

Absorptionskälteanlage · Regelung · Fernwärmeauskühlung · charakteristische Gleichung

Zwei nahezu baugleiche Funktionsmuster einer neu entwickelten Absorptionskälteanlage befinden sich seit ca. zwei Jahren im Feldtest. Bei beiden Anlagen wird die Heiß- und Kühlwassertemperatur gleichzeitig geregelt, um verschiedene Zielstellungen zu erreichen. Neben der Lastdeckung können so minimale Betriebskosten oder niedrige Heißwasseraustrittstemperaturen von bis zu 55 °C erreicht werden. In beiden Fällen wird die Wirtschaftlichkeit von KWKK-Systemen verbessert.

### Investigation of control strategies for absorption chillers Part 2: Field test systems and operating data

Absorption chiller · control · district heating · solar cooling · characteristic equation

Two similar functional models of a newly developed absorption chiller are in field test operation since two years. By means of a simultaneous control of hot and cooling water temperature different goals are achieved in operation. Minimum operating costs or hot water return temperatures as low as 55 °C have been reached in addition to load coverage. With both strategies the economic feasibility of tri-generation systems is improved.



Foto: Boris Buchholz, Berlin

### Autoren

Jan Albers\* (links), Stefan Petersen (Mitte), Felix Ziegler (rechts), Anja Hanßke, Christian Hennrich, Walther Hüls, Sarah Hunt, Wolfgang Lanser, Christopher Paitazoglou, Martin Schröder

Institut für Energietechnik,  
TU Berlin

# Untersuchung von Regelstrategien für Absorptionskälteanlagen Teil 2: Feldtestsysteme und Betriebsdaten

## Einleitung

Im ersten Teil des Beitrags wurden zwei Regelstrategien für Absorptionskälteanlagen erläutert, bei denen die Kältelastdeckung durch gleichzeitige und kontinuierliche Regelung der Heiß- und Kühlwassertemperatur erfolgt. Im Gegensatz zu einer Standardregelung, bei der die Kühlwassereintrittstemperatur in den Absorber  $t_{Ai}$  konstant gehalten und nur die Heißwassereintrittstemperatur in den Desorber  $t_{Di}$  geregelt wird, kann so neben der Bereitstellung einer geforderten Kälteleistung  $\dot{Q}_{E,set}$  auf einem notwendigen Kaltwasser-Temperaturniveau  $t_{Eo,set}$  eine weitere, z.B. technische oder wirtschaftliche Zielstellung, erreicht werden. Denn für einen gegebenen Lastfall ( $\dot{Q}_{E,set}; t_{Eo,set}$ ) ist nur entscheidend, dass auf eine „passende“, modifizierte Temperaturdifferenz  $\Delta\Delta t^*_{set}$  geregelt wird (die sich aus  $t_{Di}$ ,  $t_{Ai}$  und  $t_{Eo,set}$  zusammensetzt).

Der Freiheitsgrad in der Festlegung einer der beiden Eintrittstemperaturen  $t_{Di}$  oder  $t_{Ai}$  kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden. In einem Verwaltungsgebäude in Berlin wird z.B. die Einhaltung einer niedrigen Heißwasserrücklauftemperatur von bis zu 55 °C als Regelstrategie verfolgt (technische Zielstellung). Hierdurch kann eine hohe Fernwärmeauskühlung und damit eine verbesserte Netzauslastung erreicht werden. In der zweiten Liegenschaft im Umweltbundesamt in Dessau werden Heiß- und Kühlwassertemperatur dagegen so geregelt, dass minimale Betriebskosten bei der (solar)thermischen Kälteerzeugung erzielt werden (wirtschaftliche Zielstellung). Die theoretischen Grundlagen dieser Regelstrategien wurden im ersten Teil des Beitrags zusammen mit den eingesetzten Absorptionskälteanlagen vorgestellt. Im zweiten Teil werden nun die Messdaten aus den beiden Feldtestsystemen analysiert.

