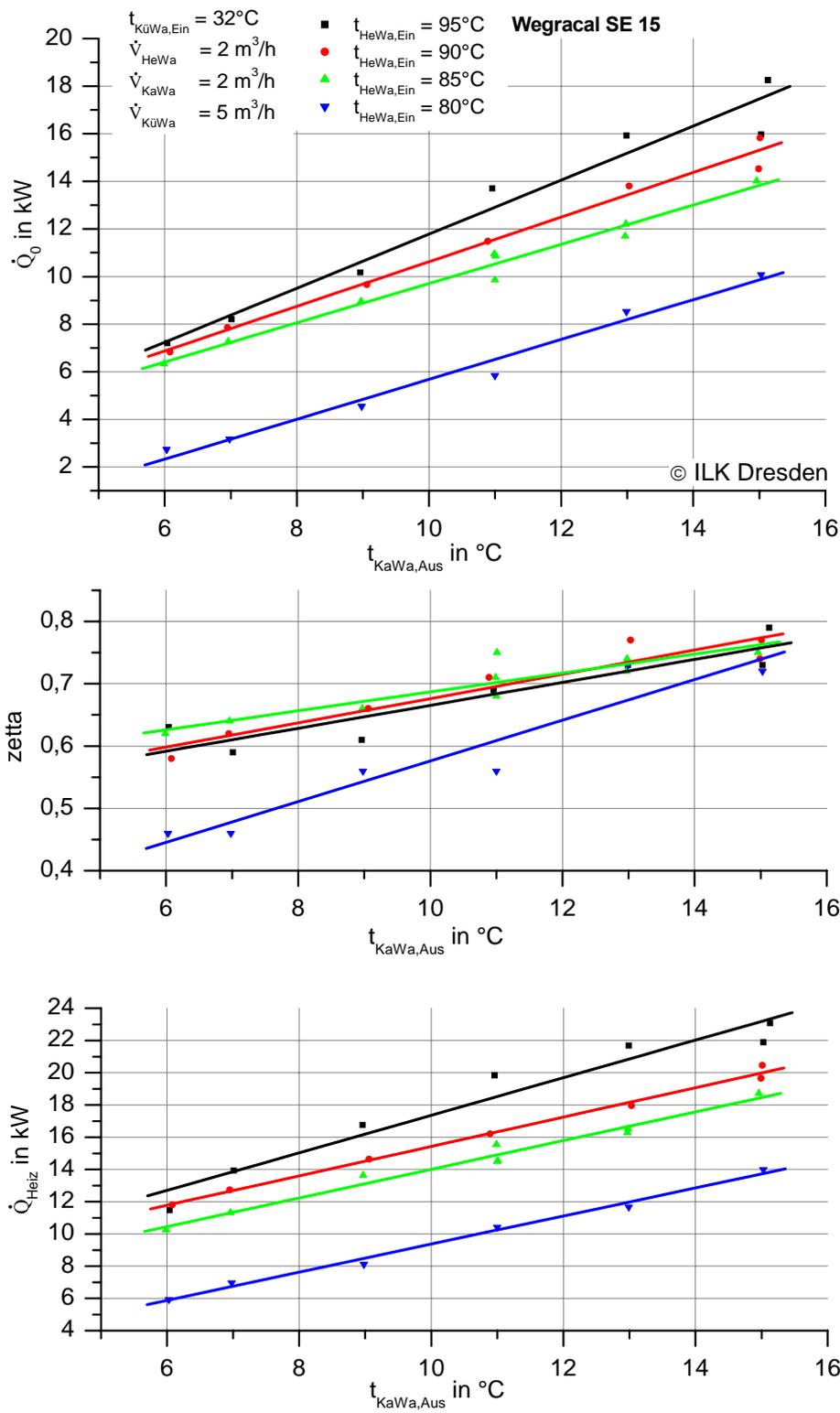


Abbildung 19: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 32°C

