

**Deutsche Kälte-  
und Klimatagung**



**ONLINE VOM 19.-20.11.2020**

**Deutsche Kälte- und Klimatagung 2020**

**als**

**Online-Veranstaltung**

# **Kurzfassungen**

**Veranstalter:**

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

Theodorstraße 10

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)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Arbeitsabteilung I .....</b>	<b>5</b>
<b>Kryotechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung II.1 .....</b>	<b>18</b>
<b>Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung II.2 .....</b>	<b>35</b>
<b>Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik</b>	
<b>Arbeitsabteilung III .....</b>	<b>48</b>
<b>Kälteanwendung</b>	
<b>Arbeitsabteilung IV .....</b>	<b>59</b>
<b>Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung</b>	

## **Hinweis:**

\* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

I.01

## Technische Aspekte effizienter Kryokonservierung von Gewebe

O. Gryshkov<sup>1\*</sup>, V. Mutsenko<sup>1</sup>, J. Hagedorn<sup>1,2</sup>, S. Kabelac<sup>2</sup>, B. Glasmacher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, 30823 Garbsen, Deutschland

<sup>2</sup>Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover, 30823 Garbsen, Deutschland

Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Spenderorganen ist das Züchten von Gewebe – Tissue Engineering genannt – von großer Bedeutung. Das Tissue-Engineering wird zu einer treibenden Kraft bei der raschen Verbesserung der menschlichen Gesundheitsversorgung und der personalisierten Medizin. Daher müssen effiziente Ansätze für die Lagerung von Tissue-Engineering Konstrukten (TECs) entwickelt werden damit die Verfügbarkeit garantiert werden kann. Hier stellt die Kryokonservierung von funktionellen dreidimensionalen TECs einen unvermeidlichen Schritt für ihre klinische Anwendung und Testung neuartiger Therapeutika dar. Im Rahmen des Vortrages wird der aktuelle Stand der Technik in der effizienten Kryokonservierung von TECs dargestellt. Technische Aspekte der Kryokonservierung von Gewebe werden hinsichtlich ihres Einflusses auf die strukturellen Eigenschaften der TECs, Zusammensetzung von Gefrierschutzmitteln und ihrer Präinkubationszeit mit TECs erläutert. Ebenso wird das Einfrieren in unterschiedlichen Kryogefäßgeometrien auf die funktionellen Eigenschaften von TECs, wie z. B. mechanische Eigenschaften, Zellvitalität und -aktivität nach dem Auftauen dargestellt. Der Einfluss der oben genannten Parameter auf die Funktionalität der TECs spielt eine große Rolle und muss somit für die Entwicklung effizienter Einfrier-, Lagerungs- und Auftaumethoden von klinisch-relevanten Konstrukten erforscht werden, nur so kann die Verfügbarkeit der funktionsfähigen TECs für die klinische Anwendung gewährleistet werden.

I.02

## Roboterkomponenten für den kryogenen Arbeitsraum

### Entwicklung von Festkörpergelenken und monolithischen Greifersystemen für eine Parallelroboterstruktur

Philipp Jahn<sup>1\*</sup>, Annika Raatz<sup>2</sup>, Frank Ihmig<sup>3</sup>, Margit Biehl<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland  
[jahn@match.uni-hannover.de](mailto:jahn@match.uni-hannover.de)

<sup>2</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Montagetechnik, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Deutschland  
[raatz@match.uni-hannover.de](mailto:raatz@match.uni-hannover.de)

<sup>3</sup>Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), Joseph-von-Fraunhofer-Weg 1, 66280 Sulzbach, Deutschland  
[frank.ihmig@ibmt.fraunhofer.de](mailto:frank.ihmig@ibmt.fraunhofer.de)

<sup>4</sup>Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (IBMT), Joseph-von-Fraunhofer-Weg 1, 66280 Sulzbach, Deutschland  
[margit.biehl@ibmt.fraunhofer.de](mailto:margit.biehl@ibmt.fraunhofer.de)

In der heutigen Industrie ist die Automatisierung ein allgegenwärtiger Faktor, selbst in Nischenanwendungen wie der Kryokonservierung. Die manuelle Handhabung von biologischen oder toxischen Proben ist in Forschungseinrichtungen immer noch die Norm. Die Konservierung und Lagerung solcher Proben erfolgt in sogenannten Biobanken bei Temperaturen zwischen -130 °C und -196 °C. In heute üblichen Biobanken werden die Proben oft mit sperriger Schutzkleidung von Hand ein- und ausgelagert oder bewegt. Dies ist notwendig, da ein

erhebliches Verletzungsrisiko für den Arbeiter durch Kälteverbrennungen sowie eine Gefährdung der Probenintegrität durch Beschädigung und Erwärmung oder auch Temperaturwechsel besteht. Zur Überwindung dieser Probleme ist eine Vollautomatisierung bei Temperaturen unter  $-130\text{ °C}$  wünschenswert. In diesem Beitrag wird das von der DFG geförderte Projekt „Methoden zur Automatisierung von Handhabungsprozessen unter kryogenen Umgebungsbedingungen“ vorgestellt und erläutert. Dabei wird besonders auf die Teilaspekte der Greifertechnologie sowie die Optimierung der verwendeten Festkörpergelenke eingegangen.

**Stichwörter:**

Parallelroboter, Greifer, Festkörpergelenke, Automatisierung, Kryotechnik, Biobanken

I.03

## Developing a LN<sub>2</sub>-free shipping solution for cryopreserved samples

Peter Kilbride<sup>1\*</sup>, Julie Meneghel<sup>1</sup>, William Shingleton<sup>1</sup>, Stuart Milne<sup>1</sup>, Stephen Lamb<sup>1</sup>, John Morris<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Cytiva, Sovereign House, Cambridge, UK  
[peter.kilbride@cytiva.com](mailto:peter.kilbride@cytiva.com)

A cryopreservation cold-chain is typically categorised into three broad components – the cooling, storage, and subsequent thawing step. Each of these must be precisely controlled to ensure optimal cell recovery, however, one critical area which is sometimes overlooked is the transportation of cryopreserved samples at ultra-low temperatures. Modern cell therapies often require multiple shipments at ultra-low temperatures, from the initial cell extraction to a manufacturing site, to the ultra-low shipment of a final cell therapy to the clinic.

Ultralow temperature shipment presents interesting biological and engineering challenges. Samples must be kept below the glass transition temperature, around  $-120\text{ °C}$  during the whole shipment or damage to the therapy is likely. Physically transporting such shipping containers can be hazardous due to the low temperatures and liquid coolants typically used.

To overcome these challenges, we have engineered a shipping system using Stirling Engine cryocoolers to allow for ultra-low shipment of precious biological samples without the need for LN<sub>2</sub> or other liquid coolant. Practical difficulties such as keeping the system cool without a continual electricity supply and preventing LN<sub>2</sub> condensation from the atmosphere were resolved in order to give maximum protection to cell therapies during transportation.

In this presentation I will cover the difficulties overcome in developing a LN<sub>2</sub>-Free shipping solution by using Stirling Engines, as well as biological data while it is being used for shipping of cell therapies.

**Keywords:**

Cryopreservation, Tissue Freezing, Shipping, Stirling Engine, LN<sub>2</sub> Free, Cell Therapies

I.04

## Kryokonservierte Präzisionslungenschnitte (PCLS)

### Ein translationales Modell zur Untersuchung der Biologie der Lunge

Clemens Ruppert<sup>1\*</sup>, Oleksandr Gryshkov<sup>2</sup>, Vitalii Mutsenko<sup>2</sup>,  
Samira Schwindt<sup>1</sup>, Birgit Glasmacher<sup>2</sup>, Andreas Günther<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universities of Gießen & Marburg Lung Center (UGMLC), Medizinische Klinik 2,  
Justus-Liebig Universität Gießen, 35392 Gießen, Deutschland  
[Clemens.Ruppert@innere.med.uni-giessen.de](mailto:Clemens.Ruppert@innere.med.uni-giessen.de)

<sup>2</sup>Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, 30823 Garbsen, Deutschland

Präzisionslungenschnitte (*precision cut lung slices*, PLCS) haben sich in den letzten Jahren zu einem vielgenutzten translationalen Modell zur Untersuchung der Biologie der Lunge entwickelt. In einem natürlichen dreidimensionalen Zellverbund können in der *ex-vivo* Gewebekultur komplexe Zell-Zell-Interaktionen von humanem Lungengewebe (Lungenbiopsien und -resektate, Lungentransplantation) untersucht werden. PCLS von explantierten erkrankten humanen Lungen sind ein wertvolles Werkzeug zur Aufklärung der Pathogenese von Lungenerkrankungen und zur Entwicklung neuer Therapieansätze geworden.

Ein großer Nachteil von PCLS ist die Verfügbarkeit von humanem Operationsgut und die Notwendigkeit einer frischen Aufarbeitung mit anschließender Kultivierung. Vor diesem Hintergrund wäre eine Kryokonservierung und anschließende Lagerung in einer Biobank wünschenswert.

In einer ersten Annäherung an das Thema Kryokonservierung wurden humane und murine PCLS in BasalmEDIUM (DMEM/F-12 + 1 % Penicillin/Streptomycin + 10 % Serum) bzw. nach Zugabe der Kryoprotektiva Dimethylsulfoxid (DMSO) und Trehalose eingefroren. Mangels geeigneter Geräte erfolgte der Einfrierprozess nicht unter kontrollierten Bedingungen. Dabei erwies sich die Kombination aus 10 % Vol. % DMSO und 200mM Trehalose am effizientesten im Hinblick auf Überleben (LDH-Assay, Calcein/Ethidiumbromid Färbung) und metabolische Aktivität (MTT-Assay, Lyotracker Grün Färbung) nach Auftauen und Inkulturnahme der PCLS für bis zu 4 Tage.

