

**Deutsche Kälte-  
und Klimatagung**



# **Deutsche Kälte- und Klimatagung 2016**

**Kassel**

**16. – 18. November 2016**

## **Kurzfassungen**

### **Veranstalter:**

#### **Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.**

Striehlstraße 11

30159 Hannover

T. +49 (0) 511 897 0814

F. +49 (0) 511 897 0815

E. [info@dkv.org](mailto:info@dkv.org)

H. [www.dkv.org](http://www.dkv.org)

#### **Kongress Palais Kassel**

Holger-Börner-Platz 1

34119 Kassel

T. +49 (0)561 70 77-02

F. +49 (0)561 70 77-240

E. [kongress-palais@kassel-marketing.de](mailto:kongress-palais@kassel-marketing.de)

H. [www.kongress-palais.de](http://www.kongress-palais.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Arbeitsabteilung I.....</b>	<b>4</b>
<b>Kryotechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung II.1.....</b>	<b>17</b>
<b>Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung II.2.....</b>	<b>34</b>
<b>Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung III.....</b>	<b>50</b>
<b>Kälteanwendung</b>	
<b>Arbeitsabteilung IV.....</b>	<b>66</b>
<b>Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung</b>	
<b>Studentenvorträge .....</b>	<b>85</b>

## **Kälteanlage mit kryogener Umwälzpumpe von Linde Kryotechnik AG für das US ITER Zentralspulen- Modulfertigungsprogramm**

**Ph. Treite<sup>1\*</sup>, W. Fisel<sup>1</sup>, K. Schaubel<sup>2</sup>, A. Langhorn<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Switzerland

<sup>2</sup>General Atomics. 3550 General Atomics Ct. San Diego, CA 92121. USA

<sup>3</sup>Startech Inc., PO Box 573 Solana Beach, CA 92075. USA

\* Korrespondenzautor

Der Zentralmagnet bildet das Herz von ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Der 12,8 m hohe Magnet wird aus sechs Spulenmodulen, welche jeweils 110 t wiegen, bestehen. General Atomics fertigt derzeit diese Module für das US ITER Programm, welches durch das Oak Ridge National Laboratory geleitet und vom Department of Energy's Office of Science gefördert wird. Der Kalttest der einzelnen Module erfordert eine spezielle Kälteanlage, die die geforderte Kälteleistung bei ähnlichen Bedingungen wie im späteren Betrieb im Tokamak bereitstellen kann.

Linde Cryogenics wurde 2014 beauftragt diese Kälteanlage zu entwickeln, zu fertigen und die Inbetriebnahme durchzuführen. Die Kälteanlage basiert auf Lindes Standard LR280-Anlage mit einer Kälteleistung von 900 W bei 4,5 K. In diese ist ein sekundärer überkritischer Heliumkühlkreislauf integriert. Mit Hilfe einer kalten Pumpe werden bis zu 332 g/s von 4,7 K kaltem Helium bei 5,5 bar durch ein Modul umgewälzt. Eine weitere Herausforderung für die Kälteanlage ist der Abkühlprozess in einem sehr engen Temperaturband und bei Kälteleistungen bis zu 13 kW.

Diese Präsentation wird die Schlüsselfunktionen des Systems zeigen und einige Inbetriebnahme-Ergebnisse hervorheben.

## **Aufbau der kryogenen Infrastruktur bei GSI/FAIR**

**Marion Kauschke\*, Holger Kollmus, Anna Breidert, Monica Martinez-Lopez,  
Claus Schroeder, Brano Streicher, Yu Xiang, Franz Walter**

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, CSCY,  
Planckstraße 1, 64291 Darmstadt, Germany  
[www.gsi.de](http://www.gsi.de), [M.Kauschke@gsi.de](mailto:M.Kauschke@gsi.de)

\* Korrespondenzautorin

In den nächsten Jahren wird bei GSI das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) entstehen, eines der größten Forschungsvorhaben weltweit. An FAIR wird eine nie dagewesene Vielfalt an Experimenten möglich sein, durch die Physiker aus aller Welt neue Einblicke in den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums, vom Urknall bis heute, erwarten.

FAIR wird Teilchenstrahlen mit bisher unerreichter Intensität und Qualität liefern. Ihr Herzstück ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 1100 Metern. An diesen schließt sich ein komplexes System von Speicherringen und Experimentierstationen an. Die bereits existierenden GSI-Beschleuniger dienen als Vorbeschleuniger.

Sowohl der Ringbeschleuniger SIS100 wie auch der supraleitende Fragment Separator (Super-FRS) bestehen hauptsächlich aus supraleitenden Magneten, die in internationalen Kollaborationen entwickelt und gefertigt werden. Ein Teil dieser Magnete, hauptsächlich die Dipole des SIS100, werden bei GSI getestet. Die hierfür benötigte Infrastruktur mit Heliumkälteanlage und 4 Testbänken wurde im letzten Jahr fertiggestellt und wird in dieser Präsentation vorgestellt.

Zum Entwickeln und Testen kleiner Komponenten wurde ein Heliumverflüssiger mit verteiltem Recovery-System installiert. Der hierfür entwickelte, universal verwendbare Kryostat mit Anbindung an flüssiges Helium und Stickstoff wird präsentiert.

Zum Schluss der Präsentation wird noch ein Ausblick auf die kryogene Infrastruktur der FAIR Anlagen gegeben.

### I.03

## Hocheffiziente Beschleunigerkühlung bei 40 - 60 K mittels He/Ne-Kreisläufen

**Steffen Klöppel\*, Christoph Haberstroh, Hans Quack**

TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Münchner Platz 3, 01062 Dresden, Deutschland  
[steffen.kloeppe@tu-dresden.de](mailto:steffen.kloeppe@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Infolge der in zukünftigen Beschleunigeranlagen angestrebten höheren Teilchenenergien steigt auch der Wärmeeintrag in die tiefkalten Magnete. Um dem zusätzlichen Exergieaufwand zu deren Kühlung entgegenzuwirken, werden bei großen Beschleunigern Strahlrohre eingesetzt, welche ihrerseits bei einer höheren Temperatur möglichst effizient gekühlt werden müssen. Hinzu kommen die Kühlung der thermischen Schilde und der Stromzuführungen. Dafür wird ein Turbo-Braytonkreislauf untersucht, welcher durch die Einsatz von Turbo-Kompressoren anstelle herkömmlicher Schraubenkompressoren einen höheren Gesamtwirkungsgrad ermöglicht. Um die Investitionskosten der Kompressoren zu begrenzen, wird anstelle reinen Heliums ein Gemisch mit Neon als Arbeitsgas vorgesehen.

### I.04

## Fehleranalyse bei einer 2 kW- Heliumanlage

**Rafael Klenk\*, Holger Neumann**

Kit Campus Nord - Institut für Technische Physik – Abteilung Kryoinfrastruktur,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
[Rafael.klenk@partner.kit.edu](mailto:Rafael.klenk@partner.kit.edu)

\* Korrespondenzautor

Am Institut für Technische Physik des Campus Nord wird Helium mittels Claude-Prozess gekühlt bzw. verflüssigt. Dieser Vorgang wird in der Kältetechnik oft angewendet und verbindet adiabate und isenthalpe Expansion. Als Beispiel verfahrenstechnischer Prozesse aus der Kryotechnik soll eine 2 kW-Tiefemperatur-Heliumanlage anhand verschiedener übergeordneter Fehlerquellen bewertet werden. Diese besteht grundsätzlich aus Kompressoren, Plattenwärmeübertragern, Turbinen und einem Joule-Thomson-Ventil. Die Anlagen- bzw. Komponentenausfälle werden in elektrische, mechanische, Software- oder Leitsystem-Zwischenfälle bzw. externer Faktoren unterteilt. Hierfür wurden Einträge der letzten zwölf Jahre aufgenommen. Diese Auflistung soll Aufschluss über sich wiederholende Vorfälle geben, sodass diese zeitnah behoben oder ganz vermieden werden können, um einem Anlagenausfall vorzubeugen.

## Betriebsverhalten federbelasteter Sicherheitsventile bei kryogenen Bedingungen

Christina Weber<sup>1,\*</sup>, Carolin Heidt<sup>1,2</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Physik (ITEP),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
[Christina.Weber@kit.edu](mailto:Christina.Weber@kit.edu)

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

\* Korrespondenzautorin

Zur Absicherung von Flüssighelium-Kryostaten werden häufig federbelastete Sicherheitsventile eingesetzt. Deren Funktionsweise wird wesentlich durch die Einbausituation beeinflusst, wobei insbesondere der Druckverlust in der Zuleitung und der Gegendruck in der Ableitung Einfluss auf den stabilen oder auch instabilen Betrieb haben. Eine Fehlfunktion des Sicherheitsventils kann dazu führen, dass der erforderliche Massenstrom im Fall einer Betriebsstörung nicht abgeführt und dadurch der maximal zulässige Betriebsdruck überschritten wird.

Zum Verhalten von Sicherheitsventilen unter kryogenen Bedingungen, wie sie z. B. beim Quenchen eines supraleitenden Magneten auftreten, liegen bisher nur wenige experimentelle Daten vor, obwohl die Anfälligkeit für instabiles Abblasen (Flattern) besonders hoch ist. Hinzu kommen Unsicherheiten in Bezug auf die Ausflussziffer durch die Expansion ins Nassdampfgebiet sowie die Veränderung der Federkraft durch die starke Abkühlung des Ventilkörpers auf Temperaturen um 10 K.

In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse von Flüssighelium-Experimenten an einem repräsentativen Sicherheitsprüfstand vorgestellt und Konzepte für weiterführende Untersuchungen des Ventilhaltens diskutiert.

### Stichwörter:

Flüssighelium, Sicherheitsventil, Sicherheitsprüfstand

## Kryoventile und Kryoventile für LNG-Einsatz auf dem Land und auf dem Wasser

Thorsten Cordes

HEROSE GMBH, QM, Elly-Heuss-Knapp-Straße 12, 23843 Bad Oldesloe, Deutschland  
[Thorsten.Cordes@herose.com](mailto:Thorsten.Cordes@herose.com)

Armaturen für den kryogenen Einsatz unterliegen einer Vielzahl unterschiedlicher Regularien. Diese Standards und Normen werden mit ihren verschiedenartigen Anforderungen zum Vergleich gegenübergestellt.

Lösungsmöglichkeiten anhand praktischer Beispiele von technisch notwendigen Maßnahmen, die zur Erfüllung der normativen Forderungen durchgeführt wurden, sollen die kritischen Bereiche einer Armatur aufzeigen.

Eine Übersicht über relevante Produkt-Zulassungen verschafft uns einen Überblick von der Vielfältigkeit möglicher Zulassungen, welche in Abhängigkeit vom Einsatz des Produktes gefordert werden.

Dem Zuhörer soll damit ein Überblick über die Komplexität kryogener Armaturen in Bezug auf das Anwendungsfeld gegeben werden.

## **Kryogene Sicherheitsventile für das Quench-Schutz-System bei ITER**

**M. Börsch\*, D. Weber, J. Drache, E. Iten**

WEKA AG, Schürlistrasse 8, CH-8344 Bäretswil, Schweiz

\* Korrespondenzautor

ITER ist ein internationales Projekt zum Bau eines Fusionsreaktors und zur wissenschaftlichen und technischen Erforschung der Fusionsenergieerzeugung. Helium-gekühlte supraleitende Magnete stellen ein wesentliches Funktionselement dieser Anlage dar. Im Fehlerfall, z. B. bei einem Magnet-Quench erwärmen sich grosse Mengen des Kühlmittels und es kommt es zu einem raschen Druckanstieg. Zum Begrenzen dieses Druckes werden Quench-Ventile verwendet, die das kryogene Helium in Auffangbehälter abführen. Dafür wurden spezielle Sicherheitsventile entwickelt und hergestellt. Neben den internationalen Standards müssen diese Ventile besondere Anforderungen des spezifischen Einsatzes, z. B. hinsichtlich Strahlung, Kompaktheit oder mechanischer Belastung erfüllen. Es werden die Besonderheiten der konstruktiven Gestaltung sowie die absolvierten Tests erläutert.

*Der Vortrag gibt nicht notwendigerweise die Ansichten und Meinungen von ITER Organization wieder.*

## **Heliumkleinverflüssiger im Labormaßstab**

**T. Adler**

LOT-QuantumDesign GmbH, Im Tiefen See 58, 64293 Darmstadt

Heliumkleinverflüssiger basieren auf der sogenannten „Kaltkopf“-Technologie. Diese Kaltköpfe sind entweder als „Pulse Tube“ (PT) oder „Gifford McMahon“ (GM) bekannt und liefern ca. 1,5 W Kühlleistung bei 4,2 K. Montiert auf einem Transportdewar und versehen mit einer intelligenten Drucksteuerung entsteht hieraus ein Heliumkleinverflüssiger (stark vereinfacht gesprochen). Dieser verfügt über Verflüssigungsraten von ca. 20 bis 30 Litern flüssigen Heliums pro Tag. Aufgrund seiner Mobilität und seines relativ kleinem Platzbedarfs eignen sich diese Kleinverflüssiger besonders gut für die Versorgung von autonomen Laboren und Einzelgeräten.

In dieser Präsentation wird auf die Technik und die physikalischen Grundlagen hinter dem „Advanced Technology Liquefier“ (ATL) von Quantum Design eingegangen. Die Realisierungen mehrerer Rückgewinnungen werden am Beispiel von bestehenden Installationen aufgezeigt.

## **Entwicklungen und Optimierungen bei der Flüssigheliumversorgung weltweit**

**S. Ebner**

Linde AG, Unterschleißheim  
[Siegfried.Ebner@linde-gas.com](mailto:Siegfried.Ebner@linde-gas.com)

Die weltweite Heliumversorgung ist und bleibt eine Herausforderung für jeden, der sich mit der Logistik und der Handhabung dieses wertvollen Edelgases beschäftigt.

War vor ein paar Jahren die weltweit produzierte Menge noch sehr knapp, ist durch die Inbetriebnahme mehrerer Anlagen mit großer Produktionskapazität die Versorgung mehr als gedeckt.

Daraus ergeben sich neue logistische und technische Herausforderungen, die je nach Bedarf als LHe oder GHe, auf verschiedene Weise gelöst werden müssen, um die Verluste dieses wertvollen Edelgases so gering wie möglich zu halten.

(Eine Darstellung aus der Praxis für die Praxis)

## I.10

# Numerische Untersuchung eines LNG-Tanksystems

**Stefan Posch<sup>1\*</sup>, Mario Rohrhofer<sup>1</sup>, Johann Hopfgartner<sup>1</sup>, Erwin Berger<sup>1</sup>,  
Raimund Almbauer<sup>1</sup>, Erhard Perz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz,  
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Österreich  
[posch@ivt.tugraz.at](mailto:posch@ivt.tugraz.at)

<sup>2</sup> SimTech GmbH, Riesstraße 120, 8010 Graz, Österreich

\* Korrespondenzautor

Für die Erfüllung zukünftiger Richtlinien bezüglich Emissionen und Verbrauch wird in der Entwicklung moderner Lastkraftwagen (LKW) die Verwendung von Erdgaskonzepten untersucht. Eines der Konzepte verwendet flüssiges Methan (LNG) bei tiefen Temperaturen. Um sicherzustellen, dass der Verbrennungsmotor ausschließlich mit gasförmigem Treibstoff versorgt wird, gilt es, das flüssige Methan in einem zwischengeschalteten Wärmeübertrager zu verdampfen. Die Auslegung dieses Wärmeübertragers für kritische Betriebsbereiche wie den Motorwarmlauf unter Berücksichtigung dynamischer Effekte stellt ein Kriterium für die Funktion des gesamten Tanksystems dar. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Modellierung des Tanksystems und der transienten Berechnung der physikalischen Vorgänge in den Komponenten. Das Modell beinhaltet neben der eindimensionalen räumlichen Auflösung die Berechnung von Wärmeübergängen und Druckverlusten im zweiphasigen und überkritischen Bereich unter Berücksichtigung der Stoffwerte von Methan. Als Simulationsumgebung wird das kommerziell erhältliche Programm IPSEpro verwendet.

### **Stichwörter:**

LNG, Wärmeübertrager, transient

## I.11

# Kleine modulare Erdgas-Verflüssigungsanlagen für dezentrale Anwendungen

**Christian Schmidt**

Cryotec Anlagenbau GmbH, Dresdener Straße 76, 04808 Wurzen, Deutschland  
[christian.schmidt@cryotec.de](mailto:christian.schmidt@cryotec.de)

Die Cryotec Anlagenbau GmbH entwickelt, plant und baut Sonderanlagen für Kälte- und Kryogene Anwendungen, unter anderem Luftzerlegungsanlagen zur Erzeugung von Stickstoff, Sauerstoff und Argon, flüssig und/oder gasförmig, CO<sub>2</sub>-Rückgewinnungsanlagen und Erdgasverflüssigungsanlagen. Diese sollen anhand eines realisierten Projektes näher erläutert werden.



In vielen Regionen weltweit gibt es infrastrukturelle Versorgungsprobleme. Zur Entwicklung des ländlichen Raumes, besonders in den so genannten „Schwellen- und Entwicklungsländern“, kann der Einsatz von LNG eine sinnvolle Alternative zur dezentralen Energieversorgung sein. Des Weiteren gewinnt LNG als Kraftstoff für Lastkraftwagen und Schiffe zunehmend an Bedeutung.

Die von Cryotec für Gazprom in Russland gebaute Erdgas-Verflüssigungsanlage ist im Umland von Perm aufgestellt worden und bezieht das Erdgas aus einer Gaspipeline. Das Gas steht mit ausreichendem Vordruck zur Verfügung und wird nach der Übernahme-Regelstation einer trockenen Aufbereitungsstufe zugeführt. Hier werden hauptsächlich Restfeuchte und CO<sub>2</sub> abgetrennt. Das dabei anfallende Restgas wird zur Stromerzeugung in Gasmotoren genutzt, die die benötigte Energie zum Betrieb der Anlage erzeugen. Zur Erzeugung der notwendigen Kühlleistung wird ein Stickstoffkreislauf eingesetzt, der aus einem 3-stufigen Turbokompressor und einer Kompressor-gebremsten Turbine besteht, die Verdichtung und Entspannung des Stickstoffes im Kreislauf realisieren. Zusätzlich zu den Zwischen- bzw. Nachkühlern der Kompressoren ist im Kreislauf eine Kälteanlage zur Vorkühlung und Temperaturregelung des Kreislaufes vor Eintritt in den Hauptwärmeübertrager (HWÜ) integriert. Im HWÜ wird das Erdgas verflüssigt und anschließend dem Lagertanks zugeführt. Aus dem Tanklager wird LNG über eine Transferpumpe zur Verladeeinrichtung transportiert und in Tankwagen gefüllt.

Die LNG-Anlage versorgt LNG-Satelliten-Stationen im Umkreis von Perm, die örtlich Gasnetze speisen. Ein Teil des in der Anlage erzeugten LNG wird in andere Regionen Russlands transportiert und z. B. als Kraftstoff für Busse verwendet.

Im Vortrag wird der Aufbau und Betriebsweise der Anlage geschildert und erste Betriebserfahrungen genannt. Es werden auch weitere mögliche Nutzungsformen von LNG aufgeführt.

## I.12

# Der erste BMW mit Kryodruck-Wasserstofftanksystem

**Klaus Szoucsek\*, Klaas Kunze, Manuel Tolosa**

BMW AG, Wasserstoff Tanksysteme, Parkring 19, 85748 Garching, Deutschland

[klaus.szoucsek@bmw.de](mailto:klaus.szoucsek@bmw.de)

\* Korrespondenzautor

Die Wasserstoffspeicherung im Fahrzeug zählt zu den großen technologischen Herausforderungen in der Entwicklung kundenwerter Brennstoffzellenfahrzeuge. Die Hochdruckspeicherung mit Drücken von bis zu 700 bar stellt den derzeitigen Stand der Technik dar, den auch BMW in ersten kommerziellen Anwendungen zum Einsatz bringen wird. Die Weiterentwicklungspotenziale dieser Technologie im Hinblick auf die Energiedichte und damit die im Fahrzeug speicherbare Wasserstoffmenge sind allerdings begrenzt, weshalb BMW seit vielen Jahren an der Entwicklung von Konzepten mit höheren volumetrischen Speicherdichten arbeitet. Nach ermutigenden Prüfstandsergebnissen der Kryodruck-Technologie wurde sie von BMW weiterentwickelt, in Prototypenfahrzeuge auf Basis des 5er GT integriert und für öffentliche Straßen zugelassen. Mit einer kleinen Flotte dieser Brennstoffzellenfahrzeuge demonstriert BMW derzeit die Kundenwertigkeit der innovativen Kryodruck-Technologie.

Am Anfang des Vortrags wird gezeigt, dass die BMW Brennstoffzellentechnologie vor allem für große Fahrzeuge mit hohem Reichweitenanspruch zum Einsatz kommen soll. In diesem Fahrzeugsegment ergeben sich vor allem für die Kryodruck-Technologie mehrere Vorteile hinsichtlich Speicherdichte, Sicherheit, Betankung und Kühlpotential. Sie werden im Einzelnen erklärt. Anschließend wird der 5er GT FCEV mit seinen Leistungsdaten und den Erprobungsergebnissen vorgestellt. Der Vortrag wird durch eine Zusammenfassung des Erreichten und eine Auflistung der verbleibenden Herausforderungen abgerundet.

I.13

## Materialcharakterisierung in Flüssigwasserstoff

Thomas Sirtl

ET EnergieTechnologie GmbH, Eugen-Sänger-Ring 12, 85649 Brunthal, Deutschland  
[thomas.sirtl@enhytec.de](mailto:thomas.sirtl@enhytec.de)

Vorgestellt wird eine Prüfmaschine für statische und dynamische Werkstoffprüfungen unter kryogenen Bedingungen. Zug-, Biege-, Druckversuche, Bruchzähigkeit, Ermüdungsrissausbreitung sowie Ermüdungsversuche in Flüssigwasserstoff werden ermöglicht (max. 100 kN).

Die Werkstoffprobe taucht in Flüssigwasserstoff bei Temperaturen bis 20 K ein. Die Testtemperaturen können im Bereich von 20 - 330 K variiert werden. Auch andere Medien können eingesetzt werden.

I.14

## New Technologies and Control System Enhancements on Multi Cargo Handy-Size Gas Carriers

Jürgen Essler

TGE Marine Gas Engineering GmbH, Mildred-Scheel-Straße 1, 53175 Bonn, Germany  
[juergen.essler@tge-marine.com](mailto:juergen.essler@tge-marine.com)

Multi cargo gas carriers with the ability to transport liquid ethene (ethylene) with a normal boiling temperature of -104 °C use cascade systems to liquefy boil-off gas and cool down the cargo during the voyage. The cargo is liquefied in an open cycle by condensing compressed cargo vapour against propene (propylene) in a heat exchanger which is used in the closed loop refrigerant cycle.

This paper describes new processes of cooling on such gas carriers that are possible with a minimum of additional installed equipment and the implementation of a new control logic used for the propene cascade refrigerant system. The key features of the enhanced control logic, testing of control logic by a hardware in the loop simulation, commissioning and user experience are described.

By today more than 10 gas carriers with more than 20 systems are successful in operation.

I.15

## Kühlanlage für ein supraleitendes Energieversorgungskabel - 2 Jahre erfolgreicher Dauerbetrieb -

F. Herzog<sup>1\*</sup>, T. Kutz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Messer Group GmbH, Gahlingspfad 31, 47803 Krefeld, Germany  
[friedhelm.herzog@messergroup.com](mailto:friedhelm.herzog@messergroup.com)

<sup>2</sup>Messer Industriegase GmbH, 65812 Bad Soden, Germany

\* Korrespondenzautor

Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) können mit flüssigem Stickstoff sehr effizient bis zu einer Temperatur von 64 K (-209 °C) gekühlt werden. Tiefere Temperaturen sind nicht praktikabel, da Stickstoff bei 63 K (-201 °C) gefriert.

Um dieses Temperaturniveau zu erreichen, muss das Kühlmedium im Unterdruck verdampft werden. Messer hat hierfür eine Kühlanlage mit einem entsprechenden Vakuum-Unterkühler, einem speziellen Flüssigstickstoff-Vorratsbehälter und einem Pumpensystem entwickelt, mit der auf 67 K (-206 °C) unterkühlter Stickstoff als Kälteträger für den Betrieb eines supraleitenden Energieversorgungskabels bereitgestellt werden kann.

Die Kühlanlage wurde von Messer im Jahr 2013 für das „AmpaCity-Projekt“ der RWE Deutschland AG geliefert. Weitere Projektpartner sind die Firma Nexans (Lieferant des HTS-Kabels) und das KIT (Karlsruher Institut für Technologie). Im Rahmen des Projektes installierten RWE und Nexans das weltweit längste supraleitende Stromversorgungskabel mitten in der Innenstadt von Essen, Deutschland. Das Kabel ist seit dem 10.03.2014 in Betrieb.

**Keywords:**

subcooler, cryocooler, superconductor, HTS-cooling system, cryogenic cooling, AmpaCity project

I.16

## **The evolution of cryogenic compressors on board LNG carriers to meet the propulsion system changes**

**Neil Wilson\*, Roger Dambach**

BU LNG Transport & Terminals, Zone Industrielle, 68220 Hésingue, France  
[neil.wilson@cryostar.com](mailto:neil.wilson@cryostar.com), [roger.dambach@cryostar.com](mailto:roger.dambach@cryostar.com)

\* Korrespondenzautor

Transportation of natural gas from a producing country to a consuming country in liquid form requires the implementation of an LNG supply chain which includes LNG production facilities, LNG carriers and LNG receiving terminals. An inherent characteristic of this supply chain is that the storage and transport of LNG results in the generation of boil off gas (BOG). On sea-going LNG carriers, this boil-off is typically used to fuel the vessel's propulsion system. As LNG tank and propulsion technology has improved, the fuel gas systems have developed. The LNG carrier industry has developed very compact, efficient and fully skidded BOG compressors which are based on an integrally geared design with overhung wheels. This paper explains how the various propulsion systems have driven the development of the compressor technology, while coping with differences in BOG composition and wide ranges of inlet temperatures experienced within a voyage.

I.17

## **Optische Festkörperkühlung**

**Matthias Thürk**

Friedrich-Schiller Universität , Institut für Festkörperphysik,  
Helmholtzweg 5, D-07745 Jena, Deutschland  
[matthias.thuerk@uni-jena.de](mailto:matthias.thuerk@uni-jena.de)

Im Beitrag werden thermodynamische Aspekte der optischen Festkörperkühlung behandelt.

Einführend wird die Funktionsweise, die idealen Teilprozesse mit ihren notwendigen Energieumwandlungen sowie der Aufbau von optischen Festkörperkühlern vorgestellt.

Bei der Anti-Stokes-Kühlung wird die Wärme des Festkörpers in Licht umgewandelt, welches als einziger Energiestrom das thermodynamische System verlässt.

Verblüffend ist dabei die Tatsache, dass das Spektrum des Lichts deutlich enger ist als das der thermischen Strahlung und damit die Entropie der elektromagnetischen Strahlung kleiner als die der Planckschen Wärmestrahlung ist.

Damit würde die funktionierende optische Kühlung eine Verletzung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik bedeuten.

Im Vortrag wird gezeigt, dass die konsequente Anwendung der Strahlungsthermodynamik diesen Widerspruch auflöst, die Ermittlung thermodynamischer Grenzwerte der optischen Festkörperkühlung ermöglicht und daraus physikalisch denkbare Vorschläge für energetische Verbesserungen bekannter Konstruktionsansätze entwickelt werden können.

## I.18

# Entwicklung einer Testprozedur für kryogene Klebebänder

Thomas Funke<sup>1\*</sup>, Christoph Haberstroh<sup>1</sup>, Robert Mayrhofer<sup>2</sup>, Johannes Stipsitz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TU Dresden, Bitzer-Proffessur für Kälte-, Kryo- und Kompressoventchnik, 01069 Dresden, Deutschland  
[thomas.funke@email.de](mailto:thomas.funke@email.de), [christoph.haberstroh@tu-dresden.de](mailto:christoph.haberstroh@tu-dresden.de)

<sup>2</sup>RUAG Space GmbH, Stachegasse 16, 1120 Wien, Österreich  
[robert.mayrhofer@ruag.com](mailto:robert.mayrhofer@ruag.com), [johannes.stipsitz@ruag.com](mailto:johannes.stipsitz@ruag.com)

\* Korrespondenzautor

Bei Kryostaten und Dewargefäßen für tiefste Temperaturen – insbesondere in Verbindung mit Flüssigheliumkühlung bei rund 4 K, sowie bei den meisten Anwendungen der Supraleitung – werden vielfach Verbindungen und Verschlüsse auf Basis tieftemperaturtauglicher Klebebänder benötigt. Eine gängige Methode zur thermischen Isolierung von Kaltflächen ist deren Abdeckung mit hochreflektierenden Aluminiumfolien, die mit Aluminiumklebebändern befestigt werden. Auswahl, Einsatz und Zuverlässigkeitseinschätzung mutmaßlich geeigneter Klebebänder bzw. Aluminium-Tapes erfolgen derzeit eher heuristisch.

Eine entsprechende Testapparatur zur Messung der maximalen Schubspannung wurde entwickelt und anhand einer Reihe von Testmessungen erprobt. Der Versuchsaufbau und Messergebnisse zur Validierung des Messkonzepts mit Aluminiumklebeband werden in diesem Beitrag präsentiert.

## Entwicklung eines mikrostrukturierten Wärmeübertragers für kryogene Gemischkältekreisläufe

David Gomse<sup>1\*</sup>, Jürgen J. Brandner<sup>2</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Physik (ITEP),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
[david.gomse@kit.edu](mailto:david.gomse@kit.edu)

<sup>2</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

<sup>3</sup>Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe

\* Korrespondenzautor

Kryogene Gemischkältekreisläufe (*Cryogenic Mixed-Refrigerant Circuit* – CMRCs) stellen eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit zur Kühlung im Temperaturbereich zwischen 60 und 200 K dar. Diese Kreisprozesse ähneln dem Linde-Prozess zur Luftverflüssigung, werden aber überwiegend im Nassdampfgebiet eines weit-siedenden Kältemittelgemischs bei moderaten Drücken betrieben.

Die Effizienz von CMRCs wird entscheidend von der Güte der inneren Wärmeübertrager bestimmt. Diese müssen einerseits in Strömungsrichtung eine niedrige Wärmeleitung bei Temperaturunterschieden bis zu 200 K aufweisen, andererseits muss der Wärmedurchgang quer zur Strömungsrichtung hoch sein. Für diese Aufgabe haben Mikrostrukturwärmeübertrager auf Grund der großen volumenspezifischen Wärmeübertragerfläche prinzipielle Vorteile.

Die zuverlässige Auslegung solcher Wärmeübertrager ist mit heutigen Mitteln jedoch nicht möglich, weil herkömmliche Auslegungsmethoden nicht mit weitsiedenden Gemischen kompatibel sind. Ferner ist die Datenbasis zu Wärmeübergangs- und Druckverlustkoeffizienten beim Verdampfen/Kondensieren weitsiedender Gemische unzureichend.

Im Rahmen dieses Beitrags werden der Auslegungsprozess eines Prototyp-Wärmeübertragers mit einer eigens entwickelten Berechnungsroutine sowie erste experimentelle Ergebnisse vorgestellt.

### Stichwörter:

Gemischkälte, Wärmeübertragung

## **Eigenkalibrierung eines neuen kryogenen Durchflusssensors im Anlagenbetrieb**

**Andreas Janzen<sup>1\*</sup>, Michael Börsch<sup>2</sup>, Birgit Burger<sup>3</sup>, Andreas Ebersoldt<sup>3</sup>, Pascal Erni<sup>2</sup>, Fridtjof Feldbusch<sup>3</sup>,  
Ralph Lietzow<sup>4</sup>, Daniel Oertig<sup>2</sup>, Heinz Schön<sup>4</sup>, Michael Stamm<sup>4</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Karlsruher Institut für Technologie,  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[andreas.janzen@kit.edu](mailto:andreas.janzen@kit.edu)

<sup>2</sup> WEKA AG, Schürlistrasse 8, 8344 Bäretswil, Schweiz  
[web-info@weka-ag.ch](mailto:web-info@weka-ag.ch)

<sup>3</sup> Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE), Karlsruher Institut für Technologie,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

<sup>4</sup> Institut für Technische Physik (ITEP), Karlsruher Institut für Technologie,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Das Karlsruher Institut für Technologie entwickelt zusammen mit der WEKA AG, Schweiz einen kommerziellen Durchflusssensor für die Anwendung in der Kryotechnik. Der Durchflusssensor basiert auf einem neuen thermischen Messprinzip, das die Eigenkalibrierung im Betrieb erlaubt. Grundlage sind zwei unabhängige und physikalisch exakte Gleichungen, die beschreiben, wie sich der Massenstrom aus Temperatur- und Heizleistungsmessungen eines Wärmeübertragers berechnen lässt. Messunsicherheiten der direkten Messgrößen haben hierbei zur Folge, dass die Ergebnisse beider Gleichungen voneinander abweichen. Die Eigenkalibrierung erfolgt durch die Minimierung der Streuung der Ergebnisse beider Gleichungen, wodurch alle systematischen Messunsicherheiten eliminiert werden. Die resultierende Messunsicherheit des Massenstroms ist damit nur noch von statistischen Anteilen abhängig und wird im Wesentlichen von der Stabilität der Fluidströmung in der Anlage bestimmt.

In dieser Arbeit werden experimentelle Ergebnisse des kryogenen Durchflusssensors vorgestellt, der für Helium-Massenströme bis 12 g/s bei Arbeitstemperaturen von 300 K bis 4 K und Drücken bis 5 MPa konzipiert ist. Die Experimente wurden mit Helium im Kontrollkryostaten der 2 kW-Kälteanlage des TOSKA-Versuchsstandes durchgeführt. Durch Vergleich mit einem in Reihe angeordneten Venturirohr, das als Referenzmesssystem diente, wurde das Funktionieren der Eigenkalibrierung erfolgreich nachgewiesen.

### **Stichwörter:**

Sensor, Kalibrierung, Durchfluss, Thermisch, Massenstrom

## Messung von Tieftemperatur-Phasengleichgewichten in binären Gemischen mit R1234yf

Isabelle Tratschitt<sup>1</sup>, Thomas M. Kochenburger<sup>1\*</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Karlsruher Institut für Technologie,  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe  
[kochenburger@kit.edu](mailto:kochenburger@kit.edu)

<sup>2</sup> Institut für Technische Physik (ITEP), Karlsruher Institut für Technologie,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

\* Korrespondenzautor

Kryogene Gemischkältekreisläufe (MRCs) stellen eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit zur Kühlung im Temperaturbereich zwischen 80 und 200 K dar. Zur Auslegung dieser Prozesse sind Zustandsgleichungen erforderlich, die das Phasenverhalten der verwendeten Kältemittelgemische zuverlässig wiedergeben. Eine Anpassung der Parameter an genaue experimentelle Daten ist dafür unabdingbar.

Am Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK) steht eine Versuchsanlage zur Verfügung, mit der die benötigten Dampf-Flüssig-Gleichgewichtsdaten zwischen 120 und 280 K bei Drücken bis zu 35 bar bestimmt werden können. Bei gegebenen Temperaturen sind damit sowohl die Messung des Dampfdrucks als auch die Probenahme aus der Dampfphase und aus bis zu zwei Flüssigphasen möglich.

Sollen MRCs zur Kühlung hochtemperatursupraleitender elektrischer Komponenten eingesetzt werden, so ist aus Sicherheitsgründen die Verwendung schwer brennbarer Kältemittelgemische vorzuziehen. Darin bietet das Kältemittel R1234yf auf Grund seines geringen Treibhauspotentials und der niedrigen Tripelpunkttemperatur ein besonderes Potential als Mischungskomponente.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Tieftemperatur-Phasengleichgewichtsmessungen von binären Gemischen aus R1234yf mit weiteren Kältemitteln vorgestellt.

### Stichwörter:

Gemischkältekreislauf, Hochtemperatursupraleiter, Phasengleichgewicht, R1234yf

## Neuartige kryogene Funktionselemente

Andreas Kade, Petar Dalakov, Norbert Gust, Moritz Kuhn, Daniel Schmidt, Matthias Schneider,  
Gunar Schroeder, Gabriele Spörl, Manuel Wischer, Ulrich Zerweck, Jürgen Klier\*

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH (ILK Dresden),  
Hauptbereich Kryotechnik und Tieftemperaturphysik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Am ILK Dresden werden individuelle kryogene Systeme nach Kundenwunsch entwickelt und gefertigt. Aktuelle Entwicklungen sind Helium Satelliten-Verflüssigungssysteme mit einer Kälteleistung von 100 W bis zu einigen kW nahe 4 K, zum Handling von großen Heliumgasströmen.

Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung eines eigenen Kalibrierprüfstands für Tieftemperatursensoren, dass spezielle Kundenwünsche bzgl. Verdrahtung und Sensorcharakteristik berücksichtigt werden können.

Durch Anfragen von Großforschungszentren wurden spezielle Temperaturmessbrücken entwickelt, mit denen es möglich ist, 80 Sensoren gleichzeitig anzuschließen und für diese die individuellen Kalibrierkurven zu hinterlegen. Vorteile ergeben sich u. a. aus einem kompakten Aufbau und der Möglichkeit, je nach Abtastrate weitere Sensoren über kalte Multiplexer anzuschließen.