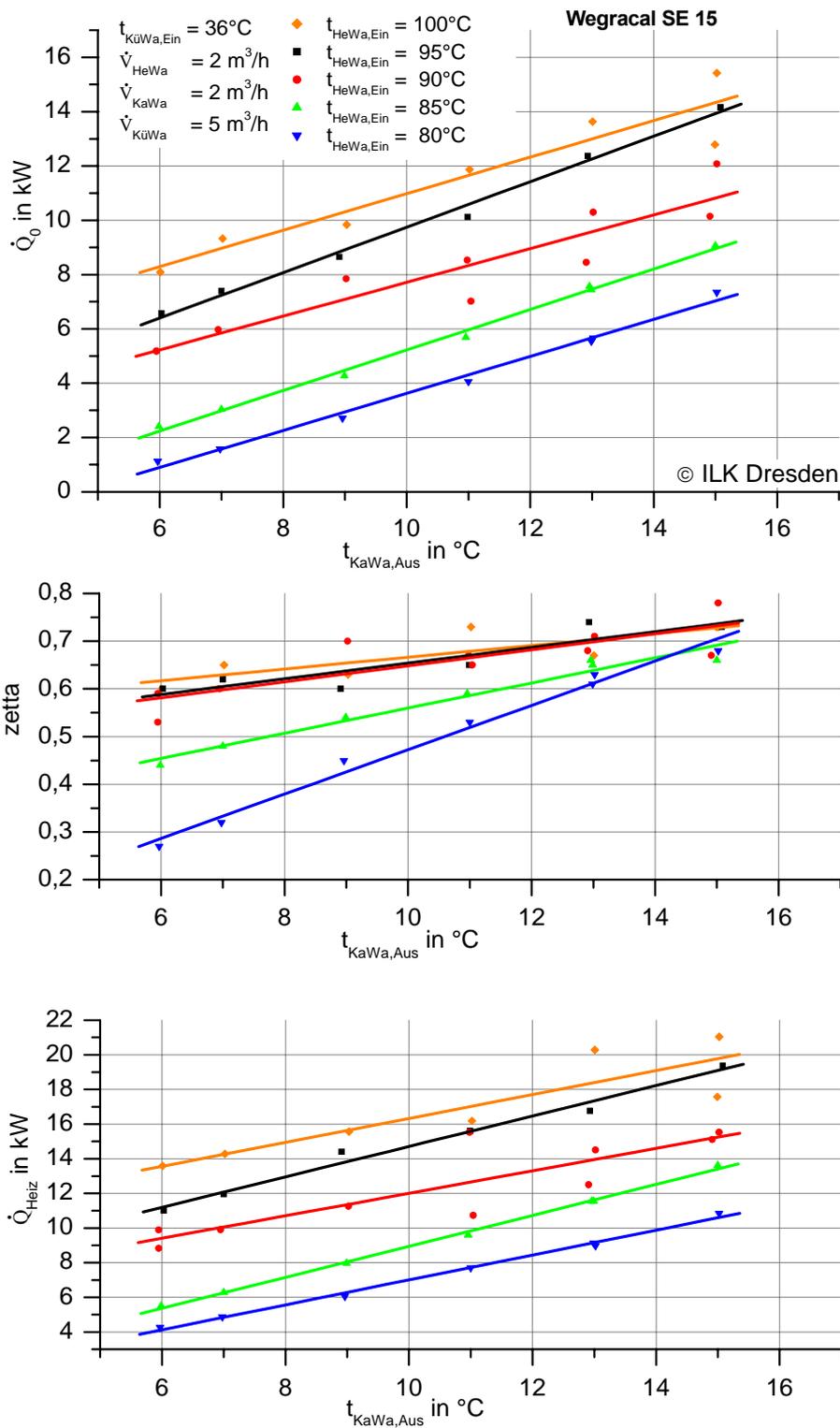


Abbildung 20: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von  $36^\circ\text{C}$