In einem laufenden Pilotversuch unter Verwendung von PCLS aus Mauslungen werden am IMP in Hannover Einfrierprotokolle für die effiziente Kryokonservierung entwickelt. In dieser Studie werden die PCLS in Multiwell-Platten nach einer 10-minütigen Präinkubation mit unterschiedlichen Kryoprotektiva (10 Vol. %, DMSO, 10 Vol. % Ethylenglycol, 0.3M Saccharose und Vorbehandlung mit 0.1M Saccharose) anhand der „*in air*“-Methode mit einer Kühlrate von 1 K/Min eingefroren. Die Vitalität und Aktivität der Schnitte werden am Tag 1, 3 und 5 nach dem Auftauen mittels Lebend-Tod-Färbung und Alamar-Blau-Assay evaluiert. Die Ergebnisse dieser Studie werden auf der Tagung vorgetragen.

**Schlagwörter:**

Kryokonservierung, Präzisionslungenschnitte

I.05

## Welche Faktoren beeinflussen das Vorhandensein von Mikroorganismen in Kryotanks? – Ein Kulturunabhängiger Ansatz<sup>(1)</sup>

**F. Bajerski<sup>1\*</sup>, A. Bürger<sup>2</sup>, B. Glasmacher<sup>3</sup>, E. R. J. Keller<sup>4</sup>, K. Müller<sup>5</sup>, K. Mühldorfer<sup>5</sup>, M. Nagel<sup>4</sup>, H. Rüdell<sup>6</sup>, T. Müller<sup>7</sup>, J. Schenkel<sup>8</sup>, J. Overmann<sup>1,9</sup>**

<sup>1</sup>Leibniz Institute DSMZ-German Collection of Microorganisms and Cell Cultures, Braunschweig, Germany  
[Felizitas.Bajerski@dsMZ.de](mailto:Felizitas.Bajerski@dsMZ.de)

<sup>2</sup>Helmholtz Zentrum München, German Research Center for Environmental Health, Institute of Developmental Genetics, München, Germany

<sup>3</sup>Institute for Multiphase Processes, Leibniz University Hannover, Hannover, Germany

<sup>4</sup>Leibniz Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research (IPK), Seeland, OT Gatersleben, Germany

<sup>5</sup>Leibniz Institute for Zoo and Wildlife Research (Leibniz-IZW), Berlin, Germany

<sup>6</sup>Fraunhofer Institute for Molecular Biology and Applied Ecology IME, Schmallenberg, Germany

<sup>7</sup>BioKryo GmbH, Sulzbach, Germany

<sup>8</sup>German Cancer Research Centre, Heidelberg, Germany

<sup>9</sup>Microbiology, Braunschweig University of Technology, Braunschweig, Germany

Biobanken und Kryokonservierung gewinnen zunehmend an Bedeutung in den Lebenswissenschaften, insbesondere für medizinische und biotechnologische Anwendungen. Hohe Qualitäts- und Hygienestandards sind eine Grundvoraussetzung für eine sichere und saubere Lagerung biologischer Proben. Dennoch gibt es einzelne Studien über Bakterienisolate aus Kryotanks und Probenkontaminationen nach der Lagerung im Flüssigstickstoff, die darauf hinweisen, dass Organismen in den Kryotanks verbleiben können.

Um zu bewerten, welche Organismen in Kryotanks vorkommen, wurden systematisch verschiedene Phasen in Kryotanks von zehn Biobanken auf das Vorhandensein von Bakterien, Pilzen, pflanzlichen und menschlichen Zellen untersucht. Mit Hilfe modernster mikroskopischer und Kultivierungs-unabhängiger molekularer Methoden (gruppenspezifische Markergenamplifikation und Hochdurchsatzsequenzierung bakterieller ribosomaler Gene) konnten mögliche Eintrittswege identifiziert und geeignete Strategien für das Qualitätsmanagement abgeleitet werden.

Die Anzahl der Bakterienzellen und die Kopienzahlen der 16S-rRNA-Gene in der LN-Phase lagen im Bereich der Negativkontrollen und damit unter der ermittelten Nachweisgrenze von  $10^2$  Zellen pro ml und  $10^3$  Genkopien pro ml. In der Eisphase, die sich unter den Deckeln bildete oder sich am Boden ansammelte, trat eine geringe Anzahl von Bakterien von bis zu  $10^4$  Zellen pro ml und bis zu  $10^6$  Genkopien pro ml sowie DNA von *Mycoplasma* und Pilzen in nachweisbaren Mengen auf. Die Mikroorganismen können über die technische Umgebung in die Kryotanks gelangen (wie *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Methylobacterium*), außerdem wurden das menschliche Mikrobiom (*Bacteroides*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*) oder das gelagerte Material selbst (*Elizabethkingia*, *Janthibacterium*) als mögliche Quellen identifiziert. Basierend auf unseren Ergebnissen kann die geringe Bakterienbelastung von Eis- und Sedimentproben durch die Verringerung der Eisbildung und durch die Verwendung hermetisch verschlossener Probenbehälter weiter minimiert werden<sup>(1)</sup>.

1. Bajerski F, Bürger A, Glasmacher B, Keller ERJ, Müller K, Mühlendorfer K, et al. Factors determining microbial colonization of liquid nitrogen storage tanks used for archiving biological samples. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2020;104(1):131-44.

## I.06

# Kryotechnologien und Gesellschaft: Eine sozialwissenschaftliche Perspektive auf kryobiologische Anwendungen

Ruzana Liburkina

Institut für Soziologie, Goethe-Universität Frankfurt, Theodor-Adorno-Platz 6, 60323 Frankfurt/Main  
[Liburkina@soz.uni-frankfurt.de](mailto:Liburkina@soz.uni-frankfurt.de)

Im Mittelpunkt des an der GU Frankfurt angesiedelten ERC-Forschungsprojekts CRYOSOCIETIES steht die Frage, wie die Kryokonservierung von Zellen, Gewebe und DNA zeitliche und räumliche Konfigurationen verändert und unser Verständnis von Leben und Tod, Gesundheit und Krankheit, (Un-)Fruchtbarkeit und Nachhaltigkeit prägt. So rücken Kryotechnologien in den Mittelpunkt gesellschaftswissenschaftlicher Forschungsinteressen, weil durch sie grundlegende Normen und Wahrheitsansprüche verändert werden. Gleichzeitig steht ihre Anwendung als solche immer im Kontext konkreter Zukunftsvisionen, Forschungsnetzwerke und Allianzen zwischen industriellen Akteuren und politischen Entscheidungsträgern. Die Untersuchung von Kryokonservierungspraktiken ist somit auch wichtig, um zu verstehen, was heutige Innovationsregime ausmacht und wie ökonomische, politische und epistemische Agenden die Zukunft technologischer Eingriffe in Lebenszyklen prägen. Um diese Fragen zu beantworten, sind abstrakte theoretische Überlegungen ganz klar unzureichend. Vielmehr bedarf es einer intensiven empirischer Auseinandersetzung mit den Eigenlogiken der Anwendungsfelder von Kryotechnologien. Ferner ist ein enger Austausch mit den Menschen notwendig, die diese Technologien entwickeln, evaluieren, tagtäglich professionell nutzen oder als Lösung ihrer persönlichen Probleme mobilisieren. Diese Forschungsziele reihen sich ein in eine langjährige Tradition sozialwissenschaftlicher Forschung zu Wissensproduktion und Technologienutzung und -entwicklung. Ihre Verwirklichung wird mittels qualitativer Forschungsmethoden umgesetzt – von teilnehmenden Beobachtungen bis hin zu narrativen Interviews. Das Forschungsprojekt CRYOSOCIETIES gliedert sich in drei Teilprojekte, die dieses empirische Programm in jeweils unterschiedlichen europäischen Staaten und Anwendungsbereichen realisieren. Die Fallstudien

beschäftigen sich mit Nabelschnurblutlagerung, Eizellagerung und der Kryokonservierung von Keimzellen, Gewebeproben und DNA von gefährdeten oder ausgestorbenen Tierarten zwecks Erhalts der Artenvielfalt.

I.07a

## Validierung der Kryokonservierung von Tissue-Engineering-Konstrukten in Kryobeuteln

Sven-Alexander Barker<sup>1</sup>, Oleksandr Gryshkov<sup>2</sup>, Birgit Glasmacher<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover,  
An der Universität 1, Gebäude 8143, 30823 Garbsen, Deutschland  
[gryshkov@imp.uni-hannover.de](mailto:gryshkov@imp.uni-hannover.de), [glasmacher@imp.uni-hannover.de](mailto:glasmacher@imp.uni-hannover.de)

Über die vergangenen Jahre hat sich die Entwicklung und Analyse von Tissue-Engineering-Konstrukten (TEC) als eine mögliche Methode zur Erzeugung von Substituten für Gewebedefekte erwiesen. Um allerdings eine ausreichende Verfügbarkeit dieser TEC zu gewährleisten, müssen neue Konservierungsmethoden erschlossen werden. Bisher häufig angewendete Verfahren erlauben keine Langzeitlagerung. Die Kryokonservierung stellt eine mögliche Alternative dar. Allerdings weist auch dieses Verfahren einige herausfordernde Charakteristiken auf. Hierzu zählen beispielsweise Zellschädigungsmechanismen, aufgrund der kryogenen Bedingungen, sowie die Massen- und Wärmetransporte.

In dieser Studie wurde daher die Kryokonservierung in Kryobeuteln analysiert, da diese Methode eine Möglichkeit zur Verbesserung des Wärmetransportes darstellt. Dazu wurden die notwendigen PCL/PLA-Proben mithilfe des Elektrospleißverfahrens hergestellt und anschließend mit SaOS-2 Zellen besiedelt. Die Kryokonservierung erfolgte mit  $1 \text{ K min}^{-1}$  bis zu einer Temperatur von  $-100^\circ\text{C}$  und anschließender Überführung in flüssigen Stickstoff. Ferner wurde die kryoprotektive Wirkung von 10 % Dimethylsulfoxid, 10 % Ethylenglykol sowie deren Kombination mit 0,3 M Saccharose untersucht. Hierbei ergab sich für Ethylenglykol eine maximale Zellvitalität von 80 %. Dies stellt eine Steigerung um 3 % im Vergleich zu Dimethylsulfoxid dar. Durch den Vergleich mit Zellkulturtestplatten aus einer vorangegangenen Studie, ergab sich ebenfalls eine höhere Zellvitalität im Fall der Kryobeutel. Es kann daher vermutet werden, dass die Applikation von 10 % Ethylenglykol in Verbindung mit Kryobeutel eine positive Wirkung auf die Zellvitalität besitzt.

