

## **Abschlussbericht**

zum Forschungsvorhaben:

**„EnEff: Wärme – Absorptionskälteanlage für Niedertemperaturfernwärme;  
Entwicklung einer Pilotanlage“**

***Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines  
Beschlusses des Deutschen Bundestages***

**Förderkennzeichen:** 0327496A

**Zuwendungsempfänger:** Technische Universität Ilmenau  
Institut für Thermo- und Fluidodynamik

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.04.2009 bis 30.09.2013

**Bearbeiter:** Prof. Dr.-Ing. habil. Salman Ajib  
Dipl.-Ing. Wolfgang Günther

**Fachgebietsleiter:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. rer. nat. habil. André Thess

**Abgabetermin:** 31.03.2014

***Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor***

## Vorwort

Kälte- und Klimaanlage werden heute in vielen Lebensbereichen eingesetzt. So findet man sie in Privathaushalten genauso wie im Gewerbe, Industrie und Handel. Sie dienen zum einen der Klimatisierung von Räumen und zum anderen zur Kühlung diverser Prozesse und Produkte. Der Anteil der Kälteerzeugung nimmt mit zunehmender Industrialisierung und steigenden Klimatisierungsansprüchen stetig zu. Ziel muss es sein, durch Forschung und Entwicklung die Effektivität der Kälteerzeugung zu erhöhen um somit die Umwelt besser zu schonen und die fossilen Ressourcen zu schützen.

Herkömmliche Kälteerzeugungsanlagen arbeiten mit relativ hohem innerem Wirkungsgrad. Die Antriebsenergie muss jedoch in Kraftwerken verlustreich erzeugt und über weite Strecken transportiert werden. Der Einsatz thermischer Kompressoren stellt eine Möglichkeit zur Nutzung anfallender Abwärme, Solarenergie oder Fernwärme dar. Für viele Anwendungsfälle in der Kälte- und Klimatechnik bieten die Absorptionskältemaschinen gut angepasste Lösungen.

Die Nutzung der Fernwärme in den Sommermonaten als Antriebsenergie für die Absorptionskälteanlage stellt einen Sonderfall der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung dar. Die benötigte Kaltwassermenge wird aus wirtschaftlich und umweltverträglich erzeugter Fernwärme mit einem geringen Aufwand an Primärenergie hergestellt. Durch diesen effizienten Einsatz von Fernwärme ist eine ganzjährige Auslastung der Wärmeerzeugungsanlagen sowie eine wirtschaftliche Nutzung des Fernwärmenetzes gewährleistet.

Ziel des Forschungsprojekts ist, die im Sommer im Fernwärmenetz der Stadt Bad Blankenburg vorhandenen, relativ hohen Rücklauftemperaturen des Heizwassers von ca. 75 °C mittels Absorptionskältemaschine zur Erzeugung von Kälte zu nutzen und den Privathaushalten sowie dem Gewerbe für Klimatisierungszwecke dezentral zur Verfügung zu stellen. Zur Realisierung dieses Zieles wurde eine Pilotabsorptionskälteanlage ausgelegt, beim Industriepartner aufgebaut, in Betrieb genommen und zum größten Teil durch beide Projektpartner, TWA Wärmeanlagenbau Thür. GmbH & Co. KG, Bad Blankenburg und der Technische Universität Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Arbeitsgruppe Kälte- und Klimatechnik, auf die Funktionsfähigkeit getestet. Die Hauptuntersuchungsergebnisse sind im vorliegenden Bericht enthalten. Das Gesamtziel wurde durch enge Zusammenarbeit der Projektpartnern zum größten Teil erreicht.

Dieser Bericht beinhaltet die Hauptergebnisse der Voruntersuchungen am Absorptionsversuchsstand der TU Ilmenau und an dem gebauten Funktionsmuster des TWA Bad Blankenburg, ihre Auswertung und die daraus abgeleiteten Aufschlüsse. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die durch den Industriepartner TWA Wärmeanlagenbau Thür. GmbH & Co. KG, Bad Blankenburg aufgebaute Absorptionskälteanlage mit Niedertemperatur-Fernwärme betrieben werden kann. Allerdings konnten die berechneten Auslegungsparameter nicht erreicht werden. So konnte bei einer Heizwasser-Eintrittstemperatur von 71 °C und einer Kühlwasser-Eintrittstemperatur von ca. 24 °C eine Kälteleistung von ca. 4 kW erzielt werden. Das Wärmeverhältnis betrug dabei 0,35.

Aufgrund der Verzögerungen beim Aufbau des Funktionsmusters konnten keine Versuche mit dem Arbeitsstoffpaar Aceton/Zinkbromid durchgeführt werden. Diese werden in Abstimmung mit dem Industriepartner später durchgeführt.

*Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert und vom Projektträger Jülich ständig unterstützt. An dieser Stelle möchten sich die Autoren bei beiden Einrichtungen recht herzlich bedanken. Einen besonderen Dank gebührt dabei Frau Sabine Dramaix und Herrn Dr. Carsten Magaß. Einen weiteren Dank gilt auch den Projektpartnern TWA Wärmeanlagenbau Thür. GmbH & Co. KG, Bad Blankenburg für die gute Zusammenarbeit.*

**Inhaltsverzeichnis**

1	<u>Aufgabenstellung</u> .....	3
2	<u>Stand der Technik und Entwicklung mit Niedertemperatur angetriebener Kältemaschinen mit Leistungen bis 20 kW</u> .....	5
3	<u>Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Absorbers</u> .....	9
3.1	Beurteilung der Absorberberieselung der alten AbKM bei TWA..... ( <i>BMW-Projekt: 0327320A</i> )	10
3.2	Untersuchungen zur Verbesserung des Wärme- und Stofftransports des Absorbers am Versuchsstand der TU Ilmenau .....	10
3.2.1	Aufbau des Versuchsstands .....	10
3.2.2	Versuchsdurchführung .....	11
3.2.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Berieselungsstärke .....	13
3.2.4	Ergebnisse der Untersuchungen unterschiedlicher Absorberrohre.....	15
3.2.5	Zusammenfassung der Berieselungsuntersuchungen.....	15

**Die Abschnitte 4 bis 6 sind vertraulich**

7.	<u>Zusammenfassung</u> .....	53
8.	<u>Quellenverzeichnis</u> .....	54

## 1 Aufgabenstellung

Durch die dynamische wirtschaftliche Entwicklung und den gestiegenen Komfortanspruch im gewerblichen als auch im privaten Bereich steigt der Energiebedarf für Klimatisierung in Gebäuden und Kälteerzeugung in der Industrie bzw. dem Gewerbe weltweit stetig an. Die durch den Einsatz herkömmlicher Kompressionskältemaschinen verursachten Spitzenlasten, bringen bereits jetzt weltweit die Stromnetze an ihre Grenzen. Vor diesem Hintergrund erhält die Gebäudeklimatisierung auf Basis thermisch angetriebener Kältemaschinen einen besonders Bedeutung. Als thermische Antriebsquelle wird heutzutage sehr oft Solarenergie oder Abwärme aus technischen Prozessen genutzt. In diesem Bericht steht die Verwendung von nieder-temperiertem Rückkühlwasser aus Fernwärmenetzen zum Antrieb einer Absorptionskältemaschine im Vordergrund.

Zurzeit werden zur Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden und Räumen vorrangig Kompressionskältemaschinen (KKM) eingesetzt. Bei Raumklimageräten kleiner Leistung (ca. 2 bis 5 kW) handelt sich ausschließlich um derartige Kältemaschinen. Die japanische Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA) hat für den kleinen Leistungsbereich bis 5 kW für Wohn- sowie Verwaltungsgebäude im Jahr 2008 einen weltweiten Absatz von ca. 82 Mio. Geräten angegeben, davon 8,6 Mio. in Europa (siehe folgende Abb. 1).