Des Weiteren wird ein neuartiger kalter Linearantrieb vorgestellt, der unter kryogenen Bedingungen für den Transport von tiefkalten, verflüssigten Medien, z. B. in einer Kryoflüssigkeitspumpe, eingesetzt werden kann.

### I.23

## **Design and development of fully automated cryogenic temperature calibration facility for optical and electro-mechanical sensors**

**R. Ramalingam\*, A. Reiner, H. Neumann**

Institut für Technische Physik (ITEP), Karlsruher Institut für Technologie,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

\* Korrespondenzautor

Cryogenic temperature monitoring and control is important for various cooling circuits and in the area of applied superconductivity. The big experimental facilities utilizing superconducting devices, and cryogenic systems needs a large number of temperature sensors installed at various locations to measure the local temperature with high accuracy. Hence accurately calibrated electrical and optical temperature sensors are needed. In order to fulfill the requirements a fully automated cryogenic temperature calibration facility for optical and Electro mechanical sensor calibration has been designed and developed. The facility can be used to calibrate in the temperature range from 1.6 to 300 K. For calibrations two secondary standards, germanium and rhodium/iron are installed. In addition, a vapor pressure measurement system is integrated in order to be able to verify the secondary standards periodically. In this paper, the technology requirement for developing a fully automated cryogenic temperature calibration facility for simultaneous calibration of optical and Electro mechanical sensors will be described.

#### **Keywords:**

Sensors, Cryogenic temperature, Calibration, Cryo-instrumentation.



## Effiziente Kältebereitstellung durch Kopplung von Adsorptions- und CO<sub>2</sub>-Kompressionskälteanlage

Andrej Gibelhaus<sup>1\*</sup>, Nicolas Fidorra<sup>2</sup>, Franz Lanzerath<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>3</sup>,  
Jürgen Köhler<sup>2</sup>, André Bardow<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik,  
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen, Deutschland  
[andrej.gibelhaus@ltt.rwth-aachen.de](mailto:andrej.gibelhaus@ltt.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommerstr. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[n.fidorra@tu-braunschweig.de](mailto:n.fidorra@tu-braunschweig.de)

<sup>3</sup> Fraunhofer ISE, Gebäudeenergie-technik,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[andre.bardow@ltt.rwth-aachen.de](mailto:andre.bardow@ltt.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

Die Nachhaltigkeit von Energiesystemen wird immer häufiger durch den Einsatz von Kompressionskälteanlagen mit dem natürlichen Kältemittel CO<sub>2</sub> verbessert. Bei hohen Umgebungstemperaturen arbeiten CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen im transkritischen Betrieb. Dadurch weisen sie häufig noch eine geringere Effizienz auf als Kompressionskälteanlagen mit synthetischen Kältemitteln. Aufgrund der Stoffeigenschaften von CO<sub>2</sub> im transkritischen Betriebsbereich, fällt die Abwärme der Kälteanlagen allerdings auf einem hohen Temperaturniveau an, sodass eine Nutzung möglich wird. Für Heizzwecke erfolgt so bereits eine Wärmerückgewinnung, allerdings ist bei hohen Umgebungstemperaturen der Heizwärmebedarf meist gering.

Daher wird in dieser Arbeit eine alternative Möglichkeit zur Nutzung der Abwärme von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen vorgestellt, die auf Adsorptionskälteanlagen basiert. Adsorptionskälteanlagen sind thermisch angetriebene Kälteanlagen und können Niedertemperaturwärme zur Kälteerzeugung verwerten. So kann die Abwärme der CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen zur Erzeugung einer zusätzlichen Kälteleistung genutzt werden. Diese zusätzliche Kälteleistung steigert die Effizienz der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, indem das Kältemittel bei der Rückkühlung unter Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen ist dieser Ansatz vielversprechend, da zum einen viel Abwärme zur Verfügung steht und zum anderen eine zusätzliche Kühlung besonders effizienzsteigernd ist.

In diesem Beitrag wird daher die Ankopplung einer Adsorptionskälteanlage an eine CO<sub>2</sub>-Kompressionskälteanlage mithilfe von dynamischen Simulationen untersucht. Dabei wird der Einfluss der Dimensionierung sowie der Betriebsparameter auf die Systemperformance bei verschiedenen Umgebungstemperaturen identifiziert und diskutiert. Basierend darauf wird das Potenzial dieser Kopplung für die Gesamteffizienzsteigerung aufgezeigt.

### Stichwörter:

Adsorption, CO<sub>2</sub>, Transkritischer Prozess, Wärmeintegration, Energieeffizienz

II.1.02

## Vergleich zweier Wärmerückgewinnungskonzepte für Adsorptionskältemaschinen

**Aditya Desai\***, Valentin Schwamberger, Ferdinand P. Schmidt

Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Strömungsmaschinen,  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Baden-Württemberg  
[aditya.desai@kit.edu](mailto:aditya.desai@kit.edu)

\* Korrespondenzautor

Adsorptionszyklen umfassen zwei gegenläufige Wärmeübertragungsprozesse. Interne Wärmerückgewinnung (WRG) zwischen Ad- und Desorption ist erforderlich, um eine Verbesserung der Arbeitszahl (engl. coefficient of performance, *COP*) zu erreichen. In einem in marktverfügbaren Zwei-Adsorber-Kältemaschinen eingesetzten WRG-Konzept (hier als „Standard“ bezeichnet) findet eine WRG durch eine verzögerte Umschaltung der Adsorber-Rückläufe beim Wechsel zwischen den Halbzyklen statt, sodass immer der heißere bzw. kältere Rücklauf an Hochtemperaturquelle bzw. Mitteltemperatursenke angeschlossen ist. Dabei wird hauptsächlich sensible Wärme zurückgewonnen. Das zweite untersuchte WRG-Konzept ist das sogenannte „Stratisorp“-Konzept. Darin wird die während des Adsorptionshalbzyklus freigesetzte Wärme in einem thermischen Schichtspeicher zwischengespeichert und soweit möglich im Desorptionshalbzyklus eingesetzt.

Ein Vergleich dieser beiden WRG-Konzepte wird hier mittels dynamischer Systemsimulationen durchgeführt. Die Sensitivität des *COP* und der Kühlleistung bezüglich verschiedener Systemparameter wird bestimmt. Die relevantesten Parameter sind die Massenströme und Vorlauftemperaturen auf den Außenseiten des Antriebs-, Rückkühl- und Verdampferkreislaufs. Die Simulationen werden mit den Parametern eines marktverfügbaren Adsorbers (SAPO-34/Wasser) durchgeführt.

Da sich die beiden WRG-Konzepte auch hinsichtlich der anlagentechnischen Realisierung unterscheiden (Anzahl der Adsorber, Art der Speicherintegration), ist die Auswahl eines Konzepts für die Systemplanung notwendig. Es werden hier für jedes Konzept bzw. System die geeigneten Einsatzbereiche dargestellt.

**Stichwörter:**

Adsorptionskältemaschine, Wärmerückgewinnung, Stratisorp

II.1.03

## Experimentelle Untersuchung einer Gasabsorptionswärmepumpe unter Labor- und Feldtestbedingungen sowie Vergleich mit Simulationsergebnissen

Roman Wechsler<sup>1</sup>, René Rieberer<sup>1\*</sup>  
Johann Emhofer<sup>2</sup>, Andreas Zottl<sup>2</sup>, Christian Köfinger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich  
[rene.rieberer@tugraz.at](mailto:rene.rieberer@tugraz.at)

<sup>2</sup> Energy Department, Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[johann.emhofer@ait.ac.at](mailto:johann.emhofer@ait.ac.at)

\* Korrespondenzautor

Gasabsorptionswärmepumpen (GAWPs) bieten im Vergleich mit herkömmlichen fossil betriebenen Technologien im Bereich der Raumwärmeerzeugung ein beträchtliches Potential hinsichtlich der Einsparung von Brennstoff und der Emission von Treibhausgasen.

Eine GAWP für Anwendungen im häuslichen Bereich mit 18 kW Heizleistung (E-Sorp Alpha-Anlage) wurde bei verschiedenen stationären Betriebspunkten unter Laborbedingungen am AIT und der TU Graz untersucht. Dabei wurden neben zahlreichen individuell ausgewählten Betriebspunkten auch Norm-Betriebspunkte nach der EN12309:2016 vermessen. Gleichzeitig wurde eine GAWP der gleichen Bauart in einem Einfamilienhaus in einem Gesamtsystem mit einem 800 l Heizungspuffer und einem 300 l Frischwasserspeicher betrieben. Relevante Messgrößen wurden in diesem System minutenweise über 18 aufeinanderfolgende Tage im Jänner und Februar 2015 aufgezeichnet und das Betriebsverhalten der GAWP unter realen dynamischen Betriebsbedingungen dokumentiert. Basierend auf den verschiedenen experimentell ermittelten Kennwerten und auf den Massen- und Energiebilanzen der Komponenten, wurde ein Kreislaufmodell der untersuchten GAWP entwickelt. Die Vorhersagen des Modells wurden zum einen mit den Laborversuchen und zum anderen mit stationären Betriebspunkten unter Feldtestbedingungen abgeglichen. Ferner wurde der saisonale Wirkungsgrad der Gasnutzung im Heizbetrieb (*SGUE<sub>h</sub>*) mit dem Simulationsmodell nach dem Temperaturstufen-(BIN-)verfahren der EN12309 und andererseits durch eine detaillierte Jahressimulation berechnet. Diese Daten wurden mit dem aus Messdaten berechneten *SGUE<sub>h</sub>* gemäß EN12309 verglichen.

**Stichwörter:**

Ammoniak/Wasser, Energieeffizienz, Monitoring

II.1.04

## Experimentelle Ergebnisse einer Absorptionskälteanlage mit ionischer Flüssigkeit und Ethanol

T. Meyer\*, M. Winker, R. Kühn, C. Ricart, F. Ziegler

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
Fon: 030 314-22933, Fax: 030 314-22253, Email: [thomas.meyer@tu-berlin.de](mailto:thomas.meyer@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Zur thermischen Tiefkältebereitstellung im Temperaturbereich von bis zu -20°C werden typischerweise Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser eingesetzt. Aufgrund des nicht vernachlässigbaren Dampfdruckes des Absorbens Wasser wird für diesen Temperaturbereich jedoch eine Rektifikationseinrichtung benötigt, um ein Vereisen des Verdampfers zu vermeiden.

Im Rahmen eines vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Verbundforschungsprojektes wird die Eignung von ionischen Flüssigkeiten als Absorbens mit vernachlässigbarem Dampfdruck für alternative Kältemittel untersucht.

Ein potentielles Arbeitspaar für die Kälteanwendung von bis zu -20°C ist die ionische Flüssigkeit [EMIM][DEP] als Absorbens für das Kältemittel Ethanol. Im Verlauf des Projektes wurde eigens für das verwendete Kältemittel eine Absorptionskälteanlage auf Basis vorheriger Computersimulationen konzipiert, ausgelegt und gefertigt.

Die experimentell ermittelten Kälteleistungen, sowie die thermische Effizienz der Kälteanlage als Funktion der Antriebstemperatur werden gezeigt und mit den Ergebnissen der für die Anlagenauslegung durchgeführten Computersimulation verglichen.

**Stichwörter:**

Absorptionskälte, Thermische Kältebereitstellung, natürliche Kältemittel, Ethanol, ionische Flüssigkeiten, Tiefkälte

## Schallgeschwindigkeitsmessungen in flüssigem *n*-Butan und *iso*-Butan

Ahmed El Hawary, Karsten Meier\*

Institut für Thermodynamik, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg,  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg, Deutschland  
[elhawary@hsu-hh.de](mailto:elhawary@hsu-hh.de), [karsten.meier@hsu-hh.de](mailto:karsten.meier@hsu-hh.de)

\* Korrespondenzautor

Mit einer am Institut vorhandenen Apparatur wurden umfassende und genaue Messungen der Schallgeschwindigkeit in reinem *n*-Butan und *iso*-Butan im flüssigen und überkritischen Zustandsgebiet mit dem Puls-Echo-Verfahren durchgeführt. Die Messungen decken den Temperaturbereich von 200 K bis 430 K unter Drücken bis zu 100 MPa ab. Die erweiterten Unsicherheiten unserer Daten (95 %-Konfidenzintervall) betragen 2,1 mK für die Temperatur, 0,007 % für den Druck und 0,01 % für die Schallgeschwindigkeit mit Ausnahme der Daten in der Nähe des kritischen Punktes, wo die Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit bis zu 0,016 % beträgt. Die hohe Qualität der Daten für *n*-Butan wird durch Vergleiche mit Literaturdaten von Niepmann [1] und der Fundamentalgleichung von Bückner und Wagner [2] für *n*-Butan belegt. Die Schallgeschwindigkeit im Flüssigkeitsgebiet von *iso*-Butan wurde in dieser Arbeit erstmalig vermessen. Daher werden die Ergebnisse für *iso*-Butan nur mit der Fundamentalgleichung von Bückner und Wagner [2] verglichen. Mit unseren neuen Daten können die beiden Fundamentalgleichungen für *n*-Butan und *iso*-Butan von Bückner und Wagner erheblich verbessert werden.

### Stichwörter:

*n*-Butan, *iso*-Butan, Flüssigkeit, Schallgeschwindigkeit, thermodynamische Eigenschaften

### Referenzen:

- [1] R. Niepmann: Thermodynamic properties of propane and *n*-butane. 2. Speeds of sound in the liquid up to 60 MPa. J. Chem. Thermodynamics 16, 851-860, 1984.
- [2] D. Bückner und W. Wagner: Reference Equations of State for the Thermodynamic Properties of Fluid Phase *n*-Butane and Isobutane. J. Phys. Chem. Ref. Data 35, 929-1019, 2006.

## Oberflächenspannung von POE in Gasatmosphären

Tobias Göpfert\*, Christiane Thomas, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01062 Dresden, Deutschland  
[tobias.goepfert@tu-dresden.de](mailto:tobias.goepfert@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Die Optimierung von Kompressionskältemaschinen und Wärmepumpen kann unter anderem durch die Reduktion von Leckage innerhalb des Kompressors erreicht werden. Zur Wärmeabfuhr und Schmierung von Kompressoren werden daher für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Schmierstoffe eingesetzt. Weiterhin werden aktuell vermehrt Kältemittel mit hohen Dampfdrücken wie R744 eingesetzt, welche besondere Anforderungen an die Kompressoren und Schmierstoffe stellen. Neben der Viskosität ist die Oberflächenspannung entscheidend für die Bewertung der Haftung und des Dichtungseffektes des Schmierstoffes innerhalb des Kompressors. Da aus der Literatur nur wenige Daten für die Oberflächenspannung von Schmierstoffen in Gasatmosphären, insbesondere bei hohen Drücken entnommen werden können, wurde ein entsprechender

Versuchstand konzipiert, aufgebaut und getestet. Mit Hilfe der Methode des hängenden Tropfens und neuen Algorithmen zur Lösung der Young-Laplace-Gleichung kann die Oberflächenspannung bestimmt werden. Es werden Abhängigkeiten der Oberflächenspannung des Schmierstoffes für unterschiedliche Drücke und Temperaturen in verschiedenen Gasatmosphären sowie Kennzahlen für die Bewertung der Oberflächenspannung dargestellt.

**Stichwörter:**

Oberflächenspannung, POE-Schmierstoffe, Hochdruckgasatmosphären, Stoffeigenschaften

**II.1.07**

## **Measurement of Binary Diffusion Coefficients in Refrigeration Oil/Refrigerant Mixtures by Using DLS**

**Cédric Giraudet<sup>1</sup>, Shane P. Cadogan<sup>1</sup>, Christian Puhl<sup>2</sup>,  
Michael H. Rausch<sup>1</sup>, Andreas P. Fröba<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Department Chemie- und Bioingenieurwesen,  
Professur für Advanced Optical Technologies – Thermophysical Properties,  
Paul-Gordan-Straße 6, 91052 Erlangen  
[andreas.p.froeba@fau.de](mailto:andreas.p.froeba@fau.de)

<sup>2</sup> Fuchs Schmierstoffe GmbH, Friesenheimer Straße 19, 68169 Mannheim  
[christian.puhl@fuchs-schmierstoffe.de](mailto:christian.puhl@fuchs-schmierstoffe.de)

\* Corresponding Author

Mixtures of refrigeration oils with refrigerants are subjected to composition changes during, e.g., switching operations in refrigeration plants. For the characterization of the corresponding mass transport processes, binary diffusion coefficients are required for both the refrigerant-rich and the oil-rich phases. Reliable data for these transport coefficients are, however, lacking in the open literature. In this contribution, it is demonstrated that dynamic light scattering (DLS) allows for an accurate measurement of binary diffusion coefficients in both liquid phases of refrigeration oil/refrigerant mixtures over a wide range of well-defined temperatures and pressures. Besides the effects of these thermal properties of state on the transport coefficients, the influence of the selected substances is pointed out by comparison of results for varying refrigerants and refrigeration oils.

**II.1.08**

## **Druckverlust beim Strömungssieden von CO<sub>2</sub> - Einfluss von POE-Öl im horizontalen innenstrukturierten Rohr -**

**Sonja Weise\*, Markus Wetzel, Benjamin Dietrich, Thomas Wetzel**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Thermische Verfahrenstechnik,  
76131 Karlsruhe, Deutschland  
[weise@kit.edu](mailto:weise@kit.edu)

\* Korrespondenzautorin

Eine wichtige Größe bei der Auslegung von effizienten Kompressionskältemaschinen ist der Druckverlust, da dieser zu einem Abfall der Sättigungstemperatur im Verdampfer führt und damit den Wirkungsgrad der Kältemaschinen beeinflusst. In diesem Beitrag werden umfangreiche experimentelle Ergebnisse zum Druckverlust

beim Strömungssieden von CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>-Öl-Gemischen in einem Rippenrohr (Innendurchmesser 8.62 mm) präsentiert. Um eine Empfehlung für die Auslegung von innenstrukturierten Verdampferrohren abzuleiten, wird der Einfluss des Öls und der Gemischstoffdaten herausgearbeitet und die Daten mit Korrelationen aus der Literatur verglichen.

Untersucht wurde der Druckverlust bei Strömungssieden im horizontalen Rippenrohr sowohl unter adiabaten als auch unter diabaten Bedingungen (Wärmestromdichte 0 - 120 kW m<sup>-2</sup>). Der nominelle Massenanteil des vollständig mit CO<sub>2</sub> mischbaren POE-Öls variierte zwischen 0 und 3 %. Ebenso wurde der Einfluss des Sättigungsdruck (10 - 39 bar), des Strömungsdampfgehalts (0.1 – 0.9) und der Massenstromdichte (75 - 500 kg m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>) untersucht.

Ein signifikanter Einfluss des Ölgehalts auf den Druckverlust konnte bei hohen Strömungsdampfgehalten und Wärmestromdichten festgestellt werden. Durch die Verwendung des hydraulischen Durchmessers kann der Reibungsdruckverlust ohne zusätzlichen Faktor mit guter Übereinstimmung durch bekannte Korrelationen beschrieben werden. Für die Beschreibung des Beschleunigungsdruckverlusts erwies sich das homogene Modell als vielversprechend. Eine weitere Erhöhung des Druckverlusts bei hoher Wärmestromdichte durch die Anreicherung des Öls in der wandnahen Grenzschicht kann durch die bisher bekannten Modelle nicht abgebildet werden.

**Stichwörter:**

Strömungssieden, Rippenrohr, Druckverlust, Kältemittel, Öl, Kohlendioxid, natürliche Kältemittel

II.1.09

## Entwicklung eines PVT-basierten Wärmepumpensystems auf der Basis von CO<sub>2</sub> Direktverdampfung

Johannes Rullof<sup>1\*</sup>, Klaus Lambers<sup>1</sup>,  
Jean-Régis Hadji-Minaglou<sup>2</sup>, Frank Scholzen<sup>2</sup>, Ulf Blieske<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TH Köln, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE),  
Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln, Deutschland  
[johannes.rullof@th-koeln.de](mailto:johannes.rullof@th-koeln.de)

<sup>2</sup> University of Luxembourg, Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication,  
6 rue Richard Coudenhove-Kalergi, 1359 Luxembourg, Luxembourg

\* Korrespondenzautor

In jüngster Zeit wird zunehmend die Möglichkeit untersucht, Photovoltaik (PV) und Solarthermie in einem Modul (PVT-Modul) zu vereinen. PVT-Module erzeugen gleichzeitig thermische und elektrische Energie. Da der Wirkungsgrad eines PV-Moduls jedoch mit steigender Temperatur abnimmt, wird die Temperatur des Wärmeträgermediums häufig auf ca. 30 °C beschränkt und eine Wärmepumpe in den Kreislauf integriert, die das Temperaturniveau anhebt.

Der Beitrag beschäftigt sich mit einem CO<sub>2</sub>-Wärmepumpensystem, bestehend aus einem neuartigen PVT-Modul, welches einen mikrokanal-basierten Verdampfer einer CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe mit einem PV-Modul vereint (PVT-direkt). Durch die CO<sub>2</sub>-Direktverdampfung im PVT-Modul wird das Gesamtsystem im Vergleich zu konventionellen PVT-Wärmepumpensystemen mit Glykol-Wasser-Kreislauf auf den Kältekreis reduziert. Eine Pumpe sowie der Wärmeübertrager des Sekundärkreislaufs fallen weg, so dass sich der Gesamtwirkungsgrad des Systems erhöht. Einen weiteren Vorteil des PVT-direkt-Moduls stellt die Erhöhung des Wirkungsgrads der photovoltaischen Komponente dar, der durch die geringen Temperaturen steigt.

Um die Machbarkeit des neuartigen PVT-direkt-Wärmepumpensystems zu demonstrieren, wird im Rahmen des Forschungsprojekts ein funktionsfähiges PVT-direkt-Modul mit einem mikrokanalbasierten Verdampfer konstruiert und schließlich als Teil eines CO<sub>2</sub>-Wärmepumpensystems getestet und modelliert. Eine besondere

Herausforderung stellt die gleichmäßige Kältemittelverteilung der parallel angeordneten Verdampfer-Rohre dar, um eine gute Materialausnutzung und geringe Temperaturgradienten des PV-Moduls zu erreichen.

**Stichwörter:**

R744/CO<sub>2</sub>, Wärmepumpe, PVT, Direktverdampfung, Mikrokanal-Verdampfer

II.1.10

## Einsatz von Latentwärmespeichern in Klimageräten

**Felix Loistl\*, Timo Korth, Christian Schweigler**

Hochschule München, Fakultät 05 Versorgungs- und Gebäudetechnik,  
Lothstr. 34, 80335 München, Deutschland  
[felix.loistl@hm.edu](mailto:felix.loistl@hm.edu), [timo.korth@hm.edu](mailto:timo.korth@hm.edu), [christian.schweigler@hm.edu](mailto:christian.schweigler@hm.edu)

\* Korrespondenzautor

Für die zukunftsorientierte Energieversorgung von Gebäuden nehmen Wärmepumpensysteme mit dem Antrieb durch regenerativ erzeugten Strom eine entscheidende Rolle ein. Besonders Klimageräte sind für die Raumkonditionierung durch Ihre einfache Installation und die leichte Erschließung von Luft als Wärmequelle europaweit und weltweit stark vertreten. Während Wärmepumpen und Kältemaschinen mit wasserführenden Energieverteilensystemen auf konventionelle Wärmespeicher oder auf eine Gebäudeaktivierung zurückgreifen können, haben luftbasierte Klimageräte kaum Möglichkeiten, die thermische Energieerzeugung von dem Verbrauch zeitlich zu entkoppeln. Mit einer Einbringung von thermischen Speichern in den Kältekreis könnte auch bei Klimageräten eine Entkopplung geschaffen werden.

Latentwärmespeicher als thermische Speicher kommen zusätzlich der Charakteristik des Kompressionsprozesses entgegen. Die nahezu konstanten Temperaturen bei der Energieein- und ausspeicherung können eine zu starke Erhöhung des Temperaturhubs bei der Verdichtung unterbinden.

Um mit einem Latentwärmespeicher die gewünschten Leistungen und Betriebszeiten zu erzielen, sind die Dynamik, das Verhalten des Speichers und insbesondere die Wechselwirkung zwischen dem Kältemittel und dem Phasenwechselmaterial von Bedeutung. Nach der Darstellung verschiedener Funktionsarten und Einsatzmöglichkeiten in Klimageräten werden die entscheidenden Einflussgrößen und Design-Parameter von kältemitteldurchströmten Latentwärmespeichern aufgezeigt. Zur Bestätigung der theoretischen Abschätzung wird ein Latentwärmespeicher in einer Versuchskälteanlage untersucht.

**Stichwörter:**

Kältemittelbeaufschlagter Latentwärmespeicher, PCM, Klimageräte

II.1.11

## Design und Entwurf von Latentwärme-Kühlkörpern für Elektronikkomponenten durch Simulationen und Experimente

**Henrik Veelken\*, Gerhard Schmitz**

Technische Universität Hamburg, Institut für Thermofluidynamik, Hamburg, Deutschland  
[henrik.veelken@tuhh.de](mailto:henrik.veelken@tuhh.de), [schmitz@tuhh.de](mailto:schmitz@tuhh.de)

\* Korrespondenzautor

Die Entwicklung und Sicherstellung eines effektiven Thermomanagements im Bereich der Elektronik Kühlung ist eines der schwierigsten Aufgaben auf diesem Gebiet. Für zeitlich begrenzte oder periodisch angewandte

Systeme hat sich die Latentwärmekühlung als vielversprechende Methode herausgestellt. Bei der Latentwärmekühlung wird ein Phasenwechselmaterial (Paraffin, Salzhydrat etc.) eingesetzt und die Schmelzenthalpie zur Kühlung genutzt. Ein entscheidendes Problem dieser Phasenwechselmaterialien ist, dass die Wärmeleitfähigkeit sehr gering ist, weshalb diese durch den Einsatz von thermisch gut leitenden Materialien (Aluminium, Kupfer etc.) verbessert werden muss.

In vielen von den oben genannten Einsatzbereichen tritt die Wärmelast nicht räumlich gleichmäßig verteilt auf, sondern es gibt sog. lokale „hot spots“, also Bereiche, in denen eine erhöhte Wärmelast auftritt.

In einem Forschungsprojekt an der Technischen Universität Hamburg wurde simulativ und experimentell untersucht, wann eine Anpassung eines Kühlkörpers an die Wärmelast sinnvoll ist und wie groß die Verbesserung der Kühlung der Elektronikkomponente in Folge einer Optimierung ist. Simulationen wurden in Comsol® und Matlab® durchgeführt. Experimente wurden in der Laboreinrichtung des Instituts mithilfe von LabView® und angepassten Elektronikkomponenten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit steigenden Wärmelastunterschieden eine Verbesserung bis zu 5% bei nahezu gleichbleibender Masse erreicht werden kann. Simulationen und Experimente zeigen ein sehr ähnliches Verhalten. Unterschiede zwischen beiden sind durch nicht simulierte physikalische Effekte zu erklären.

## II.1.12

# Eisspeicher – Stand der Technik und Ansatzpunkte zur Optimierung der Beladung sowie deren Modellierung

**U. Oechsle\*, K. Spindler**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik,  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
Tel.: 0049-711-685-69443, Fax: 0049-711-685-63503  
E-Mail: [oechsle@itw.uni-stuttgart.de](mailto:oechsle@itw.uni-stuttgart.de)

\* Korrespondenzautor

Eisspeicher sind thermische Speicher, die in Kombination mit einer Wärmepumpe oder einer Absorptionskältemaschine (AKM) eingesetzt werden können. Bei der Beladung eines Eisspeichers bildet sich Eis auf der Wärmeübertrageroberfläche, sobald lokal die Nukleationstemperatur unterschritten wird. Dies führt zu einer Abnahme der Beladungsleistung.

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zum Betrieb eines Eisspeichers im Kombination mit einer AKM durchgeführt. Aktuell werden experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung der Beladung hinsichtlich einer Beeinflussung der Nukleationstemperatur durchgeführt. Die Nukleationstemperatur wird unter anderem bestimmt durch die Beschaffenheit der Wärmeübertrageroberfläche. Durch die Verwendung verschiedener Wärmeübertragermaterialien und z. B. mittels Elektropolieren, Sandstrahlen oder Plasmabeschichtungen kann die Oberfläche verändert werden. Einige experimentelle Ergebnisse sowie Ansätze zur Modellierung eines Beladungsvorgangs in Abhängigkeit von der Nukleationstemperatur werden vorgestellt. Dabei wird Bezug genommen zum Stand der Technik und zu den früheren Untersuchungen von Eisspeichern am ITW.



## Partikelgrößenverteilung in Eisbreigemischen – Rekristallisationshemmende Stoffe in Eisbreigemischen

Matthias Koffler<sup>1\*</sup>, Andreas Leiter<sup>2</sup>, Volker Gaukel<sup>2</sup>, Michael Kauffeld<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[matthias.koffler@hs-karlsruhe.de](mailto:matthias.koffler@hs-karlsruhe.de), [michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de)

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Bio- und Lebensmitteltechnik, Bereich I:  
Lebensmittelverfahrenstechnik, Gotthard-Franz-Straße 3, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[andreas.leiter@kit.edu](mailto:andreas.leiter@kit.edu), [volker.gaukel@kit.edu](mailto:volker.gaukel@kit.edu)

\*Korrespondenzautor

Die stattfindende Energiewende erfordert zwingend Energiespeichersysteme. Im Bereich der thermischen Speicherung werden hierbei vermehrt Phasenwechselspeicher (PCM-Speicher) eingesetzt. Eine innovative Version der PCM-Speichertechnologie in der Kältetechnik ist das Medium Eisbrei. Hierbei liegt das Speicher-material Eis in Form von kleinen Partikeln als zweiphasiges fest-flüssig-Gemisch vor und ist dadurch in Fluidsystemen förderbar.

Um die Parameter Druckverlust, Viskosität und Wärmeübergang des Gemischs über die Speicherdauer möglichst konstant zu halten und die Betriebssicherheit der Anlage zu gewährleisten, muss die auftretende Rekristallisation der Eispartikel möglichst unterdrückt werden. Eine Rekristallisationsunterdrückung und damit die Eindämmung des Wachstums der Eispartikel kann durch Zugabe von rekristallisationshemmenden Stoffen realisiert werden. Beispielsweise zeigten Antifrierproteine (AFP), Polyvinylalkohol (PVA) und das Polysaccharid  $\kappa$ -Carrageen starke rekristallisationshemmende Wirkungen in einfachen Saccharoselösungen (Budke und Koop, 2006 [1]; Gaukel et al., 2014 [2]). In dieser Arbeit wird daher das Potential dieser Stoffe als Rekristallisationshemmer in Eisbrei untersucht.

Im Einzelnen werden die Auswirkungen von Antifrierproteine (AFP), Polyvinylalkohol (PVA) und  $\kappa$ -Carrageenan auf die Rekristallisation von Eis in den Basislösungen Ethanol-Wasser und Propylenglykol-Wasser untersucht. Gezeigt werden Ergebnisse von Voruntersuchungen in einem statischen, miniaturisierten System, welches üblicherweise zur Überprüfung der rekristallisationshemmenden Wirkung in Lebensmitteln genutzt wird.

Eine wachstumshemmende Wirkung bei der Zugabe von AFP und PVA ist sowohl bei 10 % Ethanol als auch bei 14 % Propylenglykol als Basislösung erkennbar. Beide Mischungen haben einen Eisanteil von 30 % bei -7 °C. Die Ergebnisse deuten außerdem auf eine Wechselwirkung von PVA mit dem Korrosionsschutz im Ethanol-Wasser-Gemisch hin. Bei erhöhter Konzentration des Grundstoffes in der Basislösung (Ethanol 15 % und Propylenglykol 20 %, entspricht Eisanteil von 30 % bei -12 °C) zeigt AFP weiterhin eine rekristallisationshemmende Wirkung, wohingegen PVA nur noch in Propylenglykol wirkt. Die Zugabe von  $\kappa$ -Carrageen hat in keiner der untersuchten Mischungen eine messbare Wirkung aufgezeigt.

In folgenden Arbeiten werden Untersuchungen auf einem dynamischen System mit größeren Mengen durchgeführt. Hierbei wird der Eisbrei über einen Kratzverdampfer durch heterogene Keimbildung erzeugt und mit dem, im Jahre 2015 (Koffler und Kauffeld, 2015 [3]) vorgestellten Verfahren untersucht.

*Da die Untersuchungen noch andauern, werden die Resultate der dynamischen Untersuchung in der Veröffentlichung beschrieben.*

### Stichwörter:

Thermische Energiespeicher, Eisbrei; Partikelgrößenverteilung

### Literatur:

[1] Budke, C.; Koop, T., (2006). Ice recrystallization inhibition and molecular recognition of ice faces by poly(vinyl alcohol). ChemPhysChem. 7, 2601-2606.

- [2] Gaukel, V.; Leiter, A.; Spieß, W.E.L., (2014). Synergism of different fish antifreeze proteins and hydrocolloids on recrystallization inhibition of ice in sucrose solutions. *Journal of Food Engineering*. 141 (2014) 44–50.
- [3] Koffler, Matthias ; Kauffeld, Michael, (2015). Partikelgrößenverteilung in Eisbreigemischen – Setup und Auswertung. In: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV) (Hrsg.): Deutsche Kälte- und Klimatagung

#### II.1.14

## **Entwicklung und Erprobung einer thermisch angetriebenen Lösungsmittelpumpe für Ammoniak Wasser Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen**

**Alexander Arnitz\*, René Rieberer**

Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich  
[alexander.arnitz@tugraz.at](mailto:alexander.arnitz@tugraz.at)

\* Korrespondenzautor

Absorptionswärmepumpen bzw. -kältemaschinen haben bei Antriebsenergiebereitstellung durch Wärme aus solarthermischen Anlagen oder aus industrieller Abwärme erhebliches wirtschaftliches und ökologisches Potential. Der Ersatz der elektrischen Lösungsmittelpumpe durch eine thermische Lösungsmittelpumpe kann zu einer Verringerung des elektrischen Energiebedarfs und somit zu wirtschaftlicheren Betriebsbedingungen beitragen. Die thermische Lösungsmittelpumpe wird dabei durch einen rechtslaufenden thermodynamischen Prozess mit im Generator erzeugtem Kältemitteldampf angetrieben und durch Magnetventile mit vorgegebener Schaltzeit gesteuert.

In dieser Arbeit wird das Konzept der thermischen Lösungsmittelpumpe beschrieben und die Integration in einer einstufigen Ammoniak Wasser Absorptionskältemaschine mit einer Kälteleistung von bis zu 20 kW dargestellt. Um Optimierungspotentiale aufzuzeigen wird neben dem ausschließlichen Betrieb der Pumpe mit Kältemitteldampf ein kombinierter Betrieb mit armer Lösung und Kältemitteldampf untersucht. Eine teilweise Kondensation von Antriebskältemitteldampf, verursacht durch den Wärmeaustausch mit reicher Lösung bzw. der Umgebung, wirkt sich sowohl auf die Leistung als auch auf die Effizienz negativ aus. Um die bestmöglichen Betriebsbedingungen zu finden, wurden verschiedene Strategien zur Wahl der Schaltzeiten experimentell untersucht und deren Auswirkungen auf Leistung und Effizienz analysiert.

#### **Stichwörter:**

Effizienz, Kälteleistung, Kondensation

#### II.1.15

## **Numerische Untersuchung des Wärme- und Stofftransports bei der Absorption von Wasserdampf in wässriger LiBr-Lösung**

**Michael Olbricht\*, Simon Fries, Joseph Addy, Andrea Luke**

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Germany  
[m.olbricht@uni-kassel.de](mailto:m.olbricht@uni-kassel.de)

\* Korrespondenzautor

In Absorptionskältemaschinen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithium Bromid werden üblicherweise Fallfilmapparate als Absorber, Austreiber, Verdampfer und Kondensator eingesetzt. Als kritische, den Prozess

begrenzende Komponente wird in der Literatur häufig der Absorber genannt. Begründet wird dies durch die Limitierung des Wärmetransportes im Absorber durch den gleichzeitig ablaufenden, langsameren Stofftransport. Der überwiegende Teil der experimentellen Untersuchungen zum Wärme- und Stofftransport in Fallfilmabsorbern wird unter typischen Betriebsbedingungen bei niedrigen Temperaturen, welche in einstufigen AKMs herrschen, durchgeführt. Die Anwendbarkeit der so erzielten Erkenntnisse auf andere Anlagenkonzepte ist somit nicht immer möglich.

Daher wird durch die numerische Simulation der Wärme- und Stofftransportprozesse im Fallfilm der Einfluss der druck- und temperaturabhängigen Transportgrößen für Impuls, Wärme und Stoff auf die Sorptionsvorgänge für unterschiedliche Betriebszustände untersucht. Es wird gezeigt, inwieweit sich experimentell gewonnene Daten auf verschiedene Betriebsbedingungen übertragen lassen, um die experimentellen Daten beispielsweise für die Auslegung von mehrstufigen AKMs oder Absorptionswärmeformatoren, in welchen die Sorptionsvorgänge bei deutlich unterschiedlichen Bedingungen ablaufen, nutzen zu können. Hierbei wird auch der Einfluss von einer Unterkühlung bzw. Überhitzung der Lösung am Eintritt des Apparates auf den Wärme- und Stofftransport untersucht.

Weiterhin werden die Ähnlichkeit und Übertragbarkeit des Wärme- und Stofftransports in Austreiber und Absorber diskutiert.