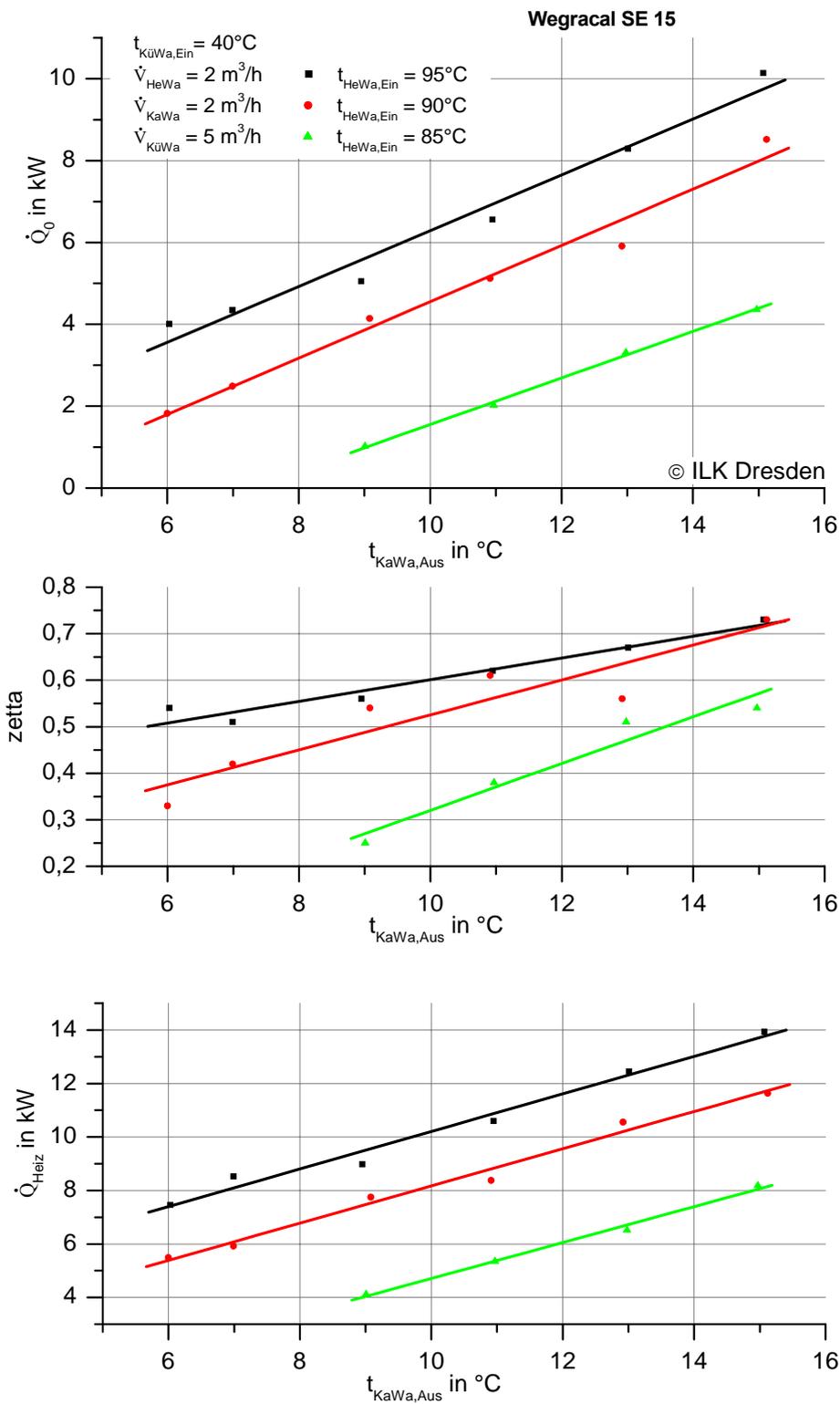


Abbildung 21: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und aufgenommene Heizleistung der KAKM für eine Kühlwassereintrittstemperatur von 40°C