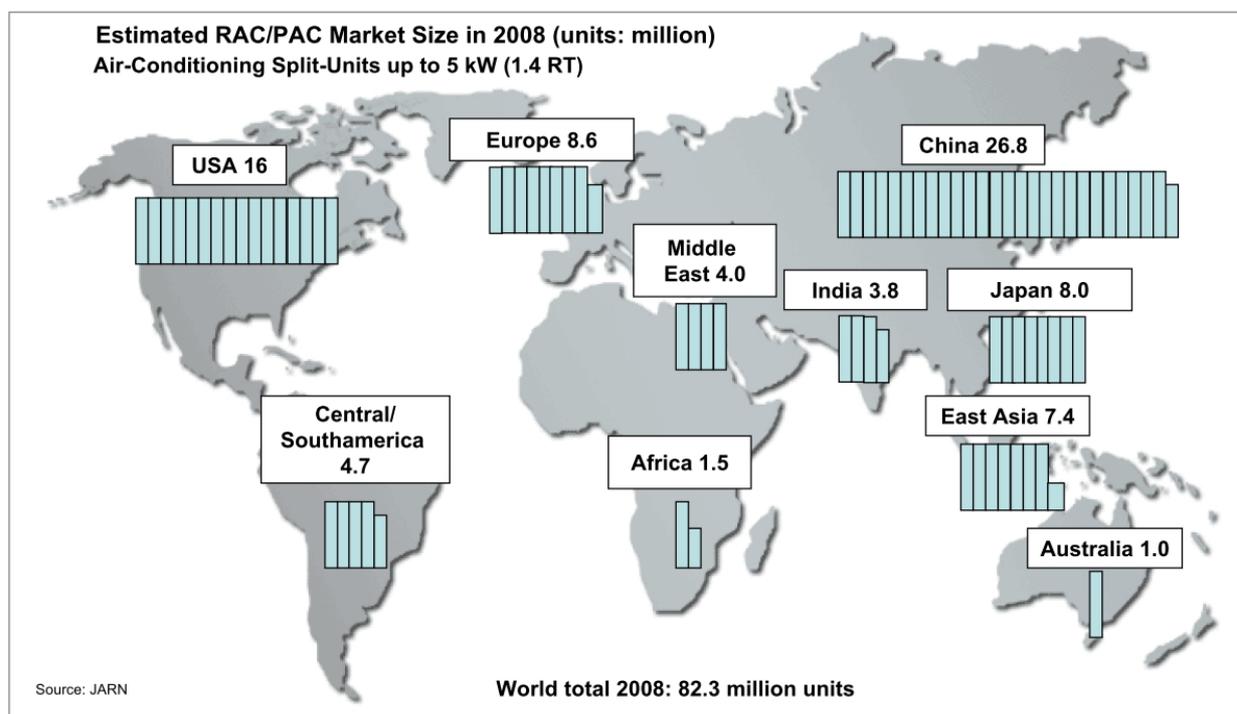


Abb. 1: Produktion von Air Conditioning (RAC+PAC)<sup>1</sup> /1/

Die Kompressionskältemaschinen weisen zwei große Nachteile auf – ihren hohen Stromverbrauch und demzufolge ihren negativen Einfluss auf die Umwelt. Die früher ozonschädlichen Kältemittel dieser Anlagen werden nach und nach durch FCKW-freie Ersatzstoffe substituiert, die jedoch auch nicht gänzlich unproblematisch für das Erdklima sind. Der hohe Stromverbrauch führt zu einer erhöhten Emission von CO<sub>2</sub>-Gasen, die auf Grund der weltweiten Erwärmung der Erdoberfläche ebenfalls zur Klimabeeinflussung beitragen. Zum anderen verursacht der Stromverbrauch Probleme bei der Stromversorgung, da er gerade zu Spitzenlastzeiten abgerufen wird. Es kann zu regionalen Engpässen kommen, die bis zur Unterbrechung des Stromnetzes führen können.

<sup>1</sup> RAC - Room Air Conditioner, PAC – Package Air Conditioner

Wie die Abb. 2 zeigt, ist zudem mit einer weiteren Erhöhung des Einsatzes derartiger Klimatisierungsgeräte zu rechnen. So betragen die jährlichen Zuwachsraten auf diesem Sektor in den letzten Jahren über 10 %.

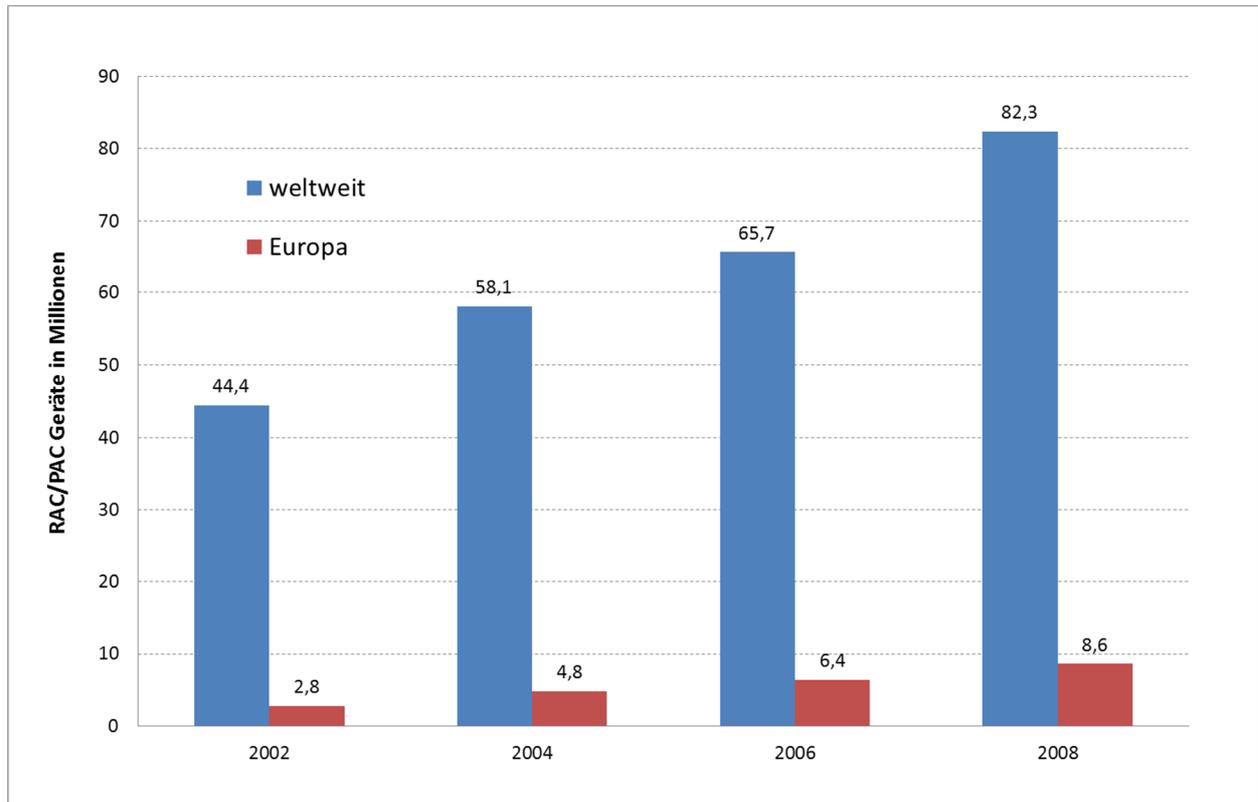


Abb. 2: Herstellungszahlen von RAC+PAC Geräten der Jahre 2002 bis 2008 /1/

Eine umweltfreundlichere Lösung wäre der Einsatz von Adsorptions- oder Absorptionskälteanlagen. Die Kühlung mit Niedertemperatur angetriebenen Absorptionskältemaschinen auf Basis von Solarenergie oder wie in unserem betrachteten Fall mit Restwärme aus dem Fernleitungsnetz, bietet hingegen eine nachhaltige, innovative Alternative.