### Stichwörter:

Kryokonservierung, Kryobeutel, Tissue-Engineering-Konstrukte, Gefrierschutzadditive, Zellvitalität

I.07b

## Entwicklung eines Mikrocontroller-Systems zur Temperaturüberwachung im Tieftemperaturbereich einer Biobank

Norman Göke<sup>1</sup>, Tim Rittinghaus<sup>1</sup>, Sara Y. Nussbeck<sup>2</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1</sup>

Fehler! Textmarke nicht definiert.Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland  
[rittinghaus@imp.uni-hannover.de](mailto:rittinghaus@imp.uni-hannover.de),  
[sekretariat@imp.uni-hannover.de](mailto:sekretariat@imp.uni-hannover.de)

<sup>2</sup>Zentrale Biobank UMG, Universitätsmedizin Göttingen, Göttingen, Deutschland  
[sara.nussbeck@med.uni-goettingen.de](mailto:sara.nussbeck@med.uni-goettingen.de)

Diverse Biomaterialien, wie Blut, Tumorgewebe oder Urin, werden Patientinnen und Patienten für Diagnostikzwecke entnommen. Nach deren Einwilligungserklärung können diese Proben in einer Biobank für Forschungszwecke kryokonserviert und in einer Biobank eingelagert werden. Die Proben werden in Tiefkühltruhen, in Tanks in der Gasphase von flüssigem Stickstoff oder in automatisierten Lagerrobotern gelagert. Vom Zeitpunkt

der Einlagerung bis zur Nutzung kann es vorkommen, dass die Proben wiederholten Aufwärm- und Abkühlphasen ausgesetzt sind, wodurch die Probenqualität negativ in einem bisher unbekanntem Ausmaß negativ beeinflusst wird.

Im Rahmen dieser Masterarbeit sind in Zusammenarbeit mit der Zentralen Biobank der Universitätsmedizin Göttingen Temperaturverläufe von NaCl-Proben während des Einlagerungsprozesses im Lagerroboter „BioStore II“ aufgenommen worden. Dazu wurde ein Arduino-basiertes Messgerät mit integrierter Heizungsregelung entwickelt, welches durch die äußeren Abmessungen eines sogenannten SBS-Racks und mit Hilfe eines Barcodes vom Lagersystem als Proben-Rack erkannt wird. So konnte es mit anderen SBS-Racks auf einem Lagereinschub (einem Tray) eingelagert werden. Mit Hilfe von Thermoelementen wurde an verschiedenen Stellen in den SBS-Racks die Temperatur der Proben aufgezeichnet. Vor der Übergabe an den Lagerroboter sind die Proben auf -80 °C temperiert worden. Dies entspricht der Temperatur im Lagerbereich des BioStore II. Während des Scanvorgangs bei -20 °C Umgebungstemperatur im Lagerroboter sind gerade die außen befindlichen der 96 Proben der SBS-Racks zum Teil um mehr als 15 K erwärmt worden. Bei den auftretenden Temperaturen können beispielsweise Rekristallisationsprozesse zu einer Schädigung des Probenmaterials führen. Anhand der gewonnenen Ergebnisse können zukünftig Verhaltens- und Einlagerungsregeln abgeleitet und somit die Probenqualität nachhaltig verbessert werden. Des Weiteren können zur Beurteilung der Probenqualität Studien durchgeführt werden, die den Einfluss der aufgezeichneten Temperaturverläufe auf die Probenqualität bestimmen.

**Stichwörter:**

Biobank – Kryokonservierung – Temperaturmessung – Probenqualität – Lagerroboter – -80 °C System

I.08

## Konzeptstudie eines angetriebenen Kaltteils für Linear-Stirlingkühler

**Marcel Nussberger<sup>1\*</sup>, Ingo Rühlich<sup>1</sup>, Carsten Rosenhagen<sup>1</sup>, Markus Mai<sup>1</sup>, Robert Bertok<sup>1</sup>, Thomas Wiedmann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>AIM Infrarot-Module GmbH, Bereich Kühler, Theresienstraße 2, 74072 Heilbronn, Deutschland  
[marcel.nussberger@aim-ir.com](mailto:marcel.nussberger@aim-ir.com)

In den letzten 15 Jahren haben sich Technologie und Leistungsklassen für Stirling-Kleinkühler aufgrund von Weiterentwicklungen der IR-Sensoren deutlich verändert. Die Betriebstemperatur für MWIR-Sensoren (Mid-Wave Infrared) stieg mit Einführung der HOT-Technologie (High Operating Temperature) schrittweise von 77 K auf bis zu 160 K an. Um die veränderten Anforderungen erfüllen zu können, wurde mit der SX-Reihe eine neue Generation von kompakten Freikolben-Linear-Kühlern entwickelt. Vorrangige Ziele waren dabei die Verbesserungen von SWaP, C (Size, Weight and Power, Costs). Sowohl bei Kühlern der HOT-Technologie als auch bei Kühlern für tiefere Temperaturen bleibt die Leistungsaufnahme das zumeist entscheidende Kriterium.

Um die Leistungsaufnahme weiter zu senken wurde daher ein Kaltteil mit aktivem Antrieb konzipiert. Der aktive Antrieb ermöglicht die variable Einstellung von Regeneratorhub und der Phasenlage von Regenerator zu Kompressorkolben. Deren Einfluss auf die Gesamtleistungsaufnahme wird untersucht um mögliche Optionen zur Senkung der Leistungsaufnahme durch einen aktiven Antrieb zu bewerten. Der aktuelle Stand und die ersten Ergebnisse der Konzeptstudie werden vorgestellt.

**Stichwörter:**

Stirling-Kleinkühler, Cryocooler, IR detector, Einkolbenkühler

## Leckageprüfung von Kryokomponenten

Johannes Drache<sup>1\*</sup>, Nicola Maggini<sup>1</sup>, Pascal Erni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>WEKA-AG, Schürlistrasse 8, CH-8344, Schweiz  
[j.drache@weka-ag.ch](mailto:j.drache@weka-ag.ch), [cryo@weka-ag.ch](mailto:cryo@weka-ag.ch)

Komponenten im Hochvakuumbereich unterliegen besonderen Dichtigkeitsanforderungen. Die Erfüllung dieser Anforderungen muss bei der industriellen Fertigung von Armaturen prozesssicher nachgewiesen werden.

Am Beispiel der Serienfertigung von kryogenen Prozessventilen werden die Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Leckageprüfung aufgezeigt. Im Speziellen wird auf die Prüfgasverfahren nach ISO 20485 mit Helium eingegangen. Anhand von Beispielen wird erläutert, wie mit Hilfe spezieller Prüfvorrichtungen und durch Automatisierung die Testsensitivität und die Prozesssicherheit gesteigert werden können.

Zudem werden Beispiele vorgestellt, bei denen Dichtheitsprüfungen an Komponenten bei tiefen Temperaturen mit hoher Präzision durchgeführt wurden.

**Stichwörter:**

Leckageprüfung, kryogene Armaturen, Ventile, ISO 20485, industrielle Fertigung, Automatisierung

## Effizienzsteigerung von Kryoanlagen durch Einsatz von Turbinen nach dem neuesten Stand der Technik

Robert Herrmann<sup>1\*</sup>, David Curd<sup>1</sup>, Oliver Amstutz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Linde Kryotechnik AG, Machinery Department, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz  
[robert.herrmann@linde-kryotechnik.ch](mailto:robert.herrmann@linde-kryotechnik.ch); [david.curd@linde-kryotechnik.ch](mailto:david.curd@linde-kryotechnik.ch);  
[oliver.amstutz@linde-kryotechnik.ch](mailto:oliver.amstutz@linde-kryotechnik.ch)

Eine Effizienzsteigerung existierender kryotechnischer Anlagen ist meist nur schwer möglich. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass eine Erweiterung oder Austausch von Komponenten immer einen Eingriff in eine bestehende Anlageninfrastruktur mit vorgegebenen Platzverhältnissen und Zugänglichkeiten bedeutet. Des Weiteren sollen thermodynamische und strömungsmechanische Parameter durch einen Eingriff nicht negativ beeinflusst werden.

Ein effektiver Ansatz für die Effizienz- und somit Leistungssteigerung ist der Einsatz von modernen Turboexpandern.

Bei dem hier vorgestellten neuartigen Konzept wird mit Hilfe einer Adapterlösung bestehende mit aktueller Turbinentechnologie kombiniert. Die Modifikation der Turbinen wird ohne Eingriff in den inneren Aufbau der Coldbox ermöglicht. Die Technologie kann unabhängig von der Art der Anwendung (Verflüssiger oder Kälteanlage) als auch dem zu verwendeten Betriebsmedium (Helium oder Wasserstoff) eingesetzt werden.

**Stichwörter:**

Kryoanlagen, kryotechnische Kälteanlagen, Heliumverflüssiger, Turbinen, Turboexpander, Coldbox

## Anforderungen an das Kühlsystem für lange HTSL-Leistungskabel

Alexander Alekseev<sup>1\*</sup>, Steffen Grohmann<sup>2</sup>, Lutz Decker<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Linde, Linde Technology, Transformational R&D, München  
[alexander.alekseev@linde.com](mailto:alexander.alekseev@linde.com)

<sup>2</sup>KIT Karlsruhe, ITTK, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

<sup>3</sup>Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstr. 5, 8422 Pfungen/Schweiz

Ein supraleitendes Kabel muss auf der ganzen Länge gekühlt werden, beim entsprechenden Kühlsystem handelt es sich deswegen um ein verteiltes System. Morphologisch kann dieses in zwei Untersysteme aufgeteilt werden: Kälteerzeugung und Kälteverteilung.