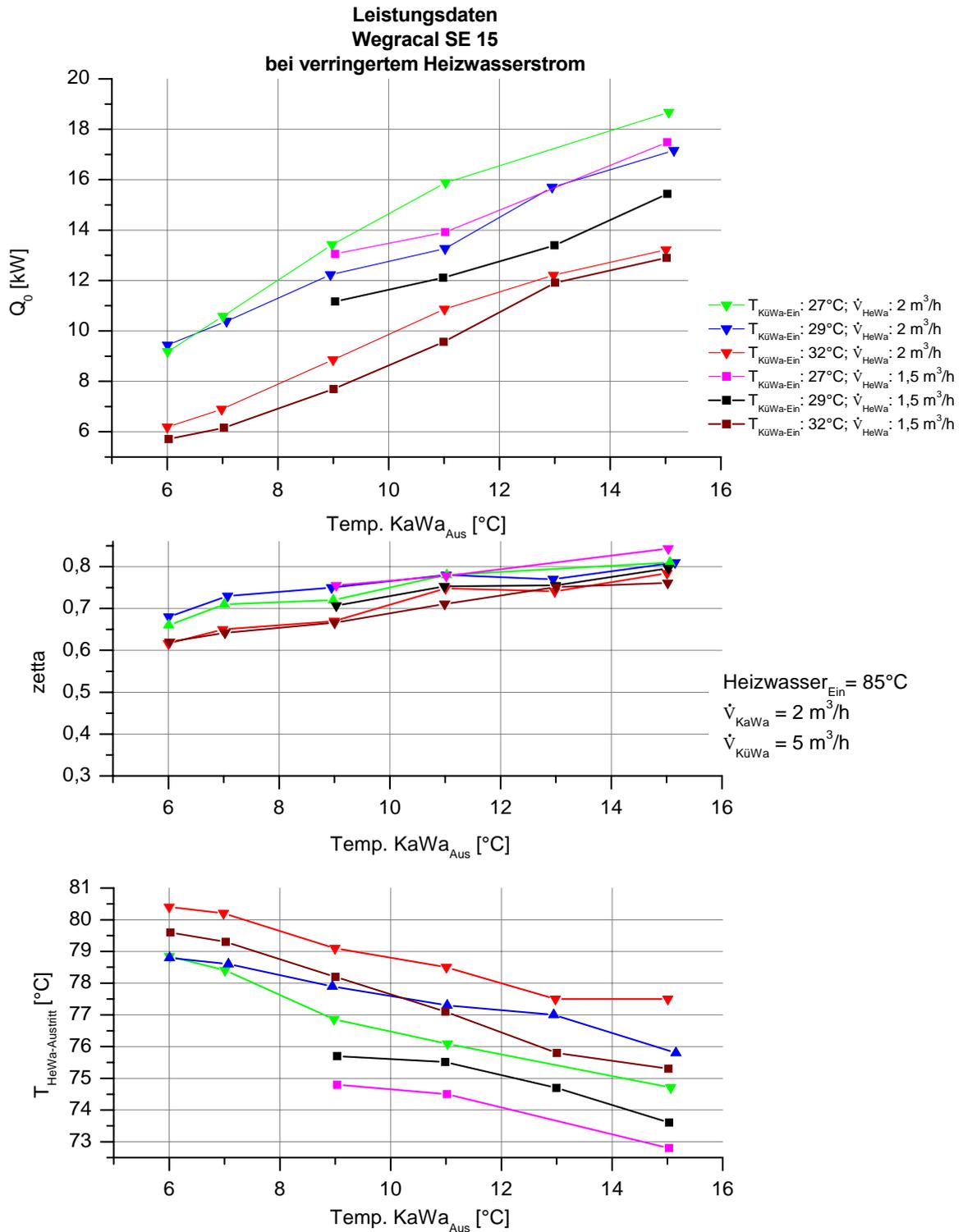


Abbildung 22: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und Heizwasseraustrittstemperatur der KAKM bei einer Heizwassereintrittstemperatur von 85°C sowie verschiedenen Heizwasservolumenströmen und Kühlwassertemperaturen