Traditionell werden Absorptionskälteanlagen für den Bereich mittlerer Leistungen (ab 100 kW aufwärts) bis hin zu sehr großen Kälteleistungen (Megawatt Bereich) sowie extrem kleinen Kälteleistungen (< 100 W) für Kühlschränke mit jeweils speziellen Technologien entwickelt. Im Leistungsbereich von ca. 5 bis 20 kW zeichnet sich erst in den letzten fünf Jahren ein Anstieg der Gerätehersteller ab. Diese nutzen zur Kälteerzeugung überschüssige Abwärme aus industrieller Produktion bzw. niedertemperierte Wärme oder solare Wärme. Die optimale Antriebstemperatur liegt dabei meist bei 85 °C und höher.

Das Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes besteht darin, ein Funktionsmuster einer Absorptionskälteanlage mit einer Kälteleistung von 15 kW zu entwerfen, zu bauen und experimentell zu erproben. Als Antriebsenergie soll niedertemperierte Wärme aus dem Rücklauf des Fernwärmenetzes der Stadt Bad Blankenburgs mit einer Temperatur von ca. 75 °C verwendet werden. Der vorgesehene Einsatzbereich dieser Kältemaschine liegt in der Klimatisierung von Räumen in Einfamilienhäusern und anderen kleinen, auch gewerblich genutzten, Gebäuden. Die Herausforderung besteht darin, eine kostengünstige und zuverlässige Lösung zu erarbeiten. Neue technische und technologische Ansätze sind erforderlich, um einen optimalen Betriebszustand einer solchen Kälteanlage zu gewährleisten.

## 2 Stand der Technik und Entwicklung mit Niedertemperatur angetriebener Kältemaschinen mit Leistungen bis 20 kW

Absorptionskälteanlagen kleinerer Leistung, sind bislang relativ wenig realisiert worden. Das liegt vor allem daran, dass in diesem Leistungssektor nur wenige industriell gefertigte Absorptionskältemaschinen existierten. Erst in letzter Zeit zeigt sich, dass immer mehr Hersteller auch für diesen Leistungsbereich Kältemaschinen anbieten /2, 3/. Handelte es sich früher meist um Prototypen oder Geräte, die einem größeren Feldtest unterzogen werden, existieren heutzutage bereits über zehn Produkte von nationalen und internationalen Herstellern.

Die hauptsächliche Entwicklung erfolgt in zwei Richtungen der Kältetechnik:

- der Entwicklung von Absorptionskältemaschinen (AbKM) mit herkömmlichen Arbeitsstoffpaaren  $H_2O/LiBr$  bzw.  $NH_3/H_2O$  und
- der Entwicklung von Adsorptionskältemaschinen (AdKM) mit einer Zeolith oder Silica gel Füllung als Adsorptionsmittel.

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Produzenten von derartigen Absorptionskältemaschinen dargestellt. Offenen sorptionsgestützten Kälteanlagen – sogenannte DEC-Anlagen (Desiccative and Evaporative Cooling) - sollen hier nicht weiter betrachtet werden.

Hersteller	Land	Typ	Medien	Produkt	Leistung	Bemerkung
Yazaki Tokyo	Japan	AbKM	$H_2O/LiBr$	WFC-SC5	17,5 kW	<a href="http://www.yazaki-airconditioning.com">www.yazaki-airconditioning.com</a>
Energieanlagenbau Westenfeld	Deutschland	AbKM	$H_2O/LiBr$	Wegracal SE15	15 kW	<a href="http://www.energieanlagenbau.de">www.energieanlagenbau.de</a>
Sonnenklima Berlin	Deutschland	AbKM	$H_2O/LiBr$	suninverse 10	10 kW	<a href="http://www.sonnenklima.de">www.sonnenklima.de</a>
Thermax Pune	Indien	AbKM	$H_2O/LiBr$	LT 0.5	17,5 kW	<a href="http://www.thermaxindia.com">www.thermaxindia.com</a>
ClimateWell Stockholm	Schweden	AdKM	$H_2O/LiCl$	Climatewell 10	10 kW	<a href="http://www.climatewell.com">www.climatewell.com</a>
PinkChiller Langenwang	Österreich	AbKM	$NH_3/H_2O$	PC19	19 kW	<a href="http://www.pink.co.at">www.pink.co.at</a>
Invensor Berlin	Deutschland	AdKM	$H_2O / Zeolith$	LTC 10 plus HTC 18 plus	10 kW 18 kW	<a href="http://www.invensor.de">www.invensor.de</a>
SorTech Halle	Deutschland	AdKM	$H_2O / Silika gel$	ACS 08 ACS 15	7,5 kW 15 kW	<a href="http://www.sortech.de">www.sortech.de</a>
SJTU- Shanghai Jiao Tong University	China	AdKM	$H_2O / Silika gel$	SWAC-10	10 kW	<a href="http://www.sjtu.edu.cn">www.sjtu.edu.cn</a>

Tabelle 1: Hersteller thermisch angetriebener Kältemaschinen bis 20 kW

Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, liegt eine verstärkte Entwicklung von thermisch betriebenen Ab- und Adsorptionskältemaschinen kleiner Leistung, die sich wegen ihres Temperaturniveaus unter anderem auch für die Kopplung mit niedertemperierten Antriebsenergien eignen, besondere in Asien und Europa. Prototypen verschiedener derartiger Systeme werden an zahlreichen Instituten und Universitäten als Laboranlagen entwickelt und untersucht. Hierzu gehören z. B. das ILK Dresden, das Institut für Solare Energiesysteme (ISE) des Fraunhofer Institutes Freiburg, das ZAE Bayern, die TU Berlin, die TU Ilmenau und viele andere. In Europa wurden auch einige Unternehmen, die teilweise in sehr engem Kontakt zu den Forschungseinrichtungen stehen und somit die Erprobung und Weiterentwicklung von Sorptionskältemaschinen vorantreiben, gegründet. Vorreiter bei den Absorptionskältemaschinen sind dabei die Firmen Energieanlagenbau Westenfeld aus Thüringen und die Phoenix

Sonnenwärme aus Berlin (Sonnenklima) und für Adsorptionskältemaschinen die Firma SorTech aus Halle (Saale). Dennoch muss gesagt werden, dass die Erfahrungen mit installierten Anlagen und deren Betrieb die Notwendigkeit weiterer messtechnisch begleiteter Demonstrationsanlagen belegen /4/.

Bei den Absorptionskältemaschinen für Temperaturen oberhalb von 0°C sind H<sub>2</sub>O/LiBr-Anlagen und für tiefere Temperaturen NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Anlagen am weitesten verbreitet. Das Arbeitsstoffpaar Aceton/ZnBr<sub>2</sub> wird an der Technischen Universität Ilmenau seit 2001 untersucht. Die prinzipielle Anwendbarkeit im Hinblick auf die Funktionsweise und Materialverträglichkeit wurde durch die Untersuchungsergebnisse bestätigt /5, 6, 7, 8/. Durch Einsatz dieses Arbeitsstoffpaares ist der Betrieb auch bei Antriebstemperaturen von 70 °C und tiefer möglich. Dies würde den Einsatz von Flachkollektoren und/oder Fernwärme als Wärmequelle wesentlich verbessern. Im Hinblick auf die Optimierung der erzielbaren Kälteleistungen und Kältezahlen sind allerdings noch einige Untersuchungen notwendig.

Bei den Feststoff-Adsorptionskältemaschinen wird in /9/ mit sogenannten Ammoniakaten, Komplexverbindungen aus Metallsalz und Ammoniak, gearbeitet. Ziel ist auch hier, nicht nur eine Erhöhung des COP sondern auch eine Verringerung der erforderlichen Antriebstemperatur der thermischen Antriebsenergie. Die nachfolgend aufgeführten, auf dem Markt befindliche AdKM arbeiten bereits bei einer Antriebstemperatur von um die 75 °C, jedoch liegt ihr COP-Wert bei nur 0,56 und schlechter.