Mehrfach erprobt sind Kälteverteilungssysteme mit unterkühltem Flüssigstickstoff als Kälte Träger, welcher in einem geschlossenen Kreislauf angetrieben von einer oder von mehreren Pumpen zirkuliert. Die Rückleitung kann integriert in die Hauptleitung oder als eine separate Leitung ausgeführt werden. Auch eine Pendelleitung mit zwei größeren Speicherbehältern an beiden Enden, abwechselnd in eine oder in andere Richtung durchströmt, wird manchmal diskutiert. Alle diese Varianten haben Ihre Vor- und Nachteile. Ein solches System kann eine bestimmte Kabellänge mit Kälte versorgen. Die maximale Länge ist vom Druckverlust und vom Wärmeeinfall (von innen und außen) abhängig, die vor allem vom Design des Kabelkryostaten vorgegeben werden, sowie vom Stickstoff-Durchfluss bei gegebenem Unterkühlungsgrad bestimmt. In der praktischen Realisierung kommen weitere Limitierungen hinzu, wie z. B. bauliche bzw. geografische Gegebenheiten vor Ort. Bei längeren Kabelstrecken werden deswegen mehrere seriell geschaltete gekoppelte Flüssigstickstoff-Kreisläufe gebraucht.

Die Rückkühlung des zirkulierenden flüssigen Stickstoffs (in jedem einzelnen Flüssigstickstoffkreislauf) erfolgt entweder mit Hilfe geschlossener oder offener Kühlsysteme. Die Wirtschaftlichkeit der Option mit offenem Kühlsystem ist inzwischen gut bekannt, die Wirtschaftlichkeit der Option mit geschlossenem Kühlsystem ist dagegen noch nicht eindeutig geklärt. Bekannt ist nur, dass diese eine bessere Energieeffizienz aufweist und dass die Kosten etwas höher sind als die des offenen Systems. Die Anforderungen an die HTS-Kabel-Kühltechnik sind grundsätzlich ebenfalls bekannt: es wird eine mittlere Kälteleistung von 10-30 kW bei Kühltemperaturen unterhalb 77 K benötigt. Die Kühlanlage muss wartungsarm und extrem zuverlässig funktionieren. Niedrige Beschaffungskosten sowie niedrige Betriebskosten (hohe Effizienz) werden ebenfalls erwartet. Auch geringer Platzbedarf ist ein wichtiger Faktor. Die ersten zwei Anforderungen sind relativ neu, eine Kälteleistung auf diesem Temperaturniveau wurde bisher für keine andere Anwendung gebraucht. Entsprechend wurden Kühlsysteme dieser Leistungsklasse erst seit etwa 15 Jahren gezielt entwickelt, die Anzahl von verfügbaren Optionen ist noch überschaubar.

Die Anforderungen an das Kühlsystem sowie die verfügbaren Optionen werden in diesem Vortrag diskutiert.

## Supraleitende Stromkabel: Optimierung der Kühltechnik

F. Herzog<sup>1</sup>, T. Kutz<sup>1</sup>

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

Hochtemperatur-Supraleiter zum Aufbau von Stromversorgungskabeln bestehen aus keramischen Materialien, die bei einer Temperatur in der Nähe des Siedepunktes von flüssigem Stickstoff (-196°C) ihre kritische Temperatur (Sprungtemperatur) erreichen und dann ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren. Dadurch ist es möglich, elektrischen Strom verlustfrei zu transportieren, wobei die Stromtragfähigkeit der Kabel exponentiell steigt, je weiter sich die Kühltemperatur von der kritischen Temperatur entfernt. Der Ersparung

der ohmschen Verluste beim Stromtransport steht der energetische Aufwand für die Kühlung gegenüber. Dieser hängt neben der erforderlichen Kühlleistung auch von der Kühltemperatur, vom Kühlkonzept und von der Art der Kälteerzeugung ab.

Die supraleitenden Stromleiter werden in Kabelkryostate integriert, durch die unterkühlter Flüssigstickstoff zirkuliert ohne zu verdampfen. So kann die durch den Kryostat einfallende Wärme abgeführt werden. Die Rückkühlung des zirkulierenden Flüssigstickstoffs erfolgt idealerweise in einem Unterkühler, in welchem zur Kälteerzeugung flüssiger Stickstoff im Unterdruck verdampft. Der Verdampfungsdruck lässt sich dabei auf bis zu 150 mbar absenken, die Verdampfungstemperatur liegt dann bei  $-209^{\circ}\text{C}$ . Tiefere Temperaturen sind im praktischen Betrieb nicht erreichbar, weil bei  $-210^{\circ}\text{C}$  der Stickstoff gefriert.

Alternativ oder ergänzend zur „offenen“ Kühlung durch verdampfenden Stickstoff lassen sich auch „geschlossene“ Kühlsysteme konzipieren, bei denen die Kälteerzeugung mit einer Kältemaschine erfolgt. Es ist auch denkbar, den bei „offener“ Kühlung verdampfenden Stickstoff direkt wieder zu verflüssigen, so entsteht eine „quasi geschlossene“ Kühlung.

Neben dem Wärmeeinfall durch den Kabelkryostaten und seine Endverschlüsse sind insbesondere bei längeren Kabelstrecken auch die hydraulischen Verluste durch den zirkulierenden Flüssigstickstoff und den damit verbundenen Wärmeeintrag der Zirkulationspumpen von Bedeutung. Die hierdurch erforderliche zusätzliche Kälteleistung lässt sich sehr stark durch den Einbau von Zwischenkühlstationen beeinflussen. Weiterhin ist es wichtig, neben den Kühltemperaturen am Ein- und Austritt des Kabelkryostaten auch die Temperatur-Hochpunkte auf der Strecke zu betrachten. Diese lassen sich durch eine optimale Konzipierung von Kühltechnik und Wärmeübertragung minimieren und unnötige Einschränkungen bei der Stromtragfähigkeit werden vermieden.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Supraleiter, Unterkühler, kryogene Kühlung, Kabelkryostat

**I.13**

## **Produktentwicklung und Bau einer kryogenen Argonanlage**

**P. Dalakov\*, Ch. Jaspers, C. Ziege**

Cryotec Anlagenbau GmbH, Dresdner Str. 76, 04808 Wurzen

[petar.dalakov@cryotec.de](mailto:petar.dalakov@cryotec.de)

Gegenstand des Beitrags ist die Entwicklung einer kryogenen Argonanlage. Ziel ist die Fertigung dieser Anlage komplett „made in Germany“ in Wurzen bei Cryotec. Berichtet wird über Auslegung, Simulation und geplante Effizienz der Anlage.

**I.14**

## **Installationsmöglichkeiten flexibler, kryogener Rohrleitungen**

**Jürgen Essler<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>BRUGG Rohrsysteme GmbH, Cryogenic Systems, Adolf-Oesterheld-Straße 31, 31515 Wunstorf, Deutschland

[cryo@brugg.com](mailto:cryo@brugg.com)

Nach erfolgter prozesstechnischer Auslegung und Auswahl einer für die Anwendung geeigneten kryogenen Rohrleitung ist es notwendig den exakten Leitungsverlauf und die Installation zu planen. In der Kryotechnik geschieht diese Installation häufig oberirdisch auf einer Trasse, wobei verschiedene Aspekte wie z. B. die Haltungen, notwendige Festpunkte, Abstand der Halterungen, das Passieren von Sicherheitsbereichen etc. für eine zuverlässige Installation berücksichtigt werden müssen. Eine Möglichkeit der unterirdischen Verlegung direkt im Sandbett oder gar eine Installation mittels einer Spülbohrung werden häufig nicht in Betracht gezogen.

Das Portfolio für flexible Transferleitungen für kryogene Fluide der BRUGG Rohrsysteme GmbH erstreckt sich von LHe über LH2, LN2, LOX bis LNG. Der Fokus der vorliegenden Arbeit bezieht sich nicht explizit auf das Design der Rohrleitung zum effizienten Transport verflüssigter Gase, sondern auf die oft vernachlässigten Aspekte der Installation am Ort der Anwendung.

In der vorliegenden Arbeit werden unabhängig vom kryogenen Fluid die wichtigsten Aspekte oberirdischer und unterirdischer Installation vakuum- und schaumisolierter flexibler Rohrleitungen aufgezeigt und anhand von Beispielen technisch und wirtschaftlich gegenübergestellt.

**Stichwörter:**

Kryogene Rohrleitung, Installation, Verlegung

I.15

## **Schutz vor verdeckter Korrosion [C.U.I.] in kryogenen, vorisolierten Rohrleitungen**

**Dr.-Ing. Thadeus Hoss\***

Jabitherm Rohrsysteme AG, Brügger Straße 6, D-53842 Troisdorf  
[th@jabitherm.com](mailto:th@jabitherm.com)

Unternehmen aus allen Bereichen der Industrie, nehmen seit Jahren die Kosten für Engineering und die Errichtung oder Erweiterung von Anlagen sowie zunehmend die Unterhaltungsausgaben in ihren Fokus.

Trotz wiederkehrender Inspektionen an Rohrleitungen vor Ort, steigen die Anzahl der Leckagen und damit die Zahl der Produktionsausfälle und Stillstände ständig. Mit erheblichen Folgekosten.

Ursache: „C.U.I.“. Anglizismus für werkstoffunabhängige Korrosion unterhalb der Isolierung auf der Mediumrohr-Oberfläche.

Die Ursachen hierfür sind vielfältig.

Undichter Außenmantel, Hohlräume innerhalb der Wärmedämmung und Spalte zwischen dem Dämmwerkstoff und der Mediumrohr-Oberfläche (Kondensatbildung).