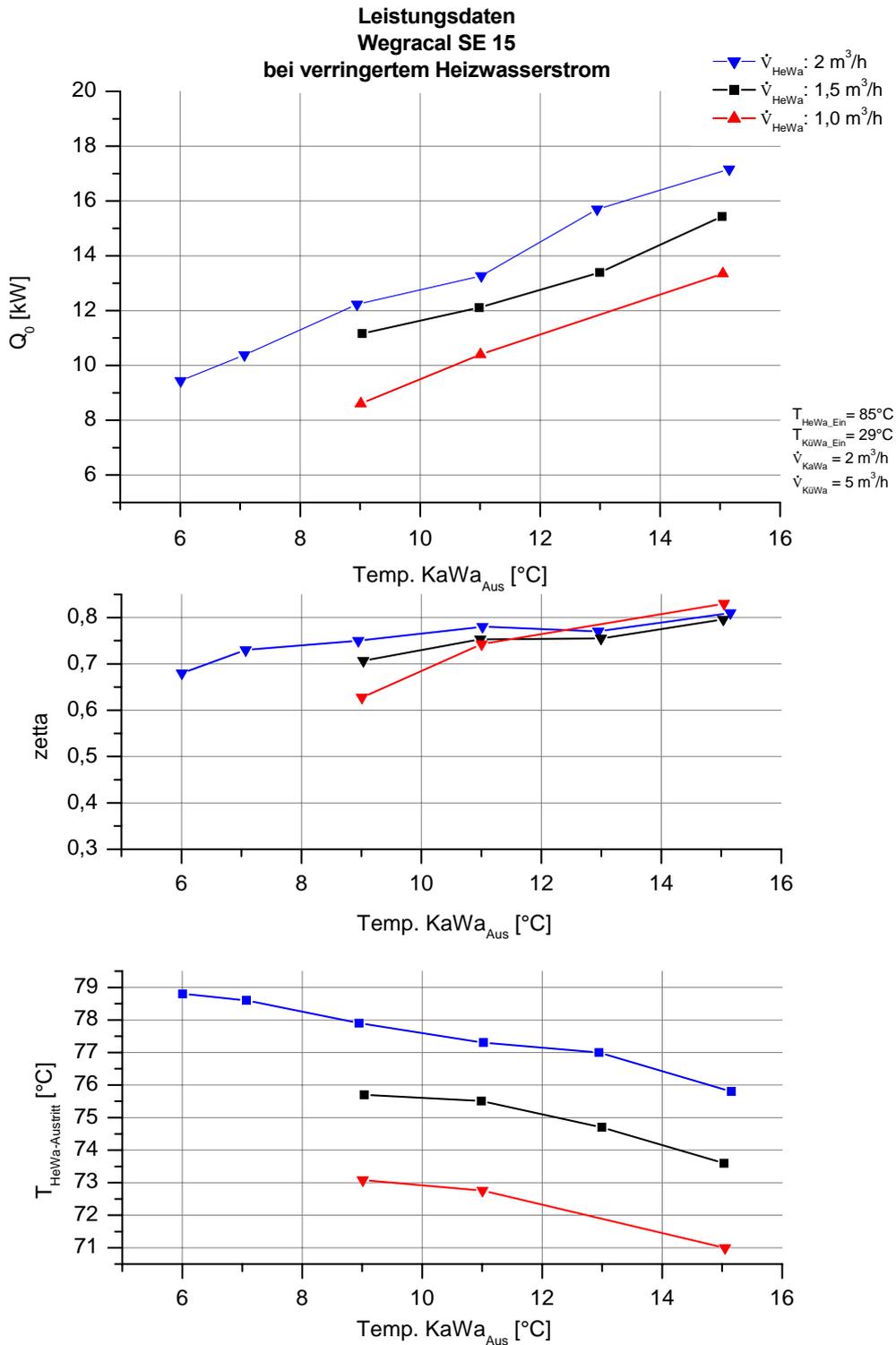


Abbildung 23: Kälteleistung, Wärmeverhältnis und Heizwasseraustrittstemperatur der KAKM bei einer Heizwassereintrittstemperatur von 85°C, Kühlwassereintrittstemperatur von 29°C sowie verschiedenen Heizwasservolumenströmen

Tabelle 11: Übersicht der Messstellen der solaren Kälteanlage am ILK Dresden

Messort Nr.	Ort	Messstelle	Ausgangssignal	Messbereich	Sensor
TR 1	Heizwasserkreis Eintritt	01_T_ HeWa EIN	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 2	Heizwasserkreis Austritt	02_T_ HeWa AUS	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 3	Kaltwasserkreis Eintritt	03_T_ KaWa EIN	RTD	0...30°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 4	Kaltwasserkreis Austritt	04_T_ KaWa AUS	RTD	0...30°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 5	Kühlwasserkreis Eintritt	05_T_ KüWa EIN	RTD	0...50°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 6	Kühlwasserkreis Austritt	06_T_ KüWa AUS	RTD	0...50°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 7	Kollektorkreis hyd. Wei- che Eintritt	07_T_ hyd.W EIN	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 8	Kollektorkreis hyd. Wei- che Austritt	08_T_ hyd.W AUS	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 9	Kollektorkreis PWÜ1 Eintritt	09_T_ WÜ1-KK EIN	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 10	Kollektorkreis PWÜ2 Austritt	10_T_ WÜ2-KK AUS	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 11	Kollektorkreis VSG	11_T_ VSG	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 12	Kollektorkreis MAG	12_T_ MAG	RTD	0...150°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 13	Kollektorfeld 1	13_T_ KF 1	RTD	-20...200°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 14	Kollektorfeld 2	14_T_ KF 2	RTD	-20...200°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 15	Kollektorfeld 3	15_T_ KF 3	RTD	-20...200°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 16	Kollektorfeld 4	16_T_ KF 4	RTD	-20...200°C	Pt 100; KI.A; 4-Leiter
TR 17	Notkühlkreis PWÜ2 Ein- tritt	17_T_ WÜ-NK EIN	4...20 mA	0...50°C	Pt 100
TR 18	Notkühlkreis PWÜ2 Aus- tritt	18_T_ WÜ-NK AUS	4...20 mA	0...50°C	Pt 100
TR 19	Rückkühler Luft Eintritt	19_T_ RK-Luft EIN	4...20 mA	-20...50°C	Pt 100
TR 20	Rückkühler Luft Austritt	20_T_ RK-Luft AUS	4...20 mA	-20...50°C	Pt 100
FIR 21	Heizwasserkreis	21_F_ HeWa	4...20 mA	0...2.5 m³/h	MID
FIR 22	Kaltwasserkreis	22_F_ KaWa	4...20 mA	0...2.5 m³/h	MID
FIR 23	Kollektorkreis	23_F_ Koll-Kreis	4...20 mA	0...2.5 m³/h	MID
PR 25	Kondensator	25_p_ Kond	4...20 mA	0...100 mbar(ü)	kapazitiver Keramiksensor
PR 26	Verdampfer	26_p_ Verd	4...20 mA	0...100 mbar(ü)	kapazitiver Keramiksensor
RR 27	Kollektorfeld	27_R_ Strahlung	4...20 mA	0...1500 W/m²	Siliziumsensor