**Stichwörter:**

Absorption, Desorption, Wärme- und Stofftransport

II.1.16

## **Betriebscharakteristik eines Absorptionswärmeformators mit einem Gemisch aus Wasser und Ionischer Flüssigkeit**

**Markus Bücherl\*, Nina Merkel, Matthias Zimmermann, Miguel Nava, Karlheinz Schaber**

Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Karlsruher Institut für Technologie,  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe  
[markus.buecherl@kit.edu](mailto:markus.buecherl@kit.edu)

Eine Möglichkeit, den Primärenergieverbrauch zu reduzieren, ist die Abwärmenutzung. In der Industrie sind viele Abwärmequellen, beispielweise Kopfkondensatoren von Destillierkolonnen oder Brüden aus Koch- und Trocknungsprozessen, vorhanden, die auf einem Temperaturniveau von etwa 90 °C liegen. Um zumindest einen Teil der Abwärmeströme wieder in den vorgeschalteten Prozessen nutzbar zu machen, müsste man das Temperaturniveau auf mindestens 110 °C anheben. Dies kann man durch einen Absorptionswärmeformator (AWT) erreichen.

Im Rahmen eines BMBF-Forschungsprojektes wurde ein AWT mit einer Nutzleistung von etwa 4 kW mit der zugehörigen Peripherie aufgebaut. Klassische Arbeitsmittel für Absorptionskreisläufe sind Wasser-Natriumhydroxid, Wasser-Lithiumbromid und Ammoniak-Wasser. Diese Arbeitsstoffgemische sind stark korrosiv, giftig und im Fall der Mischungen vom Wasser-Lithiumbromid bzw. Wasser-Natriumhydroxid kann unter bestimmten Randbedingungen die Kristallisationsgrenze überschritten worden. Um diese Nachteile zu reduzieren bzw. zu verhindern, wurde als neuartiges Arbeitsstoffpaar Wasser-Ethylmethylimidazolium Methansulfonat ([EMIm][OMs]) verwendet. [EMIm][OMs] gehört zu den Ionischen Flüssigkeiten, und ist weniger korrosiv und weist keine Mischungslücken mit Wasser auf. In dem Beitrag werden neue Ergebnisse zu den durchgeführten Leistungstests präsentiert. Es wurden die Temperaturniveaus der Abwärmequelle (80 °C – 95 °C), die Temperaturniveaus des Nutzmediums (110 °C – 140 °C) und die Massenströme des Lösungsmittelkreislaufs variiert. Somit konnten verschiedene Betriebszustände angefahren und untersucht werden. Des Weiteren wurde die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse überprüft. Hierbei wurden die charakteristischen Leistungsdaten wie Wärmeströme, Lösungsmittelumlauf sowie COP-Werte ermittelt. Beispielsweise konnte bei einem Temperaturhub von 45 K ein COP-Wert von 0,27 und ein Nutzwärmestrom von 1,8 kW erreicht werden. Die experimentellen Ergebnisse werden mit Simulationsergebnissen verglichen.

**Stichwörter:**

Absorptionswärmeformator, Ionische Flüssigkeiten

II.1.17

## **Entwicklung einer Absorptionskältemaschine für die Nutzung der Abwärme einer Festoxidbrennstoffzelle**

**Johannes Albert\*, René Rieberer**

Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich

[johannes.albert@tugraz.at](mailto:johannes.albert@tugraz.at)

\* Korrespondenzautor

Die direkte Umwandlung von chemische in elektrische Energie in Brennstoffzellen liefert einen höheren Wirkungsgrad als mit konventioneller Energieerzeugung. Durch weitere Fortschritte in der Entwicklung kann mit einem steigenden Absatz von Brennstoffzellen gerechnet werden. Im Zuge dieses Ausbaus können sich für Absorptionswärmepumpen bzw. -kältemaschinen (AKM) neue Anwendungsfelder ergeben. Durch die Nutzung der Abwärme der Brennstoffzelle in einer KWKK-Anlage (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) können sehr hohe Gesamtwirkungsgrade erreicht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prototyp einer AKM für die Nutzung des heißen Abgases aus einer Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) entwickelt. Durch das hohe Temperaturniveau der SOFC von ca. 250 °C kann die Entgasungsbreite des Ammoniak-Wasser-Arbeitsstoffpaares vergrößert werden. Bedingt durch den Dampfdruck des Lösungsmittels (Wasser), kommt es dadurch zu einem verstärkten Eintrag von Wasser in den Kältemitteldampf. Mittels Simulation wurden verschiedene Konzepte zur Aufbereitung des Kältemitteldampfes durch eine Rektifikation und/oder einen Dephlegmator bzw. der Einfluss der Ausgasungsbreite auf den Kreislauf untersucht. Dabei zeigte sich, dass durch Zulauf eines Teilstroms reicher Lösung am Kolonnenkopf die Trennleistung bzw. auch die Effizienz des Gesamtsystems bei einer hohen Ausgasungsbreite verbessert werden kann. Diese Ergebnisse werden anhand von Messergebnissen diskutiert und erste Betriebserfahrung des Prototyps präsentiert.

**Stichwörter:**

Ammoniak/Wasser, KWKK, SOFC

II.1.18

## **Rechnersimulationen zum Winter- und Sommerbetrieb einer Abwasser-Gaswärmepumpe/-Kältemaschine**

**Johannes Goebel\*, Marek Kowalski, Lena Frank, Mario Adam**

Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Hochschule Düsseldorf,

Josef-Gockeln-Str. 9, 40474 Düsseldorf

[johannes.goebel@fh-duesseldorf.de](mailto:johannes.goebel@fh-duesseldorf.de)

\* Korrespondenzautor

Abwasser wird als Wärmequelle für Wärmepumpen selten genutzt, obwohl dies aufgrund vergleichsweise hoher Jahresmitteltemperaturen energetisch sehr interessant wäre. Sorptionswärmepumpen sind primärenergetisch sehr effizient und benötigen im Vergleich zu elektrischen Kompressionswärmepumpen weniger als die Hälfte an Wärmequellenleistung, was sie auch für kleine Abwasserabflüsse attraktiv macht, bei gleichzeitig geringeren Kosten für den Abwasserwärmeübertrager. Die Nutzung von Abwasser als Wärmesenke zur Kühlung von Gebäuden ist noch unüblicher als die Nutzung als Wärmequelle, bietet jedoch den Vorteil der wegfallenden Kosten und der Platzeinsparung für herkömmliche Außenluft-Rückkühler.

In diesem Beitrag werden ein mit Messdaten validiertes Modell für die Buderus GWPW41 Gas-Sorptionswärmepumpe und die Ergebnisse von dynamischen Jahressimulationen und Parametervariationen eines Gesamtsystems zur Nutzung von Abwasser als Wärmequelle und Wärmesenke im Winter- und Sommerbetrieb dieser Maschine inklusive Abwasserwärmeübertrager, Wärmespeicher, Gebäude mit Wärme-Kälteverteilung/-übergabe sowie Zusatzheiz-/Kälteaggregaten vorgestellt. Die verwendete Simulationsumgebung ist MATLAB/Simulink und die Komponenten-Toolbox CARNOT. Planung und Auswertung der durchgeführten Parametervariationen erfolgen unter Nutzung der arbeitseffizienten Methodik Design of Experiments (DoE). Es werden Speichervolumen, Heiz-/Kältelast des Gebäudes, Größe des Abwasserwärmeübertragers, Größe des Backup-Kälteaggregats, die Einstellung der Sollvorlauftemperaturen, die Freigabehysteresen der Umluftkühlgeräte und der Wärme/Kälteerzeuger variiert. Aus den Ergebnissen werden sinnvolle Systemkonfigurationen, Regelstrategien und Dimensionierungen der Komponenten für eine solche Anlage abgeleitet.

Die Arbeiten sind Teil eines Projektes, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03FH038PX3.

**Stichwörter:**

Abwasser, Kühlung, Gaswärmepumpe, Design of Experiments, Simulation

II.1.19

## Absorptionskälteanlagen am Fernwärmerücklauf Betriebsergebnisse aus dem FAKS-Projekt KFWK

C. Hennrich\*, R. Graf, S. Petersen, J. Albers, W. Lanser F. Ziegler

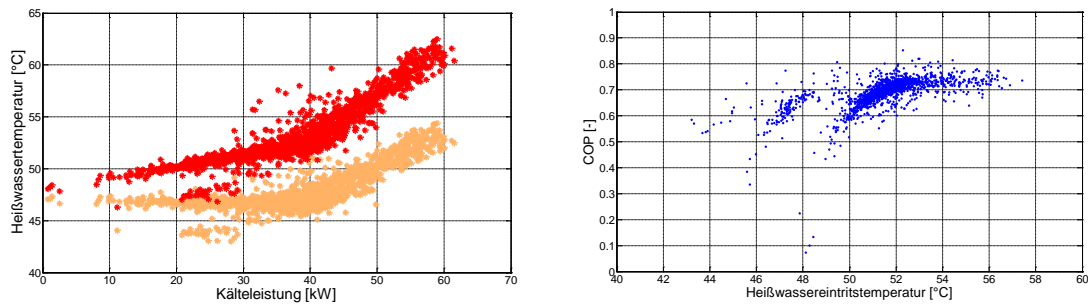
Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik KT2, FG Maschinen- und Energieanlagentechnik,  
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland  
[christian.hennrich@tu-berlin.de](mailto:christian.hennrich@tu-berlin.de), [rupert.graf@tu-berlin.de](mailto:rupert.graf@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

In Zusammenarbeit mit den Städtischen Werken Kassel, wurde im Forschungsprojekt „EnEff Wärme: Feldtests Absorptionskälteanlagen für KWKK Systeme“ kurz FAKS eine Absorptionskälteanlage vom Typ Hummel zur Prozesskälteerzeugung und Felderprobung von KWKK Systemen zur Fernwärme-Rücklaufauskühlung (auf  $T < 50\text{ °C}$ ) installiert. Die Auslegungskälteleistung mit Heißwasserversorgung aus dem Fernwärmerücklauf beträgt ca. 96 kW und kann durch eine Umschaltung auf den Fernwärme-Vorlauf auf 170 kW angehoben werden.

Ziel ist es, durch die Wahl der Betriebsstrategie zwischen Speicher, Verbraucher und Erzeuger - die Kälteerzeugung aus einer nahezu 100-%igen Fernwärmerücklaufversorgung herzustellen. Die AKA verfügt über eine CE Controller (basierend auf der Charakteristischen Gleichung) und berechnet die erforderliche Heiß- und gleichzeitig Kühlwasser-Eintrittstemperatur als Sollgröße um Kaltwassertemperatur und -leistung. Werden die Sollgrößen nicht erreicht oder sind nicht verfügbar (z. B.  $t_{Di} < t_{Di,Soll}$  oder  $t_{Ai} > t_{Ai,set}$ ), wird auf eine „*backup-Strategie*“ zurückgegriffen, die jew. verfügbare Temperatur wird entsprechend nachgeführt. Zur Sicherstellung der Kälteverfügbarkeit ist eine Kompressionskälteanlage (KKA) gleicher Kälteleistung installiert.

Messergebnisse des ersten Betriebsjahres zeigen einen Anlagenbetrieb bei Fernwärmeantriebstemperaturen von  $T < 60\text{ °C}$  sowie einer Fernwärmeauskühlung auf  $T < 50\text{ °C}$ . Trotz aktuell geringer Kältelasten, die nur ca. 25 % der Auslegungsleistung betragen, kann die in der Liegenschaft installierte AKA - eine Performance (coefficient of performance – COP) von größer gleich 0,6 erreichen. Zu dem System liegen umfangreiche Betriebsdaten vor, die im Beitrag in Bezug auf Anlagen- und Systemeffizienz und das Erreichen der Regelungsziele genauer analysiert werden.



**Abbildung 1: Heißwassertemperatur vs. Kälteleistung(li); COP vs. Kälteleistung(re.);**

**Stichwörter:**

Absorption, Abwärmenutzung, Niedertemperatur, Energieeffizienz, Fernwärme

**II.1.20**

## **Optimierung des Fluides und der Methode für solare Mini-Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Organic Rankine Cycle-Konzepten**

**Muhsen Habka\*, Salman Ajib**

Technische Universität Ilmenau & Hochschule Ostwestfalen-Lippe,  
An der Wilhelmshöhe 44, 37671 Höxter  
[muhsen.habka@stud.hs-owl.de](mailto:muhsen.habka@stud.hs-owl.de)

\* Korrespondenzautor

In der vorliegenden Arbeit wurden Leistungen einiger zeotropen Mischungen für den Einsatz im Organic Rankine Cycle (ORC) unter Berücksichtigung von zwei Varianten der solaren Mini-Kraft-Wärme-Kopplung-Systemen (KWK) bewertet. Zu den KWK-Methoden zählen dabei die traditionelle Wärmegewinnung über den Kraftwerk Kondensator und die Serienschaltung des Kraft- und Heizwerks. Der Flachkollektor wurde zudem als Herzstück des Solarsystems betrachtet. Ziel dieser Untersuchungen ist es, solche KWK-Einheiten unter vorgegebenen Bedingungen zu optimieren. Um das Ziel zu erreichen, wurden energetische und ökonomische Kriterien mit Hilfe von numerischen Simulationen identifiziert. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass im Vergleich zu reinen Arbeitsmitteln (R134a und R245fa) das Gemisch R409A stark zu empfehlen ist, indem der Wärmebedarf über ORC-Kondensator (traditionelle Methode) gewonnen wird. So konnte das genannte System dadurch bis zu 16.20 % optimiert werden. Während das Gemisch R401A der beste Kandidat für das Seriensystem mit wirtschaftlicher Optimierung bis 4.49 % verglichen mit denselben Arbeitsmitteln ist. Vergleich der beiden KWK-Methoden unter gleichen Rahmenbedingungen zeigte darüber hinaus, dass das Serienkonzept leichter durchsetzbar als das herkömmliche ist. Schließlich führte der Einsatz von R401A im Serienkonzept zu komponierter Optimierung der solaren Mini-KWK bis 47 % gegenüber dem Einsatz des Arbeitsmittels R134a in der traditionellen Methode.

## Experimentelle Untersuchung der energetischen Effizienz von absorptiver Lufttrocknung mit ionischen Flüssigkeiten

C. Ricart\*, T. Meyer, R. Kühn, M. Winker, F. Ziegler

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
Fon: 030 314-22933, Fax: 030 314-22253, Email: [cristina.ricart@win.tu-berlin.de](mailto:cristina.ricart@win.tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Die Bereitstellung von Kaltluft im Normal- und Tiefkältetemperaturbereich von  $-40\text{ °C}$  bis  $0\text{ °C}$ , die z.B. in der Nahrungsmittelindustrie zur Lagerung von Lebensmitteln benötigt wird, geschieht derzeit fast ausschließlich durch elektrisch angetriebene Kompressionskälteanlagen. Bei diesem Temperaturbereich liegen die absoluten Luftfeuchten bei unter  $4g_w/kg_{tr,Lu}$ . Ohne vorherige Trocknung der erzeugten kalten Luft werden dabei je nach Umgebungsluftzustand bis zu 50 % der erzeugten Kälteleistung für die Kondensation der Luftfeuchte und unerwünschte Eisbildung auf dem Wärmeübertrager benötigt. Das Abtauen des auf dem Wärmeübertrager gebildeten Eises erfordert weitere elektrische Energie. Die Abtauverluste erreichen z. B. bei Luft/Wasser-Wärmepumpen 10 % bis 15 % des gesamten Bedarfs an elektrischer Energie [1].

Die Trennung der Luftkühlung von der Luftentfeuchtung durch die Kombination einer geschlossenen Absorptionskälteanlage und eines thermisch betriebenen offenen Lufttrocknungssystems, welches wiederum mit einem Teil der Abwärme des geschlossenen Prozesses angetrieben wird, birgt das Potential, den Primärenergieverbrauch deutlich zu verringern. Zum Erzielen der niedrigen Taupunkttemperaturen, um die Kondensation der Luftfeuchte und das Vereisen der Wärmeübertrager zu vermeiden, müssen die verwendeten Sorbentien eine starke Dampfdruckabsenkung bei Temperaturen nahe der Raumtemperatur aufweisen. Einige ionische Flüssigkeiten bieten aufgrund der nicht auftretenden Kristallisation bei Raumtemperatur einen nahezu uneingeschränkten Betriebsbereich, welcher prinzipiell nur durch die thermische Stabilität der Arbeitsstoffe beschränkt ist.

Im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes wird eine mit ionischen Flüssigkeiten betriebene Luftentfeuchtungsanlage experimentell untersucht. In vorangegangenen Experimenten wurde gezeigt, dass die thermische Effizienz abhängig von den Randbedingungen (COP) dabei bei 0,33-0,58 liegt, welche aufgrund erhöhter Luftaustrittstemperaturen nach dem Luftwärmeübertrager niedriger ist als die in der Literatur angegebenen Werte von rund 0,8. Durch eine verbesserte Wärmerückgewinnung auf der Luftseite des Desorbers kann dieser Wert erhöht werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird die Auswirkung der Antriebstemperatur, des Lösungsmassenstroms, des Luftvolumenstroms und des Luftvolumenstromverhältnisses im Absorber und Desorber auf die Energieeffizienz der Anlage untersucht. Somit sollen mögliche Betriebsstrategien zur Verbesserung der thermischen Effizienz identifiziert werden.

### Stichwörter:

Energieeffizienz, Luftentfeuchtung, absorptive Lufttrocknung, ionische Flüssigkeiten, Abwärmenutzung, Klimatisierung, Tiefkälte

[1] Hubacher B., Ehrbar M., „Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Analyse gängiger Abtauverfahren“, Forschungsprogramm Umgebungswärme, Kälte. Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Schweiz, 2000.

## **Experimentelle Untersuchung eines sorptionsgestützten Klimatisierungssystems mit geothermischer Wärmesenke**

**Peter Niemann\*, Arne Speerforck, Gerhard Schmitz**

Technische Universität Hamburg, Institut für Thermofluidynamik,  
Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland  
[peter.niemann@tuhh.de](mailto:peter.niemann@tuhh.de), [arne.speerforck@tuhh.de](mailto:arne.speerforck@tuhh.de), [schmitz@tuhh.de](mailto:schmitz@tuhh.de)

\* Korrespondenzautor

Im Sommer besteht die Aufgabe eines Klimatisierungssystems überwiegend in der Abkühlung und Entfeuchtung der Außenluft, um behagliche Raumzustände zu erreichen. In diesem Zusammenhang führt vor allem der Entfeuchtungsprozess zu Spitzenlasten beim Betrieb konventioneller Klimaanlage, da die Außenluft zur Abfuhr latenter Wärmelasten unter die Taupunkttemperatur (z. B. 10 °C) gekühlt werden muss. Die erforderlichen Kühlleistungen werden meist durch elektrische Kompressionskältemaschinen bereitgestellt; Entfeuchtung und Kühlung sind dabei prozessbedingt gekoppelt. In einem sorptionsgestützten Klimatisierungssystem werden die Luftbehandlungsfunktionen Entfeuchtung und Kühlung getrennt. Die Außenluft wird zunächst sorptiv entfeuchtet, indem der enthaltene Wasserdampf an einem festen oder flüssigen hygroskopischen Material angelagert wird. Anschließend wird die entfeuchtete Luft auf den Sollwert der Zulufttemperatur gekühlt, wobei Wärmesenken auf höherem Temperaturniveau (16 °C bis 19 °C) genutzt werden können und der Kältebedarf deutlich reduziert wird. Dies ermöglicht die energetische Nutzung oberflächennaher Geothermie als geeignete Wärmesenke. Für die Regeneration des Sorptionsmittels wird Energie in Form von Wärme auf einem vergleichsweise niedrigen Temperaturniveau der Wärmequelle (40 °C bis 80 °C) benötigt und ermöglicht den Einsatz solarthermischer Energie.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Technischen Universität Hamburg wird die Kombination eines offenen sorptionsgestützten Klimatisierungssystems in Verbindung mit Erdreichwärmeübertragern anhand einer Versuchsanlage untersucht. Die Energieeffizienz des Gesamtsystems wird durch geeignete Trennung von Kühlung und Lüftung erhöht; der Einsatz von Kühldecken zur Abfuhr sensibler Kühllasten ermöglicht eine Reduzierung der Be- und Entlüftung auf die aus hygienischen Gründen minimal erforderliche Luftwechselrate. In dieser Arbeit werden Messergebnisse des Klimatisierungsbetriebs während der Kühlperiode 2015 gezeigt und erörtert. Anhand der Messergebnisse kann gezeigt werden, dass sich der elektrische Energiebedarf des untersuchten Klimatisierungssystems auf die Hilfsenergien beschränken lässt, so dass dieser im Vergleich zu einem konventionellen System mit Kompressionskältemaschine um bis zu 76 % reduziert werden kann. Prozessbedingt findet eine Verlagerung des Energiebedarfs von elektrischer zu thermischer Energie statt. Aufgrund der erforderlichen Regeneration des Sorptionsrades ist die thermische Leistung des sorptionsgestützten Systems deutlich höher. Die thermische Energie kann jedoch solarthermisch bereitgestellt werden. Die Versorgung des Nachkühlers sowie der Kühldecken erfolgt durch Erdreichwärmeübertrager. Für die betrachtete Periode wird eine saisonale Arbeitszahl des geothermischen Systems von  $SAZ = 162$  erreicht und zeigt damit die generell hohe Effizienz des Kühlprozesses. Ergänzend zur energetischen Bewertung des Gesamtsystems werden Messergebnisse der Temperaturentwicklung im Erdreich sowie zu den Abhängigkeiten des thermischen Komforts für den Referenzraum der Versuchsanlage vorgestellt.



## Untersuchungen eines offenen Absorptionsprozesses

Ulrike Jordan\*, Mustafa Jaradat, Daniel Fleig, Klaus Vajen

Universität Kassel, FG Solar- und Anlagentechnik, 34125 Kassel  
[solar@uni-kassel.de](mailto:solar@uni-kassel.de)

\* Korrespondenzautorin

Untersuchungsgegenstand sind Absorptionsprozesse, in denen Außenluft in Wärme- und Stoffübertragern im Kreuzstrom an flüssigen Sorbentien entlang geleitet wird. Die getrocknete Luft wird direkt als Zuluft für die Gebäudeklimatisierung oder für Trocknungsanwendungen eingesetzt (liquid desiccant systems).

Die Übertragungsflächen der Komponenten wurden mit Textilien bedeckt bzw. ummantelt und werden von verschiedenen Sorbentien (u.a. LiCl-H<sub>2</sub>O, Ionische Flüssigkeiten) überströmt. Ziele der Untersuchungen sind, die Benetzung der Übertragungsflächen zu optimieren, Strömungsmittels des Sorbents zu unterbinden sowie geeignete Konstruktionsverfahren, Geometrien und Betriebszustände zu evaluieren.

In den Untersuchungen eines intern gekühlten Rohrbündelabsorbers mit einer wässrigen LiCl-Lösung bei einem Massenanteil von 0,4 konnten Luftaustrittszustände erzielt werden, die im Behaglichkeitsbereich liegen. Die absolute Feuchte der Luft wurde je nach Massenstromverhältnis zwischen Luft und Sorbent und Eintrittsfeuchte um ca. 2,4 bis 4,1 g/kg reduziert.

In einem Plattenabsorber, der für Trocknungsanwendungen in einer Feldtestanlage eingesetzt wird, lag die Verringerung der Luftfeuchte erwartungsgemäß niedriger als bei dem intern gekühlten Absorber. Hierbei wurden Speicherdichten des Sorbents von bis zu 900 MJ/m<sup>3</sup> erreicht.

**Stichwörter:**

Absorber, Regenerator, Sorption, Wärmeübertrager, liquid desiccant

II.2.01

## Anforderungen an Verdichter in CO<sub>2</sub>-Anlagen der neusten Generation

Manuel Fröschle

GEA Bock, Benzstraße 7, 72636 Frickenhausen

In gewerblichen und kleinen bis mittelgroßen industriellen Anwendungen werden Lösungen für die seit Anfang 2015 neu geltende F-Gas-Verordnung benötigt.

Hierbei bieten besonders Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid interessante Lösungen, die bereits heute in vielen Anwendungen zum Einsatz kommen. Besonders CO<sub>2</sub> stößt auf Grund seiner Nichtbrennbarkeit, des sehr niedrigen GWP von 1 und weiterer sehr positiver Eigenschaften auf immer größeres Interesse im Markt. Die etablierte CO<sub>2</sub>-Technologie im gewerblichen Einzelhandel kommt nun mehr und mehr auch in weiteren Anwendungen zum Einsatz. Hierbei werden mit neuen Systemtechnologien hohe Effizienzwerte auch in Regionen mit höheren Umgebungstemperaturen erreicht. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der effizienten Wärmerückgewinnung auf unterschiedlichen Temperaturniveaus.

GEA bietet ein breites Produktportfolio mit halbhermetischen Hubkolbenverdichtern für die Kältemittel aus der Gruppe der Kohlenwasserstoffe wie auch für subkritische und transkritische CO<sub>2</sub>-Anwendungen an. Diese Verdichterbaureihen zeichnen sich durch höchste Effizienz mit teilweise zertifizierten Leistungsdaten, hohe Lebensdauer, optimales Laufverhalten und der Möglichkeit minimaler Teillastregelung mit Frequenzumformer aus. Die CO<sub>2</sub>-Verdichter sind dadurch besonders auch für neue effizienzoptimierte Systemtechnologien wie Parallelverdichtung in CO<sub>2</sub>-Booster-Systemen auch für warme Regionen geeignet.

**Stichwörter:**

Natürliche Kältemittel, CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-Booster-Systeme, Verdichter, Energieeffizienz, Parallelverdichtung, Gewerkekälte, Industriekälte

II.2.02

## Turbokompressoren: Versuchsaufbau und Pilottests einer Brüden Rückkompression für überhitzte Dampftrockner

Michael Bantle<sup>1\*</sup>, Mogens Weel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway

<sup>2</sup> Weel & Sandvig, Kopenhagen, Dänemark  
[Michael.Bantle@sintef.no](mailto:Michael.Bantle@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

Dampftrockner zeigen, speziell für die Nahrungsmittel- und Futterindustrie, deutliche Vorteile gegenüber der herkömmlichen Lufttrocknung. Einer der signifikantesten Vorteile ist die Möglichkeit, den dem Trocknungsgut entwichenen Wasserdampf mit Hilfe einer Brüden Rückkompression als Energiequelle für den Trocknungsprozess zu nutzen. Effektive industrielle Luft- und Dampftrockner benötigen im besten Fall 0,7 bis 0,8 kWh an thermischer Energie, um einen Liter Wasser zu entfeuchten. Für die Dampftrocknung kann dieser spezifische Energieverbrauch des Systems durch Brüden Rückkompression auf 0,2 kWh<sub>(elektrisch)</sub>/kg reduziert werden.

Um eine effektive und einfache Brüden Rückkompression zu realisieren, wurde ein spezieller Dampftrockner (© EPCON) entwickelt, der lediglich einen Temperaturanstieg von 25 Kelvin zwischen Dampfeintritt und -austritt benötigt. Bezogen auf Brüden bei atmosphärischem Druck entspricht dies einem Druckverhältnis von 2.5.

Für den vorliegenden Fall wurde der Prototyp eines Turbokompressors in einer Versuchsanlage getestet. Hierbei wurde speziell auf eine kompakte und kosteneffektive Bauweise geachtet. Die Antriebsleistung des Turbokompressors betrug 59 kW und wurde mit Hilfe eines Gleichstrommotors direkt auf das Planetengetriebe des Impellers montiert.

Der Aufbau des Trockners sowie die prinzipielle Funktion des Turbokompressors werden in der vorliegenden Arbeit kurz beschrieben. Des Weiteren werden die durchgeführten Versuche erläutert und die Leistung des Kompressors dokumentiert. Es konnte nachgewiesen werden dass durch das vorgeschlagene System bis zu 80 % der Trocknungsenergie zurückgewonnen werden kann. Dies macht es möglich, bisherige Dampftrocknungssysteme, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, durch elektrisch betriebene Turbokompressoren zur Brüden Kompression zu ersetzen. Eine vereinfachte Investitionsrechnung zeigt auf, dass sich die Investitionskosten innerhalb von 1 Jahr amortisieren, auch für einen Standort in Deutschland.

In der weiteren Entwicklungsarbeit wird die mehrstufige Kompressionsanordnung basierend auf Turbokompressoren untersucht werden, um ein breiteres Anwendungsfeld zu finden. Weiterhin soll der komplette Antrieb so konzeptioniert werden, dass ein schmiermittelfreies System realisiert werden kann.

### II.2.03

## **Vorteile und Herausforderungen beim Einsatz von miniaturisierten, gasgelagerten, ölfreien Turbo Kompressoren für Wärme- und Kälteanlagen**

**Fabian Dietmann\*, Christof Zwysig, Andreas Looser**

Celeroton AG, Industriestrasse 22, 8604 Volketswil, Schweiz

[fabian.dietmann@celeroton.com](mailto:fabian.dietmann@celeroton.com)

\* Korrespondenzautor

Typische Anforderungen an Kompressoren für Wärme- und Kälteanlagen sind eine hohe Effizienz, lange Lebensdauer und geringe Kosten. Für mobile Anwendungen (z. B. im KFZ, oder in Hybrid- und Elektrofahrzeugen) kommt zudem die Forderung nach geringem Bauvolumen und Gewicht dazu. Je nach Anwendung und Kältemittelwahl sind Ölfreiheit, um ein Aufschäumen zu verhindern und den Wärmeübergang zu verbessern, und geringe Vibrations- und Lärmentwicklung zusätzlich gefordert.

Für viele dieser Anforderungen bietet der Einsatz eines Turbokompressors Vorteile gegenüber klassischen Kompressor-Typen wie beispielsweise Hubkolben- oder Scroll-Verdichtern. In den vergangenen Jahren hat sich daher die Zahl der Veröffentlichungen zur Thematik der Turbokompressoren für Wärme- und Kälteanlagen gesteigert [1,2]. Industriell werden Turbokompressoren aber erst in Großanlagen im genannten Anwendungsbereich eingesetzt [3]. Bisherige Bemühungen, die Turbokompressor-Technologie auf kleinere Leistungen in den Bereichen Automobiltechnik, Ein- und Mehrfamilienhäuser und Haushaltsgeräte zu miniaturisieren, sind meist im Forschungsstadium [2] und es bestehen weitere technische und ökonomische Herausforderungen auf dem Weg zum kommerziellen Einsatz.

In dieser Publikation werden daher hauptsächlich die durch die Miniaturisierung bedingten technischen Herausforderungen und mögliche Lösungsansätze für miniaturisierte Turbokompressoren diskutiert [4,5]. Exemplarisch sei hier z. B. der mit der Miniaturisierung verknüpfte, größere Einfluss des Leckagespalts zwischen Kompressor-Laufrad und Gehäuse genannt. Weitere Herausforderungen ergeben sich durch die Lagerungsart. Um große Lebensdauern zu erreichen, ist der Einsatz von Gaslagern notwendig. Technologische Herausforderungen stellen hier die Kombination von benötigter Stabilität bei hohen Drehzahlen und die resultierenden, sehr engen Fertigungstoleranzen dar.

Die theoretischen Betrachtungen in dieser Publikation werden mittels praktischer Beispiele hinterlegt. In einer Wärmepumpe für Satellitenkühlung sind beispielsweise die Anforderungen bezüglich Kompaktheit, Effizienz und Vibrationsminimierung besonders ausgeprägt. Es wird exemplarisch aufgezeigt, dass auch hohe Temperatur- und damit Druckunterschiede mit miniaturisierten Turbokompressoren effizient abgedeckt werden können.

- [1] F. Dietmann, D. M. Vogt, Ölfreier CO<sub>2</sub>-Verdichter für Wärmepumpen, Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2013, Hannover, November 2013, AA.II.2.14
- [2] J. Schiffmann, Integrated design, optimization and experimental investigation of a direct driven turbocompressor for domestic heat pumps, Dissertation, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2008.
- [3] Online: <http://commercialcompressors.danfoss.com/newsstories/rc/shanghai-danfoss-cooling-sets-the-scene-for-green-data-center-solutions/?ref=17179922016>
- [4] M. Casey, D. Krähenbühl, C. Zwysig, The design of ultra-high-speed miniature centrifugal compressors, 10<sup>th</sup> Europ. Conf. on Turbomachinery, Fluidynamics and Thermodynamics, Finland, April 2013.
- [5] C. Zwysig, J. W. Kolar, and S. D. Round, Megaspeed drive systems: pushing beyond 1 million r/min, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, accepted for future publication.

## II.2.04

# Simulation eines Scroll Verdichters mittels 1D Einsatz

Ha-Duong Pham<sup>1</sup>, Marek Lehocky<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Sanden International Europe (Ltd), German Branch  
[hpham@sanden-europe.com](mailto:hpham@sanden-europe.com)

<sup>2</sup>Gamma Technologies GmbH  
[m.lehocky@gtisoft.com](mailto:m.lehocky@gtisoft.com)

\* Korrespondenzautor

Zwei wesentliche Anforderungen an die Entwicklung von Scroll-Verdichtern für Klimatisierungssysteme sind die Geräuschreduzierung sowie die Verbesserung des Wirkungsgrades. Um diese Ziele erfüllen zu können, ist es von elementarer Bedeutung, die komplexen Strömungseffekte im Verdichter verstehen und bewerten zu können. Zurzeit wird die innere Strömung häufig mit 3D CFD Simulationen untersucht. Die Genauigkeit der 3D-Tools ist generell hoch, korreliert jedoch direkt mit der Rechenzeit, was die Bewertung der Verdichter sehr zeitintensiv macht. In besonderem Maße ist dies der Fall, wenn die Bewegung mechanischer Teile des Kompressors in der Simulation berücksichtigt werden soll. Optimierungsstudien werden dadurch extrem zeit- und kostenintensiv. Alternativ bieten 1D-Simulationstools die Möglichkeit, komplexe Strömungs- und Mechaniksysteme in vertretbarer Zeit zu berechnen, ohne dabei extrem an Genauigkeit der Vorhersagen zu verlieren.

Dieser Artikel befasst sich mit der Entwicklung eines 1D-Simulationsmodells eines Sanden Scroll-Verdichters in der 1D-Simulationsplattform GT-SUITE. Ziel dieser Arbeit ist es, die thermodynamischen Eigenschaften des Kompressors hinreichend genau vorherzusagen und durch den 1D-Ansatz die Rechenzeit im Vergleich zu 3D CFD erheblich zu reduzieren. In dem vorgestellten Modell sind die komplexen Strömungseigenschaften, wie die Änderungen des Volumens der Arbeitskammer mitberücksichtigt. Darüber hinaus werden Verdichterkomponenten, wie das Auslassventil und das Schalldämpfersystem, welche einen entscheidenden Einfluss auf die Akustik und den Wirkungsgrad des Verdichters haben, in der Simulation ebenfalls berücksichtigt. Die Kopplung von Strömung und Mechanik ist eine weitere Kerneigenschaft des vorgestellten Modells.

Die resultierenden Simulationsergebnisse wie Indikator diagramm, Ventilbewegung, Massenströme, und Druckpulsationen wurden mit Testergebnissen verglichen. Die Vergleiche haben gezeigt, dass das Modell in der Lage ist, das Verhalten des Verdichters mit guter Genauigkeit vorherzusagen. Die Rechenzeit kann dabei im Vergleich zu 3D-Modellen deutlich reduziert werden, wodurch das entwickelte Simulationsmodell dazu verwendet werden kann den Entwicklungsprozess zu verbessern und den Bedarf an Prüfstandmessung zu reduzieren. Zusätzlich erlaubt das Modell eine detaillierte Einsicht in die Kältemittelströmung im Verdichter.

### Stichwörter:

1D Strömungssimulation, Scroll-Verdichter, Druckpulsation

II.2.05

## **Thermodynamische und strömungstechnische Vermessung lamellierter Wäremeübertrager im Betrieb mit dem natürlichen Kältemittel R717**

**Eric Gerstenberger**

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund, Germany  
[Eric.Gerstenberger@thermofin.de](mailto:Eric.Gerstenberger@thermofin.de)

Aufgrund der neuen F-Gas-Verordnung zeigt sich uns gegenüber eine gestiegene Nachfrage nach Wärmeübertragern mit natürlichen Kältemitteln, insbesondere  $\text{NH}_3$ .

Es besteht ein großer Mangel an Test- bzw. Versuchseinrichtungen zur Bestimmung gemessener Leistungsdaten für Verdampfer, Luftkühler und Kondensatoren für den Einsatz in der Kälte- und Klimatechnik.

Um verstärkt theoretische und praktische Erfahrungen zu sammeln, hat sich die thermofin GmbH dazu entschlossen, ein eigenes Prüflabor aufzubauen. Bezüglich des Aufbaus der Versuchsanlage stand das ILK Dresden thermofin® beratend zur Seite. Die ersten Messungen mit  $\text{NH}_3$  wurden Anfang April durchgeführt. Mit der installierten Anlage können Verdampferblöcke sowohl mit Direkteinspritzung als auch im Pumpenbetrieb gemessen werden. Außer luftgekühlte Kondensatoren ist es auch möglich, diverse Abtausysteme zu erproben.

II.2.06

## **Messsystem für die Erfassung von Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen an luftbeaufschlagten Wärmeübertragern**

**Jascha Ruebeling<sup>1\*</sup>, Jan Eggebrecht<sup>1</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, Karlsruher Institut für Technologie,  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[jascha.ruebeling@kit.edu](mailto:jascha.ruebeling@kit.edu)

<sup>2</sup> Institut für Technische Physik, Karlsruher Institut für Technologie,  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

\* Korrespondenzautor

Am Karlsruher Institut für Technologie wurde ein Messsystem zur Erfassung von Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen in Luftströmungen entwickelt, das auf einem kommerziell verfügbaren Lichtwellenleitermesssystem zur Temperaturmessung basiert. Das Messsystem wird eingesetzt, um bauartbedingte Charakteristika der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder im Vor- und Nachlauf von Lamellenwärmeübertragern zu ermitteln. Mittels 96 diskreter Messstellen werden statistisch aussagekräftige, querschnittsflächenbezogene Mittelwerte beider Messgrößen mit geringen Unsicherheiten bestimmt.