Im Folgenden werden die z.Z. marktverfügbaren Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen mit ihren spezifischen Kenndaten kurz vorgestellt:



(Quelle: Yazaki)

Abb. 3: **Yazaki**

Temperaturen Heizwasser	88 / 83 °C
Temperaturen Kühlwasser	31 / 35 °C
Temperaturen Kaltwasser	12,5 / 7 °C
Kälteleistung	7,5 kW
COP	0,70
Gewicht	420 kg
Abmaße (L x B x H)	0,60 x 0,80 x 1,77 m

**WFC-SC5**

(Quelle: EAW)

Abb. 4: **EAW**

Temperaturen Heizwasser	90 / 80 °C
Temperaturen Kühlwasser	30 / 36 °C
Temperaturen Kaltwasser	17 / 11 °C
Kälteleistung	15 kW
COP	0,71
Gewicht	500 kg
Abmaße (L x B x H)	1,75 x 0,76 x 1,75 m

**Wegracal SE15**



(Quelle: Sonnenklima)

<b>Abb. 5: Sonnenklima</b>	<b>suninverse 10</b>
Temperaturen Heizwasser	95 / 75 °C
Temperaturen Kühlwasser	27 / 35 °C
Temperaturen Kaltwasser	18 / 15 °C
Kälteleistung	10 kW
COP	0,77
Gewicht	550 kg
Abmaße (L x B x H)	1,08 x 0,70 x 1,90 m



(Quelle: CSIRO)

<b>Abb. 6: Thermax</b>	<b>LT 0.5</b>
Temperaturen Heizwasser	91 / 85 °C
Temperaturen Kühlwasser	29 / 36,5 °C
Temperaturen Kaltwasser	12,5 / 7 °C
Kälteleistung	17,5 kW
COP	0,70
Gewicht	875 kg
Abmaße (L x B x H)	0,90 x 1,00 x 2,00 m



(Quelle: ClimateWell)

<b>Abb. 7: ClimateWell</b>	<b>Climatewell 10</b>
Temperaturen Heizwasser	83 / -- °C
Temperaturen Kühlwasser	30 / -- °C
Temperaturen Kaltwasser	-- / 15 °C
Kälteleistung	10 kW
COP	0,68
Gewicht	875 kg
Abmaße (L x B x H)	1,20 x 0,80 x 1,60 m



(Quelle: Pink)

<b>Abb. 8: Pink</b>	<b>PC 19</b>
Temperaturen Heizwasser	85 / 78 °C
Temperaturen Kühlwasser	24 / 30 °C
Temperaturen Kaltwasser	12 / 6 °C
Kälteleistung	19 kW
COP	0,62
Gewicht	550 kg
Abmaße (L x B x H)	0,80 x 0,60 x 1,90 m



(Quelle: Invensor)

Abb. 9: **Invensor**

	<b>LTC 10plus</b>	<b>HTC 18 plus</b>
Temperaturen Heizwasser	72 / 66 °C	85 / 76,5 °C
Temperaturen Kühlwasser	27 / 31,5 °C	27 / 34,5 °C
Temperaturen Kaltwasser	18 / 15 °C	18 / 14 °C
Kälteleistung	4 - 12 kW	6 - 22 kW
COP	0,65	0,52
Gewicht	390 kg	420 kg
Abmaße (L x B x H)	1,10 x 0,75 x 1,37 m	1,75 x 0,76 x 1,75 m



(Quelle: Sortech)

Abb. 10: **Sortech**

	<b>ASC 08</b>	<b>ASC 15</b>
Temperaturen Heizwasser	75 / 68 °C	75 / 69 °C
Temperaturen Kühlwasser	27 / 32 °C	27 / 32 °C
Temperaturen Kaltwasser	18 / 15 °C	18 / 14 °C
Kälteleistung	7,5 kW	15 kW
COP	0,56	0,56
Gewicht	260 kg	510 kg
Abmaße (L x B x H)	0,79 x 1,06 x 0,94 m	0,79 x 1,35 x 1,45 m



(Quelle: SJTU)

Abb. 11: **SJTU**

	<b>SWAC-10</b>
Temperaturen Heizwasser	85 / 79 °C
Temperaturen Kühlwasser	30 / 36 °C
Temperaturen Kaltwasser	15 / 10 °C
Kälteleistung	10 kW
COP	0,39
Gewicht	1600 kg
Abmaße (L x B x H)	1,80 x 1,20 x 1,40 m

### 3 Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Absorbers

Dem gestiegenen Klimatisierungsbedarf entsprechend ist es erforderlich, die notwendige Kälte unter ökologischem Aspekt mit einem möglichst geringen energetischen und ökonomischen Aufwand zu erzeugen. Zur Verbesserung der Betriebsweise einer Absorptionskälteanlage können unter anderem folgende Maßnahmen genannt werden:

- Optimierung von Systemkomponenten (z. B. Wärmetauscher, Lösungsverteilung sowie Pumpen) zur Verbesserung der Hydraulik sowie des Wärme- und Stofftransportes im System
- Optimierung der Mess- und Regelungstechnik
- Wahl des geeigneten Arbeitsstoffpaares (Lösung sowie Kältemittel)

Einige der oben genannten Faktoren wurden bereits getestet und darüber in mehreren Veröffentlichungen berichtet /10, 11, 12, 13/.

Ein wichtiger Aspekt zur Erhöhung der Effektivität von Absorptionskältemaschinen stellt die Benetzung der Wärmetauscherrohre der einzelnen Komponenten Austreiber, Kondensator, Verdampfer und Absorber dar. Zu diesem Zweck wurde an der TU Ilmenau ein gesonderter Versuchsstand (siehe Kapitel 3.2), welcher den Absorber der Absorptionskältemaschine repräsentiert (als Modell), aufgebaut und thermisch vermessen. In der Literatur gibt es dazu ähnliche Untersuchungen zur Ermittlung und Analyse der Wärmeübertragungsvorgänge beim Sieden und Rieseln von Kältemitteln oder Lösungen an Oberflächen von Wärmeübertragern in verschiedenen Bauarten und Größen /14, 15, 16, 17/.

Zusätzlich zur Untersuchung am o.g. Versuchsstand wurde ein bereits genutzter Absorber bei der TWA Bad Blankenburg hinsichtlich seiner Berieselungsgüte begutachtet (siehe Kapitel 3.1).

#### 3.1 Beurteilung der Absorberberieselung der alten AbKM bei TWA

Um erste Rückschlüsse für eine optimale Berieselung zu ziehen, wurde der alte Absorber und Verdampfer (aus dem *BMW-F-Projekt: 0327320A*) ausgebaut und bei TWA Bad Blankenburg einer visuellen Begutachtung unterzogen. Dazu wurden beide Wärmetauscher oberhalb einer Auffangwanne montiert und mit Wasser als auch mit einer  $H_2O/LiBr$ -Lösung mit unterschiedlichen Berieselungsstärken beaufschlagt (siehe Abb. 12).



Abb. 12: Untersuchung zur Berieselungsgüte des Absorbers (alte Ausführung)

Die visuelle Beurteilung der Berieselung ergab folgende Schwächen, die beim Bau von neuen Wärmetauschern nach Möglichkeit zu vermeiden sind:

- Wurde die Berieselungsstärke erhöht, spritzte die Lösung aus dem Verteilerrohr seitlich über die Absorberrohre hinweg; wurde sie verringert, floss aus einigen Öffnungen des Verteilerrohres überhaupt keine Lösung mehr aus. Beides führte zu einer ungleichmäßigen Benetzung der Rohroberflächen.
- Durch die versetzte Anordnung der untereinander liegenden Rohrreihen des Wärmetauschers floss die abtropfende Lösung teilweise am darunterliegenden Rohr vorbei.

Dies führte zu dem unzufriedenen Erkenntnis, dass von der Gesamtoberfläche des Wärmetauschers nur ca. 50% benetzt wurde.

Um beim Entwurf neuer Absorber eine Verbesserung der Oberflächenbenetzung der Wärmetauscherrohre zu erzielen, wurde wie bereits erwähnt, ein Teststand an der TU Ilmenau aufgebaut, dessen Untersuchungen auch eine quantitative Bewertung des Wärme- und Stofftransportes erlauben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden Kapitel dargestellt. Die erzielten positiven Untersuchungsergebnisse wurden beim Aufbau der Pilotanlage berücksichtigt.