Anhand vorisolierter Rohre für den Betrieb in kalten und tiefkalten (kryogenen) Prozessen wird die Entwicklung des Rohrdesigns und die es beeinflussenden, maßgeblichen Parameter dargestellt.

Weiterhin die Maßnahmen, die bei vorisolierten und mit Schaum gedämmten Rohren aktiv die Bildung der Korrosion in und unter den Isolierschichten am Beispiel der Rohre in einem LNG-Terminal verhindern.

**Stichwörter:**

vorisoliertes Rohr, Schaumisolierung, C.U.I., Korrosionsschutz, Brandschutz

I.16

## **Kalte Wasserstoffisotopologe am Tritiumlabor Karlsruhe**

**Robin Größle\*, Bennet Krasch, Alexander Kraus, Florian Priester, Marco Röllig, Stefan Welte**

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Kernphysik, Tritiumlabor Karlsruhe, Karlsruhe, Deutschland  
[\\*robin.groessle@kit.edu](mailto:*robin.groessle@kit.edu)

Die Forschungsschwerpunkte am Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) liegen auf der Neutrinoforschung im Rahmen des Karlsruhe Tritium Neutrino Experiments (KATRIN) und der internationalen Fusionsforschung. Forschungsbedarf besteht jeweils von der Grundlagenforschung, wie der Untersuchung von molekularen Reaktionskinetiken, bis hin zur Entwicklung von Komponenten und Anlagen im

größtechnischen Maßstab zur Tritiumprozessierung, wie der Isotopentrennung durch kryogene Destillation. Ein Schlüsselbaustein ist hierbei die Entwicklung von maßgeschneiderten und hochspezialisierten Analytiksystemen für die zum Teil extremen Prozessbedingungen. Ein Beispiel für die Bandbreite an Forschung und Entwicklung sind die kalten Wasserstoffisotopologe, welche aus Sicht des TLK bisher in zwei Bereichen von Bedeutung sind. Zum einen verwendet KATRIN eine gasförmige fensterlose Tritiumquelle bei 30 K mit einem nominalen Durchsatz von 40 g Tritium pro Tag. Zum anderen entwickelt das TLK die kryogene Destillation zur Isotopentrennung. Eingesetzt werden soll diese im TLK als Teil der Wasserdetriitierung und in Fusionskraftwerken als Isotopentrennsystem, mit erwarteten Durchsätzen im Bereich von einigen 10 kg pro Tag.

In diesem Beitrag wird ein Überblick über Entwicklungen der Tritium- und Wasserstoffanalytik mit dem Fokus auf kalte Wasserstoffisotopologe gegeben. Es steht die Inlinemessung der molekularen Zusammensetzung und die direkte Messung der Ortho-Para-Verhältnisse über IR- und Ramanspektroskopie im Fokus. Die Fähigkeiten der Ramanspektroskopie werden an einem Testaufbau zur Untersuchung der Kinetik der katalytisch getriebenen Ortho-Para-Umwandlung demonstriert. Im vergangenen Jahr konnte erstmals mit Hilfe der Ramanspektroskopie an der kryogenen Destillationskolonne die Trennung von Ortho- und Para-Deuterium untersucht werden. Dies ermöglicht neue Möglichkeiten bei der Erprobung von Kolonnengeometrien und Packungsmaterialien.

Ein weiterer wichtiger Gegenstand aktueller Forschung ist die Entwicklung der betainduzierten Röntgenspektroskopie hin zu einem Onlinesensor, mit dem kleinste Spuren von Tritium in Deuterium nachgewiesen werden können. Ein zukünftiges Anwendungsgebiet dafür sind beispielsweise Quellen für kalte und ultrakalte Neutronen, bei denen Tritium einen parasitären Effekt besitzt.

**Schlüsselwörter:**

Wasserstoff, Ortho-Para-Verhältnis, Parawasserstoff, Orthowasserstoff, Raman-Spektroskopie, IR-Spektroskopie, Neutronenmoderator, Kryogene Destillation, flüssiger Wasserstoff, Tritium

I.17

## **Bestimmung des Ortho-Para-Verhältnisses von Wasserstoff mittels Schallgeschwindigkeitsmessung**

**Eisenhut S<sup>1\*</sup>, Haberstroh Ch<sup>1</sup>, Klaus M<sup>1</sup>, Schwab A<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>TU Dresden (Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik), Dresden, Deutschland  
[sebastian.eisenhut@tu-dresden.de](mailto:sebastian.eisenhut@tu-dresden.de)

<sup>2</sup>Forschungszentrum Jülich (JCNS-2), Jülich, Deutschland

Molekularer Wasserstoff tritt stets in Form einer Mischung der beiden Allotrope Ortho- und Parawasserstoff auf. Die beiden Spinisomere unterscheiden sich hinsichtlich ihrer technisch relevanten Eigenschaften teils sehr deutlich voneinander. Zu nennen wären hier insbesondere die spezifische Wärmekapazität (und folglich die Enthalpie) sowie der Wirkungsquerschnitt bei der Neutronenstreuung. Für einige Anwendungen sind sehr genaue Echtzeit-Messungen des Ortho-Para-Verhältnisses von großem Wert. So können beispielsweise bei kalten Neutronenmoderatoren auf Basis von flüssigem Wasserstoff kleine Abweichungen des Ortho-Para-Verhältnisses zu erheblichen Einbußen der Neutronenausbeute führen. Für die exakte Bestimmung der Aktivität von Ortho-Para-Katalysatoren und der Ableitung von Gesetzmäßigkeiten zur Reaktionsordnung sind hohe Messgenauigkeiten ebenfalls von Bedeutung. Häufig erfolgt die Bestimmung des Ortho-Para-Verhältnisses auf Basis von Messungen der thermischen Leitfähigkeit oder des Raman-Spektrums einer Probe. An der TU Dresden wurden in den vergangenen zwei Jahren jedoch umfangreiche Erfahrungen mit einem alternativen Ansatz gesammelt, der auf der Messung der Schallgeschwindigkeit mittels des binären Gasanalysators BGA244 von Stanford Research Systems basiert. Tests haben gezeigt, dass das Gerät zuverlässig zur Bestimmung des Ortho-Para-Verhältnisses in Echtzeit eingesetzt werden kann, sofern bestimmte Kriterien hinsichtlich Temperaturstabilität und Reinheit des Messgases erfüllt sind. Zur Steigerung der Sensitivität des Verfahrens wurde zudem eine Miniatur-Klimakammer gebaut, die es ermöglicht, das Gerät über lange Zeiträume sehr stabil bei

reduzierten Temperaturen von bis zu  $-30^{\circ}\text{C}$  zu betreiben. Auf diese Weise konnte die Messgenauigkeit noch einmal deutlich erhöht werden.

**Keywords:**

Wasserstoff, Ortho-Para-Verhältnis, Parawasserstoff, Orthowasserstoff, Schallgeschwindigkeit, Neutronenmoderator

I.18

## Entwicklung eines Neutronenmoderators mit Methan bei $T < 10\text{ K}$

A. Schwab<sup>1\*</sup>, P. Zakalek<sup>1</sup>, U. Rücker<sup>1</sup>, J. Li<sup>1</sup>, Y. Beßler<sup>2</sup>, T. Gutberlet<sup>1</sup>, J. Baggemann<sup>1</sup>, K. Lieutenant<sup>1</sup>, J. Voigt<sup>1</sup>, E. Mauerhofer<sup>1</sup>, S. Eisenhut<sup>3</sup>, C. Haberstroh<sup>3</sup>, G. Natour<sup>2</sup>, T. Brückel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jülich Centre for Neutron Science JCNS, Forschungszentrum Jülich

<sup>2</sup>ZEA-1 Engineering und Technologie, Forschungszentrum Jülich

<sup>3</sup>Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, TU Dresden

Im Rahmen des Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS)-Projektes werden sogenannte „kalte“ Neutronenmoderatoren entwickelt und getestet, mit deren Hilfe freie Neutronen durch Kollisionen mit den Moderatoratomen auf kryogene Temperaturen abgebremst werden. Ein Ansatz, die Menge kalter Neutronen am jeweiligen Neutroneninstrument und damit an der Probe zu erhöhen, besteht in der Absenkung der Moderatortemperatur unter die häufig hier verwandte Temperatur von 20 K. In diesem Temperaturbereich ist festes Methan in Phase II aufgrund seiner niedrigliegenden Energielevel ein vielversprechendes Material. Diese ermöglichen auch bei geringen Neutronenenergien noch Energieüberträge zwischen den Neutronen und den Moderatoratomen.

Das Methan wird in Form eines Batch-Prozesses in einen Moderatorbehälter mit einem Volumen von ca. 30 bis 110 ml gefüllt, in dem es gefroren und auf Betriebstemperatur gebracht wird. Die Aufrechterhaltung einer Betriebstemperatur unterhalb von 10 K, vor allem in Anbetracht der Wärmelast durch nukleare Prozesse und der geringen Wärmeleitfähigkeit von festem Methan, kann nur durch geeignete ingenieur- bzw. kryotechnische Maßnahmen realisiert werden. Weiterhin sind strahlungsinduzierte Schäden und strukturelle Veränderungen bei der Nutzung festen Methans mit ionisierender Strahlung zu beachten und geeignete Maßnahmen für eine sichere Nutzung des Moderatormaterials durchzuführen.

Basierend auf diesen Betrachtungen wurde ein Preliminary Design Report (PDR) erstellt, dessen Ergebnisse vorgestellt werden und der die Grundlage für die konstruktive Auslegung des Systems bildet. Die Konstruktion eines entsprechenden kalten Methan-Moderatorsystems soll Ende des kommenden Jahres als Teil eines Prototyps an der *Big Karl*-Neutronenquelle am Zyklotron *JULIC* des Forschungszentrums Jülich getestet werden.