## Logisch – ökologisch: Solarthermische Klimakälteanlage



Solarthermisch angetriebene Sorptionskältemaschinen stellen eine vielversprechende Möglichkeit zur Klimakälteerzeugung dar. Bis vor wenigen Jahren waren jedoch kaum geeignete Anlagen im kleinen Leistungsbereich verfügbar. Die Fa. EAW Energieanlagenbau und das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden entwickelten Niedertemperatur-Absorptionskältemaschinen im Leistungsbereich 50 bis 200 kW Kälteleistung und haben diese seit 2001 am Markt etabliert. Um auch Anwendungen mit geringerem Kältebedarf zu erschließen, entstand innerhalb einer anschließenden Entwicklung ein „Kleinabsorber“ mit einer Kälteleistung von 15 kW.

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes wurde in der Versuchshalle des ILK Dresden eine solarthermische Klimakälteanlage mit dem Kleinabsorber WEGRA-CAL SE 15 installiert. Die Anlage dient der Demonstration dieser Technologie sowie der Bestimmung der

Leistungsfähigkeit der Anlage unter realen Betriebsbedingungen. Nach Abschluss der Installation im Spätsommer 2005 ist das System inzwischen erfolgreich in Betrieb gegangen. Im Rahmen einer Einweihungsveranstaltung wird das System der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt. In einigen kurzen Vorträgen wird auf aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Solarthermie sowie solarthermische und photovoltaische Kälteerzeugung eingegangen.

Dazu laden wir Sie herzlich am 18. Juli 2006 ein. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Versuchs- und Demonstrationsanlagen zu besichtigen. Zudem bietet diese Veranstaltung die Gelegenheit zu Fragen und Gesprächen zwischen den Teilnehmern. Wir freuen uns auf Ihr Kommen.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Ralf Herzog,  
Geschäftsleitung

**ILK Dresden**

**Programm**

10:00 Begrüßung und Einführung  
ILK Dresden – Innovationen für die Zukunft  
Dr. Ralf Herzog, ILK Dresden

10:30 Technologieüberblick Solare Kühlung und Vorstellung der Auslegungssoftware SolAC  
Prof. Uwe Franke, ILK Dresden

11:00 Solarthermische Anwendungen im Hoch- und Niedertemperaturbereich  
Christoph Fark, Schott AG

11:20 Niedertemperatur-Absorptionskältemaschinen zur Klimakälteerzeugung  
Gregor Weidner, EAW

11:40 Solare Klimakälteanlage am ILK Dresden – Zielstellung und Besonderheiten  
Dr. Mathias Safarik, ILK Dresden

12:00 Solare Kühlung autark - PV Kühlcontainer  
Dr. Jörg Waschull, ILK Dresden

12:30 Mittagspause

13:30 Besichtigung der solarthermischen Klimakälteanlage sowie der PV-Kühlcontainer

14:30 Ende der Veranstaltung

Bitte teilen Sie uns bis spätestens 3. Juli 2006 per Telefax oder E-Mail mit, ob Sie an der Einweihung teilnehmen.

Abbildung 24: Ausschnitt der Einladung zur Einweihungsveranstaltung am ILK Dresden

**NACHRICHTEN**

**Centrosolar beteiligt sich an chinesischem Modulhersteller**

Die Centrosolar AG setzt ihre Einkaufsförderung fort (siehe SWW 6/2006, S. 14). Laut einer Pressemitteilung erwarb das Münchner Unternehmen für 800.000 € einen Anteil von 10% an dem chinesischen Modulhersteller Jumao Photonic, Xiamen. Das Geld soll zum Ausbau der Produktionskapazität eingesetzt werden. Die Unternehmen arbeiten seit knapp

fünf Jahren zusammen. Jumao half unter anderem bei der Beschaffung von Solarzellen von drei großen Herstellern aus Taiwan und weiteren Herstellern aus Südkorea. «Rufen durch die vergünstigten Einkaufsbedingungen rechnen sich unser Engagement», sagt Centrosolar-Vorstand Alexander Kirsch. Mittelfristig soll China ein wichtiger Absatzmarkt werden.