## Feldtestsysteme und Betriebsdaten

Im Laufe des Forschungsprojektes „EnEff: Wärme – Absorptionskälteanla-

gen für Niedertemperaturantrieb“ wurden in einem Verwaltungsgebäude der Vattenfall Europe Wärme AG am Berliner Syringenplatz (BVES) und im Dienstgebäude des Umweltbundesamtes in Dessau (DUBA) die Funktionsmuster FM050V0.2 und FM050V0.3 einer neu entwickelten Absorptionskälteanlage in Betrieb genommen. Die liegenschaftsspezifischen Auslegungspunkte der Anlagen sowie deren Nominalpunkt wurden in Tab. 1 (siehe Teil 1 des Beitrags) zusammengefasst. In Tab. 3 sind wesentliche Systemcharakteristika und Betriebsbedingungen gegenübergestellt. Das System BVES versorgt Büroräume, die mittels Ventilator-konvektoren gekühlt werden (ohne Entfeuchtung), das System DUBA kühlt und konditioniert vorwiegend ein Rechenzentrum sowie Schulungsräume. In einigen Stunden des Jahres wird auch ein Hörsaal mit Klimakälte versorgt.

Die Liegenschaft in Berlin am Syringenplatz (BVES) hat eine reine Fernwärmeversorgung als Antrieb der Kälteanlage. Neben einer gesamteffizienten Betriebsweise, die sowohl den Stromverbrauch des Rückkühlwerks (RKW) und der Versorgungspumpen der Absorptionskälteanlage berücksichtigt, ist die Einhaltung einer Fernwärmerücklauftemperatur bedingende Aufgabe für die Regelung.

Die Wärmeversorgung der Absorptionskälteanlage (AKA) im System DUBA erfolgt dagegen vorrangig über ein Solarkollektorfeld (ca. 216 m<sup>2</sup> Absorberfläche, Vakuumröhrenkollektoren *heat-pipes*) mit drei Wärmespeichern à 7,5 m<sup>3</sup> Speichervolumen. Bei nicht ausreichender Antriebstemperatur in den Solarwärmespeichern erfolgt die Wärmeversorgung der AKA über die Hausanschlussstation aus dem Fernwärmenetz. Anders als im System BVES ist aufgrund des vorrangig solaren Betriebs nicht eine bestimmte Heißwassertemperatur sondern, die Minimierung der Betriebskosten für Strom und Wärme erklärtes Nebenziel für die Regelung.



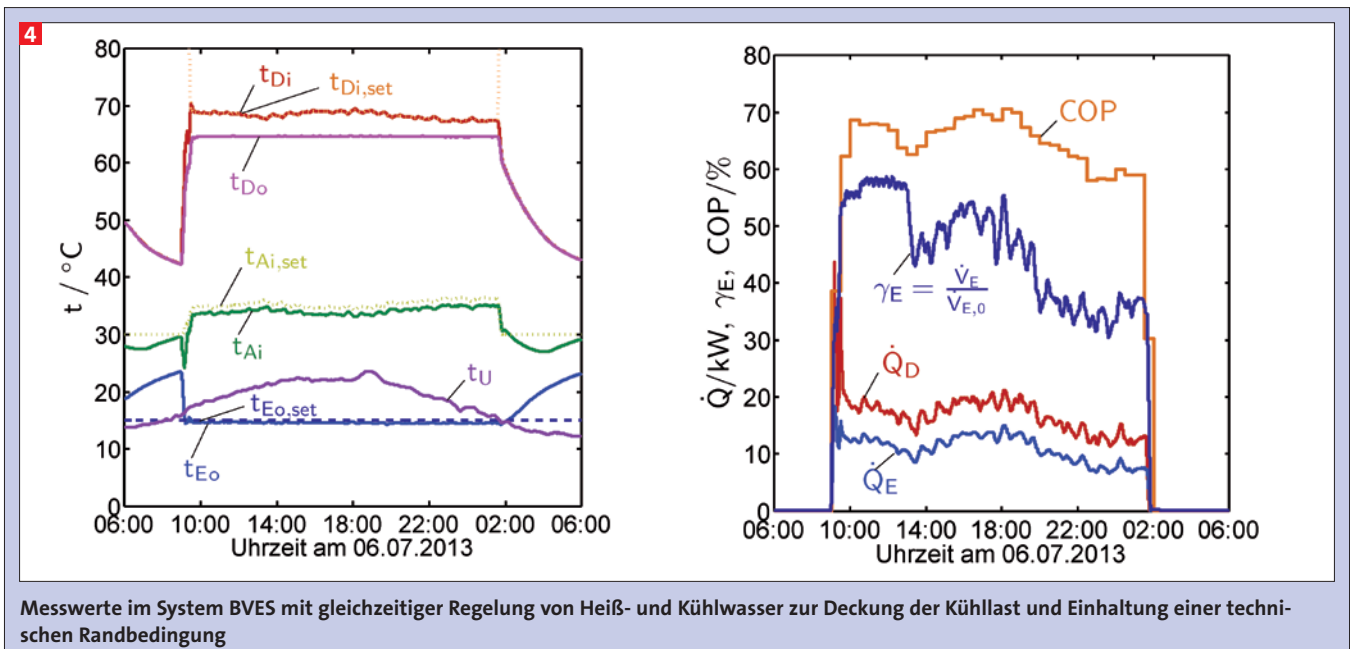
**KI** Kälte · Luft ·  
**Klimatechnik**  
INGENIEURWISSEN IN FORSCHUNG UND PRAXIS