I.19

## Wärmelastbudgetierung eines kommerziellen, kleinkühlerbasierten Kryostaten für einen supraleitenden Induktionsheizer

M.Sc. Lennard Busch\*, Dr.-Ing. Ralph Lietzow, Dr.-Ing. Holger Neumann

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Physik (ITEP)  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

[lennard.busch@kit.edu](mailto:lennard.busch@kit.edu), [ralph.lietzow@kit.edu](mailto:ralph.lietzow@kit.edu), [holger.neumann@kit.edu](mailto:holger.neumann@kit.edu)

Im Rahmen eines BMWI-Projektes soll in einer Zusammenarbeit des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), der Theva GmbH und der Firma Bültmann GmbH ein supraleitender Magnetheizer aufgebaut werden. Die

Firma Theva GmbH designt und liefert den Magneten aus Hochtemperatursupraleiter (HTS), der vom KIT in einen Kryostaten eingebaut und mit einem Kleinkühler bei ca. 25 K betreiben werden soll. Der Kryostat wird nach erfolgreichem Test bei der Bültmann GmbH zum Betrieb eines Magnetheizers dienen und in industrieller Umgebung getestet. Die Herausforderung liegt im kryotechnischen Design, das möglichst günstig und robust sein muss, damit der Magnetheizer auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig ist.

In diesem Beitrag wird das konzeptionelle Design, vor allem im Hinblick auf das Wärmelastmanagement des Kryosystems, vorgestellt. Da die Kälteleistung zweistufiger Kleinkühler begrenzt ist, muss das Design des Komplettsystems darauf abzielen, die abgeschätzten Wärmelasten entsprechend auf die beiden Stufen des Kleinkühlers zu verteilen. Die Gesamtwärmelast auf beiden Kleinkühlerstufen setzt sich aus den Wärmelasten aufgrund von Wärmeleitung der angeschlossenen Komponenten, Joulescher Wärme und der Wärmestrahlung zusammen. Die Abschätzungsmethoden und deren Resultate werden kurz präsentiert und bewertet. Der Einfluss der Abschätzungen auf das Kryostatdesign im Rahmen der thermischen Optimierung wird im Einzelnen gezeigt. Die Eignung der vorgestellten Annäherungen als Entscheidungsbasis für die Auswahl eines geeigneten Kleinkühlermodells wird anhand der Auswahlkriterien diskutiert. Auf der erstellten Basis werden schließlich geeignete Kleinkühlermodelle vorgestellt.

**Stichwörter:**

Kryotechnik, Kryostat, Supraleitung, Wärmelast, Kleinkühler

II.1.01

## Thermodynamische Betrachtung von transkritischen R744-Gaskühlern

Eric Gerstenberger

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund, Germany

[Eric.Gerstenberger@thermofin.de](mailto:Eric.Gerstenberger@thermofin.de)

Im Zusammenhang mit der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 findet das natürliche Kältemittel R744 vermehrt Einsätze im Bereich der Industrie- sowie Gewerbekälte. Aufgrund der Einstufung als A1-Kältemittel ist es besonders in der Gewerbekälte gefragt.

Kohlenstoffdioxid hat eine verhältnismäßig geringe kritische Temperatur von ca. 31 °C. Ab Lufttemperaturen von ca. 20...25 °C findet daher ein transkritischer Betrieb statt. Diese Betriebsweise ist zum einen ineffizienter gegenüber der subkritischen Betriebsweise. Außerdem werden besondere Anforderungen an die Komponenten gestellt. Einerseits werden geringe Temperaturdifferenzen zwischen Lufteintritts- sowie Gaskühleraustrittstemperatur gefordert. Weiterhin ist ein hoher Wärmedurchgang nötig, um ein wirtschaftliches Produkt zu erhalten. Aufgrund der sich stark veränderten Stoffdaten während der Wärmeabgabe, kann das transkritische Gas nicht als Einphasenströmung angesehen werden. Die Berechnung und Auslegung dieser Wärmeübertrager stellt daher eine Herausforderung dar.

Ziel soll es sein, die Besonderheiten darzustellen und auf welche Weise damit umgegangen werden muss, um eine zuverlässige Wärmeübergabe mit einem transkritischen Gaskühler zu gewährleisten. Dafür werden messtechnische Untersuchungen und Simulationen zur Verdeutlichung verwendet.

II.1.02

## Analyse des Reifwachstums in gekühlten Kanälen

Patric Figueiredo<sup>1</sup>, Jonas Klingebiel<sup>2</sup>, Markus Nürnberg<sup>2</sup>, Dirk Müller<sup>2</sup>, Reinhold Kneer<sup>1</sup>,  
Wilko Rohlf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung,  
Augustinerbach 6, 52056 Aachen, Deutschland  
[rohlf@wsa.rwth-aachen.de](mailto:rohlf@wsa.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup>RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimetechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de)

Reif wächst auf Oberflächen unterhalb des Taupunktes der umgebenden Luft und unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser. Der Reif wirkt wie eine thermische Isolierschicht und erhöht den Strömungswiderstand, wodurch der Wärmeübergang zwischen Luftstrom und Wand deutlich gehemmt wird.

Diese Studie präsentiert ein reduziertes Modell des Wärme- und Stofftransports während der Reifbildung in einer Kanalströmung. Die Modellierung der Reifbildung auf einer gekühlten Wand, die sich in einem Luftstrom befindet, erfordert in den Simulationen eine Auflösung sowohl des Luftstroms als auch der Reifschicht. Aufgrund vieler unbekannter Parameter, wie z. B. der dichteabhängigen Wärmeleitfähigkeit oder des Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf in der Reifschicht, ist eine Kalibrierung des Modells mittels Literaturdaten notwendig.

Ergebnisse werden für die Reifbildung und für das Verhalten des Reifschichtwachstums entlang der Luftströmung präsentiert und geben Aufschluss über den Einfluss der signifikanten Reifbildungsparameter. Die Studie liefert ebenfalls Erkenntnisse bei instationären Bedingungen der Einlasslufteigenschaften (Temperatur, Feuchte, und Geschwindigkeit) und lässt sich zur Vorhersage von Reifbildungsprozessen verwenden.

**Stichwörter:**

Bereifung, Feuchte Luft, Modellbildung, Simulation

II.1.03

## **Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Plattenverdampfern bei niedriger Überhitzung**

**Lennart Böse<sup>1</sup>, Fabian Arnold<sup>1</sup>, Markus Shigailow<sup>1</sup>, Frank Opferkuch<sup>1</sup>, Michael Wensing<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm,  
Arbeitsgruppe für Dezentrale Energiewandlung und -speicherung am Nuremberg Campus of Technology  
[lennart.boese@th-nuernberg.de](mailto:lennart.boese@th-nuernberg.de)

<sup>2</sup>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT)

Kühlaufgaben in der Industrie oder in mobilen Anwendungen (MAC) sind häufig durch Lastverläufe mit hoher Dynamik geprägt. Die geforderte kurze Ansprechzeit bei der Bereitstellung von Kälte kann mit Plattenwärmeübertragern als Kältemittelverdampfer bei niedrigen Stückkosten und hoher volumetrischer Kälteleistung erreicht werden. Wenn zudem durch niedrigere Überhitzung ein Großteil der Verdampferlänge für zweiphasigen Wärmeübergang mit hohem Wärmeübergangskoeffizienten genutzt werden kann, dann können FKW-Füllmengen noch weiter reduziert werden.

Hierdurch steigt aber insbesondere bei schnellen Lastwechseln die Gefahr von Flüssigkeitsanteilen am Verdampferaustritt und damit von Kompressorschäden durch Tröpfenschlag oder Auswaschungen des Kältemittelöls. Schutzmaßnahmen wie Kältemittelsammler am Verdampferaustritt sind mit zusätzlichen Füllmengen und Kosten verbunden, weshalb sich ein regelungstechnischer Ansatz anbietet.

Während zur Regelung von stationären Betriebspunkten auf bekannte Ansätze wie z. B. Minimum-Stable-Superheat (MMS) zurückgegriffen werden kann, gibt es bei der Überhitzungsregelung von Kompressionskältemaschinen unter transienten Betriebszuständen noch weiteren Forschungsbedarf.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse aus Untersuchungen zur thermohydraulischen Stabilität von Plattenverdampfern bei niedriger Überhitzung vorgestellt. Dazu werden die besonderen Anforderungen bei der Modellierung des zweiphasigen Wärmeübergangs diskutiert sowie Ergebnisse aus der dynamischen Simulation bei transientem Betrieb gezeigt. Zur Modellbildung und Validierung wurde im Rahmen dieser Arbeiten eine kältetechnische Versuchsanlage mit einer optischen Versuchsstrecke und einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgebaut und betrieben. Durch systematische Variation von möglichen Einflussgrößen wie Expansionsventilstellung oder sekundärseitigem Massenstrom mit unterschiedlichen Amplituden und Gradienten können Stabilitätsgrenzen identifiziert werden, bei deren Überschreitung ein sich nicht zurückbildender Einbruch der Überhitzung und das Auftreten von Gas-Flüssigkeitsgemisch am Verdampferaustritt zu beobachten sind. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden quantitativ analysiert und mit qualitativen Ergebnissen der bildgebenden Verfahren abgeglichen sowie regelungstechnische Lösungen wie der Einsatz von Gain Scheduling bei der transienten Überhitzungsregelung diskutiert.