### 3.2 Untersuchungen zur Verbesserung des Wärme- und Stofftransports des Absorbers am Versuchsstand der TU Ilmenau

Zur Ermittlung der Eigenschaften der Massen- und Wärmetransportvorgänge wurden mehrere Messreihen unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Dabei wurden die Berieselungsstärke, die Temperaturen und die Konzentration der Lösung berücksichtigt. Die Versuchsreihen fanden bei drei unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen statt, wobei Messreihen von zwei verschiedene Wärmetauschern, gefertigt aus glatten und berippten Cu-Rohren, aufgenommen wurden.

#### 3.2.1 Aufbau des Versuchsstands

Die Versuchsanlage zur Untersuchung der Absorberberieselung besteht aus einem Stahlbehälter mit zwei durchsichtigen Blindflanschen zur visuellen Beobachtung. Eine Seite des Behälters ist mit einem abnehmbaren Deckel verschlossen, so dass die Möglichkeit besteht den Wärmetauscher als auch den Lösungsverteiler zu wechseln (Abb. 13 und Abb. 14).

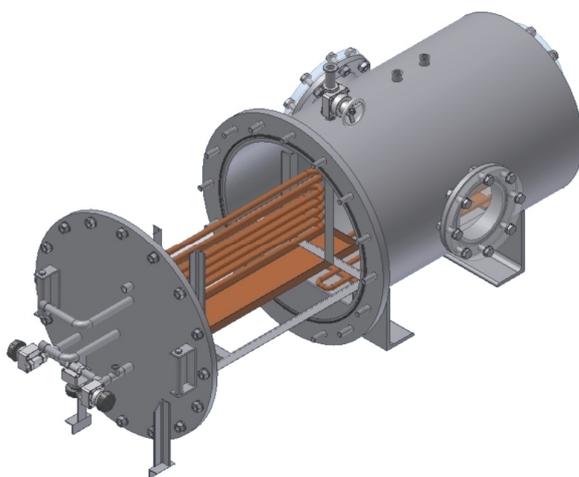


Abb. 13: Experimenteller Aufbau des Versuchsstandes mit dem Absorberbehälter



Abb. 14: Seitenansicht des Absorberbehälters mit externem Austreiber zur Kältemitteldampferzeugung

Der Versuchsstand ist mit den externen Medienkreisläufen (Heiz- und Kühlwasser) verbunden sowie mit einem internen Lösungskreislauf versehen. Externe Plattenwärmetauscher gestatten die Einstellung der Medieneintrittstemperaturen. Die Berieselungsstärke wird über eine drehzahlgeregelte Lösungspumpe eingestellt. Sämtliche Messwerte, wie Temperaturen, Drücke und Volumenströme werden in einem Datenlogger aufgezeichnet. Das hydraulische Schema incl. aller Messstellen ist in Abb. 15 dargestellt.

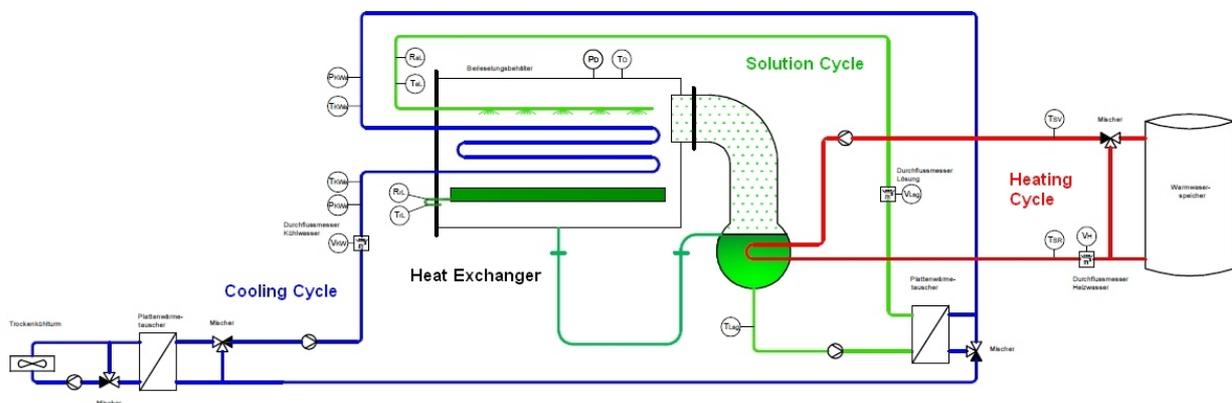


Abb. 15: Schaltschema des Versuchsstandes

### 3.2.2 Versuchsdurchführung

Als Arbeitsstoffpaar kam eine 54%-ige Wasser/Lithiumbromid-Lösung zum Einsatz. Das Kältemittel wurde im externen Erhitzer mittels Heißwasser aus dem Warmwasserspeicher angetrieben (roter Kreislauf in Abb. 15) und strömte anschließend direkt in den Absorberbehälter. Die dabei entstehende arme Lösung wurde mit Hilfe einer drehzahlgeregelten Pumpe über einen externen Wärmetauscher zum Verteilerrohr über dem Wärmetauscher gefördert (grüner Kreislauf in Abb. 15) und von oben über das Rohrregister verteilt. Auf der Oberfläche, der mit Kühlwasser durchströmten Rohre des Kühlregisters (blauer Kreislauf in Abb. 15), reicherte sich die arme Lösung durch Kondensation und Absorption mit dem Kältemitteldampf wieder an. Die reiche Lösung sammelte sich im unteren Bereich des Behälters und wurde über einen Siphon dem Verdampfer wieder zugeführt.

Dabei wurden folgende Messwerte aufgenommen:

- Volumenstrom des Kühlwassers  $V_{KW}$
- Eintrittstemperatur des Kühlwassers  $T_{KW,e}$
- Austrittstemperatur des Kühlwassers  $T_{KW,a}$
- Volumenstrom der Lösung  $V_{Lsg}$
- Austreibungstemperatur der Lösung  $T_{Lsg}$
- Temperatur der armen Lösung  $T_{aL}$
- Temperatur der reichen Lösung  $T_{rL}$
- Dampftemperatur im Behälter  $T_D$
- Dampfdruck im Behälter  $p_D$
- Volumenstrom des Heizwassers  $V_H$
- Eintrittstemperatur des Heizwassers  $T_{H,e}$
- Austrittstemperatur des Heizwassers  $T_{H,a}$

Des Weiteren wurden die Konzentrationen der armen und reichen Lösung bestimmt.

Für die Versuchsreihen standen zwei verschiedene Rohrregister zur Verfügung. Zum einen ein Rohrregister bestehend aus Cu-Rohren mit glatter Oberfläche und zum anderen ein Rohrregister aus Cu-Rohren mit berippter Oberfläche vom Typ "GEWA-C C4-HP09.16063-89" der Fa. Wieland.

Sämtliche Experimente wurden mit drei verschiedenen Kühlwasser-Eintrittstemperaturen von 25, 30 und 35 °C und mit verschiedenen Berieselungsdichten von 25, 50, 75 und 100 l/h·m durchgeführt. Dabei wurden die Leistungen, der Wärmedurchgangskoeffizient und der Stofftransport (aufgenommene Kältemittelmenge) berechnet.