Entdecken Sie weitere interessante  
Artikel und News zum Thema auf  
[ki-portal.de](http://ki-portal.de)!

**Hier klicken & informieren!**





Die hydraulischen Verschaltungen der Systeme werden in [1], [2], [3] und [4] detaillierter beschrieben. Im Nachfolgenden soll auf die regelungstechnischen Aspekte eingegangen werden.

#### Betriebsdaten vom Syringenplatz in Berlin (BVES)

In der Liegenschaft BVES erfolgt die Regelung der AKA auf den Lastfall ( $\dot{Q}_{E,set}$ ;  $t_{Eo,set}$ ) mit der zusätzlichen technischen Randbedingung  $t_{Do,set} = 65^\circ\text{C}$ . Der Kaltwassersollwert ist im Normalfall auf  $t_{Eo,set} = 15^\circ\text{C}$  eingestellt. Bei hoher Feuchtigkeitsbelastung wird dieser Wert jedoch angehoben, um eine Unterschreitung des Taupunktes in den Verteilungen bzw. an den Kühlflächen in den Räumen zu vermeiden. Als Sicherheitsabstand zur Taupunkttemperatur  $t_{tau}$  wird eine Differenz von 2 K verwendet. Damit ergibt sich der Sollwert für die Regelung zu

$$t_{Eo,set} = \max(15^\circ\text{C}, t_{tau} + 2\text{K}) \quad (11)$$

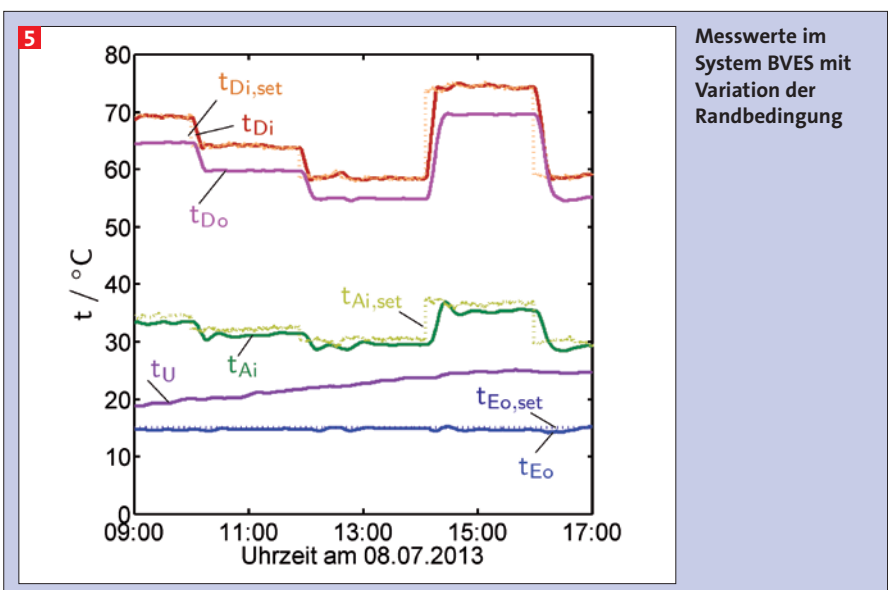
Abb. 4 zeigt die Messwerte von einem Tag, an dem der Sollwert  $t_{Eo,set}$  jedoch konstant  $15^\circ\text{C}$  betrug. Im linken Bild sind die aus der SPS berechneten Sollwerte ( $t_{Di,set}$ ;  $t_{Ai,set}$ ) zur variierenden Lastanforderung ( $\dot{Q}_{E,set}$ ;  $t_{Eo,set}$ ) punktiert dargestellt und parallel dazu die vom Fernwärmeregelventil und dem Trockenkühler tatsächlich eingestellten Werte  $t_{Di}$  und  $t_{Ai}$  am Eintritt der AKA. Im Kühlwasserkreis ist eine Differenz von ca. 1 K zwischen  $t_{Ai}$  und  $t_{Ai,set}$  zu erkennen, die vermutlich aus der Distanz zwischen RKW und AKA mit erdverlegten und ggf. ungedämmten