Der für die Temperaturmessung vorgesehene Lichtwellenleiter verläuft durch eine Edelstahlkapillare, welche im Betriebsmodus der Geschwindigkeitsmessung mit einem elektrischen Strom beaufschlagt wird. Aufgrund des elektrischen Widerstands des Metalls kommt es zu einer Temperaturerhöhung der Kapillare gegenüber der umgebenden Luftströmung. In Abhängigkeit von Stromstärke und Temperaturdifferenz lässt sich über analytische und empirische Zusammenhänge der Wärmeübertragung die an jeder Messstelle vorherrschende Luftgeschwindigkeit berechnen.

Die Unsicherheit der diskreten Temperaturmessung beträgt im kalibrierten Bereich zwischen  $-25...+80^{\circ}\text{C}$   $\pm 0,25\text{ K}$  ( $k=1$ ). Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt zwischen  $0,1...5\text{ m/s}$  mit einer Unsicherheit von  $\pm 10\%$  des Messwerts ( $k=1$ ).

Das Manuskript stellt das entwickelte Messprinzip der Geschwindigkeitsmessung vor. Darüber hinaus werden erste experimentelle Messergebnisse präsentiert, die in einem Windkanal gewonnen wurden und die Funktionsfähigkeit des Messsystems aufzeigen.

**Stichwörter:**

Thermische Geschwindigkeitsmessung, Lichtleitmesssystem, Messunsicherheit

**II.2.07**

## **Spot-Verdampfer-Verbund zur Kühlung von Elektromotoren**

**Tobias Knipping<sup>1\*</sup>, Michael Arnemann<sup>2</sup>, Ullrich Hesse<sup>3</sup>, Timo Mueller<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Institute of Materials and Processes (IMP),  
76133 Karlsruhe, Deutschland  
[tobias.knipping@hs-karlsruhe.de](mailto:tobias.knipping@hs-karlsruhe.de), [timo.mueller@hs-karlsruhe.de](mailto:timo.mueller@hs-karlsruhe.de)

<sup>2</sup> Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),  
76133 Karlsruhe, Deutschland  
[michael.arnemann@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.arnemann@hs-karlsruhe.de)

<sup>3</sup> TU Dresden, BITZER-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik  
01069 Dresden, Deutschland  
[ullrich.hesse@tu-dresden.de](mailto:ullrich.hesse@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Linearmotoren sind Elektromotoren zur Erzeugung translatorischer Bewegungen. Die elektrische Leistung und somit die erreichbare Beschleunigung dieser Motoren ist thermisch begrenzt. Konstruktionsbedingt ist die wärmeübertragende Oberfläche klein, verglichen mit der Oberfläche von drehenden Motoren. Insbesondere bei Haltevorgängen dissipiert die gesamte Antriebsleistung als ohm'scher Verlust in den Motor. Die meisten Ausfälle von Linearmotoren entstehen durch Überhitzung, bedingt durch die beschleunigte chemische Alterung des Isolationsmaterials. Nachteilig beim Einsatz von Wasserkühlungen ist auch die Kombination aus Wasser und elektrischen Strömen und Spannungen, die bei Leckagen zu erheblichen Gefährdungen führen können.

Am Institute of Materials and Processes (IMP) wird an neuartigen Kühlkonzepten für elektrische Antriebe geforscht. Hierzu wurde ein Verbund aus 18 Spot-Verdampfern in den Ferritkern eines Linearmotors eingebracht. Spot-Verdampfer sind kleine Hochleistungsverdampfer zur Kühlung von Wärmestromdichten bis  $10^7\text{ Wm}^{-2}$ .

Zur Evaluierung des Spot-Verdampfer-Verbunds wird ein thermisches Berechnungsmodell der Motorkomponenten erstellt, um die Maximaltemperaturen der Kupferwicklungen zu bestimmen. Des Weiteren werden in dieses Berechnungsmodell verschiedene Druckverlust-Modelle für Zweiphasen-Strömungen implementiert, um die Gleichverteilung des Kältemittels auf die 18 Verdampfer zu untersuchen.

Die Validierung des Berechnungsmodelles erfolgt an einem hierfür entwickelten Versuchsträger. Die Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Es kann gezeigt werden, dass aufgrund der kurzen Kapillarstrecken der Druckverlust im Motor nicht ausreichend ist. Durch den Einbau eines zusätzlichen Nadelventils kann diese Herausforderung gelöst werden. Der veränderte Eingangsdampfgehalt vor der Kapillarstrecke wird im Berechnungsmodell berücksichtigt.

Es wird gezeigt, dass Spot-Verdampfer sehr gut geeignet sind, um hohen Wärmestromdichten in Elektromotoren zu begegnen.

**Stichwörter:**

R32, hohe Wärmestromdichten, Spot-Verdampfer, Elektromotoren, Linearmotoren

## GreenHP: Strömungs-Analyse der Verdampfer-Luftseite

Christoph Reichl<sup>1\*</sup>, Johann Emhofer<sup>1</sup>, Frieder Lörcher<sup>3</sup>, Andreas Strehlow<sup>2</sup>, Mirza Popovac<sup>1</sup>,  
Peter Wimberger<sup>1</sup>, Christian Köfinger<sup>1</sup>, Andreas Zottl<sup>1</sup>, Thomas Fleckl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology, Energy Department, Sustainable Thermal Energy Systems,  
Giefinggasse 2, A 1210 Wien, Österreich  
[christoph.reichl@ait.ac.at](mailto:christoph.reichl@ait.ac.at)

<sup>2</sup> AKG Verwaltungsgesellschaft, Am Hohlen Weg 31, D-34369 Hofgeismar, Germany  
[andreas.strehlow@akg-gruppe.de](mailto:andreas.strehlow@akg-gruppe.de)

<sup>3</sup> Ziehl-Abegg SE, Heinz-Ziehl-Straße, 74653 Künzelsau  
[frieder.loercher@ziehl-abegg.de](mailto:frieder.loercher@ziehl-abegg.de)

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen des EU Projektes GreenHP ([www.greenhp.eu](http://www.greenhp.eu)) wurde eine neuartige effiziente Luft-Wasser-Wärmepumpe entwickelt. Das natürliche Kältemittel Propan (R290) wird dabei in sehr geringer Menge eingesetzt. Für diese neue Wärmepumpe wurde ein neues Kompressorkonzept umgesetzt, die Wärmeübertrager aus Aluminium-Micro-Kanälen mit effizienten Luftlamellenstrukturen konzipiert und ein neuartiger Ventilator entwickelt. Im Rahmen der Prüfstands Messungen am AIT wurde ein besonderes Augenmerk auf die Luftseite der Wärmepumpe gelegt: Laseroptische Messtechnik (Particle Image Velocimetry - PIV) wurde eingesetzt, um sowohl die (a) Strömungsbedingungen im Einsaugbereich der Wärmepumpe zu bestimmen als auch (b) die Strömungsfelder im Bereich zwischen Wärmeübertrager und Ventilator zu charakterisieren. Zusätzlich wurde das Turbulenzprofil im Ansaugbereich mittels Hitzdrahtanemometrie (Constant Temperature Anemometry – CTA) bestimmt. Die Geschwindigkeitsfelder im Einlassbereich (a) dienen als Randbedingungen für die numerischen Strömungssimulationen (CFD), die mit den Innenraummessungen (b) verglichen werden. Die numerischen Strömungssimulationen wurden in weiterer Folge eingesetzt, um das Vereisungs- und Abtauverhalten des Verdampfers der GreenHP zu berechnen. Sie erlauben eine Analyse der zeitlichen und räumlichen Frostverteilung in der turbulenten Strömung durch die Lamellenpakete. Da der Verdampfer in Tischbauweise ausgeführt ist, kann durch Auffangen des Wassers mit Behältern während der Abtauung eine orts aufgelöste Bestimmung der Eismenge am Verdampfer durchgeführt werden. Dafür wurde der Bereich von 1.70m x 1.60m in 180 Sub-Bereiche unterteilt. Zusammen mit den Strömungsmessungen ist es möglich, auf die Propan-Kältemittelverteilung im Verdampfer zu schließen. Das Vereisungsverhalten wurde zusätzlich akustisch mit einer Messkuppel bestehend aus 64 Mikrofonen untersucht. Diese zeit-, frequenz und orts aufgelöste akustische Charakterisierung ermöglicht zusammen mit der strömungstechnischen Analyse eine umfassende Bewertung der Luftseite des GreenHP Verdampfers.

Das Projekt Green Heat Pump wird von der Europäischen Kommission im Zuge des 7th Framework Programme (FP7) - grant agreement No. FP7-Energy-2012-308816 - gefördert.

### Stichwörter:

Luft-Wasser-Wärmepumpe, Laseroptische Messtechnik, Akustik, Vereisung, Computational Fluid Dynamics

## Sorptionsmodul mit neuartigen Wärmeübertragern für eine hohe Leistungsdichte von Adsorptionskältemaschinen

Ursula Wittstadt<sup>1\*</sup>, Ralph Herrmann<sup>2</sup>, André Große<sup>2</sup>, Walter Mittelbach<sup>2</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik,  
Sorptionsstechnologie – Komponentenentwicklung,  
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de](mailto:ursula.wittstadt@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> SorTech AG, Zscherbener Landstraße 17, 06126 Halle (Saale), Deutschland

\* Korrespondenzautorin

Mit Adsorptionskältemaschinen kann Abwärme zur Erzeugung von Kälte genutzt werden. Das Herzstück einer solchen Anlage ist das Sorptionsmodul, das einen mit Sorptionsmaterial beschichteten Wärmeübertrager für die Adsorption und Desorption sowie einen Wärmeübertrager für die Verdampfung und Kondensation des Kältemittels umfasst.

Für den Stoff- und Wärmetransport auf der Sorptionsseite des Wärmeübertragers eignen sich Strukturen mit hoher Porosität und großer Oberfläche bei gleichzeitig ausreichend guter Wärmeleitfähigkeit. Ein Kompositmaterial aus einem mit SAPO-34 beschichteten Aluminiumfaserwerkstoff hat hier sehr vorteilhafte Eigenschaften gezeigt (Wittstadt, Földner et al. 2015 [1]).

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekts „Entwicklung einer Gasadsorptionswärmepumpe mit einem aufkristallisierten Adsorptionswärmeübertrager und einem neuartigen Verdampfer/Kondensator-Apparat“, ADOSO wurde auf Basis dieses Fasermaterials in Verbindung mit Flachrohren ein neuartiger Wärmeübertrager entwickelt.

Erste Messungen an einem einzelnen Modul mit diesem Wärmeübertragerkonzept für die Anwendung in einer Gasadsorptionswärmepumpe haben im Vergleich zum Modul der Reihe „eZea“ der SorTech AG eine Verdopplung der Leistungsdichte bei gleichbleibendem Wirkungsgrad ergeben.

In diesem Beitrag wird die Performance dieses Moduls als alternierend betriebenes Doppelmodul für die Anwendung als Kältemaschine betrachtet. Messungen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen wie Zykluszeiten und Temperaturen werden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Kälteleistung Leistung und COP vorgestellt.

### Stichwörter:

Adsorptionskältemaschine, Wärmeübertrager, Beschichtung, Wasser, SAPO-34

[1] Wittstadt, U., G. Földner, et al. (2015). "A New Adsorbent Composite Material Based on Metal Fiber Technology and Its Application in Adsorption Heat Exchangers." *Energies* **8**(8): 8431.



II.2.10

## Energieeffiziente Rückkühlung in Rechenzentren

**Stefan Medag**

JAEGGI Hybridtechnologie AG, Hirschgässlein 11, CH-4051 Basel

[Stefan.Medag@jaeggi-hybrid.ch](mailto:Stefan.Medag@jaeggi-hybrid.ch)

Energieeffiziente Rückkühlung in Rechenzentren spielt eine immer wichtigere Rolle, da der PUE (Power Usage Effectiveness) die wichtigste Größe für den Betrieb eines Rechenzentrums ist. Dabei ist es wichtig, sowohl im klassischen Rückkühlbetrieb auf möglichst niedrige Kühlwassertemperaturen zu achten, als auch den Freikühlbetrieb so effizient wie möglich zu gestalten und ganzheitlich zu betrachten. Die Kühlung von Rechenzentren nimmt mittlerweile fast  $\frac{1}{4}$  der gesamten Leistung für sich in Anspruch.

Jedes Kelvin an niedrigeren Kühlwassertemperaturen erspart einer möglichen Kältemaschine 3 % an el. Verbrauch. Eine energieeffiziente Rückkühlung kann grundsätzlich in vier mögliche Bereiche für den Jahresverlauf unterteilt werden:

1. Trockene freie Kühlung zur Entlastung einer Kälteerzeugung ohne Wasserverbrauch,
2. Benetzte, freie Kühlung, die die trockene freie Kühlung um mehrere Kelvin verlängert,
3. Trockene Rückkühlung für eine vorgeschaltete Kältemaschine sowie
4. Benetzte Rückkühlung zur ganzjährigen effizienten Kühlwasserversorgung.

Der Vortrag zeigt anhand von Berechnungen sowie Fallbeispielen (Anwendungsberichten) die Möglichkeiten auf, energieeffiziente Rechenzentren zu betreiben. Es werden ebenfalls praxisgerechte Vorschläge für die beste Kühlwassertemperatur und damit für die Auslegung von Hybriden Rückkühlern gegeben.

**Stichwörter:**

Rechenzentrum, JAEGGI, Hybrid, Wärmeübertrager, Kühlwasser, Wasserersparnis

II.2.11

## Von Trocken bis Hybrid - Welche Rückkühltechnik für wassergekühlte Kaltwassersätze?

**Michael Freiherr**

Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Str. 2-6, 82256 Fürstfeldbruck, Germany

Tel.: +49 8141 242 4818, Fax: +49 8141 242 54818

eMail: [michael.freiherr@guentner.com](mailto:michael.freiherr@guentner.com)

Im Vortrag werden die Rückkühltechnologien „Trocken“, „Adiabat“, „Besprüht“ und „Hybrid“ erläutert und mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen anhand praxisnaher Beispiele gegenübergestellt. Verschiedene Aspekte wie Wasserverbrauch, Investitions- und Betriebskosten werden vergleichend betrachtet. Der Fokus liegt jedoch auf dem Vergleich der Energie-Effizienz-Verhältnisse von Kältemaschine und Flüssigkeitskühler im Auslegungspunkt bei unterschiedlichen Temperaturniveaus. Hierdurch soll verdeutlicht werden, welchen Einfluss die Entscheidung für oder gegen ein bestimmtes System schon während der Planungsphase auf den Invest und die späteren Betriebskosten der Gesamtanlage hat.

II.2.12

## Optimierte Regelung von thermisch getriebenen Kühlsystemen – Simulation und Praxistest

Björn Nienborg<sup>1\*</sup>, Antoine Dalibard<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de](mailto:bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> HfT Stuttgart, Zentrum für nachhaltige Energietechnik,  
Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Thermisch angetriebene Kälteanlagen im kleinen Leistungsbereich (<50kW) arbeiten typischerweise mit konstanten Wassermassenströmen in allen hydraulischen Kreisen und bieten – abgesehen von der Zykluszeit bei Adsorptionskältemaschinen – keine Möglichkeit der Leistungsregelung. Unter Teillastbedingungen sind die Folgen ein hoher Bedarf an elektrischer Hilfsenergie sowie taktender Betrieb.

Daher wurden im Rahmen einer Simulationsstudie mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen mehrere Ansätze zur Betriebsführung auf Basis von charakteristischen Gleichungen der Hauptkomponenten untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Kälteleistung durch die gezielte Variation von Kühlwassertemperatur und -massenstrom sehr gut regeln lässt. Da die zugehörigen Aktoren (Kühlturmventilator und Kühlwasserpumpe) die größten Stromverbraucher im System sind, kann dadurch je nach Randbedingungen zusätzlich eine deutliche Reduktion des Hilfsenergiebedarfs erzielt werden.

Im Sommer 2015 wurden die entwickelten Betriebsführungsstrategien an zwei realen Kühlanlagen – eine Laboranlage mit Ammoniak-Wasser-Diffusions-Absorptionkältemaschine, sowie ein solarthermisches Kühlsystem mit Wasser-Silikagel-Adsorptionskältemaschine – implementiert und getestet. Dabei haben sich die positiven Ergebnisse bestätigt. Zudem wurde die praktische Umsetzbarkeit nachgewiesen.

Vorgestellt werden sowohl die Ergebnisse der Simulationsstudie als auch die Resultate des Versuchsbetriebs an den realen Anlagen.

**Stichwörter:**

Sorptionskältemaschine, Regelung, Betriebsführung, Simulation, Vermessung

II.2.13

## Energieeffiziente Ventilatorlösungen für die Kältetechnik Im Systemansatz stecken enorme Potentiale

Martin Schulz

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Bachmühle 2, 74673 Mulfingen

Phone: +49 (7938) 81 604, Fax: +49 (7938) 81 9604

[Martin.Schulz@de.ebmpapst.com](mailto:Martin.Schulz@de.ebmpapst.com)

Die Nachfrage nach energieeffizienten und geräuscharmen Ventilatorlösungen für kältetechnische Anwendungen hat in den letzten 15 Jahren enorm zugenommen. Dies liegt zum einen daran, dass Betreiber von kältetechnischen Anlagen neben den Anschaffungskosten immer mehr die Betriebskosten im Blick haben, aber auch gesetzliche Regelungen wie die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (ErP) haben ihren Teil dazu beigetragen, effizientere Ventilatoren einzusetzen. Zudem spielen Grenzwerte der zulässigen Geräuschemissionen eine immer größere Rolle.

Die Entwicklungsschwerpunkte lagen in der Vergangenheit in der Optimierung der Ventilator-Komponenten Motor, Strömungsmaschine (Laufwerk) und Elektronik. Die Verbesserungspotentiale dieser Komponenten wurden konsequent in neuen Ventilatorbaureihen umgesetzt.

Es ist aber abzusehen, dass mit der nächsten Stufe der Ökodesign-Richtlinie die Mindestwirkungsgrade weiter angehoben werden, so dass neue Lösungen erforderlich werden. Die alleinige Betrachtung der Einzelkomponenten und deren Optimierung wird hier nicht mehr ausreichend sein.

Im Systemansatz liegt das nötige Potential, das es zu erschließen gilt. Werden die heutigen Motor-Laufwerk-Kombinationen konsequent weiterentwickelt und im System mit passenden Peripheriekomponenten gepaart, dann sind Wirkungsgradsteigerungen von bis zu 54 % möglich. Darüber hinaus lassen sich nützliche applikationsspezifische Funktionen wie z. B. eine erhöhte Wurfweite, eine Düsenheizung oder ein Vereisungsschutz im Ventilatorsystem umsetzen.

Im Vortrag wird ein neu entwickeltes Ventilatorsystem vorgestellt, welches die Potentiale des Systemansatzes konsequent umsetzt und so beeindruckende Werte in Bezug auf Effizienz, Geräusch und Funktionalität aufweist.

Das Ergebnis ist minimaler Energieverbrauch bei maximaler Funktionalität in kältetechnischen Anlagen.

## II.2.14

# Messung und Simulation einer 50 kW Butan-Hochtemperaturwärmepumpe mit Ejektor

**Gerwin Schmid<sup>1\*</sup>, Michael Lauer<sup>1</sup>, Mirza Popovac,  
Alexander Baumhake<sup>2</sup>, Armin Hafner<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology, Energy Department, Sustainable Thermal Energy Systems,  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[gerwin.schmid@ait.ac.at](mailto:gerwin.schmid@ait.ac.at)

<sup>2</sup> Frigopol Kälteanlagen GmbH, Gamser Straße 21, A-8523 Frauental a.d. Laßnitz  
[alexander.baumhake@frigopol.com](mailto:alexander.baumhake@frigopol.com)

<sup>3</sup> SINTEF Energy Research, Kolbjørn Hejes vei 1D, 7465 Trondheim, Norwegen,  
[armin.hafner@sintef.no](mailto:armin.hafner@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

In Österreich sind Industrieunternehmen für etwa ein Drittel des Endenergiebedarfs verantwortlich, wobei etwa 74 % davon für Prozesswärme benötigt wird, die wiederum zu einem großen Teil aus fossilen Energieträgern gewonnen wird. Auf der anderen Seite wird die verursachte Abwärme selten genutzt, beziehungsweise kann diese wegen der relativ geringen Abwärmepertemperaturen nicht direkt genutzt werden. Um die Abwärme für einen industriellen Prozess nutzbar zu machen, sind Industrierwärmepumpen eine effiziente Möglichkeit, welche die Abwärme von 50-80 °C auf 100-160 °C heben können.

Diese Arbeit gibt zunächst einen kurzen Überblick über industrielle Prozesse, in welche Hochtemperaturwärmepumpen integriert werden können. Aus diesen Prozessen wurde die Papiertrocknung als Beispiel herangezogen, um ein Funktionsmuster einer Butan-Hochtemperaturwärmepumpe zu entwickeln. Das Funktionsmuster erreicht dabei eine Heizleistung von 50 kW bei einer Verdampfer- bzw. Kondensatortemperatur von ca. 60 °C bzw. 130 °C. Es wurde hierbei sowohl eine Standardwärmepumpenschaltung als auch eine Ejektorschaltung untersucht und miteinander verglichen. Die beiden Schaltungen wurden zunächst in Modelica® bei verschiedenen Betriebszuständen simuliert und gegenübergestellt. Anhand dieser Daten wurde das Funktionsmuster ausgelegt. Der COP wurde durch Ejektoreinsatz um bis zu 15 % gegenüber der Standard-schaltung gesteigert. Die experimentellen Ergebnisse wurden mit den Simulationen verglichen und eine wirtschaftliche Betrachtung des Ejektors durchgeführt.

Da Butan leicht brennbar ist, musste besonderes Augenmerk auf Sicherheitsmaßnahmen gelegt werden, welche ebenfalls kurz präsentiert werden.

**Stichwörter:**

Butan, Hochtemperaturwärmepumpe, Industrie, Ejektor, Modelica, Dymola

II.2.15

## **Erforderliche Sauggasüberhitzung bei einer R600 Hochtemperaturwärmepumpe – Nutzung der Motorabwärme**

**Heinz Moisi\*, René Rieberer**

Technische Universität Graz – Institut für Wärmetechnik (IWT)  
Inffeldgasse 25 B, 8010 Graz, Österreich  
[heinz.moisi@tugraz.at](mailto:heinz.moisi@tugraz.at)

\* Korrespondenzautor

Im Zuge der Entwicklung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe (Nutztemperaturen bis zu 110 °C) werden unterschiedliche Kältemittel und Kreislaufmodifikationen betrachtet. Speziell Kältemittel für Hochtemperaturanwendungen, darunter auch R600, weisen häufig ein sogenanntes überhängendes Nassdampfgebiet auf. Bei bestimmten Betriebsbedingungen kann diese Eigenschaft zum Auskondensieren von Flüssigkeit während der Verdichtung des Kältemittels führen. Dies kann Schäden am Kompressor zur Folge haben. Um eine sogenannte „nasse Kompression“ zu vermeiden, muss eine ausreichend hohe Kältemittelüberhitzung saugseitig vorhanden sein. Die erforderliche Überhitzung ist jedoch stark vom Kältemittel sowie der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur abhängig und kann relativ hohe Werte (bis zu 20 K) erreichen. Damit diese hohe Überhitzung nicht zur Gänze im Verdampfer bereitgestellt werden muss, wurde die Möglichkeit einer Umrüstung eines luftgekühlten semihermischen Kolbenkompressors auf Sauggaskühlung untersucht. Basierend auf einer bestehenden Sauggaswärmeübertragerkonstruktion und den Herstellerdaten des Kompressors wurde ein Simulationsmodell der Kompressorkühlung und des Stators der elektrischen Maschine erstellt. Aus dem Simulationsmodell konnte das Betriebsverhalten des adaptierten Kolbenkompressors sowie die Überhitzung und maximale Statortemperaturen für unterschiedliche Kältemittel abgeschätzt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die erhaltenen Werte für die Überhitzung in den meisten Fällen ausreichen, um einen sicheren Kompressorbetrieb zu gewährleisten. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse, dass eine ausreichende Kühlfunktion trotz hoher Sauggastemperaturen bei Hochtemperaturanwendung gegeben ist.

**Stichwörter:**

Hochtemperaturwärmepumpe, Mindestüberhitzung, Kompressorkühlung

II.2.16

## Potentiale zur Energie-Einsparung an industriellen Kälteanlagen durch die Optimierung der eingesetzten Antriebstechnik

Jörg Alber\*, Laurent Tousch

Emerson Industrial Automation, Eschborner Landstr. 166, 60489 Frankfurt am Main  
[Joerg.ALBER@Emerson.com](mailto:Joerg.ALBER@Emerson.com)

\* Korrespondenzautor

Die jüngst geänderten gesetzlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz der elektrischen Antriebstechnik (Elektromotor und Frequenzumrichter) im industriellen Umfeld haben Auswirkungen auf die Planung und Auslegung von Kälteanlagen - sowie deren Leistungsregelung.

Aber nicht nur bei Neuanlagen kann die Optimierung der Antriebskomponente positive Auswirkungen auf die Energiebilanz ausweisen. Auch – und gerade - bei Bestandsanlagen mit elektrischen Antrieben aus der Zeit vor den gesetzlichen Anforderungen bezüglich einer IE-Klassifizierung der Antriebe, haben hervorragende Potentiale zur Energieoptimierung und damit zu einer direkten- und indirekten Kostenreduktion beim Betreiber. Direkt durch die Reduktion des Energieverbrauches der Anlage, durch die Gewichtsreduktion sowie durch die Möglichkeit, die Drehzahl der Motoren zu regeln. Indirekt durch diverse Fördertöpfe der öffentlichen Hand, welche derartige Modernisierungsmaßnahmen finanziell unterstützen.

Der Vortrag vermittelt einen Überblick über die möglichen technischen Ansätze zur Energiekostenoptimierung basierend auf elektrischen Antrieben – am Beispiel industrieller Kälteanlagen. Es wird die zu Grunde liegende Antriebstechnologie vorgestellt, an Hand bereits modernisierter Anlagen wird eine Kosten-Nutzen-Rechnung verschiedener Maßnahmenpakete im Vergleich zueinander dargestellt.

II.2.17

## Die aktuelle Kältemittelsituation: Wo stehen wir 2 Jahre nach EU 517/2014?

Joachim Gerstel\*, Nicolas Dietl

Chemours Deutschland GmbH, Business Development - Opteon™ Kältemittel,  
Frankfurter Str. 229, 63263 Neu-Isenburg

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen der zum 01. Januar 2015 in Kraft getretenen F-Gase Verordnung 517/2014 steht unter anderem die Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen im Fokus der europäischen Zielsetzung. Nach fast 2 Jahren zeigen sich erste Auswirkungen des „Phase-Down“. Weitere Schritte hin zu Kältemitteln mit niedrigerem GWP sind notwendig, um einer tatsächlichen Verknappung der am Markt verfügbaren Kältemittelmenge entgegenzuwirken.

Ein messbarer Anteil zur Senkung seines eigenen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks kann dabei aus der Umstellung von R-404A-Bestandsanlagen auf Opteon™ XP40 (R-449A) kommen. Diese Strategie wird bereits von zahlreichen Kunden in Europa erfolgreich umgesetzt und viele Fallbeispiele sind bekannt. Darauf basierend wird aufgezeigt, dass entgegen der bisherigen Prognosen von erhöhten Kosten zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten sich vielmehr eine positive Bilanz für den Betreiber ergibt, ökologisch wie ökonomisch. Im Wesentlichen wird das durch die Verbesserung der Energiebilanz nach der Umstellung erreicht.

Außerdem gibt es die auch die Möglichkeit, Opteon™ XL Kältemittel einzusetzen. Diese zeigen deutlich geringere GWP Werte auf und bieten daher eine einfache und effiziente Möglichkeit seine CO<sub>2</sub>-Äquivalente

weiter zu senken. Sie fallen allerdings unter die schwer-entflammbare A2L-Klassifizierung und sind daher vornehmlich für Neuanlagen geeignet. Aber auch Umstellungen sind unter bestimmten Voraussetzungen möglich. Entsprechende Projekte werden dabei vorgestellt und ein Update zum Status der Markteinführung präsentiert.

## II.2.18

# Der HFKW Phase-Down in Europa: Schaffen wir das? Das EPEE Gapometer gibt Antworten

**Andrea Voigt**

The European Partnership for Energy & the Environment (EPEE),  
46 Avenue des Arts, 1000 Brüssel, Belgien  
[a.voigt@epeeglobal.org](mailto:a.voigt@epeeglobal.org)

Ein Schlüsselement der Verordnung ist der HFKW Phase-down, der den Verbrauch von HFKWs um 79 % bis 2030 reduziert. EPEE, das Sprachrohr der Kälte- Klima- und Wärmepumpenindustrie in Europa, unterstützt den Phase-Down und setzt sich für seine erfolgreiche Umsetzung ein.

Dies ist allerdings eine schwierige Aufgabe. Aus diesem Grund hat EPEE das EPEE Gapometer entwickelt, das dabei helfen soll, die Umsetzung des Phase-Down zu verfolgen und zu messen.

Das Gapometer verfolgt drei Ziele:

Die Entwicklung eines Fahrplans, die Verfolgung der Umsetzung des Phase-Downs und die Prüfung, ob es Lücken bei letzterer gibt.

Der HFKW Phase-Down beruht auf CO<sub>2</sub>-Äquivalent und zielt daher nicht auf spezielle Kältemitteltypen ab. Er gewährt Industrie und Nutzern Flexibilität bei der Auswahl ihres Kältemittels, aber seine Ziele sind besonders kurzfristig sehr hoch gesteckt. Bereits in 2018 muss der HFKW Verbrauch um über ein Drittel reduziert werden. Bis 2020 sogar um mehr als die Hälfte.

Das Gapometer zeigt, dass diese drastischen Einschnitte nur dann erzielt werden können, wenn drei Hauptgebiete abgedeckt werden. Dabei handelt es sich um neue Anlagen, um bestehende Anlagen und um den Einsatz von rückgewonnenem Kältemittel.

Außerdem analysiert das Gapometer die verschiedenen Anwendungssegmente von HFKWs und welche Rolle diese für die Erreichung der Ziele spielen. Zwei Segmente sind besonders wichtig: die Gewerbekälte und stationäre Klimaanlage. Kurzfristig liegt die Hauptpriorität bei der Gewerbekälte und insbesondere bei dem frühzeitigen Einsatz von R-404A Alternativen.

Weitere Informationen unter [www.epeeglobal.org](http://www.epeeglobal.org)

### **Stichwörter:**

HFKW Phase-Down, HFKW Alternativen, Gewerbekälte, stationäre Klimaanlage, Leckagen, Retrofit, R-404A Alternativen

II.2.19

## Opteon™ Arbeitsfluide: Lösungen für die Wärmepumpenindustrie

Claus-Peter Keller\*, Nicolas Dietl

Chemours Deutschland GmbH, Business Development - Opteon™ Kältemittel & Arbeitsfluide  
Frankfurter Str. 229, 63263 Neu-Isenburg

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen der jüngst in Kraft getretenen F-Gase Verordnung 517/2014 steht unter anderem die Reduzierung der Emissionen von Treibhausgasen im Fokus der europäischen Zielsetzung. Dieser „Phase-Down“ stellt dabei eine völlig neue Situation im Markt dar, denn im Gegensatz zu den bisherigen „Phase-Outs“ gibt es diesmal nur vereinzelte Verbote, jedoch soll das Produkt aus Treibhauspotential und Kältemittelmenge (= CO<sub>2</sub>-Equivalent) bis 2030 deutlich reduziert werden.

Für die Wärmepumpenindustrie bestehen keine direkten Verbote für die derzeit eingesetzten Technologien. Allerdings sind auch Sie von dem erwähnten Phase-Down betroffen, welcher letztendlich dazu führt, dass auch hier neue Arbeitsfluide mit niedrigerem GWP eingesetzt werden müssen, um einer tatsächlichen Verknappung im Markt entgegenzuwirken. Chemours bietet hier unterschiedliche Alternativen, um jeder Anforderung gerecht zu werden und den bestehen Anwendungsbereich sogar noch zu erweitern.

Der Vortrag fasst die jüngsten Entwicklungen auf dem Gebiet der Arbeitsfluide zusammen und gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der möglichen Alternativen. Dies beinhaltet neben HFO-1234yf basierten Fluiden wie etwa Opteon™ XL41 (R-454B) als Ersatz für R-410A, auch Stoffe für Hochtemperaturanwendungen wie das neue Opteon™ MZ (R-1336mzz(Z)). Letzteres ermöglicht Temperaturen bis zu 160 °C und ist bis über 200 °C stabil, womit es auch besonders attraktiv für „Organic Rankine Cycle“- und „Waste Heat Recovery“-Anwendungen ist. Neben Eigenschaften und Leistungsdaten werden auch Pilotprojekte und Feldtests vorgestellt.

II.2.20

## Erste Tendenzen für die Anwendungen von Kältemitteln im Rahmen der EU-F-Gase Verordnung

Rainer M. Jakobs

DMJ-Consulting, Kreuzfeldstr. 10, 64747 Breuberg, Deutschland  
[Dr.Rainer.Jakobs@t-online.de](mailto:Dr.Rainer.Jakobs@t-online.de)

Die EU-Verordnung Nr. 517-2014 wurde im April 2014 verabschiedet und der Geltungsbeginn war der 01. Januar 2015. Mit dem 01.01.2015 war bereits ein Verbot von Kältemitteln für die Haushaltskühl- und -gefriergeräte verbunden. Die erste Stufe des Quotensystems (93 %) ist zum 01.01.2016 und die zweite Stufe (63 %) zum 01.01.2018 wirksam. Weitere Verbote zum Inverkehrbringen von Kältemitteln bei speziellen Anwendungen sind für 2020 festgelegt.

Ist es noch zu früh über Tendenzen bei der Anwendung zu sprechen?

Der Vortrag versucht, die derzeitigen Entwicklungen in den verschiedenen Anwendungen der Kälte- und Klimatechnik aufzuzeigen. Es werden u. a. die Bereiche Haushaltskälte, Transportkälte, Industriekälte, Gewerbekälte mit den vielfältigen Anwendungen sowie mobile und stationäre Klimatechnik vorgestellt.

Die Trends und Entwicklungen sind nicht auf den europäischen Raum beschränkt, sondern zeigen ebenso internationale Entwicklungen auf.

Weitere Erkenntnisse zu den neu angemeldeten Kältemittelgemischen runden das Bild ab.

Die verschiedenen Anwendungsbereiche zeigen zum Teil sehr pragmatische Lösungen auf, in anderen Bereichen werden Anwendungsmöglichkeiten von allen denkbaren Alternativen intensiv und systematisch untersucht.

**Stichwörter:**

EU F-Gase Verordnung 517-2014, Trends der Kältemittelanwendung, Anwendungen in der Kälte- und Klimatechnik

**II.2.21**

## **Erfahrungen mit Niedrig-GWP Kältemittel mit hohem Gleit in einem Tiefkühlmöbel**

**Frank Rinne**

Emerson Climate Technologies GmbH, Pascalstrasse 65, 52076 Aachen  
[frank.rinne@emerson.com](mailto:frank.rinne@emerson.com)

Die F-Gas-Verordnung 842/2006 hatte das wesentliche Ziel, die Emission von Kältemitteln zu reduzieren. Das mittlere Treibhauspotential bis 2030 beträgt 350 kg CO<sub>2</sub>, jetzt müssen langfristige „Future Proof Solutions“ zum Einsatz kommen, um diese Ziele zu erreichen. Vor allem in Tiefkühlanwendungen mit kleineren Leistungen besteht Bedarf für Alternativen. Für A3 Kältemittel begrenzen die maximal zulässigen Füllmengen die zu erzielenden Kälteleistungen. Niedrig-GWP Kältemittel (Sicherheitsklasse A2L, GWP < 150) ermöglichen die Verwendung größerer Füllmengen bei vergleichbarem sicherheitstechnischem Aufwand. Der Vortrag behandelt die Ergebnisse einer Vergleichsmessung von R290 zu einem solchen Niedrig-GWP Kältemittel am Beispiel eines serienmäßig produzierten Tiefkühlmöbels.

Im Vortrag werden die folgenden Punkte behandelt:

- Genereller Vergleich der thermodynamischen Eigenschaften der verwendeten Kältemittel
- Abkühlverhalten des Möbels in Bezug auf die Luft- und Kühlguttemperaturen
- Auswirkungen des Temperaturgleits auf das Verhalten der verbauten Komponenten (Fokus: Wärmetauscher und Expansionsventil)
- Zusammenfassung mit Bewertung des Kältemittels als praktikable Alternative.

**II.2.22**

## **Effiziente Kälteerzeugung im Supermarkt mittels CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage und Ejektoren**

**Jonas Schönenberger\*, Erik Wiedenmann**

FRIGO-CONSULTING AG., CH-3073 Gümligen, Schweiz  
[j.schoenenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schoenenberger@frigoconsulting.ch)

\* Korrespondenzautor

Die transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen erleben in der gewerblichen und industriellen Kältetechnik eine Renaissance. In Kombination mit Ejektoren gelten sie unter Kältefachleuten als eine der zukünftigen Technologien, insbesondere in der gewerblichen und industriellen Kältetechnik. Die Einbindung der Ejektoren führt zu einer markanten Effizienzsteigerung. Diese trägt dazu bei, dass die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage auch in südlichen Regionen vermehrt zum Einsatz kommen wird.