Die Gleichung zur Berechnung der Leistungen lautet:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_e - T_a) \quad (1.1)$$

Dabei ist:

$\dot{Q}$	[kW]	Wärmestrom des jeweiligen Mediums
$\dot{V}$	[m³/s]	Durchfluss
$T_e$	[°C]	Eintrittstemperatur
$T_a$	[°C]	Austrittstemperatur
$\rho$	[kg/m³]	Dichte des Mediums
$c_p$	[kJ/kg·K]	spezifische Wärmekapazität des Mediums bei mittlerer Temperatur

Der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmeübertragers berechnet sich wie folgt:

$$K = \frac{\dot{Q}_{KW}}{A \cdot \Delta T_m} \quad (1.2)$$

Dabei ist:

$K$	[W/m²K]	Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmeübertragers
$\dot{Q}_{KW}$	[kW]	Kühlleistung
$A$	[m²]	Gesamtoberfläche der Wärmetauscherrohre
$\Delta T_m$	[K]	Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz bezogen auf $T_{Lsg}, T_{rL}, T_{KW,e}, T_{KW,a}$

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz berechnet sich wie folgt:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{gr} - \Delta T_{kl}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{gr}}{\Delta T_{kl}}\right)} \quad (1.3)$$

Dabei ist:

$\Delta T_m$ [K]	mittlere logarithmische Temperaturdifferenz des Wärmeübertragers
$\Delta T_{gr}$ [K]	große Temperaturdifferenz des Wärmeübertragers
$\Delta T_{kl}$ [K]	kleine Temperaturdifferenz des Wärmeübertragers

### 3.2.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Berieselungsstärke

Die Gegenüberstellung der Wärmeleistungen zwischen dem Absorber aus glatten Rohren und dem aus berippten Rohren (Abb. 16) zeigt deutlich, dass bei berippten Wärmetauscherrohren die Leistung generell höher als bei glatten Rohren ist.

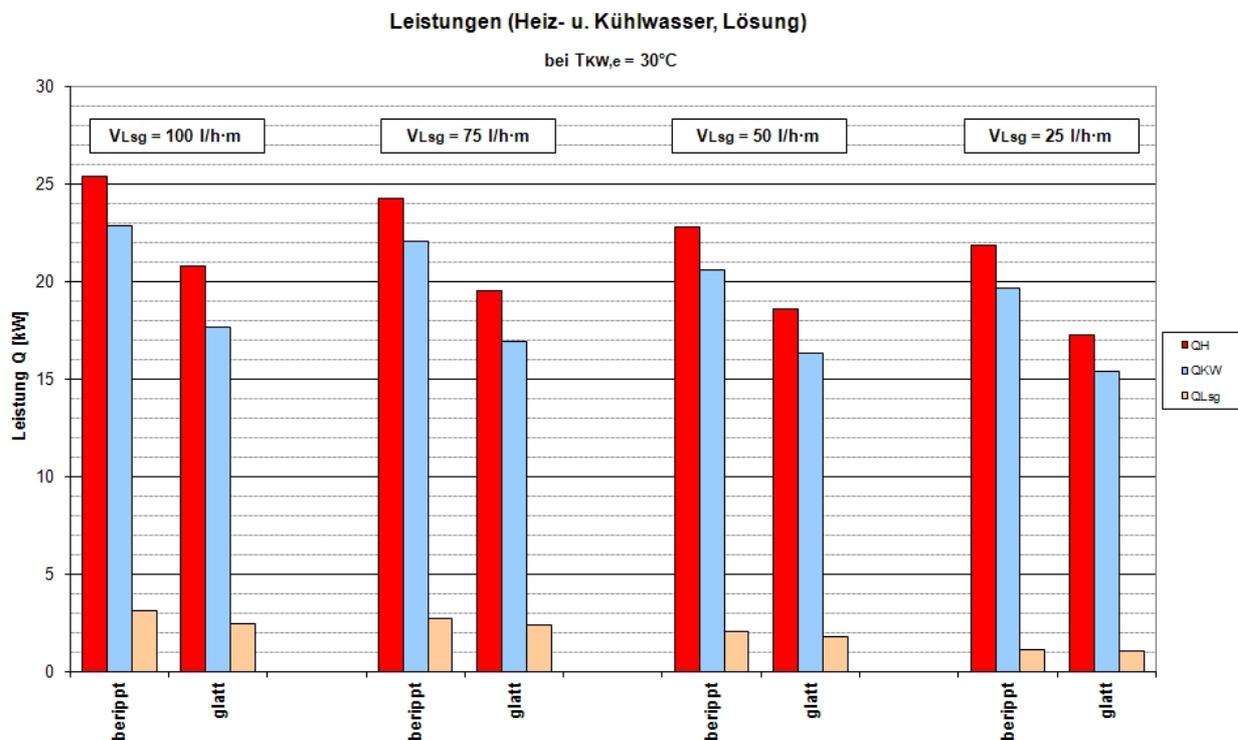


Abb. 16: Leistungen (Heizwasser  $Q_H$ , Kühlwasser  $Q_{KW}$  und Lösung  $Q_{Lsg}$ ) in Abhängigkeit von der Berieselungsstärke bei konstanter Kühlwassereintrittstemperatur

In Abb. 17 sind die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten beider Wärmetauscher in Abhängigkeit der Berieselungsstärke bei konstanter Kühlwassereintrittstemperatur und in Abb. 18 bei einer konstanten Berieselungsstärke aber unterschiedlichen Kühlwassereintrittstemperaturen dargestellt. Beide Abbildungen lassen erkennen, dass die Gestaltung der Rohroberfläche einen höheren Einfluss auf die Wärmeübertragung hat, als eine Veränderung der Berieselungsdichte. Sie zeigen aber auch, dass eine Veränderung der Berieselungsstärke bei berippten Rohren stärker ins Gewicht fällt als bei glatten Rohren. So führte die Vervierfachung der Berieselungsstärke bei gleicher Kühlwassereintrittstemperatur von  $30^\circ\text{C}$  zu einer Verbesserung des Wärmedurchgangskoeffizienten bei berippten Rohren um 22 % und bei glatten Rohren um nur 13 %. Betrachtet man jedoch den Wärmedurchgangskoeffizient des berippten Wärmetauschers gegenüber dem des glatten Wärmetauschers, so lag er je nach Berieselungsstärke um ca. 31 % bis 42 % besser.

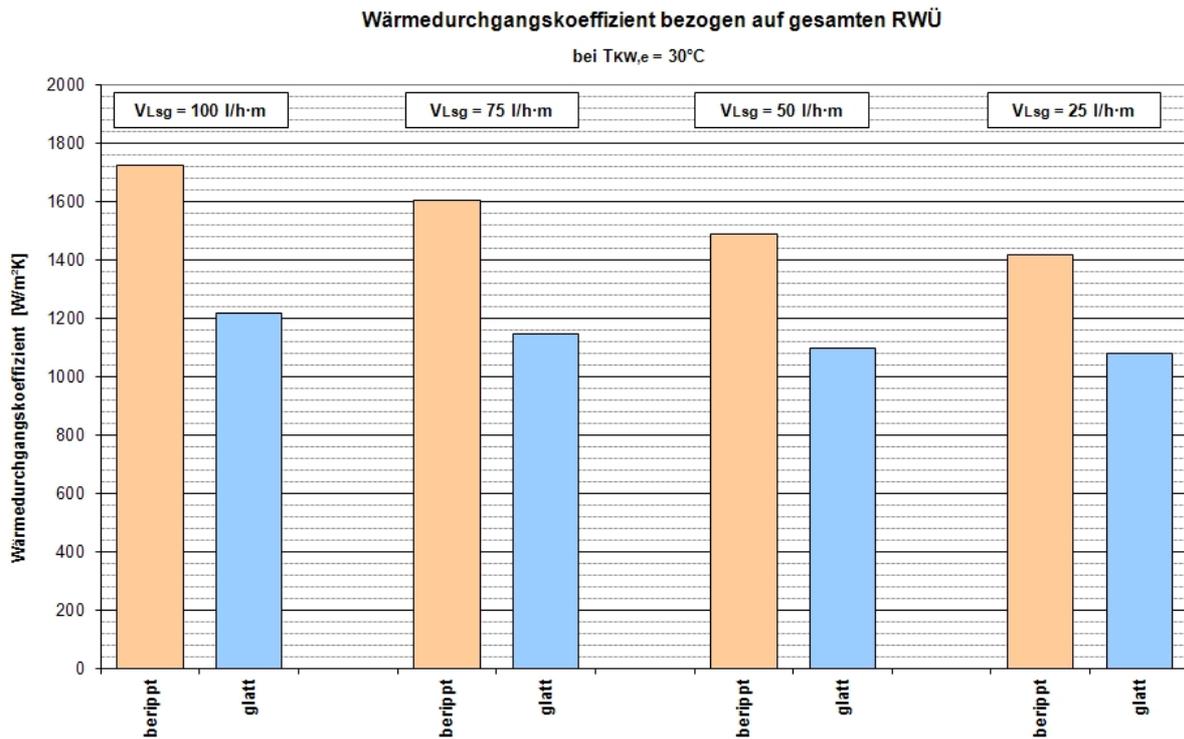


Abb. 17: Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit von der Berieselungsstärke bei konstanter Kühlwassereintrittstemperatur