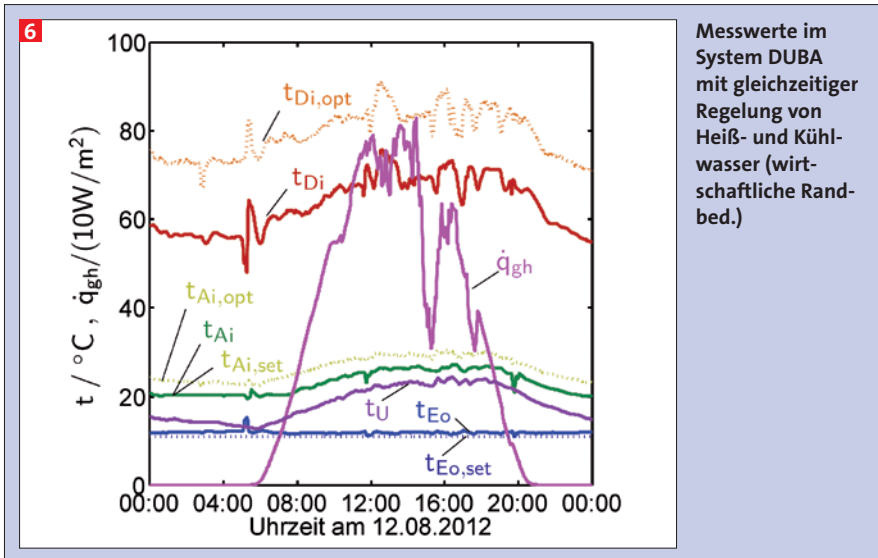
#### 3 Systemcharakteristik zu den Feldtestsystemen BVES und DUBA

Beschreibung	BVES	DUBA
Wärmeversorgung	Nur Fernwärme	Solarwärme (FW als Backup)
Temperaturniveau der Nutzkälte	$\geq 15^\circ\text{C}$	$\leq 12^\circ\text{C}$
Rückkühlung	Nur trocken; hybride Rückkühlung nicht möglich	Vorrangig trocken, hybride Rückkühlung möglich
Hauptkälteverbraucher	Bürräume, ca. 40 kW (max.)	Rechenzentrum, ca. 30 kW

Rohrleitungen resultiert. Im Heißwasserkreis ist dagegen kaum ein Unterschied zwischen berechnetem und eingeregelmtem Wert zu erkennen. Sowohl der Kaltwassersollwert als auch die geforderte Austrittstemperatur im Heißwasserkreis werden über den gesamten Betriebszeitraum auf ca.  $\pm 0,5\text{ K}$  eingehalten. Auf-

grund der relativ geringen Lastvariation zwischen ca. 10 und 15 kW variieren auch die berechneten Sollwerte nur zwischen ca.  $65^\circ\text{C} < t_{Di} < 70^\circ\text{C}$  und ca.  $33^\circ\text{C} < t_{Ai} < 38^\circ\text{C}$ . Trotz der geringen Kältebelastung von lediglich 20-30% der Nominalleistung wird ein COP zwischen ca. 0,6 und 0,7 erreicht (in Abb. 4, rechts, sind





Messwerte im System DUBA mit gleichzeitiger Regelung von Heiß- und Kühlwasser (wirtschaftliche Randbed.)

aus Übersichtlichkeitsgründen Halbstundenmittelwerte gezeigt).