II.1.04

## In-situ-Auslegungsmethode für Kapillaren

**Bernhard Vetsch<sup>\*</sup>1, Tobias Menzi<sup>1</sup>, Slawomir Rysiewicz<sup>2</sup>, Adrian Bachmann<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ThermodynamX GmbH, Straubstrasse 11, 7323 Wangs, Schweiz

[b.vetsch@thermodynamx.ch](mailto:b.vetsch@thermodynamx.ch)

[t.menzi@thermodynamx.ch](mailto:t.menzi@thermodynamx.ch)

<sup>2</sup>V-ZUG Kühltechnik AG, Zelgstrasse 3, 9320 Arbon, Schweiz

[adrian.bachmann@vzug.com](mailto:adrian.bachmann@vzug.com)

[slawomir.rysiewicz@vzug.com](mailto:slawomir.rysiewicz@vzug.com)

Für Massenprodukte wie Haushaltskühlschränke und Klimageräte ist die Kapillare als Drosselorgan in der Regel die erste Wahl. Bislang geht dieser Entscheid mit einem erhöhten Entwicklungsaufwand einher, da die Auslegung der Kapillare nicht trivial ist. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn das verbundene System über einen breiten Arbeitsbereich zuverlässig und effizient funktionieren soll. Während des Entwicklungsprozesses kann das System beispielsweise mit einer auswechselbaren Kapillarsektion erweitert sein. In der Praxis weisen die bekannten Methoden jedoch Nachteile auf, wie signifikante Füllmengenänderung, schwieriges Handling, lange Rüstzeiten etc..

Diese Publikation stellt eine neuartige in-situ-Methode zur Auslegung der Kapillare vor und demonstriert deren Einsatz an zwei Beispielen aus der Praxis. Ersteres zeigt die Methodik im Zuge der Ermittlung der Auswirkung von Kapillartoleranzen auf das Betriebsverhalten eines Kühlschranks. Es handelt sich hierbei um einen Test, welcher ohne den vorgestellten Ansatz kaum belastbare Ergebnisse hätte liefern können.

Am zweiten Beispiel wird die klassische Anwendung des Equipments zur Spezifikation der Drosselkapillare in einem Kleinkältekreis mit brennbarem Kältemittel veranschaulicht. Dank der neuen Methode wurde die Entwicklungszeit um ein Vielfaches reduziert.

II.1.05

## Neues Modell zur 1D-Simulation der indirekten Verdunstungskühlung

**Kerstin Oetringer<sup>\*</sup>, Andreas Dümmler, Joachim Götsche**

Solar-Institut Jülich, Energieeffiziente Gebäudetechnik, Heinrich-Mußmann-Str. 5, 52428 Jülich, Deutschland

[oetringer@sij.fh-aachen.de](mailto:oetringer@sij.fh-aachen.de)

Im Projekt Coolplan-AIR geht es um die Fortentwicklung und Feld-Validierung eines Berechnungs- und Auslegungstools zur energieeffizienten Kühlung von Gebäuden mit luftgestützten Systemen. Neben dem Aufbau und der Weiterentwicklung von Simulationsmodellen erfolgen Vermessungen der Gesamtsysteme anhand von Praxisanlagen im Feld.

Eine der betrachteten Anlagen arbeitet mit indirekter Verdunstung. Diese Veröffentlichung zeigt den Entwicklungsprozess und den Aufbau des Simulationsmodells zur Verdunstungskühlung in der Simulationsumgebung Matlab-Simulink mit der CARNOT-Toolbox. Das besondere Augenmerk liegt dabei auf dem physikalischen Modell des Wärmeübertragers, in dem die Verdunstung implementiert ist. Dem neuen Modellansatz liegt die Annahme einer aus der Enthalpie-Betrachtung hergeleiteten effektiven Wärmekapazität zugrunde. Des Weiteren wird der Befeuchtungsgrad als konstant angesehen und eine standardisierte Zunahme der Wärmeübertragung des feuchten gegenüber dem trockenen Wärmeübertrager angenommen.

Die Validierung des Modells erfolgte anhand von Literaturdaten. Für den trockenen Wärmetauscher ist der maximale absolute Fehler der berechneten Austrittstemperatur (Zuluft) kleiner als  $\pm 0.1$  K und für den nassen Wärmetauscher (Kühlfall) unter der Annahme eines konstanten Verdunstungsgrades kleiner als  $\pm 0.4$  K.

Bei dem gewählten Ansatz wird von der Standardkomponente ‚HeatExchanger‘ aus der Carnot-Toolbox abgerückt und der Prozess der Verdunstung in die S-Funktion des Wärmetauscher-Bausteins integriert. Mit diesem 1D-Modell können eine hohe Genauigkeit und eine kurze Rechenzeit gewährleistet werden, sodass Jahressimulationen von Gesamtsystemen und Gebäuden möglich sind.

Die Übertragbarkeit des Modells auf reale Anlagen wird mittels der Messdaten aus dem Feld-Monitoring aufgezeigt.

**Stichwörter:**

Indirekte Verdunstungskühlung, adiabatische Kühlung, Carnot-Toolbox, Jahressimulation, Wärmetauscher

II.1.06

## **Numerische Simulation einer Eisbreiströmung zur Vorhersage der Agglomeration und des Effekts von Phasenwechselwirkungen im Wärmeübertrager**

**Shaimaa Hefny\*, Christiane Thomas, Ullrich Hesse**

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01062 Dresden, Deutschland,  
[Shaimaa.Hefny@tu-dresden.de](mailto:Shaimaa.Hefny@tu-dresden.de)  
[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)  
[Ullrich.Hesse@tu-dresden.de](mailto:Ullrich.Hesse@tu-dresden.de)

Eisbrei ist ein zukunftssträchtiges Sekundärfluid, das eine wichtige Rolle bei verschiedenen Kühlzwecken spielen kann. Aus der Sicht der Systemauslegung ist es von großer Bedeutung, detaillierte Strömungsinformationen zu erhalten. Eine Anwendung der Theorie der komplexen Zweiphasen-Strömungscharakteristik ist aufgrund der heterogenen Eisbreiströmung schwierig. Das Manuskript beinhaltet die theoretische Analyse des Eisbreiverhaltens bei verschiedenen Eisbreikonzentrationen am Einlass des Wärmeübertragers und Partikelgrößen unter Berücksichtigung von Druckabfall und Agglomeration. Neben dem mathematischen Modell, der Analyse der wichtigsten Bilanzgleichungen, Granulat-Eigenschaften und Phasenwechselwirkungen, werden eine Vielzahl weiterer Parameter berücksichtigt, die das Verhalten des Eisbreis beeinflussen. Die CFD-Simulation liefert Vorhersagen für den Druckabfall und die Konzentrationsprofile, die die Agglomeration zwischen den Partikeln darstellen. Als Ergebnisse werden der Druckverlust im Wärmeübertrager, das mittlere Geschwindigkeitsprofil und das Eisvolumenanteilprofil bei unterschiedlicher Partikelgröße, Agglomerationslänge, Einlassgeschwindigkeit und Eiskonzentration dargestellt. Die numerischen Untersuchungen von Eisbrei werden für unterschiedliche Kanalformen von Plattenwärmeübertragern durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Untersuchungen stellen einen ersten Ansatz zur Optimierung der Plattenwärmeübertragergeometrie für Eisbrei dar.

**Stichwörter:**

Eisbrei, Simulation, Agglomeration, Phasenwechselwirkungen, Plattenwärmeübertragern

II.1.07

## Zeotrope Arbeitsfluide mit großem Temperaturgleit

### Einsatzpotentiale in ORC Prozessen

**Benedikt Gregor Bederna<sup>\*</sup>,**  
**Christiane Thomas<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden, Deutschland  
[benedikt.bederna@tu-dresden.de](mailto:benedikt.bederna@tu-dresden.de)

Der Carnot-Prozess verspricht im Vergleich zu anderen Kreisprozessformen, wie dem Dreiecks-Prozess oder dem Lorenz-Prozess, bei der Verstromung von Wärme den höchsten Wandlungswirkungsgrad. Dennoch kann der Einsatz eines Lorenz-Prozesses, bestehend aus zwei isobaren und zwei isentropen Zustandsänderungen, angebracht sein, wenn dieser mit einem geringen Wärmequellen- und Wärmesenkenkapazitätsstrom gekoppelt werden soll. Kleine Kapazitätsströme gehen häufig mit großen Temperaturdifferenzen in den angeschlossenen Strömen einher, was in verschiedenen Anwendungsfällen vorliegt. In solchen Fällen kann der Einsatz eines Kreisprozesses auf Basis des Carnot-Prozesses sogar unmöglich sein. Technisch kann ein Lorenz-Prozess mithilfe von zeotropen Gemischen mit großem Temperaturgleit realisiert werden. Die Gestaltungsform ist aufgrund der großen Auswahl an möglichen Gemischbestandteilen sehr vielseitig. Die Herausforderung bei der realen Umsetzung besteht jedoch darin, dass der Temperaturgleit nicht zwingend linear verläuft, da die Wärmeübergangskoeffizienten im Vergleich zu den eingesetzten Reinstoffen absinken und Zusammensetzungsverschiebungen eintreten. Nichts destotrotz besitzt ein ORC-Prozess mit großen Temperaturgleits während der Verdampfung und Kondensation das Potential, sensible Wärmeströme zu koppeln. Beispielsweise kann dies im Bereich der industriellen Wärmerückgewinnung auftreten, was die Erschließung eines neuen Anwendungsfeldes für die Abwärmeverstromung ermöglicht.

#### Stichwörter:

Lorenz-Prozess, Zeotrope Gemische, Großer Temperaturgleit, ORC-Prozess, Integrationsmöglichkeiten

II.1.08

## Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagen

### Dymola-Modell einer H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskälteanlage

**Michael Wernhart<sup>1\*</sup>, René Rieberer<sup>1</sup>, Sandra Zlabinger<sup>2,3</sup>, Viktor Unterberger<sup>2,3</sup>, Markus Gölles<sup>2,3</sup>**

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

<sup>2</sup>BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH, Inffeldgasse 21/B, 8010 Graz, Österreich

<sup>3</sup>Technische Universität Graz, Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik,  
Inffeldgasse 21/B, 8010 Graz, Österreich

Absorptionskälteanlagen können einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten, wenn Wärme aus regenerativen Energieträgern oder Abwärme aus industriellen Prozessen zum Antrieb verwendet wird. Absorptionskälteanlagen weisen bereits jetzt eine hohe Effizienz auf, die bei veränderlichen Betriebsbedingungen je nach vorhandenen Stellgliedern weiter gesteigert werden kann. Dazu werden im Rahmen des Forschungsprojekts „Heat Pumping Systems Control (HPC)“ zwei Absorptionskälteanlagen – eine mit der Stoffpaarung Ammoniak/Wasser (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) und eine mit der Stoffpaarung Wasser/Lithiumbromid (H<sub>2</sub>O/LiBr) – untersucht, um für unterschiedliche Anwendungen optimale Betriebsstrategien zu entwickeln.