Seit Oktober 2014 wird die modernisierte Supermarkt-Verkaufsstelle Migros Ibach, Schweiz mit zwei transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen betrieben, welche in Sachen Energieeffizienz neue Maßstäbe setzten (Auszeichnung EHI-Energieaward 2015). Dank der Einbindung von je fünf Ejektoren in die transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen können interne Verluste reduziert und eine Energieeinsparung erzielt werden. Die Messdatenerfassung liefert seit Oktober 2014 wertvolle Informationen, um den Betrieb der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage zu optimieren sowie die Ejektor-Technologie weiter zu entwickeln.

Die einmalige Ausgangslage, zwei identische CO<sub>2</sub>-Verbundkälteanlagen in derselben Verkaufsstelle zu betreiben, erlaubt, einmalige Vergleiche hinsichtlich Betriebsverhalten und Energieverbrauch anzustellen. Zum Zeitpunkt der DKV-Tagung liegen Betriebsdaten Betriebserfahrung von rund zwei Jahren vor, insbesondere von Sommer 2015, welcher überdurchschnittlich warm ausfiel. Die Systeme sowie die Einbindung der Ejektoren werden vorgestellt. Aktuelle Messdaten und deren Auswertung sowie daraus gewonnene Erkenntnisse werden präsentiert. Chancen und Risiken werden aufgezeigt und weitere Anwendungsgebiete dargestellt.

Dieses Referat und Paper analysiert das Betriebsverhalten zweier identischen CO<sub>2</sub>-Anlagen in der ein und selben Supermarkt-Verkaufsstelle. Es wird technisch ins Detail gegangen, die Autorenschaft erachtet es als sinnvoll, dieses Referat im Anschluss an das Referat „CO<sub>2</sub>-Ejektor-Systeme im Überblick“ einzugliedern.

**Stichwörter:**

Transkritische CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage, Parallelverdichtung, R744-Ejektor, Supermarkt- und Gewebekälte, Effizienzsteigerung

**II.2.23**

## **Praxiserfahrungen mit Ejektoren**

**Andres Hegglin**

Wurm (Schweiz) AG, Reutlingerstrasse 116, 8404 Reutlingen/Winterthur, Schweiz

[hegglin@wurm.ch](mailto:hegglin@wurm.ch)

Vor allem in der Supermarktkälte, wo der Energieverbrauch eine hohe Beachtung findet und deren Energiezahlen oft systematisch erfasst werden, sind die Energieverbrauchswerte durch Innovationen kontinuierlich gesunken. Hierzu beigetragen haben grundlegend neue Regelverfahren und neue Anlagenkonzepte, wie z. B. die Verwendung von Ejektoren. Es wird dargelegt, wie über eine Verdampfer-Sättigungsregelung die eigentliche Verdampfungstemperatur markant angehoben wird. Hinzu kommt die Wirkung von statischen Ejektoren, welche über Parallelverdichter die auf tieferem Niveau arbeitenden Sauggasverdichter entlasten. Gezeigt werden die Anwendung und der Optimierungsbeitrag von Venturiventilen (regelbaren Ejektoren). Die Wirkung der Gesamtheit der ergriffenen Maßnahmen wird anhand von Messungen an mehreren Kälteanlagen aufgezeigt.

III.01

## **„Minimierung von Bauzeit und Energiekosten mittels vorgefertigter Container-Ammoniak-Kältezentrale am Beispiel Eiswerk Bremerhaven“**

**Dan Steenbuck**

Johnson Controls Systems & Service GmbH, Merkurring 33 - 35, 22143 Hamburg  
[dan.steenbuck@jci.com](mailto:dan.steenbuck@jci.com)

Mit einer Gesamtbauzeit von nur 8 Monaten wurde im Juni 2015 das neue Eiswerk in Bremerhaven in Betrieb genommen. Es ersetzt das seit 1911 laufende traditionelle Eiswerk.

Die Realisierung des ambitionierten Projektes in einer derart kurzen Bauzeit konnte nur durch einen hohen Vorfertigungsgrad der Container-Ammoniak-Kältezentrale und der damit verbundenen Minimierung der Montagetätigkeiten auf der Baustelle selbst erreicht werden.

Im Beitrag werden der Aufbau und die Funktionsweise der Container-Ammoniak-Kältezentrale im Zusammenhang mit dem Eiserzeugungskonzept erläutert.

Im Rahmen des innovativen Anlagenkonzepts werden z. B. die Versorgung der Hafenwasserkondensatoren durch im Hafenbecken montierte Tauchpumpen, der Einsatz von selbstreinigenden Wasserfiltern, die komplette Beheizung über Wärmerückgewinnung und die Eiserzeuger angesprochen.

Nach nun 8 Monaten Betriebszeit des neuen Eiswerkes mit gut 35 % geringeren Energiekosten bei gleicher Tonnage und hervorragender Eisqualität, haben sich die Investitionen und gemeinsamen Anstrengungen, ein derartiges Vorhaben in so kurzer Zeit umzusetzen, mehr als gelohnt.

III.02

## **Ein Kaltsolesatz mit dem Kältemittel R290 im direkten Vergleich mit einer direktverdampfenden Kälteanlage mit dem Kältemittel R404A**

**Robert Baust**

Robert Schiessl GmbH, Kolpingring 14, 82041 Oberhaching  
Telefon: +49 (0) 89 61306-133, Telefax: +49 (0) 89 61306-171  
[r.baust@schuessl-kaelte.de](mailto:r.baust@schuessl-kaelte.de)

Mit der Revision der F-Gase Verordnung werden die in der Gewerbekälte weit verbreiteten Kältemittel R404A und R134a verboten bzw. verknappt.

Als Alternative bieten sich natürliche Kältemittel wie R290 (Propan) an. Für den Vorteil des niedrigen GWP-Wertes muss aber die Brennbarkeit in Kauf genommen werden.

Für den Kälteanlagenbauer hat das zwei Konsequenzen: In Bereichen, in denen brennbares Kältemittel in gefährlicher Konzentration freigesetzt werden kann, muss ein entsprechendes Sicherheitskonzept vorgesehen werden. Bei den meisten Anlagen wird man nicht umhin kommen, ein indirektes System mit Kälteträger einzusetzen.

Das bedeutet höhere Anlagenkosten und durch die zusätzlichen Wärmeübergänge einen theoretisch höheren Bedarf an elektrischer Energie.

In dem vorgestellten Projekt war ein großes Hopfenlager (LxBxH 66x25x32m) bereits vorhanden. Der Kältebedarf 120 kW wird von einer direktverdampfenden Kälteanlage mit dem Kältemittel R404A gedeckt. Um

die Lagerkapazität zu vergrößern, wurde ein gleich großes Kühllager angebaut. Bei dem neuen Kühllager wird der Kältebedarf von einem Kaltsolesatz mit dem Kältemittel R290 gedeckt.

Die technische Ausführung entspricht dem Stand der Technik und den Effizienzkriterien, die erfüllt werden müssen, um die Anlage für die BAFA-Förderung zu qualifizieren.

Der Anlagenbetreiber erfasst den elektrischen Energieverbrauch für beide Kühllager separat. Das Erstaunliche ist, dass der Kaltsolesatz 50 % weniger elektrische Energie verbraucht als die direktverdampfende Anlage. In Zahlen ausgedrückt, liegt die Ersparnis bei 131.000 kWh<sub>elek.</sub> oder € 20.000,- pro Jahr.

### III.03

## Dynamische Simulation des Kältekreislaufs eines Haushaltsgefrierschranks mit IPSEpro

Mario Rohrhofer<sup>1\*</sup>, Stefan Posch<sup>1</sup>, Erwin Berger<sup>1</sup>, Johann Hopfgartner<sup>1</sup>,  
Raimund Almbauer<sup>1</sup>, Erhard Perz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz,  
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Österreich  
[rohrhofer@ivt.tugraz.at](mailto:rohrhofer@ivt.tugraz.at)

<sup>2</sup> SimTech GmbH, Riesstraße 120, 8010 Graz, Österreich

\* Korrespondenzautor

In der Praxis werden Haushaltskühl- und Gefriergeräte üblicherweise durch aufwendige Experimente untersucht, um selbst in hoch entwickelten Geräten noch Potenziale für verbesserte Energieeffizienz zu finden. Im Rahmen des Forschungsprojekts ECO-COOL an der Technischen Universität Graz wurden dynamische (instationäre) Modelle der Einzelkomponenten eines solchen Kühlkreislaufs in C, Visual Basic for Applications (VBA) sowie Matlab entwickelt und in einer Gesamtkreislaufsimulation zusammengeführt, die mit Messdaten validiert wurde. Der Vorteil eines solchen Simulationswerkzeugs ist der kurze Zeitraum, der für die Auswertungen von Parametervariationen benötigt wird. Dies ermöglicht eine effizientere und kostengünstigere Optimierung des Kühlgeräts. Der Nachteil eines universitären Forschungscodes liegt jedoch oft in der Bedien- und Anwendbarkeit für Personen, die in den Entwicklungsprozess nicht eingeschlossen waren. Dies reicht von der Änderung von Parametern bis hin zum Aufbau eines neuen Geräts.

Um über das Forschungsprojekt hinaus die Bedienbarkeit zu garantieren und auch im Nachhinein industriellen Nutzen ziehen zu können, wurden nun die Modelle in die kommerzielle Software IPSEpro portiert. In dieser Arbeit werden die notwendigen Schritte, Schwierigkeiten der Portierung und die Facetten der unterschiedlichen Lösungsverfahren dargestellt. Weiters werden die Ergebnisse gegenübergestellt und diskutiert.

#### Stichwörter:

Kältekreislauf, Dynamik, R600a, IPSEpro

## **Automatisierte Optimierung von Kälteanlagen mit Hilfe geometriebasierter Simulationsmodelle**

**Jörg Aurich\*, Rico Baumgart, Andreas Meyer**

IAV GmbH, Kauffahrtei 25, 09120 Chemnitz  
Tel.: 0371 237-34917, [joerg.aurich@iav.de](mailto:joerg.aurich@iav.de)

\* Korrespondenzautor

Die derzeitigen Entwicklungen von Kälteanlagen haben in nahezu allen Industriezweigen, wie z. B. der Automobilindustrie oder der Hausgeräteindustrie, insbesondere die Kostenreduzierung und die Effizienzsteigerung der bestehenden Systeme zum Ziel. Hierbei kommen in zunehmendem Maße auch Simulationsmodelle zum Einsatz. Allerdings basieren diese zu einem großen Teil auf Messwerten, sodass damit eine geometrische Optimierung von Kältekreis Komponenten praktisch nicht möglich ist. Sofern physikalisch basierte Modelle zum Einsatz kommen, erfolgt die Optimierung zumeist nur manuell durch eine Variation einzelner Geometrieparameter. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombinationen und der Tatsache, dass jede Kombination auch eine separate Abstimmung des Gesamtsystems und der Regelstrategie erfordert, ist die Ermittlung einer optimalen Kombination auf herkömmlichem Wege nahezu ausgeschlossen.

Aus diesem Grund wurden bei IAV sehr detaillierte, geometrie- und physikbasierte Simulationsmodelle für unterschiedliche Verdichter- und Wärmeübertragertypen sowie Expansionsorgane entwickelt und zu einem Gesamtkreislaufmodell verschaltet. Die Modelle wurden anhand von Messwerten umfangreich validiert.

Sämtliche Teilmodelle sowie des Gesamtkreislaufmodells wurden mit speziellen Optimierungsalgorithmen gekoppelt. Hierdurch ist es nun möglich, unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen die Geometrieparameter der einzelnen Komponenten im Systemverbund derart zu optimieren, dass die Energieeffizienz der Anlage unter gleichzeitiger Einhaltung eines vorher definierten Bauraumes gesteigert wird.

Im Beitrag werden zunächst die physikalisch basierten Simulationsmodelle kurz vorgestellt. Anschließend wird auf die Verschaltung der Teilmodelle zu einem Gesamtsystem sowie auf die Validierung der Modelle eingegangen. In einem nächsten Schritt werden die Optimierungsalgorithmen kurz erläutert und eine automatisierte Geometrieoptimierung anhand eines handelsüblichen Haushalt-Entfeuchtungsgerätes demonstriert. Die Ergebnisse werden für unterschiedliche Zielfunktionen und Randbedingungen dargestellt. Abschließend werden die gegenüber dem Basisgerät erreichten Verbesserungen aufgezeigt und mögliche Folgeuntersuchungen abgeleitet.

## **Neue Generation CO<sub>2</sub>-Anlage mit ECU**

**Nickl<sup>1\*</sup>, Bartsch<sup>2</sup>, Hesse<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden/Germany  
Tel.: +49 351 463 32703, Fax : +49 351 463 37247  
[Joerg.Nickl@tu-dresden.de](mailto:Joerg.Nickl@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> kke GmbH, Inselallee 2, 01723 Kesselsdorf

\* Korrespondenzautor

In der Vergangenheit wurden an der TU Dresden umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Einbindung einer Expander-Kompressor-Einheit (ECU) in Kompressionskälteanlagen mit Kohlendioxid als Kältemittel durchge-

führt. Durch die Einbeziehung von Industriepartnern konnten zudem Erfahrungen im Praxisbetrieb gesammelt werden. Diese flossen in jüngster Zeit in die Neuentwicklung eines Kreislaufs mit ECU ein.

Der Prozess zeichnet sich dadurch aus, dass die ECU gut regelbar und auch nachträglich in bestehende Anlagen einfach integrierbar ist.

Das Grundprinzip besteht darin, die freiwerdende Expansionsleistung zum zusätzlichen Unterkühlen zu nutzen. Dazu sind neben einem verhältnismäßig kleinen Drosselventil nur ein zusätzlicher Plattenwärmeübertrager notwendig. Das Ergebnis ist eine Steigerung der Leistungszahl zwischen 10 bis 20 % durch eine zusätzliche Unterkühlung von ca. 8 K.

Bei einem Industriepartner wurde zunächst der Kreislauf realisiert. Die ersten Tests waren erfolgversprechend, so dass im Anschluss eine optimierte ECU gebaut wurde, die noch besser das Potenzial der Expansion umsetzt und zudem eine kostengünstigere Konstruktion hat.

Die Theorie zum neuen Kreislauf, zur optimierten ECU und Testergebnisse werden präsentiert.

### III.06

## **1:1 Labor Supermarkt R744 Parallelverdichteranlage mit Ejektorunterstützung und integriertem AC**

**Armin Hafner<sup>1\*</sup>, Krzysztof Banasiak<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen  
[armin.hafner@ntnu.no](mailto:armin.hafner@ntnu.no)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, Norwegen

\* Korrespondenzautor

There are more than 1 million supermarkets in Europe. The annual energy consumption in supermarkets can be up to 5 % of the national electricity. The cooling system is responsible for 30 to 70 % of the electricity bill in a store and the heating, ventilation and AC system (HVAC) for 15 and 25 %.

Supermarket chains prefer to apply R744 as working fluid for centralized commercial refrigeration systems whenever possible. However, today's R744 systems are not optimized regarding energy efficiency, i.e. no expansion work is utilized. At high ambient temperatures, the use and integration of ejectors can reduce energy consumption by up to 20 % compared to parallel compression units, which are currently the 'top runner' units.

To increase the knowledge related to design and control issues of ejector supported commercial refrigeration units a new laboratory facility is built at SINTEF/NTNU within the SuperSmart-Rack project funded by the Research Council of Norway and industrial partners. The installed capacities of the equipment are adapted to represent a standard Norwegian Supermarket, including some real display cabinets. Additional cabinets are simulated with large volume tube in tube heat exchangers.

The paper will give an overview of the system layout, applied components and the operation envelope.

#### **Keywords:**

Full scale laboratory ejector supported supermarket unit. R744 ejector technology, commercial refrigeration

## CO<sub>2</sub>-Booster-System zum Heizen und Kühlen

Jonas Schönenberger\*, Erik Wiedenmann

FRIGO-CONSULTING AG, Feldstraße 30, CH-3073 Gümliigen, Schweiz  
[j.schoenenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schoenenberger@frigoconsulting.ch)

\* Korrespondenzautor

Die transkritischen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen erleben in der gewerblichen und industriellen Kältetechnik eine Renaissance. Bei diesen Systemen ist die Abwärmenutzung für Brauchwarmwasser und Gebäudeheizung Stand der Technik. Zunehmend wird aber nicht nur die Abwärme vom Kühlprozess genutzt um das Heizsystem zu entlasten, sondern die Systeme so weiterentwickelt, dass diese den gesamten Wärmebedarf vom Gebäude oder Supermarkt abdecken können. Die sogenannten Integral-Systeme sind stark im Trend, nicht zuletzt, weil sie platzsparend und kosteneffizient den gesamten Bedarf an Wärme und Kälte abdecken.

Es wird eine seit Herbst 2015 sich in Betrieb befindende Supermarkt-Verkaufsstelle vorgestellt und die Einbindung des CO<sub>2</sub>-Systems in das Gebäude erläutert. Dabei wird auch auf die gebäudeseitige hydraulische Einbindung eingegangen. Weiter wird das System im Detail erläutert und auf die essentiellen System-Erweiterungen wie beispielsweise Außenverdampfer eingegangen. Es werden Betriebsdaten analysiert und präsentiert sowie Chancen und Risiken solcher Systeme aufgezeigt. Es wird auf die verschiedenen Betriebssituationen eingegangen und aufgezeigt, was dabei bei der Auslegung solcher Systeme zu berücksichtigen ist. Darüber hinaus wird aufgezeigt, wie sich der Energieverbrauch dieser Supermarkt-Verkaufsstelle verhält und was es für Optimierungspotential zukünftiger Systeme gibt.

### Stichwörter:

Transkritische CO<sub>2</sub>-Booster-Kälteanlage, Heizen und Kühlen, R744-Wärmepumpe, Supermarkt- und Gewebekälte, Effizienzsteigerung, Integral-System

## Optimierung eines Kleingewerbe-Wäschetrockners mit CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe

Thomas Alpögger<sup>1\*</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Marcos Bockholt<sup>2</sup>, Ralf Bußmann<sup>2</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TU-Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[t.alpogger@tu-bs.de](mailto:t.alpogger@tu-bs.de)

<sup>2</sup> Miele & Cie. KG, Carl-Miele-Straße 29, 33332 Gütersloh, Deutschland  
[marcos.bockholt@miele.de](mailto:marcos.bockholt@miele.de)

\* Korrespondenzautor

Die Nutzung der Wärmepumpentechnik in Wäschetrocknern führt im Allgemeinen zu einer Energieeinsparung von ca. 50 % je Nutzung und zu einem moderaten Anstieg der Trocknungszeit im Vergleich zu konventionellen Kondentrocknern. Geräte für die Kleingewerbe-Anwendung erfordern kurze Trocknungszeiten und dadurch eine höhere Leistungsfähigkeit. CO<sub>2</sub> stellt hierbei eine umweltfreundliche und sichere Alternative zu dem derzeit vorwiegend verwendeten Kältemittel R134a dar.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Prototyp eines Kleingewerbe-Wärmepumpentrockners mit dem Kältemittel CO<sub>2</sub> vorgestellt. Dieser setzt sich aus einem geschlossenen Luftkreislauf für die Wäschetrocknung und dem

Kältemittelkreislauf für den Wärmepumpenprozess zusammen. Die Wärmepumpe ist auf der Hochdruckseite mit einem zusätzlichen Wärmeübertrager (Kühler) ausgestattet, um bei Bedarf Energie an die Umgebung abführen zu können. Anhand von Messergebnissen wird das Systemverhalten diskutiert und Einflüsse auf die energetische Effizienz erläutert. Schließlich wird ein anhand der Messdaten validiertes Simulationsmodell (Modelica/TIL Suite) verwendet, um Optimierungspotenziale hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Trocknungszeit zu bewerten. Dabei wird insbesondere die dynamische Betriebsweise des Systems berücksichtigt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Wäschetrockner, energetische Optimierung, Simulation, R744

III.09

## Messung thermodynamischer Eigenschaften von CO<sub>2</sub>-Solvent-Gemischen für Tieftemperaturkälte

Steffen Feja\*, Joachim Germanus

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[steffen.feja@ilkdresden.de](mailto:steffen.feja@ilkdresden.de)

\* Korrespondenzautor

Ein spezielles Anwendungsgebiet der Kältetechnik ist die Bereitstellung von Kühlleistung im tiefen Temperaturbereich unter -50 °C. Kühlung in diesem Bereich wird beispielsweise für den Betrieb von Prüf- bzw. Umweltsimulationskammern, bei der Gefriertrocknung oder für bestimmte Prozesse in der Tieftemperaturmedizin bzw. -biologie benötigt. Für derartige Anwendungen wird gegenwärtig meist das Kältemittel R23 (Trifluormethan CHF<sub>3</sub>) mit dem Normalsiedepunkt von -82,1 °C benutzt. Für tiefere Temperaturen kann auch R14 (Tetrafluormethan CF<sub>4</sub>) mit -128 °C Normalsiedepunkt in Frage kommen. Diese Kältemittel, HFKW bzw. FKW mit sehr hohen GWP-Werten, sind durch eine Ausnahmeregelung in der neuen F-Gase-VO 517/2014 mangels geeigneter Alternativen (bisher) auch künftig noch zugelassen.

In einem Forschungsprojekt wird derzeit die Entwicklung einer umweltfreundlichen Technologie mit dem natürlichen Arbeitsstoff CO<sub>2</sub> bearbeitet. Zur Kälteerzeugung in diesem Temperaturbereich soll festes CO<sub>2</sub> (Trockeneis) sublimiert werden. Es werden hierbei zwei Varianten betrachtet, wie die Sublimationswärme am effektivsten für die Kühlung genutzt werden kann. Die beiden Varianten werden im Projekt hinsichtlich der wissenschaftlich/technischen Grundlagen untersucht und sind wie folgt von den Autoren bezeichnet worden:

1. Trocken-Sublimator – direkte Kühlung (analog zum Verdampfer eines Kaltdampfprozesses)
2. Lösungs-Sublimator – indirekte Kühlung über einen Sekundärkreislauf mit einem Solvent

Die Präsentation wird sich speziell mit dem Lösungs-Sublimator und den thermodynamischen Eigenschaften der Mischungen aus CO<sub>2</sub> und einem geeigneten Wärmeübertrager-Medium, welches gleichzeitig als Lösungsmittel (Solvent) dienen kann, beschäftigen. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der Kopplung von Sublimation und dieser Flüssigkeit eine deutlich höhere Effizienz bei der Wärmeübertragung realisiert werden kann, als beim Trocken-Sublimator. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Lösungsenthalpie von festem CO<sub>2</sub> beim Mischen mit einem geeigneten Lösungsmittel zu einer zusätzlichen vorteilhaften Abkühlung führen kann.

Um dies zu bestätigen und weitere Tätigkeiten am Projekt durchzuführen, sind Messungen der thermodynamischen Eigenschaften des reinen Solvents und dessen Gemische mit CO<sub>2</sub> erforderlich. Die Herausforderung der Messungen liegt hierbei in den geforderten tiefen Temperaturen und den noch relativ hohen Drücken des Systems von beispielsweise 30 bar bei -5 °C. Im Vortrag wird auf die Weiterentwicklung der Messmethoden der Mischungseigenschaften Mischbarkeit, Löslichkeit und Dampfdruck, der Messung der physikalischen Transporteigenschaften Dichte und Viskosität, aber auch der thermischen Eigenschaften, wie Schmelztemperatur und Wärmeleitfähigkeit eingegangen.

Neben der Darstellung der Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Fluide wird im Vortrag, anhand eines im letzten Jahr durchgeführten nationalen Vergleiches mit anderen Methoden, auf die Genauigkeit der von den Autoren verwendeten Messung mit der Zylinderspaltmethode eingegangen.

Speziell für die Messung der thermischen Eigenschaften mittels DSC (Differential Scanning Calorimetry) wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches die Untersuchung von Flüssig-Flüssig-Gemischen aber auch von Werkstoffen unter den Bedingungen des Kältekreislaufes im Bereich von Raumtemperatur bis zu tiefen Temperaturen ermöglicht. Dieses Verfahren eignet sich auch zur Bestimmung von Schmelztemperaturen und –wärmern von Kältemittelgemischen oder der Bestimmung der Glasübergangstemperatur unter Kältemittel-Öl-Einfluss.

**Stichwörter:**

Kohlendioxid, Sublimation, DSC, Wärmeleitfähigkeit, Lösungsmittel, Tieftemperaturkälte, Kältemittelgemische, Dampfdruck, Mischungslücke, Dichte Viskosität, Kühlmittel

III.10

## **Einsatz eines Zeolith/Wasser-Adsorptionskreislaufs als energieeffiziente Standklimatisierung für Lkw**

**Rico Baumgart\*, Stefan Moldenhauer, Jörg Aurich, Andreas Meyer,  
Oliver Predelli, Claus Brinkkoetter**

IAV GmbH, Kauffahrtei 25, 09120 Chemnitz  
Tel.: 0371/237-34918, [rico.baumgart@iav.de](mailto:rico.baumgart@iav.de)

\* Korrespondenzautor

Die Anzahl und die Dauer der Pausen sind für den Fernverkehr gesetzlich festgelegt. In den Pausen wird bei sommerlichen Umgebungsbedingungen vom Fahrer oftmals der Verbrennungsmotor weiterbetrieben, um mittels der Klimaanlage das Fahrerhaus zu kühlen. Allerdings führt dies zu zusätzlichem Kraftstoffverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen, Lärmbelästigung und erhöhten Betriebskosten.

Aus diesem Grund wird bei IAV derzeit eine Standklimaanlage auf Basis eines Zeolith/Wasser-Adsorptionskreislaufes entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems kann die Temperierung der Fahrerkabine während der Pausenzeiten ohne zusätzliche Antriebsenergie und somit ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen sichergestellt werden. Nach der Pause wird das System mittels der Abgaswärme des Verbrennungsmotors wieder regeneriert.

Zur Simulation dieses Klimasystems wurde ein detailliertes physikalisches Modell entwickelt. Die Ermittlung der erforderlichen Kälteleistung erfolgte mit Hilfe eines Fahrgastzellenmodells für verschiedene Betriebsszenarien. Unter Zuhilfenahme dieser Modelle wurde die gesamte Anlage konzeptioniert und ausgelegt. Basierend auf den Ergebnissen wird derzeit ein Funktionsmuster aufgebaut und in einen Mercedes-Benz Actros integriert.

Im Tagungsbeitrag soll zunächst das Funktionsprinzip der entwickelten Adsorptions-Standklimaanlage dargestellt werden. Des Weiteren werden die entwickelten Modelle sowie die Simulationsergebnisse präsentiert. Anschließend wird auf die Konstruktion und die Implementierung der Anlage in den Lkw eingegangen. Abschließend soll ein Ausblick auf die weiteren Entwicklungsschritte gegeben werden.



III.11

## Hybride Klimatisierung für Elektrofahrzeuge mit Wärmepumpe und offenem Sorptionssystem

Uwe Bau\*, Heike Schreiber, Franz Lanzerath, André Bardow

RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik,  
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen  
[uwe.bau@tt.rwth-aachen.de](mailto:uwe.bau@tt.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

In den kommenden Jahren führen Umweltzonen, Lärm- und Klimaschutzziele zur weiteren Elektrifizierung der Fahrzeugflotte. Bei batterie-elektrisch angetriebenen Fahrzeugen stellt die Klimatisierung jedoch eine Herausforderung dar. Wegen fehlender Motorabwärme muss der Fahrgastraum im Winter aktiv beheizt werden; im Sommer ist wiederum eine Kühlung und Luftentfeuchtung vorzusehen. Bei Deckung des Energiebedarfs der Klimatisierung aus den Stromvorräten der Traktionsbatterie, kommt es zu einer weiteren Reduktion der ohnehin geringen Reichweite. Um Heiz- und Kühlleistung effizient bereitzustellen, eignen sich integrierte elektrische Wärmepumpen/Kompressionskältemaschinen. Allerdings sinkt die Effizienz der Wärmepumpe bei kalten Wintertemperaturen stark ab; im Sommer muss ein großer Anteil der eingesetzten Energie für die Entfeuchtung der Luft aufgewendet werden.

In dieser Arbeit wird die Kombination einer Wärmepumpe mit einem offenen Sorptionsspeicher vorgeschlagen. Hierdurch kann sowohl im Winter als auch im Sommer die Effizienz der Klimatisierung erheblich gesteigert werden. Ein Sorptionsspeicher ist ein thermo-chemischer Speicher, der die Luft entfeuchtet und dabei Wärme freisetzt. Es wird gezeigt, dass sich hierdurch im Winter die Umluftrate erhöhen und somit Heizleistung einsparen lässt. Im Sommer entkoppelt das Sorptionsmodul die Entfeuchtung der Luft und die sensible Kühlung. Dadurch steigt die Effizienz der Kompressionskältemaschine. Durch eine Ladung des Sorptionsspeichers zwischen den Fahrten wird während der Fahrt die Batterie entlastet.

Das hybride Klimatisierungssystem aus Sorptionsmodul und Wärmepumpe wird mit Hilfe dynamischer Modelle in der Modellierungssprache Modelica untersucht. Sowohl für den Sommerfall, als auch für den Winterfall zeigen sich Potenziale für Energieeinsparungen von über 30 % im Vergleich zu konventionellen Wärmepumpen/Kompressionskältemaschinen. Diese Energieersparnis führt direkt zu einer Erhöhung der Reichweite von Elektrofahrzeugen.

**Stichwörter:**

Elektrofahrzeuge, Adsorption, Wärmepumpe

III.12

## Untersuchung von Wärmeübertragern mit integrierten Latentwärmespeichern für Fahrzeuge

Pascal Best<sup>1\*</sup>, Thomas Maurer<sup>1</sup>, Michael Sonnekalb<sup>2</sup>

<sup>1</sup> THM Gießen, Wiesenstr. 14, 35390 Gießen

<sup>2</sup> Konvekta AG, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt

\* Korrespondenzautor

Wärmeübertrager mit integrierten Latentwärmespeichern können in Fahrzeugen zum Glätten von Lastspitzen und für eine effiziente Betriebsweise der eingesetzten Therosysteme eingesetzt werden.

Bei Elektrobussen beispielsweise kann ein Kältespeicher die Batteriekühlung unterstützen. Die Batterien werden mit Schnellladesystemen aufgeladen, wobei große Wärmemengen in kurzer Zeit abgeführt werden müssen. Außerdem kann bei solchen Fahrzeugen eine Wärmepumpe mit unterstützendem Wärmespeicher zur Beheizung eingesetzt werden. Ein solcher Speicher könnte auch rekuperierte Bremsenergie aufnehmen.

In einer Machbarkeitsstudie wurden Wärmeübertrager mit ausgewählten Geometrien und verschiedenen Phasenwechselmaterialien hinsichtlich ihres zeitlichen Lade- und Entladeverhaltens experimentell untersucht. Ein Simulationsmodell wurde zudem erstellt, mit dem Auswirkungen von konstruktiven Änderungen des Systems hinsichtlich des Lade- und Entladeverhaltens zumindest qualitativ bewertet werden können.

Ein Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die ausgewählten Phasenwechselmaterialien hinsichtlich ihrer thermophysikalischen Eigenschaften in den betrachteten Systemen zur Anwendung kommen können. Ihre Eignung muss jedoch insbesondere hinsichtlich der Lebensdaueranforderungen noch genauer analysiert werden. Als wesentliche konstruktive Parameter zur Beeinflussung des Lade- und Entladeverhaltens bei dem betrachteten Konzept wurden der Lamellenabstand, der Rohrdurchmesser und die Aufteilung der Rohranzahl auf die vorgesehene Zweipassausführung identifiziert.

### III.13

## Kühlung von pelagischem Fisch

Kristina N. Widell<sup>1\*</sup>, Tom Ståle Nordtvedt<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SINTEF Fisheries and Aquaculture, 7465 Trondheim, Norwegen  
[kristina.widell@sintef.no](mailto:kristina.widell@sintef.no)

<sup>2</sup>Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen  
[armin.hafner@ntnu.no](mailto:armin.hafner@ntnu.no)

\* Korrespondenzautor

Blauer Wittling ist ein Fisch aus der Dorschfamilie, der bis zu 40 cm lang wird. Er wird typischerweise westlich von Irland im Februar-März gefangen. Heutzutage wird er hauptsächlich zur Gewinnung von Fischmehl und -öl verwendet. Zwischen Fang und Anlieferung vergehen mehrere Tage, deshalb muss der Fang gekühlt gelagert werden, um keinen Qualitätsverlust zu erleiden. Bei unzureichender Kühlung wächst die Anzahl der Bakterien zu stark und gleichzeitig verklumpen die Fische im Tank. Diese Verklumpung erschwert auch die notwendige Zirkulation des Kühlwassers und schlussendlich die Kühlung der Fische. Alle, die Fische an die Mehl- und Ölindustrie liefern, haben Kälteanlagen an Bord. In diesen Anlagen wird gekühltes Frischwasser mit Essigsäurezusatz als Kälteüberträger zirkuliert.

Meereswasser wäre aber besser geeignet, weil man damit niedrigere Zulaufstemperaturen erreichen könnte. Jedoch reichert sich das Salz während des Transports im Fisch an, was sich bei der Produktion von Fischmehl/-öl negativ auswirkt. Essig hat einen konservierenden Effekt (pH zirka 5 im Behälter) und verhindert auch die Verklumpung. Dieser Artikel beschreibt die Anlagenaspekte dieser Kälteüberträgeranlagen, um diese erfolgreich betreiben zu können. Er beschreibt auch einige Anlagenbeispiele in denen natürliche Kältemittel in RSW-Anlagen erfolgreich eingesetzt wurden. Vorschläge für Weiterentwicklung werden auch diskutiert.

#### **Stichwörter:**

gekühltes Frischwasser, Essigsäure, natürliche Kältemittel

III.14

## Vereinfachtes Modell zur Berechnung instationärer Personenwärmelasten in Fahrzeugen des ÖPNV

Ingwer Ebinger

HAW Hamburg, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau,  
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg  
[ingwer.ebinger@haw-hamburg.de](mailto:ingwer.ebinger@haw-hamburg.de)

Die Auslegung der Klimaanlage für Fahrzeuge des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) erfolgt unter Berücksichtigung der in entsprechenden Normen festgeschriebenen Randbedingungen, die aus den mittleren Extremwerten der Umgebungsbedingungen im Einsatzgebiet sowie fahrzeugspezifischen und betriebstechnischen Kennwerten resultieren. Im täglichen Betrieb arbeiten die Klimaanlage meist unter Teillastbedingungen. Während die meteorologischen Randbedingungen im Laufe eines Tages nur langsam und stetig variieren, führen häufige Fahrgastwechsel, stark schwankende Besetzungsgrade und eine relativ kurze Verweildauer der Passagiere zu sehr schnellen Veränderungen der daraus resultierenden Wärme- und Feuchtigkeitslasten in den Fahrzeuginnenräumen. Bei der Berücksichtigung der personenabhängigen Wärmelasten wird bisher davon ausgegangen, dass diese vorrangig von der Umgebungstemperatur und vom Aktivitätsgrad der Personen abhängig und zeitlich konstant sind.

In dem Vortrag wird untersucht, welchen Einfluss das Wärmespeichervermögen der je nach Jahreszeit mehr oder minder bekleideten und durch das Warten an der Haltestelle „vortemperierten“ Personen unter den besonderen Bedingungen des ÖPNV auf den zeitlichen Verlauf der Wärmelasten im Fahrgastraum hat. Dazu wird ein einfaches Personenmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe die Wärmeübertragung zwischen den Personen und der Raumluft in Abhängigkeit von der Verweildauer im Fahrzeug abgebildet werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse können in die Vorhersage des zur Klimatisierung notwendigen Energiebedarfs projektierte oder ausgeführte Anlagen für kürzere und längere Zeitintervalle (Momentan- und Jahresenergiebedarf) einfließen.

**Stichwörter:**

Personenwärmeabgabe, Fahrgastwechsel, instationäre Kühl- und Heizlast, ÖPNV

III.15

## Bahnklimatisierung mit R744 Anlagen

Armin Hafner<sup>1\*</sup>, Lutz Boeck<sup>2</sup>, Krzysztof Banasiak<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen,  
[armin.hafner@ntnu.no](mailto:armin.hafner@ntnu.no)

<sup>2</sup> Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG, Industriestraße 60, 04435 Schkeuditz

<sup>3</sup> SINTEF Energy Research, Norwegen

\* Korrespondenzautor

Currently available HVAC units for trains are commonly using either HFC-134a (75 %) or HFC-407C (25 %) as working fluids, which have a significant global warming potential when released into the environment. These units typically rely on inefficient direct electrical heating to cover heating demands. However, some system suppliers can offer HFC-134a HVAC systems with heat pump capabilities able to supply heating to the coach at ambient temperatures above -5 °C.

Deutsche Bahn has analysed the energy consumption of their Railway Rolling Stock in detail over several years. Up to 30 % of their total energy consumption has to be spent to operate the HVAC units of the passenger trains in Germany. Only the propulsion system requires a larger share of the total energy. In Norway the energy consumption for heating up the train compartments is dominating, due to the high amount of operating hours at low ambient temperatures.

The paper describes the development status of energy efficient and environmentally friendly HVAC units applying R744 for trains. First laboratory measurement results are presented. The pilot unit will be tested on a Norwegian train operated in the Oslo area from late summer 2016.