Die hydraulischen Verhältnisse im System BVES führen dazu, dass der Kaltwasservolumenstrom  $\dot{V}_E$  durch den Verdampfer der AKA nicht konstant ist, sondern am betrachteten Tag zwischen ca. 40 und 60 % des Auslegungsvolumenstroms  $\dot{V}_{E,0}$  variierte. Obwohl Änderungen von  $\dot{V}_E$  bzw.  $\gamma_E = \dot{V}_E / \dot{V}_{E,0}$  einen großen Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten im Verdampfer haben können (da dieser oftmals durch den Wärmeübergang auf der externen Seite dominiert wird), konnten die daraus resultierenden Effekte auf die Leistungsfähigkeit der AKA durch die Nachführung der charakteristischen Koeffizienten im Berechnungsalgorithmus so gut berücksichtigt werden, dass dies keinen erkennbaren Einfluss auf die Einhaltung der Sollwerte  $t_{Eo,set}$  und  $t_{Do,set}$  hatte.

In Abb. 5 sind die Messwerte von einem anderen Tag dargestellt. Hier wurde der Sollwert für die technische Randbedingung variiert. Die Verstellung von  $t_{Do,set}$  erfolgte von 65°C auf 60°C, 55°C

und 70°C im Abstand von jeweils ca. 90 Minuten und anschließend auf 55°C. Durch den Berechnungsalgorithmus in der SPS wurden zu den daraus resultierenden Anforderungen an die Regelung (d.h. Deckung des Lastfalls ( $\dot{Q}_{E,set}; t_{Eo,set}$ ) bei gleichzeitiger Einhaltung der technischen Randbedingung  $t_{Do} = t_{Do,set}$ ) die Sollwerte  $t_{Di,set}$  und  $t_{Ai,set}$  berechnet und über die Regelorgane (Fernwärmeventil und RKW-Ventilator) die tatsächlichen Werte  $t_{Di}$  und  $t_{Ai}$  eingestellt. Im Ergebnis zeigt sich, dass durch die gleichzeitige Regelung der Heiß- und Kühlwassereintrittstemperatur beide Anforderungen zu sämtlichen Werten von  $t_{Do,set}$  erfüllt werden konnten. Für niedrige Werte von  $t_{Do,set}$  kann dies jedoch nur gelingen, wenn es die meteorologischen Randbedingungen zulassen, d.h.  $t_U < t_{Ai,set} - \Delta t_{RKW,min}$ .

#### Betriebsdaten vom Umweltbundesamt Dessau (DUBA)

In Abb. 6 ist ein typischer, strahlungsreicher Betriebstag mit einer globalen Einstrahlung auf die horizontale Ebene

von  $q_{gh} = 6.4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  und einer mittleren Umgebungstemperatur von  $t_U = 19^\circ\text{C}$  dargestellt. Die Minimal- und Maximalwerte betragen  $13^\circ$  bzw.  $25^\circ\text{C}$ . In Abhängigkeit vom Lastfall und der verfügbaren Antriebstemperatur aus Solar- bzw. Fernwärme wurde sowohl die Desorber- als auch die Absorbereintrittstemperatur kontinuierlich in einem Bereich zwischen  $55^\circ\text{C} < t_{Di} < 75^\circ\text{C}$  bzw.  $20^\circ\text{C} < t_{Ai} < 28^\circ\text{C}$  geregelt. Trotz dieser Variationen konnte die Kaltwassertemperatur  $t_{Eo}$  konstant gehalten werden und lag dicht am Sollwert.