**Solarthermisches Kraftwerk für Jülich**

Auf dem Gelände der Stadt Jülich soll ein Solarthermiekraftwerk als Versuchs- und Demonstrationsprojekt mit einer elektrischen Leistung von 1,5 MW entstehen. Am 4. Juli wurden im Rahmen einer Pressekonferenz an dem Solar-Campus in Jülich Einzelheiten des Projektes bekannt gegeben. Das von der Stadtwerke Jülich betriebene Solarthermiekraftwerk soll in zwei Jahren fertiggestellt sein. Die insgesamt 21,7 Mio. € teure Anlage wird von den Stadtwerken Jülich zusammen mit dem Solar-Institut Jülich, der Fachhochschule Aachen, der Stadt Jülich, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und den Kraftanlagen München geplant. Die Bundesländer Bayern und Nordrhein-Westfalen sowie das Bundes-

umweltministerium fördern das Projekt mit insgesamt 10,6 Mio. €. Wie www.jw.de berichtet, handelt es sich bei dem Solarthermiekraftwerk um ein konventionelles Dampfkraftwerk mit solarer Feuerung. Die bislang mit Öl, Gas oder Kohle beheizte Kesselkammer wird durch eine solare Brennkammer ersetzt. Ein rund 20.000 m<sup>2</sup> großes Spiegelgefild wird die Sonnenstrahlen auf einen Empfänger an der Spitze des 50 m hohen Solarturns bündeln. Die so entstehenden hohen Temperaturen werden zur Dampferzeugung genutzt und von einer Turbine schließlich in Strom umgewandelt. Schwankungen im Leistungsangebot der Sonnenstrahlung soll ein neuartiger Speicher ausgleichen.



Das Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) weihte am 18. Juli mit etwa 60 Gästen seine mit 45 m<sup>2</sup> Kollektorfläche betriebene Sorptionskältemaschine ein. Der Anlagentyp der EAW Energieanlagenbau mit einer Kälteleistung von 15 kW ist seit zwei Jahren auf dem Markt. Das ILK hat außer der Anlage am Institut, die bereits seit Beginn dieses Sommers in Betrieb ist, die wissenschaftliche Begleitung für zwei weitere Anlagen übernommen. Foto: ILK

**Berichtigung**

In der Tabelle 1 des Artikels «Früher geht's nicht aus Sonne Wind & Wärme» 7/2006, S. 38, ist uns ein Fehler unterlaufen: Natürlich beträgt die Rücklauftemperatur des System 014-2 FEW Typ 20 von Sandier nicht 156 °C sondern 15,6 °C. Zudem wird ab Oktober das System Vario Fresh-Eco FWE 20 für 1.480 € angeboten, das das System 014-2 langfristig ersetzen soll.



**Formteile**

www.innovar.ch  
CH-1791 Courtaman, Schweiz  
Tel. +41 26 684 32 08

**INNOVAR**  
Technik innovativ.

**AKTUELL**

**ILK Dresden**

**Kälte aus der Sonne**



Am 18. Juli 2006 wurde am Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) in Dresden eine solarthermisch betriebene Klimakälteanlage eingeweiht. Derartige Sorptionskältemaschinen stellen eine vielversprechende Möglichkeit zur Kälteerzeugung dar. Bis vor wenigen Jahren waren jedoch kaum geeignete Anlagen im kleinen Leistungs-

bereich verfügbar. Die Fa. EAW Energieanlagenbau und das ILK Dresden entwickelten Niedertemperatur-Absorptionskältemaschinen im Leistungsbereich 50 bis 200 kW Kälteleistung und haben diese seit 2001 am Markt etabliert. Um auch Anwendungen mit geringerem Kältebedarf zu erschließen, entstand innerhalb einer anschließenden Entwicklung ein „Kleinabsorber“ mit einer Kälteleistung von 15 kW.