**Keywords:**

R744 ejector, Expansion work recovery, Carbon Dioxide, Train HVAC

III.16

## **Simulationsbasierte Potentialbewertung von Konzepten zur Senkung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs in Schienenfahrzeugen**

**Christian Luger<sup>1,2,\*</sup>, Johann Kallinovsky<sup>1</sup>, René Rieberer<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG, Liebherrstraße 1, 2100 Korneuburg, Österreich  
[christian.luger@liebherr.com](mailto:christian.luger@liebherr.com), [johann.kallinovsky@liebherr.com](mailto:johann.kallinovsky@liebherr.com)

<sup>2</sup> Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich  
[rene.rieberer@tugraz.at](mailto:rene.rieberer@tugraz.at)

\* Korrespondenzautor

Die weitere Energieeffizienzsteigerung von Heizungs-, Lüftungs-, Klimasystemen (HLK-Systemen) bei Personenschienenfahrzeugen stellt einen wesentlichen Stellhebel zur Entlastung der Umwelt und zur Reduktion der Betriebskosten im Bahnbereich dar. Es ist daher das Ziel von HLK-Systemherstellern geeignete Konzepte zu entwickeln und im Sinne von Frontloading bereits vor der tatsächlichen Umsetzung zu evaluieren und zu optimieren.

Eine Methodik und Tools zur umfassenden simulationsbasierten Potentialbewertung werden in dieser Arbeit vorgestellt. Zur realitätsnahen Abbildung des Jahresenergiebedarfs wurden repräsentative HLK-Betriebspunkte zur Anwendung in stationären Simulationsmodellen identifiziert. Dazu wurde eine Methodik entwickelt, die durch Sampling virtueller Zugfahrten das Problem der eingeschränkten Verfügbarkeit von Felddaten umgeht. Für die Potentialbewertung wurden Abschätzungen zu praxisrelevanten Parametern wie Gerätegewicht und Kosten vorgenommen.

Methodik und Tools wurden auf ausgewählte Konzepte zur Senkung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs angewendet. Untersucht wurden Frischluftregelung, Wärme-/Kälterückgewinnung und adiabate Kühlung. Letztere ist in dieser Ausführungsweise in der Bahntechnik neu, im Bereich der Gebäudetechnik aber etabliert und damit beachtenswert. Die Konzepte sind an sich unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des Kältekreislaufes bzw. des verwendeten Kältemittels anwendbar und ermöglichen teilweise ein Downsizing des Kältekreislaufes.

Die Potentialbewertungen wurden für einen typischen Fernreisewagen anhand der Städte Madrid, Genf und Stockholm für verschiedene Klimazonen Europas durchgeführt. Dadurch konnte schließlich ein länderspezifisches Mapping von Konzept-Bewertungsergebnissen vorgenommen werden.

**Stichwörter:**

Bahn Klimatisierung; repräsentative Bahn HLK-Betriebspunkte; länderspezifische Konzeptbewertung; Wärme-/Kälterückgewinnung; adiabate Kühlung

III.17

## **Anspruchsvolle Industriekühlung mit bis zu 70 % Energiekosten-Einsparung**

**Sören Paulußen**

InvenSor GmbH, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin, Deutschland

Adsorptionskältemaschinen erfreuen sich in Deutschland immer größerer Beliebtheit, da sie als Antriebsenergie die Abwärme von z. B. Blockheizkraftwerken (BHKWs), Druckluftanlagen oder Industrieprozessen nutzen, anstatt Strom zu verbrauchen. Damit sind sie eine Schlüsselkomponente für zukunftssichere und umweltfreundliche Kühlung und Klimatisierung. Gegenüber konventioneller Kälteerzeugung sparen die InvenSor-Systeme bis zu 70 % Strom ein und ermöglichen so eine deutliche Reduzierung der Energiekosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Da die Kälte in Form von kaltem Wasser zur Verfügung gestellt wird, sind sie universell einsetzbar. Besonders hohe Einsparungen bieten sich in der Prozesskühlung, in Serverräumen, in der Gebäudeklimatisierung oder bei verschiedensten sonstigen Anwendungen. Sie sind analog wie ein stromgetriebener konventioneller Kaltwassersatz verwendbar. In Kombination mit BHKWs bietet InvenSor komplette Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs(KWKK)-Systeme an. Es wurden bereits zahlreiche Projekte in den Bereichen Industrie, Rechenzentren, Verkaufsräume sowie kommunalen Einrichtungen realisiert.

Die Adsorptionskältemaschinen sind für einen Leistungsbereich bis 300 kW Kälte geeignet. Die Einheiten von 10, 18, 30 und 90 kW lassen sich einfach parallel schalten. Die Maschinen sind standardmäßig mit allen notwendigen Hydraulikteilen für die drei Wasserkreisläufe anschlussfertig ausgestattet, so dass keine externe Pumpenstation mehr aufgebaut werden muss und Installationsaufwand und Platzbedarf gering gehalten werden. Durch ActiVac, unserem System zur automatischen Druckoptimierung, ist der Kälteerzeuger im Inneren der Maschine wartungsfrei. Dadurch ist der Wartungsaufwand am Gesamtsystem deutlich reduziert.

Unternehmen mit energieintensiven Prozessen z. B. in der Kunststoffverarbeitung oder Metallverarbeitung haben nicht nur einen sehr hohen Stromverbrauch zu bewältigen, sondern brauchen für die Produktion auch erhebliche Mengen an Prozesswärme und Kälte. Hierfür bieten sich thermisch angetriebene Kältemaschinen besonders an. Sie sind einsetzbar in vielen verschiedenen Bereichen der Industrie wie z. B. in der Galvanik zur Kühlung der Bäder und der Leistungselektronik, in der spanenden Metallverarbeitung wie etwa der Dreh- und Frästechnik zur Kühlung der Materialien sowie in der Erodieretechnik. Dabei nutzen die Kälteanlagen die Abwärme aus z. B. industriellen Prozessen oder von BHKWs, um damit Kälte zu erzeugen. Die dadurch entstehenden Einsparmaßnahmen bringen einen großen wirtschaftlichen Vorteil mit sich, da die Energiekosten immens sinken. Darüber entstehen Wettbewerbsvorteile gegenüber Firmen mit einer herkömmlichen Kälteversorgung, denn niedrigere Energiekosten bedeuten automatisch niedrigere Produktionskosten. Im Vortrag werden neben der Funktionsweise der Energielösung insbesondere die Wirtschaftlichkeit dargestellt, sowie Beispiele aus der Praxis anhand von realisierten Anlagen gezeigt.

III.18

## **Ein hocheffizientes Konzept zur Abfuhr von Wärme auf geringem Temperaturniveau**

**Jürgen Süß**

Efficient Energy GmbH, Hans-Riedl-Str. 5, 85622 Feldkirchen, Deutschland

[juergen.suess@efficient-energy.de](mailto:juergen.suess@efficient-energy.de)

In dem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, mit dem sich aus industriellen Prozessen die entstehende Abwärme sehr effizient an die Umgebung abführen lässt. Die vorgeschlagene Lösung bietet das maximale Potential, wenn die zu kühlende Anwendung einen konstanten Kältebedarf hat, der zu 70 - 80 % der Zeit eines Jahres oberhalb der Umgebungstemperatur liegt und ansonsten darunter. In der Zeit, wo das Wärmequellenniveau unterhalb

demjenigen der Umgebung liegt, wird es von der Maschine stets nur so weit angehoben, wie dies erforderlich ist, um die Abwärme beispielsweise über einen Trockenkühler abzuführen. Im anderen Fall wird die Abwärme mit minimalem Energieaufwand lediglich durch die Gesamtanlage transportiert.

In diversen Test wurden unter realen Betriebsbedingungen bis zu 80 % der Energiekosten für die Kälteerzeugung eingespart und auch diese Ergebnisse werden im Vortrag vorgestellt und erläutert.

Neben dem erheblichen Energieeinsparpotential ist ein weiterer Vorteil, dass die Kälteerzeugung, beziehungsweise der Transport der Abwärme durch die Maschine ausschließlich mit reinem Wasser, also R718 erfolgt.

**Stichwörter:**

Abwärme, Effizienz, Wasser als Kältemittel

III.19

## **Bewertung der Energieeffizienz transkritischer Kreisprozesse mit unterschiedlichen Nutzttemperaturen nach VDMA 24247**

**Michael Arnemann\*, Dominik Bodenmüller**

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU)  
76133 Karlsruhe, Deutschland

[michael.arnemann@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.arnemann@hs-karlsruhe.de)

\* Korrespondenzautor

Im Einheitsblatt VDMA 24247-2 wird ein einfaches Verfahren beschrieben, mit dem Kälteanlagen mit einer konstanten Nutztemperatur energetisch bewertet werden können. Der Carnotprozess wird dazu als Vergleichsprozess herangezogen. Kältemittelkreisläufe mit erheblich gleitenden Temperaturen, z. B. transkritische Prozesse, sind mit dem Verfahren nicht bewertbar.

Es wird gezeigt, wie das Verfahren durch Einführen geeigneter Mitteltemperaturen so angepasst werden kann, dass es sowohl für unterkritische wie auch für transkritische Prozesse mit Reinstoffen als auch für Kältemittelgemische mit größerem Temperaturgleit anwendbar wird.

Abgeleitet aus einer exergetischen Bewertung wird auch gezeigt, wie das Verfahren erweitert werden kann, so dass es ohne Schwierigkeiten auf Wärme pumpender Anlagen mit unterschiedlichen Nutzttemperaturen anwendbar wird.

Das ursprüngliche und das modifizierte Verfahren werden miteinander verglichen und die Ergebnisse diskutiert.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Kälteanlagen, VDMA 24247, transkritische Prozesse, Temperaturgleit

III.20

## Statistische Versuchsplanung in der Kältetechnik: Eine Einführung und Beurteilung ihres Nutzens

Dennis Pfeil<sup>1\*</sup>, Gerald Kunz<sup>2</sup>, Olaf Strelow<sup>2</sup>, Ullrich Hesse<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bosch Thermotechnik GmbH, Entwicklung Wärmepumpen und Kältekreisläufe,  
Justus-Kilian-Straße 1, 35453 Lollar  
[dennis.pfeil@de.bosch.com](mailto:dennis.pfeil@de.bosch.com)

<sup>2</sup>Technische Hochschule Mittelhessen, Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und  
Systemanalyse, Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

<sup>3</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01062 Dresden

\* Korrespondenzautor

Die Einführung einer neuen Generation von Kältemitteln, die zunehmende Komplexität von Kältemaschinen im Allgemeinen, die Erweiterung des Einsatzgebietes, die Steigerung der Anlageneffizienz und ein sich global verstärkender Wettbewerb geben den Rahmen vor, in dem die heutige Entwicklungsarbeit von Kältemaschinen zu leisten ist. Vor dem Hintergrund kürzerer Entwicklungszeiten und reduzierter Entwicklungskosten müssen experimentelle Untersuchungen effektiv und effizient geplant, durchgeführt und analysiert werden. Statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiments) bietet eine vielversprechende Möglichkeit, die Anzahl an erforderlichen Versuchen durch systematische Planung und Auswertung zu minimieren. In dem vorliegenden Bericht werden grundlegende Methoden der statistischen Versuchsplanung erläutert und für die Planung von Experimenten zur Vermessung von Kältemittelkompressoren angewandt. Die aus diesen „geplanten Versuchen“ ermittelten Ursache-Wirkungsbeziehungen werden anschließend mithilfe weiterer Versuche an Kältemittelkompressoren validiert.

**Stichwörter:**

Statistische Versuchsplanung, Regressionsanalyse

III.21

## Energetische Untersuchung integrierter Supermarktkonzepte

N.Fidorra\*, J.Köhler

TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer Straße 5, Braunschweig, 38106, Germany,  
Fax: +49 (0)531 391-7814, Email: [n.fidorra@tu-braunschweig.de](mailto:n.fidorra@tu-braunschweig.de)

\* Korrespondenzautor

Kälteanlagen in Supermärkten haben einen hohen Energieverbrauch, verwenden häufig noch Kältemittel mit hohem Treibhauspotential und haben infolgedessen ein großes Verbesserungspotential in Hinblick auf den Energieverbrauch und Umwelteinfluss. Neben den Kälteanlagen, haben jedoch auch die anderen Gewerke, wie Kühlmöbel oder die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungsanlage wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch. Der Trend zu einer immer weitergehenden Integration dieser Gewerke macht es notwendig, deren Einfluss aufeinander näher zu betrachten und zu verstehen.

In diesem Artikel werden Möglichkeiten vorgestellt, wie die umfangreichen Interaktionen von Kühlmöbeln, Heizungs-, Klimatisierungs- und Lüftungsanlage sowie Gebäude und Kälteanlage berechnet und simulations-

technisch abgebildet werden können. Einige dieser Interaktionen werden beispielhaft vorgestellt und analysiert. In einer Fallstudie werden verschiedene Supermarktkonzepte - mit unterschiedlich stark integrierten Gewerken - mit einem Referenzsystem verglichen und hinsichtlich ihres Energieverbrauchs bewertet.

**Stichwörter:**

Supermarkt, Simulation, Energiebewertung, Werkzeug

III.22

## **Exergetische Bewertung von CO<sub>2</sub>-Kälteprozessen mit Abwärmenutzung für Supermärkte**

**Uwe Sievers**

Fachgebiet Technische Thermodynamik, Anlagenbau und Kältetechnik,  
Department Maschinenbau und Produktion, Fakultät Technik und Informatik,  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Berliner Tor 21, 20099 Hamburg  
[uwe.sievers@haw-hamburg.de](mailto:uwe.sievers@haw-hamburg.de)

CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen für Supermärkte dienen sowohl der Kälteerzeugung für die Normal- und Tiefkühlung als auch - durch Abwärmenutzung - der Heizwasser- und Brauchwassererwärmung. Ihre Bewertung anhand von Kälte- und Wärmeleistungszahl ist weit verbreitete Praxis. Dabei werden das unterschiedliche Temperaturniveau und die damit verbundene thermodynamische Wertigkeit der vom Kältemittel aufgenommenen oder abgegebenen, genutzten Wärmeströme nur unzureichend erfasst. Dieses trifft insbesondere zu, wenn die Kälteleistungszahl für Normal- und Tiefkühlkälteerzeugung zusammengefasst oder die Leistungszahl der (gesamten) Kälte-Wärme-Kopplung aufgeführt wird. Die Angabe exergetischer Wirkungsgrade vermeidet dieses Problem. Exergieverluste machen deutlich, an welchen Stellen Optimierungsbedarf bestehen könnte, zu deren Beurteilung zusätzlich die Investitionskosten der Anlagenkomponenten für unterschiedliche Varianten heranzuziehen sind (exergoökonomische Methode).

Im Vortrag werden die Bewertungsergebnisse durch Kälte- und Wärmeleistungszahl denen durch exergetische Wirkungsgrade gegenüber gestellt. Darauf aufbauend wird exemplarisch aufgezeigt, inwieweit abweichende Empfehlungen für die Optimierung von CO<sub>2</sub>-Supermarktkälteanlagen aus der exergetischen Betrachtungsweise resultieren.

III.23

## **Energy Storage Possibilities for Supermarket Refrigeration Units**

**Raluca Iolanda Manescu\*, Armin Hafner**

Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen  
[raluca.i.manescu@ntnu.no](mailto:raluca.i.manescu@ntnu.no)

\* Korrespondenzautor

The refrigeration and the HVAC systems are responsible for over 50 % of a supermarket's electricity usage. Energy efficient systems are therefore needed in the refrigerated food sector in order to reduce the costs due to the electricity consumption. CO<sub>2</sub> refrigeration systems are the preferred system solution when feasible for the major European supermarket chains, due to the energy efficiency of the systems and their low environmental impact. Cold Thermal Energy Storage (CTES) is currently not available for these systems. CTES could lead to a further reduction in the total energy consumption, the peak power demand and energy costs.



This paper presents and analyzes different types of CTE storages, enabling a new way of integrating the refrigeration systems of supermarkets to the smart grid. Charge and discharge operations of the thermal storage devices at favorable and unfavorable boundary conditions are analyzed in order to evaluate the performance of the proposed solutions. One example for the cold thermal energy storage is the ice storage integrated in the CO<sub>2</sub> refrigeration circuit.

**Key words:**

R744/CO<sub>2</sub>, Commercial Refrigeration (Supermarktkältetechnik), Thermal Storage (Kälte- und Wärmespeicher)

## **Jahres-Energieeffizienz von Kühlgeräten zur Klimatisierung – Untertitel: Normberechnung und Simulation**

**Mario Adam, Sandra Lohmann\*,  
Jonas Gottschald, Stefan Lambach**

Hochschule Düsseldorf, Zentrum für Innovative Energiesysteme,  
Arbeitsgruppe für Erneuerbare Energien, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf

[sandra.lohmann@hs-duesseldorf.de](mailto:sandra.lohmann@hs-duesseldorf.de)

\* Korrespondenzautor

Ziel des vom BMWi geförderten Forschungsprojektes Coolplan ist die Erstellung einer Software zur Simulation und Bewertung konventioneller und innovativer Kühltechnologien durch die Fa. ETU Software GmbH. Das Solar-Institut Jülich (SIJ) an der Fachhochschule Aachen und das Zentrum für Innovative Energiesysteme an der Hochschule Düsseldorf liefern die Simulationsmodelle für die Kühlgeräte, die neben stationären Kennfeldern auch das dynamische Taktverhalten abbilden. Als Grundlage dafür wurden an der Hochschule Düsseldorf Vermessungen des stationären und dynamischen Verhaltens verschiedener energieeffizienter Kühlgeräte durchgeführt. Darunter sind reversible Sole- und Luft-/Wasser-Wärmepumpen, teils mit Invertertechnologie, sowie ein konventioneller Kaltwassersatz.

Stationäre Kennfelder und Herstellerangaben beinhalten hauptsächlich Vollastbetriebspunkte, welche nur einen Bruchteil des realen Betriebsverhaltens im Jahresverlauf ausmachen. Die energetischen Verluste durch den Teillastbetrieb der Geräte bleiben so unberücksichtigt. Der SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio, FprEN 14825:2015) versucht diese Lücke zu schließen und so eine realistischere Bewertung für die saisonale Effizienz zu ermöglichen. Ein Vergleich zwischen dem rechnerischen SEER und Jahressimulationsergebnissen, basierend auf den (Teillast-)Messergebnissen verschiedener Kältemaschinen, bewertet die Aussagekraft des SEER-Berechnungsverfahrens. Die Vermessungs- und Simulationsergebnisse und der SEER-Vergleich werden vorgestellt.

### **Stichwörter:**

Kältemaschine, Teillastbetrieb, Jahresenergieeffizienz, SEER, Simulation

## **Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für photovoltaik-basierte solare Kühlsysteme**

**Paul Kohlenbach**

Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VIII, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin, Germany

[kohlenbach@beuth-hochschule.de](mailto:kohlenbach@beuth-hochschule.de)

Unter dem Oberbegriff „Solare Kühlsysteme“ versteht man Anlagen zur Bereitstellung von Kälte, welche sowohl mit solarthermischen Kollektoren als auch mit photovoltaischen Modulen betrieben werden können. Im ersten Fall wird dabei Wärme als Antrieb eines Kälteprozesses verwendet (solarthermische Kühlung), im zweiten Fall elektrische Energie (photovoltaische Kühlung). Bis ca. 2005 waren die Investitionskosten für

Anlagen zur solarthermischen Kühlung deutlich niedriger als für photovoltaisch angetriebene. Seit ca. 2005 hat der fortschreitende Preisverfall von Photovoltaik-Modulen eine Umkehr verursacht: heutzutage (im Jahr 2016) sind die Anschaffungskosten für Photovoltaik-Module geringer als für solarthermische Kollektoren, auf die zum Kühlen benötigte Fläche bezogen. Da die Kosten der solaren Komponenten ca. 1/3 der Gesamtkosten ausmachen, sind photovoltaisch-basierte Anlagen zur solaren Kühlung heutzutage i.d.R. günstiger in der Anschaffung. Ein Vorteil dieser Systeme ist, dass der photovoltaisch-erzeugte Strom universell für alle herkömmlichen elektrisch angetriebenen Anlagen zur Kälteerzeugung verwendbar ist. Wärme aus solarthermischen Kollektoren hingegen kann nur in wärmegetriebenen Sorptionskälteanlagen umgesetzt werden, was die Bandbreite der Anwendung einschränkt.

In diesem Artikel wird nun untersucht, unter welchen Randbedingungen der Einsatz von photovoltaisch-basierten Kühlsystemen wirtschaftlich sinnvoll ist. Es wird ein Vergleich mit netzbetriebenen Kälteanlagen als Referenzsystem gezogen. Als Einflussgröße wird die Levelized Cost of Cooling Energy (LCCE) definiert. Es werden Sensitivitätsanalysen der folgenden Parameter auf die LCCE präsentiert:

- Solare Einstrahlung
- Investitionskosten
- Strombezugskosten Netz
- Kosten für Stromspeicher
- Höhe der Einspeisevergütung
- Anteil Eigenverbrauch je Jahr.

**Stichwörter:**

Solares Kühlen, Solare Klimatisierung, Photovoltaik, solar-elektrisches Kühlen, Stromkosten, Stromspeicher, Eigenverbrauch, Kompressionskältemaschine, Levelized Cost

IV.03

## **RoCo: A Personal Cooling/Heating Device with Miniature Heat Pump and Thermal Storage**

**Jiazhen Ling, Vikrant Aute, Reinhard Radermacher\***

University of Maryland, ME Orpt. 2/8/Martin Hall, 20742-3035 College Park MD, USA  
Tel.: +1 301 405 5286, Email: [raderm@umd.edu](mailto:raderm@umd.edu)

\* Corresponding author

Building heating, ventilation, and air conditioning account for 13 % of energy consumption in the United States. A potential energy saving approach is to increase/decrease thermostat settings in summer/winter. DOE states that a 4°F (roughly 2.2°C) extension in each direction of the thermostat setting may result in 15 % to 30 % energy savings. In light of this, a personal cooling device, named Roving Comforter (RoCo), is under development by the Center for Environmental Energy Engineering. It follows an individual building occupant wherever he or she may go and provides ~100 W cooling/heating per person. The device ensures occupants' thermal comfort under expanded thermostat settings. RoCo, powered by a battery pack, features a robotic platform to enable the following capability, a miniature heat pump and smart nozzle(s) to deliver conditioned air to wherever it is need most. The miniature heat pump comes with built-in phase change material heat storage that absorbs unwanted heating/cooling during air-conditioning/heat pumping operation. Battery and phase change material are recharged at night or whenever not in use.

## **Wohnraumlüftung mit Ultraschallbefeuchtung und Wärmepumpe zum Ganzjahres-Heiz- und Kühlbetrieb**

**Arne Müller\*<sup>1</sup>, Reiner Hackl<sup>2</sup>, Andres Gordes<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Carel Deutschland GmbH, Am Spielacker 34, 63571 Gelnhausen, Deutschland  
[arne.mueller@carel.com](mailto:arne.mueller@carel.com)

<sup>2</sup>Systemair GmbH, Seehöfer Straße 45, D97944 Windischbuch, Deutschland  
[reiner.hackl@systemair.de](mailto:reiner.hackl@systemair.de)

<sup>3</sup>Recair GmbH, Hoffmannallee 41-51, 47533 Kleve, Deutschland  
[a.gordes@recair.com](mailto:a.gordes@recair.com)

\* Korrespondenzautor

Vorstellung Anlagenkonzept einer Wohnraumlüftungsanlage mit integrierter EC-Inverter-Wärmepumpe zum Heizen, Kühlen und zur Brauchwasserbereitung. Die Anlage wurde von der Firma Systemair in Zusammenarbeit mit der Firma Carel Industries Srl entwickelt.

Wir stellen das Anlagenkonzept, technische Daten (Leistung, COP, ect.) und Felderfahrungen vor.

Durch die Nutzung der Abwärme des Gebäudes als Wärmequelle der Wärmepumpe wird ein hoch effizientes System geschaffen. Des Weiteren gewährleistet die EC-Inverter-Technik, durch ständige Anpassung an den Gebäudebedarf, eine hochpräzise Temperaturführung und eine optimale Energienutzung.

Zudem ermöglicht der Einsatz von Wärmepumpentechnik den reversiblen Betrieb (Heizen und Kühlen) und liefert dadurch einen enormen Komfortgewinn, speziell in der Sommerzeit.

Ergänzend dazu haben wir die Integration eines Ultraschall-Befeuchters in der Anlage zur Befeuchtung in der Winterzeit und adiabatische, indirekte Kühlung im Sommer untersucht.

Durch die Befeuchtung in der Winterzeit wird der Komfort gesteigert. Durch eine optimale Befeuchtung werden gesundheitliche Risiken durch trockene Luft, wie trockene Haut, trockene Nasennebenhöhlen, trockene Kehle, Nasenreizungen, blutige Nasen, trockener Husten, rissige Lippen vermieden. Des Weiteren schützt es Ihr Haus und Einrichtungen durch Reduzierung des Risikos von Holzverwerfungen und Rissbildungen.

Darüber hinaus benötigt die Ultraschalltechnik gegenüber Dampfbefeuchtung einen sehr geringen Energieeinsatz.

Ein weiterer Vorteil der Ultraschalltechnik ist, dass sie zur indirekter adiabatischen Kühlung genutzt werden kann. Um die energetischen Vorteile genauer zu betrachten, wurde ein Labortest zusammen mit dem Wärmetauscher Hersteller Recair aufgebaut. Die detaillierten Ergebnisse werden vorgestellt.

Resümee:

Die Integration von Wärmepumpentechnik und Ultraschall-Befeuchtungstechnik in Wohnraumlüftungssystemen ermöglicht ein extrem effizientes System und steigert den Komfort stark. Das Anlagenkonzept ist damit speziell in Niedrigenergiehäusern die optimale Lösung.

## Entwicklung eines Personensimulators zur Ermittlung der thermischen Behaglichkeit

Andrè Badura\*<sup>1</sup>, Rita Streblow<sup>2</sup>, Olaf Zeidler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Treskowallee 8, 10318 Berlin  
[Andre.Badura@HTW-Berlin.de](mailto:Andre.Badura@HTW-Berlin.de)

<sup>2</sup> RWTH Aachen E.ON Energie Research Center

\* Korrespondenzautor

Für qualitative Aussagen über den Einfluss nicht homogener Parameter auf die thermische Behaglichkeit ist es häufig notwendig eine Vielzahl von Versuchen mit Personen durchzuführen. Die notwendige Anzahl an Versuchspersonen kann oft nur schwer bereitgestellt werden, und die Durchführung der Tests ist umständlich. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von Personensimulatoren (sog. Dummys).

Im Rahmen einer Forschungsarbeit, wird anhand der Nachbildung einer wärmeabgebenden Oberfläche (Oberschenkel und Unterschenkel eines Beines), die Möglichkeit der Erfassung von Änderungen der Wärmeabgabe an einem Personensimulator untersucht. Die veränderliche Wärmeabgabe soll durch Änderung der Temperatur im Aufenthaltsbereich und unterschiedliche Luftgeschwindigkeiten auf den Personensimulator entstehen. Es werden auch verschiedene Bekleidungsisolierungen untersucht.

Die Durchführung von Messungen zeigt, dass das ausgearbeitete Konzept gut mit den Annahmen übereinstimmt (Verhalten ähnlich der von Heizflächen).

Es zeigt sich, dass das Verhalten des Personensimulators im Bereich der thermischen Wirkung, im Besonderen der thermischen Behaglichkeit, quantifizierbar erfassbar ist. Damit ist ein Einsatz des Dummys bei der Planung, Auslegung und Untersuchung von Räumen oder auch Fahrzeugkabinen denkbar.

### Stichwörter:

Behaglichkeit, thermische Behaglichkeit, Tanabe-Modell, Personensimulator, Dummy

## „Thermische Behaglichkeit unter instationären Raumtemperaturbedingungen“

A. Buchheim\*, L. Schinke, M. Beyer, S. Paulick, J. Seifert

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik  
[Alexander.Buchheim@tu-dresden.de](mailto:Alexander.Buchheim@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Die intermittierende Betriebsweise von gebäudetechnischen Anlagen führt zu zeitlichen Schwankungen von innenraumklimatischen Parametern. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der Innenraumtemperatur zu, die sowohl im Heiz- als auch Kühlfall eine relevante Größe zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit darstellt.

Zur näheren Betrachtung dieser Thematik wurden an der TU Dresden Probandenuntersuchungen in einem realitätsnahen Versuchsumfeld durchgeführt. Dabei sind die Probanden definierten instationären Zuständen der Innenraumtemperatur in einem speziell dafür konfigurierten Versuchsraum ausgesetzt worden. Der Einfluss weiterer behaglichkeitsrelevanter Bewertungsgrößen konnte dabei auf ein Minimum reduziert werden.

Im Rahmen der diesjährigen DKV-Tagung sollen die Methodik und die Ergebnisse der o. g. Untersuchungen dargestellt und mögliche Auswirkungen auf die Auslegung und Betriebsweise gebäudetechnischer Anlagen vorgestellt werden. Insbesondere soll dabei eine Einordnung der Ergebnisse in die etablierte Methodik der (quasi-) stationären Bewertung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen vorgenommen werden.

#### IV.07

## Thermischer Komfort bei Quelllüftung – Abhängigkeit von Raumtemperatur und Temperaturgradient

Martin Möhlenkamp<sup>1\*</sup>, Mark Wesseling<sup>1</sup>, Andreas Wick<sup>2</sup>, Ingo Gores<sup>2</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[mmoehlenkamp@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:mmoehlenkamp@eonerc.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup>Airbus Operations GmbH, 21129 Hamburg, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Die Bewertung und Vorhersage des lokalen Komforts in Raumluftrömungen wird durch neue Belüftungskonzepte und den Einsatz von Komfortmodellen immer komplexer. Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik wurde im Rahmen früherer Projekte das 33-Knoten-Komfortmodell (33NCM) entwickelt, welches in seinem Anwendungsbereich erweitert wird. Die Modellparametrierung beruht auf Probandenversuchen unter unterschiedlichen thermischen Randbedingungen. Die genaue Erfassung und Reproduzierbarkeit der Randbedingungen ist dabei häufig schwierig. Zur Erweiterung des Anwendungsbereichs des Modells wurden deshalb Probandenexperimente in einem hochmodularen Komfortkubus, dem Aachener Comfort Cube (ACCu) durchgeführt.

Der ACCu hat eine Grundfläche von 2 m x 2 m und eine Höhe von 2,5 m. Von den vier Seitenwänden in Umfangsrichtung sind drei in Höhenrichtung feiner unterteilt. Insgesamt können 16 Flächensegmente separat temperiert werden. Die Segmentierung ermöglicht die Berücksichtigung von Einflüssen wie Strahlungsasymmetrien und verschiedene Temperaturgradienten. Die Belüftung kann wahlweise durch eine Quell- oder Mischlüftung realisiert werden. Im Komfortkubus können drei Probanden gleichzeitig den thermischen Komfort bewerten.

In dieser Untersuchung werden Ergebnisse zur thermischen Komfortbewertung bei Quelllüftung unter der Variation der mittleren Raumtemperatur und des vertikalen Temperaturgradienten durchgeführt. Bei einer mittleren Raumtemperatur von 20 °C, 23 °C und 26 °C wurden jeweils vertikale Temperaturgradienten zwischen  $\Delta T/\Delta y = 1 \text{ K/m}$  und  $\Delta T/\Delta y = 8 \text{ K/m}$  miteinander verglichen. Aus der gesamten Prüfmatrix lassen sich Aussagen über den Einfluss des vertikalen Temperaturgradienten und der mittleren Raumtemperatur auf den thermischen Komfort ableiten.

### Stichwörter:

Thermische Behaglichkeit, thermisches Empfinden, Quelllüftung

## Modellbasierte Regelung für die optimierte Entfeuchtung der Luft mit Luftbypass

Philipp Krimmel<sup>\*</sup>, Nico Goldschmidt<sup>\*</sup>, Robin Meier, Horst Schulte, Birgit Müller, Olaf Zeidler

Hochschule für Technik und Wirtschaft, FB1, 12459 Berlin, Deutschland

[Philipp.Krimmel@htw-berlin.de](mailto:Philipp.Krimmel@htw-berlin.de), [Nico.Goldschmidt@htw-berlin.de](mailto:Nico.Goldschmidt@htw-berlin.de), [Robin.Meier@gmx.net](mailto:Robin.Meier@gmx.net),  
[Horst.Schulte@htw-berlin.de](mailto:Horst.Schulte@htw-berlin.de), [Birgit.Mueller@htw-berlin.de](mailto:Birgit.Mueller@htw-berlin.de), [Olaf.Zeidler@htw-berlin.de](mailto:Olaf.Zeidler@htw-berlin.de)

\* Korrespondenzautoren

Für die Kühlung von nicht-industriellen Gebäuden wird etwa 10.500 GWh jährlich in Deutschland benötigt. Das wiederum entspricht Energiebeschaffungskosten von bis zu 262 Mio. Euro. Im Hinblick auf die Erhaltung von Ressourcen und Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen besteht ein großes Optimierungspotenzial, um den Kühlenergieverbrauch zu minimieren.

Die bisherige Leistungsregelung eines Luftkühlers im Sekundärkreis (Verbraucherseite) kennt zwei klassische Regelverfahren, die sowohl zur Kühlung als auch zur Entfeuchtung der Luft in zentralen RLT-Anlagen Anwendung finden. Die beiden Regelmethoden weisen bestimmte Nachteile auf, die zu einem erhöhten Energieeinsatz führen.

Um die Nachteile der beiden Schaltungen zu minimieren und das Einsparpotenzial zu realisieren, wurde ein Konzept zur optimierten Konditionierung der Raumluft mit einer modellbasierten Regelung entwickelt. Mit Hilfe dieser entwickelten Technologie wird nichtbehandelte Luft mit der gekühlten und wenn nötig entfeuchteter Luft aus dem Kühlregister hinter dem Luftkühler gemischt. Umgesetzt wird die Luftbeimischung über einen Luftbypass.

Als Grundlage dient ein analytisch aufgestelltes Zustandsraummodell eines Lamellenrohr-Kreuzgegenstromwärmetauschers nach der Methode des Infinitesimal kleinen Wärmeübertragersegmentes nach Wüning. Eine Erweiterung durch die zu beeinflussenden Komponenten: die Modelle eines Dreiwegeventils, eines Drosselventils und einer Luftbypassklappe, vervollständigen das allgemeingültige Gesamtsystem in Form eines Zustandsraummodells und bilden die Basis für den systematischen Reglerentwurf.

Die Regelungsstrategie basiert hierbei auf einem modellgestützten Mehrgrößenansatz, wodurch ein systematischer Entwurf durch Ausnutzung der Anlagenstruktur und der bekannten Anlagenparameter erst ermöglicht wird und die Stellgrößen wie gewünscht beeinflusst werden können. Anhand einer Linear-quadratischen Regelungsstruktur (LQR, Riccati-Gleichung) findet eine optimale Ausregelung eines gewünschten Arbeitspunktes statt, wobei durch eine gezielte Gewichtung („Bestrafung“) der beeinflussenden zu regelnden Systemgrößen die Verkopplung der Temperatur mit der Wasserdampfbeladung der Luft reduziert wird.

Durch die Anwendung der neuen Technologie OpDeCoLo zur bedarfsgerechten Regelung der Temperatur und der Wasserdampfbeladung der Raumluft lässt sich der Energiebedarf für die gezielte Luftkonditionierung bis zu 10 % reduzieren, bezogen auf den Endenergiebedarf. Dies bedeutet für Deutschland eine Reduzierung der elektrischen Energie um bis zu 1.050 GWh und der CO<sub>2</sub>-Emission um bis zu 649.950 t pro Jahr.

### Stichwörter:

Modellbasierte Regelung; Lüftungsanlage; Ressourcenschonung; CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion;

## **Einfluss von textilen Bodenbelägen auf die Innenraumluftqualität**

**Silvia de Lima Vasconcelos<sup>1\*</sup>, Birgit Müller<sup>1</sup>, Olaf Zeidler<sup>1</sup>,  
Wolfgang Plehn<sup>2</sup>, Wolfgang Horn<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> HTW-Berlin, Fachbereich 1, Wilheminenhofstr. 74A, 12459 Berlin, Deutschland  
[Silvia.deLimaVasconcelos@HTW-Berlin.de](mailto:Silvia.deLimaVasconcelos@HTW-Berlin.de)

<sup>2</sup> UBA, Wörlitzer Pl. 1, 06844 Dessau-Roßlau, Deutschland

<sup>3</sup> BAM, Lützowufer 26, 10787 Berlin, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Textile Bodenbeläge werden häufig in Großraumbüros und Wohngebäuden eingesetzt. Man findet sie auch großflächig in öffentlichen Unterhaltungsräumen, wie z. B. Kino, Theater sowie in der Hotellerie. Sie tragen zur Behaglichkeit der Nutzer bei, da sie einen hohen Trittkomfort und Schalldämpfung leisten. Die Leistungsschwäche dieser Baustoffe liegt in der Geruchsemission, die von dem Bodenbelag abgegeben wird, und somit die Behaglichkeit der Nutzer beeinträchtigt. Vor allem an Arbeitsplätzen kann es bei schlechter Luftqualität und der daraus resultierenden Unzufriedenheit zu einer geringeren Produktivität der Beschäftigten kommen (Wargocki 1998, Seppänen 2007, Fisk 2007).