Aus Abb. 6 ist jedoch auch zu erkennen, dass die tatsächliche Eintrittstemperatur  $t_{Di}$  deutlich niedriger lag als der optimale Sollwert  $t_{Di,opt}$ . Dies resultierte daraus, dass für den Lastgang an diesem Tag weder aus dem Fernwärmenetz noch vom Solarkollektorfeld eine ausreichend hohe Antriebstemperatur verfügbar war, um das Minimum der Kältegestehungskosten zu erreichen. Um trotzdem die notwendige charakteristische Temperaturdifferenz  $\Delta t_{set}^*$  für den jeweiligen Lastfall zu erreichen, wurde durch den Berechnungsalgorithmus ein geringerer Sollwert  $t_{Ai,set} < t_{Ai,opt}$  berechnet und über das RKW eingestellt. Auch wenn hierdurch nicht die maximale Kosteneinsparung gegenüber einer Standardregelung erzielt werden konnte, wurde die Anlage dennoch so dicht wie möglich am Minimum der Betriebskosten betrieben. Eine weitergehende Analyse auch im Vergleich zu einer vorher vorhandenen Adsorptionskälteanlage ist in [5] dargestellt. Darüber hinaus wurde durch die verstärkte Nutzung des RKW die Versorgungssicherheit erhöht, denn ohne die Back-up-Funktion des RKW wäre bei einer Standardregelung der Absorptionskälteanlage ein weiterer Kälteerzeuger zur Lastdeckung notwendig gewesen.

#### Zusammenfassung

Mit den durchgeführten Untersuchungen zu verschiedenen Regelstrategien für eine neu entwickelte Absorptionskälteanlage konnte am Beispiel von zwei Feldtestanlagen gezeigt werden, dass durch die gleichzeitige Regelung von Heiß- und Kühlwassertemperatur neben der Bereitstellung einer geforderten Kälteleistung auf einem notwendigen Temperaturniveau weitere Zielstellungen erreicht werden können. Hierzu zählt z.B. die Sicherstellung einer niedrigen Heißwasserrücklaufstemperatur von bis

Nomenklatur			
COP	Coefficient of Performance		Sub- and Superscript
$\dot{Q}$	Wärmestrom	kW	* modifiziert
T, t	interne, externe Temperatur	°C	A Absorber
$\Delta t$	charakteristische Temp.-diff.	K	C Kondensator
			D Desorber
			E Verdampfer
			i, o Inlet, Outlet
			opt optimiert, im Optimum
			set Sollwert
			tau Taupunkt
			U Umgebungsluft

zu 55 °C, so dass eine verbesserte Auslastung von Wärmeverteilnetzen in KWKK-Systemen erreicht werden kann. Ebenso lassen sich ökonomische Zielstellungen z. B. zur Minimierung von Betriebskosten oder ökologische Zielstellungen zur Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen implementieren.

Die hier behandelten Regelstrategien basieren auf einer erweiterten Berechnungsmethode für die Regelung von Absorptionskälteanlagen mit Hilfe von charakteristischen Gleichungen. Die Grundzüge der erweiterten Methodik – mit der auch die Effekte von variablen externen Volumenströmen auf das Energieeffizienzverhalten der Absorptionskälteanlagen berücksichtigt werden kann – wurden dargestellt.

Auf Grundlage des weiten Betriebsbereiches, der sich bei den neu entwickelten Absorptionskälteanlagen durch Variation der Volumenströme im Heiß- und Kühlwasserkreis erschließen lässt, ergeben sich somit weitere Möglichkeiten z. B. die spezifischen elektrischen Hilfsenergieaufwendungen, die üblicherweise in Teillast ansteigen, mit sinkender Kälteleistung überproportional zu reduzieren. Ob und wie hoch mit derartigen Regel-

strategien CO<sub>2</sub>-Einsparungen erzielt werden können, hängt jedoch auch von der primärenergetischen Bewertung der Endenergieträger ab, die zur Kälteerzeugung verwendet werden. Für die Beurteilung der Rückkopplungen (z. B. von verringerten Fernwärmerücklauftemperaturen durch entsprechend geregelte Absorptionskälteanlagen auf den Primärenergieeinsatz im KWKK-Gesamtsystem), sind deshalb weitere Untersuchungen notwendig.