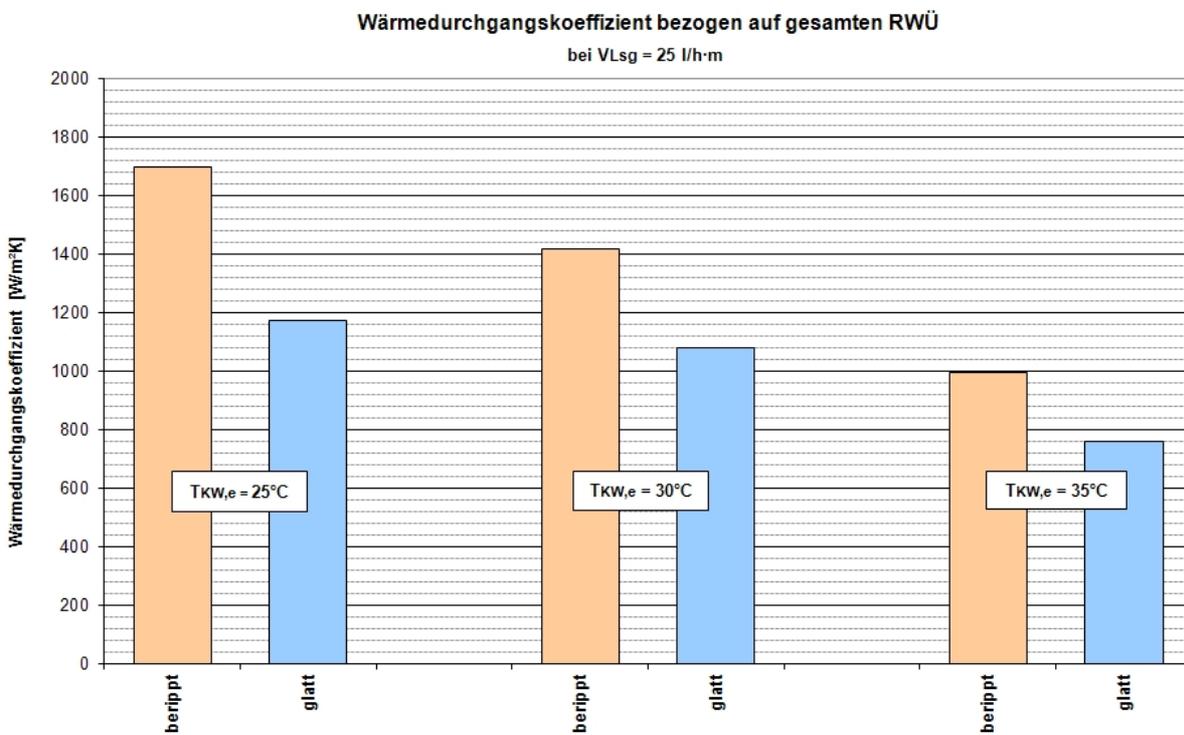


Abb. 18: Wärmedurchgangskoeffizient bei konstanter Berieselungsstärke in Abhängigkeit von der Kühlwassereintrittstemperatur

### 3.2.4 Ergebnisse der Untersuchungen unterschiedlicher Absorberrohre

In Abb. 19 sind auf Basis des Konzentrationsunterschiedes zwischen reicher und armer Lösung die Werte für die Stoffübertragung ermittelt worden. Auch hier ist zu erkennen, dass berippte Rohre vorteilhafter für den Stoffübergang sind und mit steigender Berieselungsstärke eine erhöhte Menge Kältemitteldampf in die Lösung übergeht.

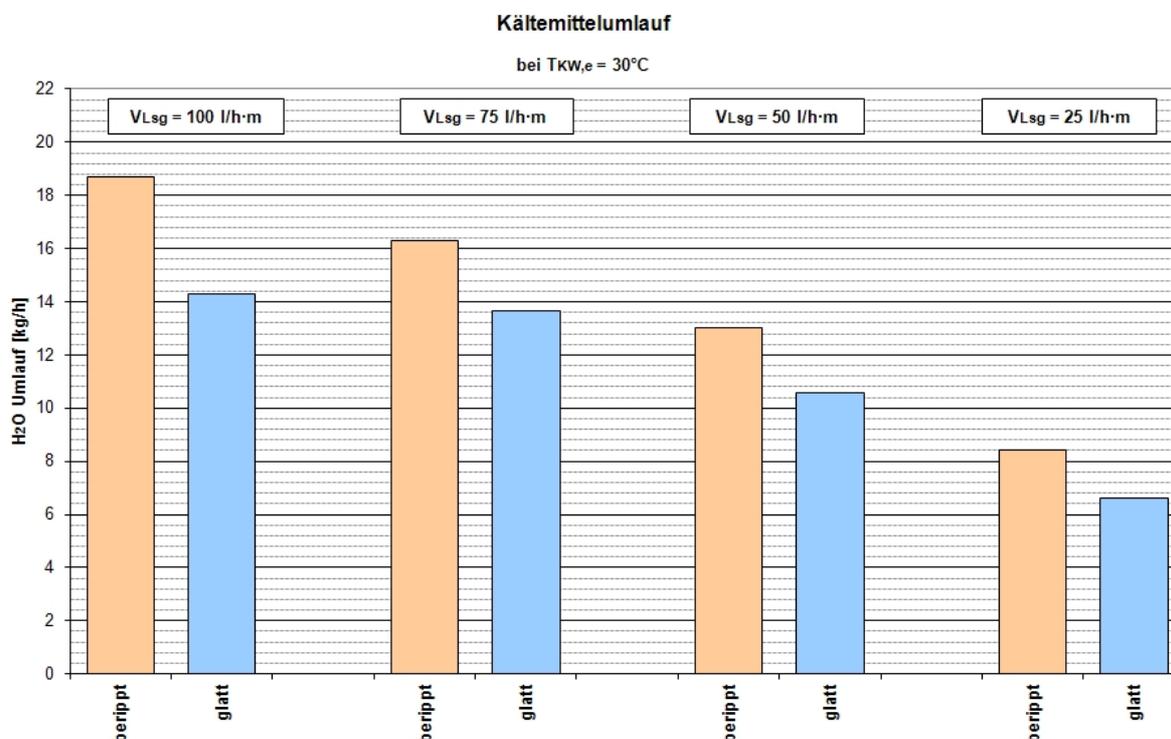


Abb. 19: Stoffübertragung in Abhängigkeit von der Berieselungsstärke bei konstanter Kühlwassereintrittstemperatur

### 3.2.5 Zusammenfassung der Berieselungsuntersuchungen

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Effektivität der Berieselung und demzufolge der Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Wärmeaustauschfläche von der Art der Flüssigkeitsverteilung und der Rauigkeit der Rohroberfläche abhängig ist. Je homogener die Flüssigkeitsverteilung ist, desto besser ist die Benetzung der Oberfläche der Wärmetauscherrohre; und je höher die Rauigkeit der Oberfläche ist, desto besser ist der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers und der Diffusion des Kältemitteldampfes in die Lösung.

Der Wärmedurchgangskoeffizient eines berippten Rohres ist je nach Kühlwassertemperatur ca. 30 % bis 40 % höher als bei glatten Rohren, bei gleichen Abmessungen und Randbedingungen. Dies zeigt, dass mit einer strukturierten Oberfläche ein höherer Wirkungsgrad des Wärmetauschers erzielt werden kann.