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes wurde in der Versuchshalle des ILK Dresden eine solarthermische Klimakälteanlage mit dem Kleinabsorber Wegracal SE 15 installiert. Die Anlage dient der Demonstration dieser Techno-

logie sowie der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der Anlage unter realen Betriebsbedingungen. Nach Abschluss der Installation im Spätsommer 2005 ist das System inzwischen erfolgreich in Betrieb gegangen. Im Rahmen einer Einweihungsveranstaltung wurde das System der Öffentlichkeit vorgestellt. In einigen kurzen Vorträgen wurde zudem auf aktuelle Entwicklungen aus den Bereichen Solarthermie sowie solarthermische und photovoltaische Kälteerzeugung eingegangen.



**bau | il | verlag**  
Springer BauMedien

Rußler, Sim, Telefon +49(0)5241-80-36-46  
Fax +49(0)5241-80-426-48  
ruessler.sim@springer.com

Leiter Verlagskommunikation  
Burkhard Probst, Telefon +49(0)5241-80-2111

Redaktionsleiter:  
Ruth Niederl, Telefon +49(0)5241-80-1036  
ruth.niederl@springer.com

Anzeigenleiter:  
Annette Ewers, Telefon +49(0)5241-80-5308  
www.werbung@springer.com

Layout:  
Arjo Klammeter, Telefon +49(0)5241-80-2889

Anzeigenpreise:  
Annette Ewers, Telefon +49(0)5241-80-5308  
www.werbung@springer.com

(verantwortlich für den Anzeigenteil)

Geschäftsführer:  
Sören Küling, Telefon +49(0)5241-80-2476

Verlagsleiter:  
Boris Scheide-Bünnes, Telefon +49(0)5241-80-2132

Verlagsleiter Anzeigen:  
Christoph Arnold, Telefon +49(0)5241-80-2513

Verwaltung:  
Gerd Höhnke-Schubert, Telefon +49(0)5241-80-2187

Vertriebsleiter:  
Peter Krüger, Telefon +49(0)5241-80-5871

Verkaufung:  
Gabry Porzig, Telefon +49(0)5241-80-2147,  
Fax +49(0)5241-80-42147

Leser-service und Abonnements:  
Abonnements können direkt beim Verlag oder bei jeder Buchhandlung bestellt werden.  
Bauverlag BV GmbH,  
Amnesteder Straße 25, 13311 | Gieseler, Deutschland

Der Leserservice ist von Montag bis Freitag persönlich erreichbar von 9.00 bis 12.00 und von 13.00 bis 17.00 Uhr (Freitag bis 16.00 Uhr).  
Telefon +49(0)5241-80-2133  
Fax +49(0)5241-80-2133  
\*0,12 € pro Minute aus dem deutschen Festnetz  
& Plus-Netzen von Montag bis Freitag

Bezugspreise und -art:  
KKA: Kälte Klima Aktuell erscheint mit 6 Ausgaben sowie 1 Ausgabe KKA Großdruck pro Jahr.  
Jahresabonnement (inklusive Versandkosten und ggf. elektronischer Beleglieferung):  
Inland Euro 72,00  
Studenten Euro 47,40  
Ausland Euro 74,80 Luftpost  
Erschließung Euro 14,00 (einmalig Versandkosten)  
Ein Abonnement gilt zunächst für 12 Monate und ist danach mit einer Frist von 4 Wochen vor Ablauf eines Halbjahres schriftlich kündbar.

Veröffentlichungen:  
Zum Abdruck vorgenommene Beiträge und Abbildungen gehen im Rahmen der gesetzlichen Bestimmungen in das Eigentum des Verlegers über. Die Verantwortung für die Richtigkeit der Beiträge über Überlieferungen und Kürzungen liegt im Einzelfall beim Verfasser. Für unvollständige oder unrichtige Angaben übernimmt der Verlag keine Gewähr. Die inhaltliche Verantwortung für die Richtigkeit der Beiträge übernimmt der Verfasser. Honorare für Verlagsbeiträge werden nur in den Fällen der Rechte gemäß der Zensur- und alle in für anhebenden Beiträge und Abbildungen und unrichtig ist, wird der Verfasser der gesetzlich zugewiesenen Fälligkeit eine Verletzung oder Verweigerung eines Zustimmungs des Verlegers sein. Das gilt auch für das Erlassen und Übertragen in Form von Daten.  
Die geltenden Geschäftsbedingungen des Bauverlags finden Sie vollständig unter www.bauverlag.de

Druck: Herber Druck, Chemnitz

Abbildung 25: Presseberichte zur Einweihungsveranstaltung am ILK Dresden