#### Literatur

- [1] Petersen, S., Hansske, A., Hennrich, C., Hüls, W., Stangl, J., Mittermaier, M., Helm, M., Zachmeier, P., Natzer, S., Lanser, W. and Ziegler, F. Development of a 50 kW absorption chiller. In: 23rd IIR Int. Congress of Refrigeration, Prague, Czech Republic, pages paper-ID 951, 2011.
- [2] Petersen, S., Albers, J., Hennrich, C., Hunt, S., Hüls, W., Lanser, W. and Schröder, M.: Absorptionskälteanlagen für die Gebäudedekühlung mit Fernwärme. EuroHeat&Power, 42. Jg (5): 42–49, 2013.
- [3] Petersen, S., Ziegler, F., Albers, J. and Lanser, W.: EnEff Wärme: Absorptionskälte-technik für Niedertemperaturantrieb – Grundlagen und Entwicklung von Absorptionskältemaschinen für die fernwärme-

und solarbasierte Kälteversorgung.

Technical Report FKZ 0327460B, TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT 2, Fachgebiet Maschinen- u. Energieanlagentechnik, September 2013.

- [4] Albers, J.: Projekterfahrungen einer solar betriebenen Adsorptionskälteanlage im Umweltbundesamt Dessau. In: Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, pages 35–52, Stuttgart, 3.–4. Apr. 2006. Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik.
- [5] Albers, J.: New absorption chiller and control strategy for the solar assisted cooling system at the German Federal Environment Agency. In: Kühn, A. (Editor), Thermally driven heat pumps for heating and cooling – State of the art and current research activities, Universitätsverlag TU Berlin, 2013.

#### Danksagung

Die hier beschriebenen Ergebnisse wurden im Rahmen mehrerer vom BMWi und UBA geförderter Forschungsprojekte erarbeitet (FKZ 0329809D, 36301222, 0327460B).

## PUBLIKATIONEN

### KI KÄLTE · LUFT · KLIMATECHNIK

**Gernot Weber:**

### Kälte- und Klimasystemtechnik

Lehrbuch zur Industriekälte

Die große Bedeutung der Kälte-/Klimatechnik liegt in ihren Anwendungen. In Deutschland entfallen ca. 15% des verbrauchten Stroms allein auf die Kältetechnik. Die theoretische Grundlage der Disziplinen Kälte- und Klimatechnik ist die Technische Thermodynamik, ohne die das tiefere Verständnis der kälte- und klimatechnischen Prozesse nicht möglich ist und die in dieser Neuerscheinung einführend behandelt wird. Es schließen sich in fünf weiteren Hauptkapiteln die Themenbereiche Komponenten und Bauteile des Kältekreislaufs, Verfahren der Kälteerzeugung, Kältesysteme, Anwendungsbeispiele sowie Klimasysteme an.

In der Behandlung der Komponenten konzentriert sich die Auswahl auf Verdichter, Kreiselpumpen, Wärmeübertrager und die Bemessung der Rohrnetze. Einen Schwer-

punkt setzt der Autor bei den Anwendungsbeispielen in der Lebensmittelindustrie. Hier werden Fleisch, Backwaren, Milch, Mälzereien und Brauereien differenziert behandelt. Darüber hinaus enthält das Lehr- und Übungsbuch 50 umfangreiche Beispielaufgaben, die es ermöglichen, das theoretische Wissen schnell in der Praxis anzuwenden.

Der Autor Dr. Gernot Weber ist promovierter Ingenieur und Anlagenbauer, Autor zahlreicher Fachbücher und Hochschuldozent an der Europäischen Studienakademie (ESaK) in Maintal. Grundlage dieser Neuerscheinung ist das Vorlesungsskript des Autors an der ESaK.

Mit den behandelten theoretischen Grundlagen für die Projektierung von Kälte- und Klimaanlageanlagen schließt der vorliegende Band eine Literaturlücke. Er stellt damit ei-



ne gelungene Basis dar für Studenten der Kälte-/Klimasystemtechnik sowie Ingenieure der Fachrichtungen Kälte/Klima.

**Gernot Weber**  
**Kälte- und Klimasystemtechnik**  
**Lehrbuch zur Industriekälte**  
**2014**

**XI, 309 Seiten, Broschur**  
**ISBN 978-3-8007-3553-2**  
**49,- €**

**VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach**  
**www.vde-verlag.de**