Das Kooperationsforschungsvorhaben zwischen dem UBA und der HTW-Berlin, mit dem Titel: Emissions- und geruchsarme Bauprodukte für energieeffiziente Gebäude - Entwicklung von Anforderungen und Konzepten für den Blauen Engel aus Klimaschutzsicht; untersucht das Emissionsverhalten textiler Bodenbeläge. Bisherige Ergebnisse weisen auf, dass zirka 60 % der untersuchten Baustoffe, den Anforderungen des Blauen Engels entsprechen. Das Einhalten dieser Grenzen schützt die Nutzer und erhöht sowohl deren Produktivität als auch die Energieeffizienz der Gebäude.

### **Stichwörter:**

Innenraumluftqualität, textiler Bodenbelag, Blauer Engel

## **GreenHP: Luft/Wasser-Wärmepumpenprototyp für die Sanierung im urbanen Raum**

**Andreas Zottl\*, Thomas Fleckl, Christoph Reichl, Christian Köfinger, Paul Lampersberger**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department,  
Giefinggasse 2, A-1210 Wien, Österreich  
[andreas.zottl@ait.ac.at](mailto:andreas.zottl@ait.ac.at)

\* Korrespondenzautor

Im Projekt Green Heat Pump ([www.greenhp.eu](http://www.greenhp.eu)) wurde ein hocheffizientes Wärmepumpenkonzept für den Einsatz im renovierten großvolumigen Bestandsbau in urbanen Gebieten entwickelt. Innovative Ansätze werden auf Komponenten-, Geräte- und Systemebene getroffen. Das Design der Green Heat Pump wird stark durch die Entwicklungen auf der Komponentenebene beeinflusst. Das Hauptaugenmerk wurde auf das Design in den Bereichen Kältemittelreduktion, Verwendung von Propan als natürliches Kältemittel und Optimierung der Verdampferinheit sowohl kältemittelseitig als auch luftseitig gelegt.



Die neu entwickelten Komponenten wurden im Zuge der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten zu einem 30 kW Luft/Wasser-Wärmepumpenlaborprototyp zusammengebaut und im Zuge von experimentellen Untersuchungen in den akkreditierten Prüfeinrichtungen des AIT detaillierten Tests unterzogen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die Analyse des Gesamtkonzepts und die Bewertung der Leistung und Effizienz des GreenHP-Prototypen nach internationalen Standards (z. B. EN 14825, EN14511) bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Zusätzlich werden die notwendige Kältemittelfüllmenge, das Abtauverhalten und die optimale Regelstrategie analysiert.

Die inhaltlichen Schwerpunkte des Manuskripts und Vortrags werden auf der detaillierten Beschreibung des Prototypen und dessen experimentellen Untersuchungen am Prüfstand liegen. Die Kältemittelfüllmenge und der SCOP, berechnet gemäß EN14825 basierend auf Prüfstandsmessergebnissen, werden mit Stand der Technik Luft/Wasser-Wärmepumpen verglichen.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Wärmequelle Luft, MPE-Tubes Wärmeübertrager, Propan, Sanierung, SCOP

IV.11

## **Wärmequellen für Wärmepumpen im energetischen und wirtschaftlichen Vergleich**

**Franziska Bockelmann\*, M. Norbert Fisch, Mathias Schlosser, Markus Peter**

Technische Universität Braunschweig IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik,  
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig  
Tel: 0531 3913557, Fax: 0531 3918125, [bockelmann@igs.tu-bs.de](mailto:bockelmann@igs.tu-bs.de)

\* Korrespondenzautorin

In Folge des wachsenden Einsatzes von Wärmepumpen, steigt auch die am Markt vorhandene Anzahl von potentiell nutzbaren Niedertemperaturwärmequellen und Wärmeübertragern für Wärmepumpensysteme. Dabei kommen Produkte wie Eisspeicher, Energiezäune oder Hochleistungs-Energiepfähle zum Einsatz, ohne dass wissenschaftliche Erkenntnisse über deren Leistungsfähigkeit oder ein Kosten-Nutzen-Verhältnis vorliegen. Die optimierte Auslegung einer Wärmepumpe, die Auswahl der dazugehörigen Niedertemperaturwärmequelle, sowie die Ankopplung an das Gebäude sind jedoch wesentliche Voraussetzungen, um einen energieeffizienten und dauerhaft wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen zu erreichen.

Das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt „future:heatpump“ widmet sich der energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen. In diesem Zusammenhang wird ein Pre-Check-Tool zur Vorauswahl von Niedertemperaturwärmequellen und zugehörigen, geeigneten Wärmeübertragungssystemen für Wärmepumpen entwickelt. Die ganzheitliche, vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Wärmequellen und Wärmeübertragungssysteme bezieht sich u. a. auf die Leistungszahlen der Wärmepumpen, die Eintrags- und Entzugsleistungen der Wärmeübertrager und die allgemeine Performance der Systeme. Zudem erfolgt eine Einschätzung von wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten (Investitions- und Betriebskosten, CO<sub>2</sub>-Emission). Ziel ist die Ermittlung der Plausibilität von Anwendungen und der Randbedingungen einzelner Quellen-Systeme. Zum qualitativen Vergleich werden in einem projektbegleitenden Monitoring verschiedene Anlagen und Quellsysteme messtechnisch erfasst.

Der Fokus des Vortrages liegt auf der Darstellung des Vergleichs der unterschiedlichen Anlagen und Wärmeübertrager, die u. a. im Projekt untersucht werden. Des Weiteren wird der erste Entwicklungsstand des Pre-Check-Tools zur Vorauswahl von Niedertemperaturwärmequellen und Wärmeübertragern für Wärmepumpenkonzepte vorgestellt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpen, Niedertemperaturwärmequellen, Wärmeübertrager, energetische und wirtschaftliche Bewertung, Monitoring, Pre-Check-Tool

## **Umsetzung eines effizienten Gebäudebetriebs durch Qualitätssicherung am Beispiel des Mehrfamilienhauses Riedberg und dessen Wärmepumpenanlage**

**Oliver Rosebrock<sup>\*</sup>, M. Norbert Fisch, Stefan Plessner, Franziska Bockelmann**

Technische Universität Braunschweig IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik,  
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig  
Tel: 0531 3913598, Fax: 0531 3918125, [rosebrock@igs.tu-bs.de](mailto:rosebrock@igs.tu-bs.de)

\* Korrespondenzautor

Durch den Einsatz komplexer technischer Gebäudeausrüstung und der Integration von Messtechnik können heutzutage große Effizienzpotenziale für Gebäude erschlossen werden. Allerdings stellt die Sicherstellung der Nutzung der Potenziale im Gebäudebetrieb eine zunehmend große Herausforderung dar. Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch können wirtschaftliche Konzepte der Planung zu Kostentreibern im Betrieb werden lassen.

Erfahrungen aus anderen Forschungsprojekten und dem Betreiben von Anlagen haben gezeigt, dass Qualitätssicherung einen wichtigen Beitrag liefert, um die im Konzept angestrebte Effizienz und somit auch die energetischen Ziele, die in der Planungsphase definiert wurden, in der Praxis zu erreichen. In diesem Zuge erfolgt im Rahmen des Projektes „Mehrfamilienhaus Riedberg“ neben dem herkömmlichen Energie- und Anlagenmonitoring und der Betriebsoptimierung des Gebäudes, eine Qualitätssicherung mit Hilfe der „digitalen Funktionsbeschreibung“, um frühzeitig die gewünschte Performance des Gebäudes sicherzustellen.

Bei dem Projekt handelt es sich um das in Frankfurt am Main/Riedberg entstandene Mehrfamilienhaus mit 17 Wohneinheiten, welches im August 2015 bezogen wurde. Mit Hilfe einer hochwertigen Gebäudehülle und optimaler Ausnutzung von erneuerbaren Energien soll der EffizienzhausPlus-Standard im Mehrfamilienhaus erreicht werden. Die Wärmeversorgung erfolgt mittels einer Sole-Wasser-Wärmepumpe (50 kW<sub>th</sub>). Als Wärmequellen dienen ein Eisspeicher (100 m<sup>3</sup>) und Solarabsorber auf dem Dach (ca. 85 m<sup>2</sup>). Des Weiteren kommen zur regenerativen Stromerzeugung PV-Module auf dem Dach und in der Fassade zum Einsatz.

Der Fokus des Vortrages wird auf der Darstellung von Messergebnissen aus dem Monitoring des Gebäudes und der Bewertung der Performance der Wärmepumpe in Kombination mit dem System aus Eisspeicher und Solarabsorber liegen. Weiterhin werden das Verfahren und die Umsetzung der Qualitätssicherung am Beispiel des Wärmepumpenbetriebs erläutert.

### **Stichwörter:**

Wärmepumpen, Eisspeicher, Solarabsorber, Qualitätssicherung, Monitoring, Wohnungsbau

## RoofVent® mit Wärmepumpe die dezentrale Lösung als Energiesparmeister

Loris Basso

Hoval Aktiengesellschaft, Austrasse 70, 9490 Vaduz, Liechtenstein  
Tel.: +423 399 27 44, Mobil: +41 79 618 29 59, Fax: +423 399 27 31  
[Loris.Basso@hoval.com](mailto:Loris.Basso@hoval.com)

**Maximale Flexibilität:** Hallenklima-Systeme von Hoval schaffen Behaglichkeit in Großräumen und minimieren gleichzeitig den Energieverbrauch. Anders als Zentralanlagen sind sie modular aufgebaut. Das heißt eine Anlage umfasst mehrere, auch unterschiedliche Klimageräte. Das garantiert maximale Anpassungsfähigkeit und Flexibilität in allen Phasen: bei Planung, Installation, Betrieb und -Wartung.

**Kanalfreie Hygiene:** Die Hallenklima-Geräte werden über den Raum verteilt an der Decke oder im Dach installiert. Sie blasen die Zuluft direkt in den Raum ein; es sind keine Zuluft und Abluftkanäle nötig. Das bringt Vorteile beim Platzbedarf, bei der Hygiene und bei der Effizienz.

**Be- und Entlüftungsgerät mit umschaltbarer Wärmepumpe zum Heizen und Kühlen von hohen Hallen:** Das RoofVent® wird mit einem modulierenden Luft/Luft-Wärmepumpensystem ausgestattet, das sowohl Wärme als auch Kälte erzeugt. Damit nutzt es die Energie der Umgebungsluft zum umweltfreundlichen Heizen und Kühlen der Halle. Diese umschaltbare Wärmepumpe in Kombination mit dem integrierten Plattenwärmeaustauscher macht das Gerät zum überlegenen Energiesparmeister. Die exzellenten Leistungsdaten (COP, EER, Rückwärmzahl) bestätigen den ausgesprochen effizienten Betrieb. Das System benötigt weder einen Technikraum noch ein Wasser-Verteilnetz.

**Patentierter Luftverteilung:** Hallenklima-Systeme von Hoval sind Meister im Energiesparen. Sie bauen die Temperaturschichtung im Raum ab, was Wärmeverluste durch das Dach auf ein Minimum reduziert. Und dank der hohen Lüftungseffizienz muss insgesamt weniger Luft umgewälzt und behandelt werden; das spart elektrische Antriebsenergie und senkt den Lüftungswärmebedarf.

**Punktgenaue Regelung:** Eigens entwickelte, für das dezentrale System maßgeschneiderte Steuer- und Regelsysteme sorgen zuverlässig für die optimale Nutzung der Ressourcen und damit für niedrigste Betriebskosten. Die einzelnen Klimageräte werden individuell geregelt und zonenweise gesteuert. So passt sich das System flexibel an lokale Anforderungen an.

## Energieeffizienz von Wohn- und Zweckgebäuden Dämmung vs. Automatisierung

Wulfdieter Bauerfeld\*, S. Hossein Sagheby

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, FB1, Gebäudeenergie- und -informationstechnik,  
Wilhelminenhofstr. 75 A, D-12459 Berlin, Deutschland  
[wulfdieter.bauerfeld@HTW-Berlin.de](mailto:wulfdieter.bauerfeld@HTW-Berlin.de), [hossein.sagheby@HTW-Berlin.de](mailto:hossein.sagheby@HTW-Berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Entscheidungen für oder gegen Gebäudedämmung hängen von einer realistischen Einschätzung der Sanierungs- und Folgekosten sowie den erzielbaren Einsparungen gegenüber dem ungedämmten Gebäude ab. Auch zu bedenken ist, dass gedämmte Außenwände einerseits den solaren Eintrag im Winter verringern können (Resultat: mehr Heiztage), andererseits die nächtliche Abkühlung im Sommer verhindern (Resultat: höhere Kühllast).

Bei einem bestehenden Gebäude wird die Effizienz nicht nur über die Höhe der Energieverluste durch die Gebäudehülle bestimmt, sondern maßgeblich durch das individuelle Nutzerverhalten und durch die Steuerung bzw. Regelung der gebäudetechnischen Anlagen wie Heizungs- und Lüftungssysteme und weiterer Elektrogeräte. Eine umfassende Automatisierung kann hier zu hohen Einsparungen führen. Dies kann unter dem Aspekt des - im Vergleich zur Wärmeenergie - höheren primärenergetischen Aufwandes der elektrischen Energie eine signifikante Rolle spielen.

Will man die ökologische und ökonomische Wertigkeit - vordergründig geprägt durch Wirtschaftlichkeit - von Dämmung und Automatisierung vergleichen, fehlen Berechnungsgrundlagen zur seriösen Bestimmung von Einsparpotentialen. Schließt man in den Vergleich zudem die Nachhaltigkeit der Nutzung als soziokulturelle Qualität ein, müssen auch Akzeptanz und Attraktivität der in Konkurrenz zueinander stehenden Lösungen betrachtet werden.

An mehreren realen Beispielen wird gezeigt, dass Automation in Wohn- oder Zweckgebäuden tatsächlich wirtschaftlicher sein kann und in wieweit die nachhaltige Nutzung von Gebäuden von entsprechenden Automatisierungsmaßnahmen geprägt sein wird.

**Stichwörter:**

Jahresenergiebedarf, Gebäudeautomation, optimale Dämmung, Nachhaltigkeit

IV.15

## **Messdatengestützte Analyse sanierungsbedingter Effizienzsteigerungen im Wohnungsbau**

**Tanja Osterhage\*, Davide Cali, Dirk Müller**

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de)

\*Korrespondenzautorin

Niedrige Dämmstandards und veraltete Heizungssysteme in vielen Gebäuden in Deutschland und in ganz Europa tragen zu einem unverhältnismäßig hohen Energieverbrauch bei. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes werden die ganzheitliche Sanierung und die Ergebnisse des Monitorings von Gebäuden in Süddeutschland vorgestellt.

Die zu Beginn der fünfziger Jahre erbauten Gebäude wurden nach sieben unterschiedlichen Sanierungskonzepten energetisch modernisiert. Die Konzepte unterscheiden sich in der Art der Dämmung und Auswahl der Anlagentechnik. Das installierte Monitoringsystem zeichnet hochaufgelöste Daten zur Behaglichkeit und Luftqualität innerhalb der Wohnräume sowie Daten zu den Energieströmen auf Übergabe-, Verteilungs-, Speicherungs- und Erzeugungsebene auf. Das Monitoringsystem ermöglicht somit den Vergleich zwischen dem realen Energieverbrauch und dem berechneten Energiebedarf der Gebäude.

Der tatsächliche Energieverbrauch von Gebäuden unterscheidet sich in vielen Fällen erheblich von den zu erwartenden berechneten Bedarfswerten, selbst wenn diese unter Nutzung fortschrittlicher Software für die komplex-dynamische Simulation von Gebäudeenergiebedarfen gewonnen werden. Dieses Phänomen ist wohlbekannt und wurde jüngst als "Energieperformancelücke" (englisch: Energy Performance Gap) bezeichnet. Darüber hinaus wird im Allgemeinen die Tendenz von Verbrauchern, ihren Bedarf und ihre Erwartungshaltung angesichts technischer Neuerungen zu steigern, als „Rebound-Effekt“ bezeichnet.

Die Energieperformancelücke konnte für jedes hier umgesetzte Sanierungskonzept identifiziert und (mit Werten bis zu 287 % der errechneten Einsparungen) quantifiziert werden. Das BewohnerInnenverhalten wurde als eine der Ursachen für die Energieperformancelücke identifiziert. Weitere Ursachen sind Fehler in der Installation und im Betrieb der Anlagentechnik. Die Notwendigkeit eines Monitoringsystems bei Gebäuden mit komplexer Anlagentechnik hat sich ebenfalls herausgestellt.

*Wir danken dem BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Förderkennzeichen 03ET1105A) und E.ON New Build and Technology für die finanzielle Unterstützung.*

**Stichwörter:**

Energetische Sanierung, EnEV Nachweisverfahren, Gebäudeenergieverbrauch, Nutzungseinflüsse, Energieperformancelücke

IV.16

## **Willibald-Gluck-Gymnasium (Neumarkt i.d.OPf.) – Energiekonzept für Bildungsbauten**

**Christian Kley\*, Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch**

Technische Universität Braunschweig IGS - Institut für Gebäude- und Solartechnik,  
Mühlenpfordtstraße 23, 38106 Braunschweig  
Tel.: 0531 3913557, Fax: 0531 3918125, [kley@igs.tu-bs.de](mailto:kley@igs.tu-bs.de)

\* Korrespondenzautor

Nachhaltige Energiekonzepte spielen heutzutage immer mehr eine Rolle im energieeffizienten Bauen. Den Schulen kommt hierbei eine Schlüsselrolle zur Erreichung der Klimaschutzziele zu. Sie sind nicht nur für die Ausbildung der kommenden Generationen verantwortlich, sondern mit ihrem umfangreichen und heterogenen Gebäudebestand sowie ihren Neubauten auch selbst dazu prädestiniert, ein Lernlabor für „Energieoptimiertes Bauen und Betreiben“ zu bilden.

Der Neubau des Willibald-Gluck-Gymnasiums in Neumarkt i. d. OPf. ist ein vorbildliches Beispiel für die integrale Planung und ermöglicht die Erforschung zukunftsorientierter Technik- und Energiekonzepte in Bildungsbauten. Im Rahmen der Begleitforschung Energieeffiziente Schulen (EnEff:Schule) und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojekts wird ein ganzheitliches Monitoring- und Optimierungsprogramm durchgeführt, um gesicherte Kenntnisse über die Performance des Gebäudes und der Anlagen zu erlangen sowie zu dokumentieren.

Das integrale Gebäudekonzept vereint das Zusammenspiel von architektonischen Überlegungen zur Ausrichtung und Gebäudeform, eine hochwertige und luftdichte Gebäudehülle mit niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten sowie eine energieeffizienten Gebäudetechnik zur Wärme- und Stromversorgung.

Neben der regenerativen Energieerzeugung über eine erdgekoppelte Wärmepumpe und einer PV-Anlage auf dem Schul- und Turnhallendach (290 kWp) bildet ein VRF-Batteriesystem mit 130 kWh Speicherkapazität die Grundlage für zukunftssträchtige Energiekonzepte in Bildungsbauten.

Der Fokus des Vortrages liegt auf der Darstellung des Energiekonzeptes und der Einbindung der Wärmepumpe unter Beachtung der Kopplung mit zwei Wärmequellen (Agrothermie und Energiepfähle). Zudem werden Ergebnisse aus dem Monitoring der Schule vorgestellt.

**Stichwörter:**

Schule, Energiekonzept, Wärmepumpen, Niedertemperatur-Wärmequellen, Monitoring, Optimierung

## Entwicklung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe für Nutztemperaturen über 120°C

Ralf Noack

Institut für Luft und Kältetechnik Gemeinnützige Gesellschaft mbH,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, D-01309 Dresden  
[ralf.noack@ilkdresden.de](mailto:ralf.noack@ilkdresden.de)

Die Wärmepumpentechnologie hat sich in den zurückliegenden Jahren aufgrund unterschiedlichster Randbedingungen zu einem wesentlichen Bestandteil bei der Beheizung von Gebäuden, vorwiegend im Niedertemperaturbereich entwickelt.

Wärmepumpenanwendungen auf Basis des Kompressions-Kaltdampfprozesses sind im Temperaturbereich von 35 °C ... 65 °C Stand der Technik und werden in großen Stückzahlen als Raumheizungsanwendungen vertrieben. Im Industriebereich wurden bei Projektstart Nutztemperaturen im Bereich von etwa 90 °C erzielt. Oberhalb dieses Temperaturbereiches ist die Wärmepumpentechnologie wirtschaftlich aktuell unbedeutend, was sich ursächlich mit den fehlenden Ersatzkältemitteln für R11 und R114 begründen lässt. Mit diesen Kältemitteln sind Einzelanwendungen bekannt, die auch Nutztemperaturen von über 120 °C erreicht haben.

Analysiert man den aktuellen Wärmebedarf ist der Anteil an Prozesswärme, welche auf einem deutlich höheren Temperaturniveau (>110 °C) benötigt wird, kleiner als der Heizwärmebedarf. Perspektivisch wird der Bedarf an Prozesswärme bis zum Jahre 2050 jedoch der größte Wärmeverbraucher werden.

In Zeiten der Verknappung der fossilen Energieträger und immer stärkerer Nutzung von erneuerbarer Energiequellen war es im Rahmen eines Forschungsprojektes Ziel zu demonstrieren, dass der Einsatz von Wärmepumpen im Bereich hoher Quell- und sehr hoher Nutztemperaturen technisch, wirtschaftlich und ökologisch möglich ist.

Als Zielstellung des Projektes war eine Wärmepumpe zu entwickeln, die bei Quelltemperaturen von 60...90 °C in der Lage ist, Nutztemperaturen von mehr als 120 °C zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich galt die Randbedingung umweltfreundliche Kältemittel mit geringen GWP zu verwenden. Die angestrebte Leistungszahl der Wärmepumpe sollte bei den beschriebenen Einsatzbedingungen im Bereich der in der Heizung eingesetzten Niedertemperaturheizungen liegen. Als Mindest-COP war 3,0 geplant. Der Kältekreislauf sollte einfach und möglichst einstufig ausgeführt werden.

Der Vortrag stellt dieses Projekt und die dabei erzielten Ergebnisse vor. Fokus dieses Vortrages werden dabei die Entwicklungsschritte von der Idee bis zum Test des ersten Funktionsmusters sein. Ausgehend von der Zielstellung werden im Vortrag die Randbedingungen zur Auswahl des Kältemittels, der Komponenten des Kältekreislaufes und die aktuell noch zu lösenden Fragestellungen beschrieben. Abschließend wird die Testdurchführung an der Hochtemperaturwärmepumpe beschrieben.

### **Stichwörter:**

Wärmepumpe, Hochtemperaturanwendung, Kältemittel, Testverfahren

## Hochtemperatur-Wärmepumpe für Industrieanwendungen: Prüfstandsmessungen und Systemsimulation

Veronika Wilk<sup>1\*</sup>, Michael Hartl<sup>1</sup>, Thomas Fleckl<sup>1</sup>, Erich Widhalm, Franz Ramler<sup>3</sup>, Gottfried Adelberger<sup>4</sup>,  
Thomas Ciepela<sup>4</sup>, Karl Ochsner sen.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Sustainable Thermal Energy Systems,  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[veronika.wilk@ait.ac.at](mailto:veronika.wilk@ait.ac.at)

<sup>3</sup> Edtmayer Systemtechnik GmbH, Talpagasse 6, 1230 Wien, Österreich

<sup>4</sup> Ochsner Energie Technik GmbH, Krackowizerstraße 4, 4020 Linz, Österreich

\* Korrespondenzautorin

In Industrieprozessen entstehen teilweise beträchtliche Abwärmeströme, die auf Grund des niedrigen Temperaturniveaus nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden können und ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden. Hochtemperatur-Wärmepumpen ermöglichen die Nutzung dieser Abwärmeströme und stellen deshalb eine zielführende Energieeffizienzmaßnahme für Industrieprozesse dar. Im vorliegenden Beitrag werden die Entwicklung eines Simulationsmodells für Hochtemperatur-Wärmepumpen und die Systemsimulation einer industriellen Anwendung beschrieben.

Das Simulationsmodell basiert auf einer neuentwickelten Hochtemperatur-Wärmepumpe der Ochsner Energie Technik GmbH. Dabei handelt es sich um eine elektrisch angetriebene Kompressionsmaschine, mit der Vorlauf-temperaturen von bis zu 130°C erreicht werden können. Als Simulationsumgebung wurde die Software IPSEpro gewählt, die insbesondere für Simulationen im Bereich der Kraftwerks- und Energietechnik Verwendung findet. Detaillierte Messdaten der Hochtemperatur-Wärmepumpe, die am Prüfstand der Ochsner Energie Technik GmbH vermessen wurde, sind die Grundlage für das Wärmepumpenmodell. Mit Hilfe dieses Modells kann die Einbindung dieser Wärmepumpe in verschiedene Industrieprozesse simuliert werden.

In diesem Beitrag wird ein Kraftwerksprozess als Anwendungsbeispiel vorgestellt. Eine gasbefeuerte KWK Anlage produziert Strom und Fernwärme. Da der Fernwärmebedarf zugenommen hat, soll dieses Kraftwerk mit Hilfe einer Wärmepumpe mehr Fernwärme liefern. Die Lagerung der Dampfturbine der KWK Anlage wird mit Öl gekühlt, um die Temperatur im Betrieb konstant zu halten. Das Öl wird in einem geschlossenen Kreislauf geführt und mit Kühlwasser auf die erforderliche Temperatur rückgekühlt. Dieses Öl soll nun als Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen, die dann auf der Heizungsseite in das Fernwärmenetz einspeist. Dadurch ist es möglich, die benötigten Kühlwasserumwälzmengen zu reduzieren. Es werden typische Betriebszustände des Gesamtsystems, das aus Kraftwerk, Wärmepumpe, und Fernwärmenetz besteht, berechnet. An Hand der Simulationsergebnisse kann die Effizienzsteigerung bewertet werden, die eine wichtige Entscheidungsgrundlage für eine mögliche Umsetzung darstellt.

### **Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Prozessintegration, Simulation

Industrielle Trocknung mit Kompressionswärmepumpen

## Ein numerischer Vergleich von zwei hydraulischen Einbindungsvarianten an einem konkreten Beispiel

Michael Lauermann<sup>1\*</sup>, Michael Hartl<sup>1</sup>, Bernd Windholz<sup>1</sup>  
Stefan Puskas<sup>2</sup>, Dirk Saldsieder<sup>2</sup>, Bernhard Thek<sup>3</sup>, Siegfried Aigner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[michael.lauermann@ait.ac.at](mailto:michael.lauermann@ait.ac.at)

<sup>2</sup> Wienerberger AG, Engineering, Wienerbergstraße 11, 1100 Wien, Österreich  
[stefan.puskas@wienerberger.com](mailto:stefan.puskas@wienerberger.com)

<sup>3</sup> Ing. Aigner Wasser – Wärme – Umwelt GmbH, Kremstalstraße 18, 4501 Neuhofen, Österreich  
[office@ing-aigner.at](mailto:office@ing-aigner.at)

\* Korrespondenzautor

Die Effektivität eines Wärmepumpensystems hängt neben der Wärmepumpencharakteristik entscheidend von der hydraulischen Einbindung ab. Auf der einen Seite gibt es für Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen bereits eine Vielzahl von Standard-Einbindungsschemen, die auf die vorherrschenden Randbedingungen perfekt abgestimmt sind, da die Temperaturniveaus der Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe annähernd konstant sind. Der Betrieb der Wärmepumpe erfolgt damit stets mit den niedrigstmöglichen Energiekosten. Auf der anderen Seite sind - für den Wärmepumpeneinsatz geeignete - Industrieprozesse äußerst verschieden und zu einem gewissen Teil auch diskontinuierlich. Stark schwankende Temperaturniveaus von Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe erlauben hier keine Standardisierung der hydraulischen Einbindung von Wärmepumpensystemen.

Im vorliegenden Beitrag werden zwei unterschiedliche hydraulische Einbindungen von Kompressionswärmepumpen am Beispiel eines Trocknungsprozesses verglichen. Der Vergleich erfolgt in der dynamischen Simulationsumgebung Dymola mit Kältetechnikkomponenten aus der TIL-Bibliothek. Die erste Einbindungsvariante basiert auf zwei separaten Zwischenkreisen – einem auf der Wärmeaufnahme- und einem auf der Wärmeabgabenseite, welche auch als Parallelschaltung von Quelle – Wärmepumpe – Senke angesehen werden kann. Die zweite Variante besteht aus einem einzigen Verbundkreislauf, sozusagen einer Serienschaltung von Quelle – Wärmepumpe – Senke. Bei dem betrachteten Trocknungsprozess wird „kalte“ Nassluft am Ende der Trocknung als Quelle genutzt und weiter abgekühlt, bevor sie an die Umgebung abgeführt wird. Die Wärmeabgabe erfolgt an der Frischlufteinspeisung zu Beginn der Trocknung. Das Temperaturniveau der Frischlufteinspeisung (Eintrittstemperatur der Wärmeabgabe) unterliegt dabei einer jahreszeitlichen Schwankung. Genau diese Schwankung hat zur Folge, dass je nach Eintrittstemperatur der Wärmeabgabe, eine der beiden hydraulischen Einbindungen vorteilhaft gegenüber der anderen sein kann und somit für dieses konkrete Beispiel eine umschaltbare Variante der beiden hydraulischen Einbindungen für eine maximale Energiekosteneinsparung zu empfehlen wäre.

**Stichwörter:**

Industrielle Trocknung, Trocknung, Prozessintegration, hydraulische Einbindung, Simulation



## Erste Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „EnPro“: Effizientere Industrieprozesse durch Wärmepumpen und Solarthermie

Veronika Wilk<sup>1\*</sup>, Bernd Windholz<sup>1</sup>, Michael Hartl<sup>1</sup>, Thomas Fleckl<sup>1</sup>, Jürgen Fluch<sup>2</sup>,  
Christoph Brunner<sup>2</sup>, Dietrich Wertz<sup>3</sup>, Daniel Lange<sup>3</sup>, Karl Ponweiser<sup>3</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Sustainable Thermal Energy Systems,  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[veronika.wilk@ait.ac.at](mailto:veronika.wilk@ait.ac.at)

<sup>2</sup> AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf, Österreich

<sup>3</sup> TU Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET),  
Getreidemarkt 9/302, 1060 Wien, Österreich

\* Korrespondenzautorin

Wärmepumpen und Solarthermie zählen zu den Schlüsseltechnologien zur Bereitstellung erneuerbarer thermischer Energie. Sie sollen einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele der EU leisten und spielen daher sowohl in den europäischen Richtlinien als auch in den nationalen Vorgaben eine wichtige Rolle (Europäisches Parlament, 2009).

In industriellen Prozessen werden diese Technologien allerdings erst vereinzelt zur Wärmeversorgung eingesetzt, da trotz erheblichen Potentials noch signifikante Hemmschwellen bestehen. Zu diesen zählen relativ hohe Investitionskosten, mangelnde Erfahrung und Skepsis bezüglich der Zuverlässigkeit dieser Technologien, sowie fehlendes Wissen über Integrationsmöglichkeiten und über technologische Weiterentwicklungen von Solarthermieanlagen und Wärmepumpen. Um diese Barrieren leichter zu überwinden, werden im Forschungsprojekt „EnPro“ Planungsrichtlinien entwickelt, die umfassende und unterstützende Informationen für Hersteller, Anwender und Planer enthalten. Sie beruhen auf Fallstudien, die in zehn österreichischen Unternehmen aus den Branchen der Nahrungs- und Futtermittelherstellung, der Papierindustrie, der Metallerzeugung und -bearbeitung, der Dämmstoffindustrie und der Großwäschereien durchgeführt werden. Die Integrationsmöglichkeiten von Solarthermie und Wärmepumpen, die in den Fallstudien erarbeitet werden, werden technisch und wirtschaftlich bewertet und daraus, wenn möglich, verallgemeinerte Integrationsschemata entwickelt. Die Planungsrichtlinien sollen dazu beitragen, dass Solarthermie und Wärmepumpen zur Wärmeversorgung von Industrieprozessen vermehrt eingesetzt werden, und letztlich der Anteil erneuerbarer Prozesswärme in Österreich erhöht wird.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse dreier Fallstudien vorgestellt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den Integrationskonzepten für Wärmepumpen, sowie der gemeinsamen Anwendung von Wärmepumpen und Solarthermie. Dabei wird sowohl die Prozessebene, als auch die Versorgungsebene betrachtet. Die Prozessanalyse zeigt, dass verschiedene Abwärmequellen und Wärmesenken in den Prozessen zur Verfügung stehen. Daher werden unterschiedliche Kombinationen von Quellen und Senken analysiert und an Hand von technoökonomischen Kennzahlen verglichen.

*Diese F&E-Dienstleistung ist im Auftrag des Klima- und Energiefonds entstanden und wird mit Mitteln des Energieforschungsprogramms 2015 finanziert.*

### Stichwörter:

Solarthermie, Wärmepumpe, Prozessintegration, Optimierung, Potentialanalyse

## Modellprädiktive Regelung eines Wärmepumpen-PV Systems für ein Einfamilienhaus

Martin Felix Pichler\*, Andreas Heinz, René Rieberer

<sup>1</sup>Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich  
[martin.pichler@tugraz.at](mailto:martin.pichler@tugraz.at) oder [martin.pichler@gmx.eu](mailto:martin.pichler@gmx.eu)

\* Korrespondenzautor

Der steigende Anteil an erneuerbaren Energiequellen wie z. B. Photovoltaik (PV) oder Wind am Gesamtenergie-mix und die damit verbundene Anforderung bezüglich der Übereinstimmung zwischen Angebot und Nachfrage stellt eine große Herausforderung dar. Ein integraler Ansatz – wie die Kombination einer PV Anlage mit einer Wärmepumpe für Heiz- und Kühlzwecke und einem Heiz- bzw. Kühlsystem mit hoher thermischer Speichermasse, im Rahmen eines intelligenten Gesamtsystems – beschreibt einen möglichen Weg wie erneuerbare Energien effizient in Gebäuden genutzt werden können.

Das Ziel der Eigenverbrauchs-Maximierung bei Verfügbarkeit von PV-Strom, in Verbindung mit einer Wärmepumpe und einem thermischen Speicher, kann nur dann effizient funktionieren, wenn im Rahmen einer Prognose des zukünftigen PV-Angebots eine vorzeitige Aufladung der thermischen Speicher verhindert wird. Eine Modellprädiktive Regelung (MPC) stellt einen möglichen Ansatz für die Lösung dieser Aufgabe dar.

Der Beitrag beschreibt die wesentlichen Schritte und Komponenten zur Umsetzung der MPC. Der größte Entwicklungsaufwand fällt für die Identifikation eines geeigneten einfachen Modells für die thermischen Speicher (Wasserspeicher und Gebäude) und insbesondere für die Charakterisierung einer leistungsregelbaren Wärmepumpe an. Der Wasserspeicher und das thermische Gebäudemodell werden jeweils in Form eines Knotenmodells (System von Differentialgleichungen 1. Ordnung) abgebildet. Die Einbindung der wesentlichen Eigenschaften der WP erfordert einen nichtlinearen Ansatz für den Wasserspeicher, das Gebäudemodell hingegen kann als lineares Zustandsraummodell realisiert werden.

Die Ergebnisse für das vorliegende System zeigen, dass der PV-Eigenverbrauch bei 20 m<sup>2</sup> Zellenfläche deutlich erhöht werden kann; anstelle von 10 % können mit der MPC 50 % des gesamten elektrischen Energiebedarfs der WP direkt über die PV-Anlage gedeckt werden. Zusätzlich ist bei dem vorgestellten System die Berücksichtigung eines volatilen Stromtarifs im Prädiktionshorizont hinsichtlich Pooling oder einem virtuellen Kraftwerk von Interesse.

### Stichwörter:

MPC, Wärmepumpe, PV, Eigenverbrauchsoptimierung, Lastverschiebung

## Auslegung und Untersuchung einer Mehrquellen-Wärmepumpe mit einzelraumgeregeltem Senkenmanagement

Thore Oltersdorf<sup>1\*</sup>, Clemens Dankwerth<sup>1</sup>, Christian Sonner<sup>1</sup>, Hans-Martin Henning<sup>1</sup>,  
Kristian Huchtemann<sup>2</sup>, Nina Kopmann<sup>2</sup>, Dirk Müller<sup>2</sup>, Lars Heinen<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Thermische Anlagen- und Gebäudetechnik,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de](mailto:thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings  
and Indoor Climate, Mathieustr. 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[khuchtemann@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:khuchtemann@eonerc.rwth-aachen.de)

<sup>3</sup> Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Berghauser Straße 40, 42859 Remscheid, Deutschland  
[lars.heinen@vaillant.de](mailto:lars.heinen@vaillant.de)

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen des Projekts MOSKWA (FKZ 03ET1169A-C) ist die Entwicklung eines energie- und kosteneffizienten Mehrquellen-Wärmepumpen-Heizungssystems durch Optimierung sowohl der Quellen- als auch der Senkenseite fokussiert worden. Eine sowohl wirtschaftliche als auch energieeffiziente Lösung muss durch die Steigerung der Anlageneffizienz bei moderatem Anstieg der Investitionskosten erreicht werden. Sie kann zum Beispiel in der Einkopplung einer zweiten Wärmequelle liegen. Um die Temperatur auf der Quellenseite möglichst zu maximieren müssen bei der Kombination von Wärmequellen die einzelnen Quellen optimal ausgenutzt werden und somit entsprechend ihrem Temperaturniveau in den Verdampfungsprozess eingefügt werden. In einer in Python programmierten Potenzialanalyse wurden unterschiedliche Quellen kombiniert und gegenüber einer direkten sowie einer indirekten thermischen Einbindung in den Kältekreis einer Luft/Wasser-Wärmepumpe verglichen. Auf Basis einer darauf folgenden Analyse des Funktionsbedarf und der Wirtschaftlichkeit erfolgten die Auswahl einer geeigneten Quellenkombination, die Auslegung eines dazu passenden Verdampfers sowie die Untersuchung der Wärmepumpenheizungsanlage.