## 7 Zusammenfassung

Das Gesamtziel des Vorhabens besteht darin, im Kälteleistungsbereich bis 20 kW eine durch Niedertemperaturfernwärme angetriebene Absorptionskälteanlage zu entwickeln und als Prototyp beim Industriepartner aufzubauen und zu testen.

In diesem Bericht wurden die Hauptergebnisse des o.g. Vorhabens dargestellt. Der Bericht beinhaltet 6 Kapitel wobei Kapitel 3 bis 6 vertraulich sind.

Nach einer Einleitung über die energetische und wirtschaftliche Bedeutung der mit Niedertemperatur angetriebenen Kältemaschinen bis zu einer Leistung von 20 kW zur Klimatisierung von kleineren und mittleren Gebäuden u.ä. wurde im Kapitel 2 eine kurze Darstellung zum Stand der Technik vorgenommen.

Im Kapitel 3 wurden die Untersuchungen zum Betriebsverhalten des Absorbers dargestellt. Am Anfang des Kapitels findet eine Beurteilung der Berieselungsgüte eines Absorbers aus einem vorhergehenden Projekt (*BMW 0327320A*) statt. Im Anschluss daran sind der Aufbau eines Berieselungsversuchsstandes als auch die Versuchsdurchführungen beschrieben und die Ergebnisse dargelegt.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Kreisprozessberechnung für die beiden Arbeitsstoffpaare Wasser/Lithiumbromid sowie Aceton/Zinkbromid. Zum Einsatz kommen dabei mittels VBA-Code entwickelte Excel-Programme der TU-Ilmenau.

Im Kapitel 5 werden die Auslegungsberechnungen der einzelnen Komponenten des Prototyps behandelt, deren Ergebnisse in enger Zusammenarbeit mit dem Industriepartner die Grundlage für die Fertigung der Absorptionskältemaschine bilden.

Die Untersuchungsergebnisse der Versuchsanlage werden im Kapitel 6 dargestellt. Nach anfänglichen Schwierigkeiten bei der Inbetriebnahme haben die späteren Ergebnisse der Untersuchungen gezeigt, dass der Prototyp der Absorptionskälteanlage unter den angestrebten Betriebsbedingungen für den Betrieb mit Fernwärme funktionstüchtig ist. Allerdings liegen die erzielten Leistungen unterhalb der Auslegungsparameter. Im Verlauf dieser Versuchsdurchführungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner einige Verbesserungsvorschläge bezüglich der Gestaltung der Anlage abgeleitet und sollen beim zukünftigen Umbau des Prototyps berücksichtigt werden. Nachdem Umbau der Anlage entsprechend der abgeleiteten Verbesserungsvorschläge werden weitere Untersuchungen seitens des Industriepartners durchgeführt.

## 8 Quellenverzeichnis

- /1/ **Zeitschrift:** "World Air Conditioner Market", JARN, Ausgabe 484-S, 2009, Seite 49-58
- /2/ **Zeitschrift.** "Sonne Wind & Wärme", Ausgabe 8/2010, Seite 154-159
- /3/ **Zeitschrift:** „IKZ-ENERGIE Magazin für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in Gebäuden“, Strobel Verlag, Ausgabe Dezember 6/2011, Seite 36-40
- /4/ **Zeitschrift:** „DIE KÄLTE und Klimatechnik“, Genter Verlag, 59. Jahrgang, Ausgabe Dezember 2006
- /5/ **S. Al-Najjar:** „Untersuchung geeigneter Arbeitsstoffpaare für Absorptionskältemaschinen unter Berücksichtigung der Wärmeprozessoptimierung“, Dissertation, Technische Universität, Ilmenau 2001
- /6/ **D. Schmidt:** „Analytische Ermittlung der thermodynamischen Eigenschaften des Acetons zur Anwendung als Kältemittel“, Studienarbeit, Technische Universität, Ilmenau 2005
- /7/ **S. Ajib, A. Karno:** „Thermo physical properties of acetone-zinc bromide for using in a low temperature driven absorption refrigeration machine“, Heat and Mass Transfer (2008) 45:61-70, Springer-Verlag
- /8/ **S. Ajib, A. Karno:** „Thermodynamic analysis of an absorption refrigeration machine with new working fluid for solar applications“, Heat and Mass Transfer (2008) 45:71-81, Springer-Verlag
- /9/ **VDI-Wärmeatlas:** „Charakteristische Stoffkonstanten“, Springer-Verlag Berlin, 8. Auflage, Abschnitt DA, Heidelberg 2006
- /10/ **A. Karno:** „Simulation und Optimierung der Betriebsweise einer solarthermisch betriebenen Absorptionskältemaschine unter Berücksichtigung verschiedener Arbeitsstoffpaare“, Dissertation, Technische Universität Ilmenau 2006
- /11/ **T. Heinke:** „Ermittlung der Wärmeübertragungskoeffizienten eines Rohrbündelwärmetauschers unter Anwendung verschiedener Fluide“, Studienarbeit, Technische Universität, Ilmenau 2006
- /12/ **S. Ajib, A. Karno, A. Nilius, J. Aust:** „Optimierung der Betriebsweise einer Absorptionskälteanlage zur Kühlung und Raumklimatisierung unter Anwendung von neuen Arbeitsstoffpaaren und Niedertemperaturantriebsquellen“, Abschlussbericht BMWA-Projekt 0327320A, Technische Universität, Ilmenau 2006
- /13/ **S. Ajib, M. Safarik, W. Günther:** „Untersuchungsergebnisse einer solarthermisch betriebenen 5 kW Absorptionskältemaschine“, KI Kälte-Luft-Klimatechnik, 46. Jahrgang, Ausgabe Oktober 2010, Seite 18-21
- /14/ **D. Bredow, P. Jain, A. Wohlfeil, F. Ziegler:** "Wärme- und Stofftransport in einem Absorber einer Absorptionskälteanlage", DKV-Tagungsbericht Band II.1, Solare Kühlung, Hannover 2007
- /15/ **K. Spindler:** "Wärmeübergang beim Strömungssieden in einem innenberippten Rohr bei hohen Dampfgehalten", DKV-Tagungsbericht Band II.1, Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik – Wärmeübertragung, Hannover 2009
- /16/ **O. Kruck, A. Luke, B. Müller, M. Freystein:** "Wärmeübertragung beim Sieden von Kältemitteln an horizontalen Rohren", DKV-Tagungsbericht Band II.1, Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik – Wärmeübertragung, Hannover 2009
- /17/ **T. Gebauer, A. Gotterbaum:** "Untersuchung des Wärmeübergangs und des Inundationseffekts in einem Rohrbündelverflüssiger", DKV-Tagungsbericht Band II.1, Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik – Wärmeübertragung, Hannover 2009

- 
- /18/ **H. Loewer.:** „Thermodynamische und physikalische Eigenschaften der wässrigen Lithiumbromid-Lösung“, Dissertation, Technische Hochschule Karlsruhe 1960
- /19/ **H. Loewer.:** „Absorptionswärmepumpen“, Reihe Wärmepumpen Band 6, Verlag C.F. Müller Karlsruhe 1987
- /20/ **Proper:** „Programm zur Berechnung von Stoffwerten“, Version 8, Lauterbach Verfahrenstechnik, Eggenstein-Leopoldshafen
- /21/ **S. Weyh, N. Dayyoub:** " Experimentelle Ermittlung der Wärme- und Stoffübertragungseigenschaften eines berieselten Absorbers einer Absorptionskältemaschine", Projektseminar, TU Ilmenau 2011
- /22/ **R. Plank:** „Handbuch der Kältetechnik“, Band 6 „Wärmeaustauscher“ von F. Steimle und K. Stephan, Springer-Verlag Berlin 1988
- /23/ **R. Plank:** „Handbuch der Kältetechnik“, Band 7 „Sorptionskältemaschinen“ von W. Niebergall, Springer-Verlag Berlin 1959