Auf der Senkenseite ist es notwendig, die Vorlauftemperatur möglichst niedrig zu halten, um einen energieeffizienten Betrieb des Wärmepumpensystems zu gewährleisten. Dies kann erreicht werden, indem die zugefügte Raumwärme kontinuierlich dem tatsächlichen Bedarf angepasst wird. Hierfür sind detaillierte Informationen über einzelne Räume bzw. Bereiche mit unterschiedlicher Nutzung notwendig. Im Rahmen des Projekts werden deswegen elektrische Stellventile anstelle der herkömmlichen Thermostatventile eingesetzt, die die notwendigen Informationen auf Einzelraumebene zur Verfügung stellen. Die Daten werden an das Wärmepumpensystem zurückgeführt, und ermöglichen eine dem Bedarf angepasste Regelung der Vorlauftemperatur des Heizungssystems. Mit den am E.ON ERC entwickelten Modellen in Modelica können die neuen Strategien simulativ entwickelt und getestet werden. Der ebenfalls am Institut verfügbare Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für Untersuchungen des hydraulischen Heizungsnetzes einer Wohnung ermöglicht die Inbetriebnahme und die Weiterentwicklung des Regelungssystems im realen Betrieb.

### Stichwörter:

Wärmepumpe, Einzelraumregelung, Senkenmanagement, Verdampfer, Quellenmanagement

## Entwicklung eines Hardware-in-the-Loop-Versuchsstandes für die dynamische Bewertung von Luft/Wasser-Wärmepumpen

Markus Nürenberg\*, Kristian Huchtemann, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustr. 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[mnuerenberg@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:mnuerenberg@eonerc.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

Um an den individuellen Bedarfsfall angepasst zu sein ermöglichen Hersteller von Wärmepumpensystemen eine Vielzahl von Verschaltungsschemata. Insbesondere die Einbindung von Sekundärwärmequellen (z. B. solare Unterstützung, Wärmerückgewinnung aus der Abluft, etc.) und der Einsatz von betriebsoptimierenden Reglern (z. B. lernende Systeme, modellprädikative Regelungen, etc.) erfordert dynamische Mess- und Bewertungsmethoden. Dazu ist es erforderlich, das gesamte Wärmepumpensystem, bestehend aus Wärmepumpe, (Puffer-) Speichern, Pumpen und zusätzlichen Wärmeübertragern in eine Prüfumgebung einzubinden. Eine Superposition von Einzelkomponentenbewertungen kann naturgemäß nicht die Interaktion der Komponenten miteinander und dem Gebäude erfassen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden wurde am Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC) ein Hardware-in-the-Loop Versuchstand entwickelt. Dieser besteht aus einer Klimakammer, die zur Emulation von Umgebungsbedingungen dient, sowie aus einem hydraulischen Versuchsaufbau, der in Summe acht Wärmequellen bzw. –senken unterschiedlicher Leistungsklassen emuliert. In diesem Artikel wird neben dem Konzept des Versuchstandes, auf das Kopplungsregime von Hard- und Software und auf die Anforderungen an die Prüfstandsregelung in Bezug auf das dynamische Verhalten einer Luft/Wasser-Wärmepumpe eingegangen. Hierzu wird die Regelungsgüte während einer Prozessumkehr (z. B. Abtauen des Verdampfers) betrachtet.

### Stichwörter:

Hardware-in-the-Loop, Wärmepumpe, Versuchstand

## Quasistatische Modellbildung einer Kompressionskältemaschine

Marco Fuchs, Ebrahim Aeini\*

Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik (IfT), Callinstraße 36, 30167 Hannover  
[m.fuchs089@gmail.com](mailto:m.fuchs089@gmail.com), [aeini@ift.uni-hannover.de](mailto:aeini@ift.uni-hannover.de)

\*Korrespondenzautor

In der aktuellen Entwicklung von Kältemaschinen kommen zunehmend drehzahlregelte elektrische Antriebe zum Einsatz, da die zugehörige Leistungselektronik kontinuierlich kostengünstiger auf dem Markt zur Verfügung steht. Eine intelligente Regelung dieser Antriebe kann daher effiziente Teillastzustände ermöglichen.

Eine Regelung, welche einen flexiblen und effizienzoptimierten Teillastbetrieb ermöglicht, ist mit herkömmlichen Methoden, bzw. Regelstrategien schwer zu bewerkstelligen, daher ist die Entwicklung einer modellprädikativen Regelung (MPC) vorgesehen. Bei einer MPC sollen die zukünftigen Stellensignale mithilfe eines Prozessmodells vorausberechnet werden, um der Sollwertvorgabe bestmöglich zu folgen. Am IfT wird im ersten Schritt ein quasistatisches Modell dieser Kältemaschine verwendet, welches in Matlab/Simulink entworfen wurde. Die Modellvalidierung erfolgte mittels einer umfangreichen Bilanzierung der Anlage. Im nächsten Schritt soll ein dynamisches Modell folgen, welches aufgrund des verwendeten Plattenwärmeübertragers aktuell jedoch schwer umzusetzen ist. Mithilfe des Modells sollen optimale Betriebspunkte hinsichtlich Kühlleistung und Leistungszahl ermittelt werden und die Anlage soll diese Punkte bestmöglich anfahren.

Bei der am Institut für Thermodynamik vorhandenen Kältemaschine, die zur Validierung des Modells genutzt wird, handelt es sich um eine Kompressionskältemaschine vom Typ *Chiller* der Firma Rittal. Als Kältemittel wird R410A verwendet, das zu kühlende Medium ist Wasser, was zum Beispiel zur Kühlung von Werkzeugmaschinen verwendet wird. Zur Aufnahme von Daten in unterschiedlichen Lastpunkten wurde umfangreiche Messtechnik hinzugefügt. Für die Regelung wurden Frequenzumrichter installiert, um die Drehzahl des verbauten Ventilators am Kondensator, des Verdichters und der Wasserpumpe zu variieren. Zudem wurde ein elektrisches Expansionsventil anstelle des thermostatischen Expansionsventils verbaut. Hintergrund dieser Erweiterungen ist die eingehende Erforschung des Anlagenverhaltens und die Optimierung der Energieeffizienz im Teillastbetrieb. Dies gestaltet sich deutlich komplexer als der Vollastbetrieb, da es mehr Freiheitsgrade gibt. Aufgrund des hohen Einsparpotentials ist dies jedoch sehr erstrebenswert.

## Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung der Kälteleistung eines Kühlschranks

Johannes Brunder

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW),  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[johannesbrunder@gmx.de](mailto:johannesbrunder@gmx.de)

Zur Bewertung der Kälteleistung von Kühlschränken wird bisher häufig die Kühlschränkinnentemperatur im Beharrungszustand herangezogen. Bei Erreichen des Beharrungszustands entsprechen die Wärmeverluste des Kühlschranks der Kälteleistung des Kühlschranks. Dieses Verfahren weist einige Nachteile auf, wie zum Beispiel die lange Messdauer bis zum Erreichen des Beharrungszustands. Zudem ist die Bestimmung der Kälteleistung nicht möglich, da nur Temperaturen gemessen werden. Im Dauerbetrieb ist die Kühlschränkinnentemperatur im Beharrungszustand in aller Regel deutlich niedriger als die reale Betriebstemperatur des Kühlschranks. Die

Anwendung dieses Verfahrens in der Entwicklung hat zur Folge, dass der Kühlschrank auf möglichst niedrige Kühlschrankinnentemperaturen hin optimiert wird und nicht auf den eigentlichen Betriebsbereich.

Es soll ein neues Messverfahren zur Bestimmung der Kälteleistung ohne diese Nachteile entwickelt werden. Ziel ist es die Kälteleistung bei verschiedenen einstellbaren Kühlschrankinnentemperaturen zu ermitteln. Hierfür wird mit Heizwiderständen im Inneren des Kühlschranks eine Temperatur aufgeprägt und damit die Kältelast simuliert. Für die Heizwiderstände wird ein Regelungsprinzip entwickelt und optimiert. Mit dem neuen Messverfahren lassen sich die Auswirkungen von veränderten Betriebsbedingungen auf die Kälteleistung des Kühlschranks untersuchen.

Im Rahmen des Vortrags sollen die Entwicklung des Messverfahrens, der Versuchsaufbau sowie die Ergebnisse einer ersten Anwendung vorgestellt werden.

### S.03

## **Parameterprüfstand für Eisbreigeneratoren mit induktiver Kristallablösung**

**Sebastian Gund\*, Michael Kauffeld, Jakob Schaaf**

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe

\* Korrespondenzautor

Die Arbeit umfasst die Konzeption, den Aufbau und die Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für Eisbreigeneratoren. An dem Versuchsstand sollen verschiedene Prototypen von Eisbreigeneratoren mit induktiver Kristallablösung getestet werden. Die Eisbreigeneratoren werden über eine Schnellkuppeleinbindung in den Versuchsstand integriert. Die Fluideigenschaften am Eisbreigeneratoreingang können über ein LabView-Steuerprogramm eingestellt und überwacht werden. Weiter soll eine Simulation eine Vorhersage über die Strömungen, Kräfte und Wärmeübertragung sowie die voraussichtliche Eisbildung an der Oberfläche des Generators liefern.

Im Vortrag wird eine kurze Einführung in die Technologie Eisbrei gegeben, hinführend zu den untersuchten Eisbreigeneratoren mit induktiver Kristallablösung. Es werden die Ergebnisse der Masterarbeit vorgestellt und welche Möglichkeiten sich damit bieten und wie sich der Prüfstand in zukünftigen Projekten weiter entwickeln könnte.

#### **Stichwörter:**

Eisbrei, Ice-Slurry, induktive Kristallablösung, thermische Energiespeicher, Latentwärmespeicher, Hochschule Karlsruhe

### S.04

## **Analyse der Randbedingungen einer Flugzeugklimaanlage und Umsetzung verschiedener Flugprofile in einer Simulationsumgebung**

**Yuyang Hu**

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden

In modernen Passagierflugzeugen basiert die Klimaanlage hauptsächlich auf einem Kaltgasprozess. Im Vergleich zum Kaltdampfprozess ist die erreichbare Effizienz allerdings deutlich geringer. Um den Treibstoffverbrauch des Flugzeuges zu verringern, wird in einem Forschungsprojekt ein neuartiges Kaltdampfkühlsystem entwickelt. Für die Auslegung ist es notwendig, sämtliche Randbedingungen der Klimaanlage zu bestimmen. Dazu zählen die Kabinen-, Stauluft-, Außenluft- und Zapfluftzustände. Dementsprechend werden in dieser Arbeit Modelle für die jeweiligen physikalischen Zusammenhänge erstellt und in der Simulationsumgebung SimulationX umgesetzt.

In dem Kabinenmodell werden Bilanzen von allen in der Kabine stattfindenden Wärmeströmen aufgestellt. Dafür werden Teilmodelle für die einzelnen Kabinenstrukturen und Wärmequellen erstellt. Bei der Bestimmung der Stauluft- bzw. Außenluftzustände am Lufteinlass wird die semi-empirische Methode aus der Abhandlung ESDU 86002 verwendet, die die theoretischen Berechnungen mit empirischen Korrekturen kombiniert. Außerdem werden die Druckverluste und Zustandsänderungen im Luftkanal bestimmt.

Der Umgang mit der Software SimulationX und das Verfahren zum Modellbau werden ebenfalls in dieser Arbeit dargestellt. Die Simulationsergebnisse werden anhand der Daten eines Beispielflugzeuges am Ende dieser Arbeit gezeigt und analysiert.

Mit den erstellten Modellen können sämtliche Randbedingungen für die Flugzeugklimaanlage für verschiedene Betriebsfälle berechnet werden. Alle Umgebungsbedingungen können in Form von Eingangsparametern frei gewählt werden.

**Stichwörter:**

Flugzeugklimaanlage, Kabinenmodell, Stauluftzustand, SimulationX

S.05

## **Thermodynamische und wirtschaftliche Analyse verschiedener Verschaltungen von Absorptionskältemaschinen**

**Anne Maria Besser**

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden  
[maria\\_besser@gmx.net](mailto:maria_besser@gmx.net)

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde sich mit der theoretischen Analyse verschiedener Verschaltungen von Absorptionskälteanlagen beschäftigt. Hierbei wurden Systeme mit den Arbeitsstoffgemischen Wasser/Lithiumbromid und Ammoniak/ Wasser betrachtet. Bei den Betrachtungen wurde sich primär auf einstufige Anlagen mit Heißwasser als Wärmequelle beschränkt. Es wurde eine Analyse hinsichtlich kommerziell erhältlicher Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen angestellt, die neben den Nennbetriebsdaten Preisvergleiche von mehreren Anbietern aufzeigt. Für das Arbeitsstoffgemisch Ammoniak/Wasser wurden verschiedene Anlagenschaltungen mit dem Programm MATLAB berechnet. Diese Simulationen wurden auf Grundlage der thermodynamischen Beschreibung des Absorptionskreislaufs und unter der Annahme technisch relevanter Randbedingungen durchgeführt. Es wurden Systeme mit und ohne inneren Wärmeübertrager sowie Resorptionskälteanlagen untersucht. Anhand der Ergebnisse wurde eine Optimierung vorgenommen und die Verschaltungen aus technischer, thermodynamischer und wirtschaftlicher Sicht diskutiert. Die Einflüsse unterschiedlicher Temperaturen, insbesondere auf die eingesetzten Absorber, werden diskutiert und thermodynamische Grenzen der Schaltungen aufgezeigt.

## Regelung und Steuerung einer Hochtemperatur-Hybridwärmepumpe

Alexander Pilevski, Taylan Tokan\*

Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik (IfT), Callinstraße 36, 30167 Hannover  
[alex.pilevski@web.de](mailto:alex.pilevski@web.de), [tokan@ift.uni-hannover.de](mailto:tokan@ift.uni-hannover.de)

\* Korrespondenzautor

Kostengünstige und nachhaltige Bereitstellung von Prozesswärme ist ein entscheidender Standortfaktor für die produzierende Industrie. In Kooperation mit Industriepartnern wurde dahingehend ein innovatives Wärmepumpenkonzept für die Hochtemperaturanwendung mit Ammoniak und Wasser als Arbeitsmittel umgesetzt. Durch die Erweiterung einer Kompressionswärmepumpe mit einem Lösungsmittelkreislauf lassen sich die Vorzüge von Absorptionswärmepumpen ohne den Einsatz eines thermischen Verdichters realisieren.

In diesem Beitrag wird die Implementierung eines Regelungskonzepts für den stationären Betrieb und eine Resorptionssteuerung zur Erhöhung der Leistungszahl thematisiert. Als Regelgrößen dienen der Anlagenhochdruck und Lösungsmittelvolumenstrom. Aufbauend auf der Hochdruckregelung wurde weiterhin eine Resorptionssteuerung realisiert. Diese erhöht die Leistungszahl der Anlage, indem der benötigte Mindesthochdruck zur vollständigen Resorption im laufenden Betrieb berechnet und an den Hochdruckregler übergeben wird. Es wird die Technikumsanlage vorgestellt und die Steuerung in Form einer Parameterstudie zum Einfluss des Lösungsmittelvolumenstroms auf die Leistungszahl diskutiert.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Prozesswärme, Regelung, Steuerung, Absorption, Resorption

## Simulation einer Ammoniak-Wasser- Absorptionskältemaschine mit UNISIM®: Thermodynamik und Prozessaufbau

Max Wannowius

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim, Fakultät Technik,  
Cobitzalle 1 - 9, 68163 Mannheim  
[max.wannowius@gmx.de](mailto:max.wannowius@gmx.de)

Eine Absorptionskältemaschine wird verwendet, um Kälte durch Abwärmenutzung zu gewinnen. Dabei existieren aktuell zwei Arbeitsgemische nämlich Ammoniak-Wasser und Wasser-Lithiumbromid. In dieser Arbeit wurde nun untersucht, ob und ggf. wie eine mit dem Gemisch Ammoniak-Wasser betriebene Absorptionskältemaschine mit dem Prozesssimulationsprogramm UniSim® dargestellt werden kann. Dazu wurden zunächst geeignete Zustandsgleichungen (so genannte „Fluid Packages“) identifiziert und bezüglich Ihrer Genauigkeit untersucht. Außerdem wurden die verschiedenen Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen ein Fluid Package angepasst werden kann, um möglichst gute Simulationsergebnisse zu erhalten. Zum Schluss wurde eine Prozesssimulation aufgesetzt und die Abbildung der Prozessschritte in UniSim® diskutiert.



## **Entwicklung einer Strategie zum energieeffizienten Betrieb einer Kälteversorgungsanlage**

**Markus Metz**

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim, Fakultät Technik,  
Cobitzalle 1 - 9, 68163 Mannheim  
[metz.markus@siemens.com](mailto:metz.markus@siemens.com)

Innerhalb dieser Arbeit wurde das Kälteversorgungskonzept eines Industrieunternehmens zur Kaltwassererzeugung energetisch analysiert und bewertet. Dazu wurden Energie- und Wetterdaten, hinterlegte Regelstrategien und technische Dokumentationen der Anlagen verwendet. Auf Basis dieser Analyse wurden Maßnahmen zur Energieeffizienz-Steigerung entwickelt und anschließend energetisch bewertet.

Weiter wurde der konzeptionelle Entwurf eines Kälteverbundsystems am Industriestandort mit einer neuen Absorptionskältemaschine unter energetischen Gesichtspunkten weiterentwickelt. Hierzu wurden die Anforderungen der Absorptionskältemaschine hinsichtlich einer optimalen Betriebsweise untersucht und in der Konzeptausarbeitung berücksichtigt.

Die Energieeffizienz-Maßnahmen und das Kälteverbundsystem wurden in der Ausarbeitung einer neuen Regelstrategie zur Programmierung der Gebäudeautomation zusammengefasst.

Es zeigte sich, dass das Potential in Bestandsanlagen zur Energieeinsparung groß ist. Fehldimensionierungen der Anlagentechnik, hydraulische Probleme sowie veraltete Regelstrategien führen zu unnötigem Energieverbrauch. Besonders hervor zu heben sind die großen erzielbaren Energieeinsparungen bei der bedarfsgerechten Anpassung des Temperaturniveaus und der Nutzung der Freikühlung über die Außenluft bei ganzjährigem Kältebedarf, ohne dass dafür hohe Investitionen in Anlagentechnik notwendig sind.

Außerdem wurde festgestellt, dass die Erstellung einer umfassenden Dokumentation zur Beschreibung der zukünftigen Anlagenregelung zum dauerhaften, energieeffizienten Betrieb eines Verbundsystems in einem Energiespar-Contracting-Projekt unbedingt notwendig ist.

## **Inbetriebnahme und Optimierung einer Versuchsanlage zur Untersuchung der Oberflächenspannung unterhalb des Atmosphärendrucks**

**Manuel Unger<sup>1\*</sup>, Federico Lonardi<sup>2</sup>, Andrea Luke<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung,  
70565 Stuttgart, Deutschland

<sup>2</sup> Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Deutschland  
[ttk@uni-kassel.de](mailto:ttk@uni-kassel.de)

\*Korrespondenzautor

Den limitierenden Faktor einer Absorptionskältemaschine ist der Wärme- und Stofftransport der Absorption im Absorber. Eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung einer Absorptionskältemaschine besteht darin, die in der Anlage verwendete Lithiumbromidlösung mit alkoholischen Additiven zu versetzen. Bereits geringe Mengen dieser Additive reduzieren die Oberflächenspannung der Lösung, was zu einer besseren Benetzung der Rohre im Absorber und zur Verstärkung der lokalen Transportprozesse durch die sog. Marangoni-Konvektion führt.

Der Wärme- und Stoffübergang wird entsprechend verbessert. Für die genaue Betrachtung dieser Mechanismen im Absorber ist deshalb die Oberflächenspannung der Lithiumbromidlösung mit alkoholischen Additiven unter Betriebsbedingungen relevant.

In diesem Beitrag wird die Inbetriebnahmen einer neuen Anlage zur Messung von Oberflächenspannung unterhalb des Atmosphärendrucks vorgestellt. Zunächst wird die Versuchsanlage hinsichtlich der thermischen Verluste, der Dampfblasen- und Gasblasenbildung in den Tropfen, sowie der Kondensation von Wasserdampf an Schaugläser und der Nadel optimiert. Zusätzlich werden Verfahren für die Berechnung der Tropfenauflösungszeit, bis zum Erreichen der Gleichgewichtstemperatur entwickelt und diskutiert. Bei anschließenden experimentellen Untersuchungen werden die statische und dynamische Oberflächenspannung von Wasser und 50 % Lithiumbromidlösung ermittelt und mit der bisherigen Literatur verglichen.

**Stichwörter:**

Oberflächenspannung, Vakuum, Lithiumbromid, Wasser

S.10

## **Quantifizierung der Auswirkung der einseitigen Diffusion auf den gekoppelten Wärme- und Stofftransport bei der laminaren Rieselfilmabsorption**

Eike Cramer

TU Berlin, Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik, Fakultät III Prozesswissenschaften, Marchstr. 18, 10587 Berlin

Für die quantitative Beschreibung der Transportvorgänge bei der nicht isothermen Rieselfilmabsorption sind in der Literatur verschiedene Modelle vorhanden. Die Modelle beruhen auf verschiedenen Annahmen und liefern entsprechend unterschiedliche Ergebnisse. In dieser Abschlussarbeit wird der Einfluss der Vernachlässigung der einseitigen Diffusion auf den gekoppelten Wärme- und Stofftransport quantifiziert.

Für die quantitative Betrachtung werden zwei Modelle hergeleitet, die sich nur in der Annahme äquimolarer bzw. einseitiger Diffusion unterscheiden. Die Modellgleichungen werden in dimensionsloser Form mit der numerischen Methode der Finiten Differenzen für das Beispiel einer Lithiumbromid Lösung gelöst.

Die Ergebnisse zeigen eine Verschiebung der Werte an der Phasengrenzfläche. Der Absorbatanteil an der Phasengrenzfläche ist bei einseitiger Diffusion im Eintrittsbereich geringer, aufgrund höherer Grenzflächentemperaturen. Die erhöhte Grenzflächentemperatur kommt durch den durch einseitige Diffusion gesteigerten Stofftransport und die dadurch intensiviertere Wärmefreisetzung zustande.

Die Quantifizierung des Einflusses wird anhand der gemittelten, dimensionslosen Absorbatmassenstromdichten durchgeführt. Das Verhältnis liegt für einen typischen Eintrittsabsorbatanteil von  $c_0 = 0,5$  bei ca. 1,2 im thermischen Einlaufbereich und erreicht ein Maximum von ca. 1,35. Dies entspricht in diesem Beispiel einer Steigerung von 20 % bzw. 35 % durch einseitige Diffusion.

S.11

## **Literaturreview: Sieden von Wasser im Niederdruckbereich für Sorptionsanwendungen**

Bao Nam Dang<sup>1\*</sup>, Wim van Helden<sup>1</sup>, Michael, Olbricht<sup>2</sup>, Andrea Luke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AEE - Institut für Nachhaltige Technologien, 8200 Gleisdorf, Austria

\* Korrespondenzautor

Die Energiedichte eines Sorptionsspeichers wird durch die Wärme- und Stofftransport während der Absorption bzw. der Adsorption bestimmt. Zur Versorgung des Speichers wird Wasser bei sehr niedrigen Dampfdrücken zwischen 7 bis 23 mbar verdampft. Hierbei ist eine kritische Komponente häufig der Verdampfer. In einem geschlossenen evakuierten Sorptionsspeicher sind die treibenden Druckdifferenzen für den Dampftransport zwischen Verdampfer und Speicher von den lokalen Temperaturen in den einzelnen Komponenten abhängig. Damit das Wasser bei möglichst hohen Siedetemperaturen bzw. Drücken verdampft, um somit die Energiedichte des Speichers zu steigern, muss die treibende Temperaturdifferenz möglichst gering sein und damit der Wärmeübergang möglichst gut sein. Trotz der großen Relevanz fehlen derzeit nötige Grundlagen und Kenntnisse, um den Verdampfer optimal auszulegen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den aktuellen Forschungsstand bei der Verdampfung für Wasser im Niederdruckbereich zu erfassen. Die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Verdampfung werden vorgestellt. Ebenfalls werden die Untersuchungen an möglichen Einflussgrößen bzw. Verbesserungsmethoden diskutiert. Darunter zählen sowohl die Betriebsparameter, wie der Füllstand beim Behältersieden oder die Berieselungsdichte bei der Fallfilmverdampfung, als auch die geometrischen Größen, wie die Form und Beschaffenheit der Heizoberflächen. Aus der Übersicht ergeben sich weitere offene Fragestellungen zu den grundlegenden Mechanismen, die später an einem eigenen Teststand genauer untersucht werden sollen.

**Stichwörter:**

Thermische Speicher, Sorptionsspeicher, Wasser, Verdampfung, Literaturreview

**S.12**

## **Investigation of efficient industrial chilling of Atlantic salmon**

**Quirin Kaliner\*, Armin Hafner, Ignat Tolstorebrov, Trygve M. Eikevik**

NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen

\*Korrespondenzautor

Ein wichtiger Wirtschaftssektor in Norwegen ist die Züchtung von Fisch für die Lebensmittelbranche.

Nach der Aufzucht des Lachses muss die Verarbeitung, vom Schlachten bis zum Verkauf, möglichst schnell geschehen. Die Qualität des Produktes verschlechtert sich mit jeder Verzögerung des Prozesses. Allgemein kann man den Prozess in die Schritte Betäuben, Schlachten, Ausbluten und die Kühlung der Fische unterteilen. Der Fisch soll dabei möglichst schnell auf eine Kerntemperatur zwischen 0 und +2 °C heruntergekühlt werden. Aufgrund der großen Konkurrenz wird immer nach effizienteren Lösungen für das Kühlen der Lachse gesucht, um Energie zu sparen und die benötigte Zeit für das Kühlen zu minimieren.

Während des Kühlens von atlantischem Lachs können, durch das Studieren des Wärmeübergangs, Rückschlüsse über die Probleme der Kühlung gewonnen werden. Die komplexe Form und Oberfläche des Lachses bereiten dabei die größten Herausforderungen. Durch experimentelle Untersuchungen sollen entscheidende Informationen darüber gewonnen werden, welches Kühlmedium verwendet werden soll, welcher Volumenstrom benötigt wird und wie viel Energieaufwand für den Kühlvorgang dafür auf jeden Fall benötigt wird.

In meinem Vortrag werde ich über die durchgeführten Experimente berichten, den Wärmeübergang bei der Kühlung von Lachs erklären und deren Herausforderungen und möglichen Lösungen erläutern.

**Stichwörter:**

Kühlen von atlantischen Lachs, Wärmeübergang, R744/CO<sub>2</sub>

S.13

## Investigation of efficient drying of sea net cages for Salmon aquaculture

Theresa Willing\*, Armin Hafner, Ignat Tolstorebrov, Trygve M. Eikevik

NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen

\*Korrespondenzautorin

Die Aufrechterhaltung von Fischfangnetzen ist aus verschiedenen Gründen unumgänglich.

Unter anderem ist es besonders wichtig sicherzugehen, dass sich nicht dauerhaft Algen in dem Netz verfangen, da diese einen guten Nährboden für Bakterien und Infektionen bilden und somit die Qualität des Fisches senken würden.

Um dies zu verhindern, wird das Netz aus dem Wasser geholt, gereinigt, repariert und zur Imprägnierung in eine Flüssigkeit getränkt. Für eine anschließende Fixierung der Imprägnierung muss das Netz mit der aufgesaugten Flüssigkeit getrocknet werden.

Für eine möglichst effiziente und schnelle Trocknung, ist es wichtig genau zu wissen, welche Prozesse währenddessen ablaufen bzw. und unter welchen Bedingungen (Temperatur, Luftgeschwindigkeit, Feuchtigkeit) das Netz am schnellsten und am besten trocknet.

Der Vortrag handelt von der Untersuchung der Kinetik des Trocknungsvorganges dieser in Imprägnierungsflüssigkeit getränkten Fischernetze.

**Stichwörter:**

Wärmepumpentrocknen, Kinetik des Trocknungsvorgangs von Netzen

S.14

## Untersuchung und Charakterisierung einer Umweltsimulationskammer mit neuartigen Kältemitteln

Alexander Münn

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden

[alexmuenn@googlemail.com](mailto:alexmuenn@googlemail.com)

Im Zuge der F-Gase-Verordnung ist der künftige Einsatz von umweltschädigenden Kältemitteln mit GWP<sub>100</sub>-Werten von größer als 2.500 verboten. Eine Ausnahme gibt es aufgrund fehlender Alternativen im Tieftemperaturbereich unter -50°C, in welchem die aktuell verwendeten Kältemittel GWP<sub>100</sub>-Werte zwischen 12.000 und 15.000 besitzen. Umweltfreundliche Ersatzkältemittel sind nur im Bereich der brennbaren Kohlenwasserstoffen zu finden.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde an der TU Dresden ein Gemisch aus dem Kohlenwasserstoff Ethen (R1150) und CO<sub>2</sub> (R744) hinsichtlich seiner Eignung im Tieftemperaturbereich untersucht. Die Untersuchungen wurden in einer bestehenden Kältekaskade durchgeführt, bei welcher das Kältemittel R23 im Niedertemperaturkreislauf durch das oben genannte Gemisch ohne weitere Anpassung der Anlage (Drop-In) ersetzt wurde. Thermodynamisch wurde bei ähnlicher Verdampfungstemperatur eine höhere Drucklage und eine höhere Kälteleistung erwartet. Es wurden Variationen bei der Gemisch-Zusammensetzung und der Füllmenge geprüft.

Das Gemisch kann als Kältemittel bis zu einer Temperatur von ca.  $-80^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden. Durch die hohe Drucklage und deren Auswirkung auf das thermostatische Expansionsventil sowie auf die interne Steuerung der Anlage wurde jedoch ein Abfall der Kälteleistung von bis zu 50 % beobachtet. Eine deutliche Steigerung der Leistungsfähigkeit wird nach einem Retrofit (aktive Anpassung der Anlage) erwartet. Zur Überprüfung dieser Annahme werden weitere Versuche an der TU Dresden durchgeführt.

### S.15

## **Umrüsten einer Bestandskälteanlage von dem Kältemittel R22 auf R407F und Anpassung der Sicherheits- und Messtechnik am Beispiel einer zweistufigen Kälteanlage**

**Manuel Bloss**

Europäische Studienakademie Kälte – Klima – Lüftung (ESaK),  
Senefelderstraße 3, 63477 Maintal  
[manuel.bloss@esak.de](mailto:manuel.bloss@esak.de)

Neue Verordnungen machen es erforderlich, dass Kälteanlagen, welche mit R22 betrieben werden, sukzessive auf Ersatzstoffe umgerüstet werden müssen. Bei der Umstellung müssen umfangreiche technische und rechtliche Vorgaben eingehalten und umgesetzt werden. Darüber hinaus, wurden für den Einsatz als Schulungsobjekt weitere Modifizierungen vorgenommen. Zunächst wurde der Ist-Zustand ermittelt und mit den neuen Anforderungen verglichen.

Daraus ergaben sich die folgenden notwendigen Modifizierungen:

- Die Umstellung der Kälteanlage auf das Kältemittel R407F.
- Der Wechsel des Öls.
- Die Sicherheitstechnik wurde den aktuellen Forderungen angepasst.
- Die Messtechnik wurde den gestiegenen Anforderungen angepasst.
- Die Ausarbeitung der Dokumentation.
- Die Abnahme durch eine zugelassene Stelle (ZÜS).

Es wird am Beispiel der zweistufigen Kälteanlage dargestellt, was bei der Umrüstung zu beachten ist. Die Betriebsparameter werden nach der Umstellung gegenübergestellt und ausgewertet. Die Aufbereitung und Auswertung der Ölproben zur Bestimmung des Restölgehaltes wird vorgestellt. Des Weiteren wird dargelegt, wie die Einstufung der Druckbehälter bzw. der Anlage und die daraus resultierende Abnahme erfolgen.

### S.16

## **Hochdruckregelung bei CO<sub>2</sub>-Gaskühlern**

**Andreas HöB**

Europäische Studienakademie Kälte – Klima – Lüftung (ESaK),  
Senefelderstraße 3, DE-63477 Maintal  
[andreas.hoess@esak.de](mailto:andreas.hoess@esak.de), [andreas.hoess@guentner.com](mailto:andreas.hoess@guentner.com)

In den letzten Jahren steigt die Verbreitung natürlicher Kältemittel aus Umweltschutzgründen stark an. Als Folge dessen, wird auch R744 (CO<sub>2</sub>) eine immer größere Rolle zu Teil.

Die Stoffeigenschaften von Kohlenstoffdioxid weisen grundsätzlich auf ein ausgezeichnetes Kältemittel hin. Es gibt jedoch ein Manko. Der kritische Punkt von CO<sub>2</sub> liegt bei nur 31,1 °C (73,8 bar). Gerade an heißen Sommertagen arbeitet die Kälteanlage also schnell im transkritischen Betrieb.

Operiert die Kälteanlage im Gaskühlerbetrieb ohne Hochdruckregelung, hat dies starke Einbußen der Kälteleistung und Effizienz zur Folge. Um diesen Effekt zu vermeiden kommen mehrere Möglichkeiten in Frage. Am sinnvollsten erscheint jedoch die Regelung des sogenannten optimalen Hochdrucks mit einem Ventil am Gaskühleraustritt. Die Regelung kann hierbei nach zwei unterschiedlichen Grundeinstellungen erfolgen.

Eine Option ist, einen höheren Druck für eine Steigerung der Kälteleistung zu wählen. Eine andere Variante wäre die Regelung auf den optimalen Hochdruck zur Maximierung der Kälteleistungszahl (EER) der Kälteanlage. Der Bediener hat somit eine noch bessere Möglichkeit, die Anlage nach seinen Bedürfnissen zu betreiben.

**Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>, Hochdruckregelung, Wärmetauscher, Gaskühler, transkritisch

S.17

## **Abwärmennutzung aus Kälteanlagen in ORC-Prozessen**

### **Fluidauswahl und Komponentenauslegung eines ORC Prozesses zur Nutzung von Niedertemperaturabwärme transkritischer Kälteanlagen**

**Florian Theede\*, Andrea Luke**

Universität Kassel, Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel, Deutschland

[theede@uni-kassel.de](mailto:theede@uni-kassel.de)

\* Korrespondenzautor

In Zuge der Reduzierung der Klimaerwärmung ist die energieeffizientere Gestaltung von Prozessen ein häufiges Ziel. Eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung ist die Nutzung von Abwärmeströmen z. B. in ORC-Prozessen. Verbunden mit der Begrenzung von Kältemitteln mit hohen GWPs, kommt es im Norden Europas zum vermehrten Einsatz transkritischer Kälteanlagen mit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als Kältemittel. Durch die hohen Drücke nach der Kompression entstehen hier neue Abwärmequellen auf einem Temperaturniveau von ca. 100 °C. Eine Alternative zur einfachen Rückkühlung oder der Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung stellt die Stromproduktion in einem ORC-Prozess da.

Die größten Herausforderungen zur Auslegung eines solchen ORC-Prozesses sind die Auswahl des Arbeitsfluides sowie die Auslegung der Wärmeübertrager. Zur Untersuchung dieser Parameter wurde ein Simulationsmodell entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells wurden verschiedene Kältemittel analysiert und gleichzeitig die Auswirkungen auf Prozess und anderen Komponenten untersucht. Die Resultate zeigen, dass unter vorher definierten Kriterien aus den untersuchten Kältemitteln (u.a. R134a, R152a, R245fa, R236ea, Butan, Propan und Pentan) R245fa die besten Ergebnisse aufzeigt. Ziel dieser Arbeit war es einen einfachen ORC-Prozess zur Wärmerückgewinnung zu konzipieren um die Effizienz der neuen CO<sub>2</sub>-Supermarktkältemaschinen zu steigern.

**Stichwörter:**

Organic Rankine Cycle (ORC), Simulationsmodell, Fluidauswahl, CO<sub>2</sub>-Kälteanlage

## **Einflussfaktoren für die optimale Auslegung von CO<sub>2</sub>-Boosterkälteanlagen in Supermarktanwendungen**

**Lukas Lohwasser**

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig  
Karl-Liebknecht-Straße 132, 04277 Leipzig

In Kooperation mit der kke GmbH wurden in einer Graduierungsarbeit Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz von Kälteanlagen im Lebensmitteleinzelhandel untersucht und beurteilt. Ein einfacher Algorithmus ermöglicht die energetische Bewertung von Bestandsanlagen und sondiert Problembereiche in der Energieeffizienz der Anlage.

Mit Blick auf die Entwicklung in diesem Marktsegment sind alle Betrachtungen auf die CO<sub>2</sub>-Boosterkälteanlage ausgerichtet.

Aus Bestandsanlagen, die mit diesem Algorithmus betrachtet wurden, konnten die Haupteinflussfaktoren auf die Energieeffizienz dieses Anlagentyps erfasst und bewertet werden. Als Ergebnis ging ein Excel-Tool hervor, welches eine Einschätzung der Energieeffizienz der Kälteanlage im Vergleich zum derzeitigen Standard zulässt. Den größten Nutzen erbringt es in der Diskussion zur Planung einer CO<sub>2</sub>-Boosterkälteanlage und dem Entscheidungsprozess über Maßnahmen zur Energieoptimierung.