Zur Abbildung der Zustandsänderungen in der Absorptionskälteanlage, werden dynamische Simulationsmodelle in der Modellierungssprache Modelica in Dymola entwickelt und mit Messdaten validiert. Im Rahmen dieses Konferenzbeitrags werden Komponentenmodelle für die H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskälteanlage und Simulationsrechnungen bei veränderlichen Randbedingungen präsentiert, sowie ein Vergleich mit Messdaten diskutiert.

**Stichwörter:**

Komponentenmodelle, Modelica, Wasser/Lithiumbromid

II.1.09

## **Sorptionseffekte bei der Förderung gesättigter mehrphasiger Fluide**

**Stefan Wagner, A. Luke, Universität Kassel, Kassel/Deutschland;**

Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Institut für Thermische Energietechnik,  
Fachgebiet Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel  
[stefanwagner@uni-kassel.de](mailto:stefanwagner@uni-kassel.de)

Mehrphasige Systeme bestehen aus verschiedenen Komponenten wie Gas, Flüssigkeiten und Feststoffen. Sie sind gekennzeichnet durch ihre Heterogenität und der Interaktion der verschiedenen Phasen. In der Natur und Technik liegen bei mehrphasigen Systemen zumeist gesättigte Fluide vor. Bei deren Förderung, insbesondere bei der mehrphasigen Förderung von Erdöl- Erdgas- Gemischen, werden Sorptions- oder Desorptionseffekte beobachtet. Aufgrund unterschiedlicher physikalischer Einflussgrößen, wie z. B. Druck, Temperatur und Scherung, kommt es bei der Förderung gesättigter Fluide zu einer Desorption der in der Flüssigkeit gelösten Gasphase. Diese tritt innerhalb der gesamten Förderstrecke infolge von Druckverlusten, Dissipationseffekten und Temperaturerhöhung in Rohrleitungen, Einbauten wie Flansche etc. auf. Die Desorptionsvorgänge führen zu einer Änderung der Strömungsform und beeinflussen die Thermo- und Fluidynamik der anschließenden Komponenten, wie Mehrphasenschraubenspindelpumpen und das gesamte Rohrleitungssystem, erheblich. Dieser Effekt wird durch Verschleiß oder Korrosion an den Oberflächen der Spindeln und durch eingeschlossene Gasreste in den Vertiefungen der festen Oberfläche, welche als Keimstellen für die Desorption wirken, verstärkt. Die Desorption ist also im Wesentlichen von der Topographie der Mikrostruktur und der Oberflächenenergie der jeweiligen festen Oberfläche bzw. von denen für die Keimbildung zur Verfügung stehenden Vertiefungen bestimmt.

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung der Keim- und Blasenbildung sowie die Entwicklung eines neuartigen Berechnungsmodells für die Berechnung von potentiellen Keimstellen bei der Desorption während der Förderung gesättigter Fluide. Die experimentellen Untersuchungen werden dabei an verschiedenen transparenten Versuchsaufbauten durchgeführt, sodass mittels Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen die während der Experimente aktivierten Keimstellen optisch erfasst und quantifiziert werden können. Anschließend soll ein für die Verdampfung entwickeltes Hüllkurvenverfahren für diesen Anwendungsfall angepasst und mittels der experimentell gewonnenen Daten validiert werden.

**Stichwörter:**

Mehrphasentransport, Desorption, gesättigte Fluide, Keim- und Blasenbildung

II.1.10

## Unterkühlung auf glas-artigen Metalloberflächen

**Sebastian Gund<sup>1\*</sup>, Oliver Schmid<sup>2</sup>, Vincent Heimrich<sup>3</sup>, Michael Kauffeld<sup>4</sup>**

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

<sup>2</sup>Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[oliver.schmid@hs-karlsruhe.de](mailto:oliver.schmid@hs-karlsruhe.de)

<sup>3</sup>Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[hevi2020@hs-karlsruhe.de](mailto:hevi2020@hs-karlsruhe.de)

<sup>4</sup>Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de)

Die Unterkühlungsmethode ist ein sehr energieeffizientes Verfahren zur Herstellung von Eisbrei verglichen mit konventionell eingesetzten Kratzverdampfern. Dabei wird eine Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt abgekühlt und anschließend gezielt zur Kristallisation angeregt. Die technische Anwendbarkeit dieser Methode ist stark abhängig vom erreichten Unterkühlungsgrad und der Stabilität der Unterkühlung. Der begrenzende Faktor ist die Grenzfläche zwischen unterkühlter Flüssigkeit und dem Substrat, auf dem sich die unterkühlte Flüssigkeit befindet. Nichtmetallische sowie amorphe Substratoberflächen eignen sich gut für die Unterkühlungsmethode. In dieser Untersuchung werden reines Wasser und Ethanol- sowie Propylenglykol-Wasser-Mischungen auf einen Probenträger aus nano-kristallinen und amorphen Metallen aufgebracht und unterkühlt bis eine Kristallisation eintritt und simultan eine Kontaktwinkelmessung durchgeführt. So können die getesteten Substrate hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit als zukünftige Wärmeübertrager-Oberflächen für Unterkühler kategorisiert werden.

**Stichwörter:**

Thermische Energiespeicherung, Eisbrei, Unterkühlung, Supercooled-Brine-Method, Kontaktwinkelmessung

II.1.11

## Praxiserfahrungen bei der Performance-Bewertung von Kälteanlagen als Grundlage für die Entwicklung von intelligenten Regelungsstrategien

**Thomas Keller<sup>1</sup>, Stephan Vollmuth<sup>1</sup>, Christian Steininger<sup>2</sup>, Magdalena Wolf<sup>1\*</sup>,  
Barbara Beigelböck<sup>2</sup>, Katharina Eder<sup>2</sup>, Tobias Pröll<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verfahrens- und Energietechnik,  
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien, Österreich  
[magdalena.wolf@boku.ac.at](mailto:magdalena.wolf@boku.ac.at)

<sup>2</sup>VASKO+Partner Ingenieure Ziviltechniker für Bauwesen und Verfahrenstechnik GmbH,  
Grinzinger Allee 18, 1190 Wien, Österreich

Intelligente Regelungsstrategien können, durch die Vermeidung von ineffizienten Betriebspunkten, zur Effizienzsteigerung von Kälteanlagen beitragen. Im Zuge des Forschungsprojekts „VICC – Virtual Cooling Control“

soll der energetische Mehrwert von Regelungsstrategien auf Basis von virtuellen Datenpunkten untersucht werden. Dazu werden Kompressions-Kälteanlagen vermessen und auf dieser Datenbasis Modelle der Kälteanlagen erstellt, die wiederum virtuelle Datenpunkte generieren. Diese virtuellen Datenpunkte werden den Regelungseinheiten der Systemkomponenten (z. B. Rückkühler, Umwälzpumpen, Kältemaschine) übergeben und ermöglichen so, eine gezielte und im Besten Fall effizientere Regelung.

Im ersten Teil des Projekts werden dazu verschiedene Kompressions-Kälteanlagen vermessen, um eine valide Datenbasis für die Modellierung zu schaffen. Die untersuchten Kompressions-Kälteanlagen decken verschiedene Systemkomponenten – luftgekühlter Rückkühler, offener Kühlturm, Rückkühlung durch Flusswasser – ab, um eine breite Datenbasis für die Modellierung zu erhalten. Zudem werden Systemkennzahlen und Effizienzparameter der Einzelkomponenten, verschiedener Teilsysteme und der gesamten Anlage entwickelt. Neben einer energetischen Betrachtung werden Exergieverluste der Systemkomponenten mittels Prozesssimulation quantifiziert.

In dieser Arbeit werden erste Erkenntnisse der Messdatenerhebung bei einer der untersuchten Kompressions-Kälteanlagen im Detail vorgestellt und Probleme aufgezeigt, die bei der Integration zusätzlicher Messstellen in bereits bestehende Kälteanlagen auftreten. Bei der Messdatenerhebung kommen verschiedenste Messfühler mit unterschiedlichen Messprinzipien zur Anwendung. Messdaten von Messfühlern mit hoher Messqualität werden mit Messergebnissen von ökonomisch vorteilhaften Messfühlern gegenübergestellt.

Kostengünstige Temperaturmessfühler können im stationären Zustand gute Ergebnisse bereitstellen, die als Grundlage für eine statische Modellierung verwendet werden können. Erste Ergebnisse der Performance-Bewertung zeigen, dass die Gesamteffizienz der untersuchten Anlage zwischen 3.8 und 4.5 (EER) schwankt. Der Exergieverlust der Kältemaschine (5 – 17 kW) liegt um etwa den Faktor 10 höher als die Exergieverluste in den Wärmeübertragern des Kühlwasserkreises (0.5 – 2.3 kW) oder des Mischventils im Kühlwasserkreis (< 1 kW) bei einer Nennkälteleistung der Anlage von 186 kW.

Die vorhandenen Messdaten geben eine erste Datengrundlage für die Modellierung der Kompressions-Kälteanlagen. Es sind jedoch weiterführende Untersuchungen von zusätzlichen Anlagen geplant, um die Datengrundlagen zu erweitern.

Stichwörter:

Kompressions-Kälteanlagen, Regelung, virtuelle Datenpunkte, Messdatenerhebung, Exergie

## II.1.12

# Experimentelle Untersuchung eines CO<sub>2</sub>-Sublimationskreislaufs

**Yixia Xu<sup>\*</sup>, Christiane Thomas, Ullrich Hesse**

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

Der Einsatz des natürlichen Kältemittels R744 im Sublimationsbetrieb unterhalb des Tripelpunkts stellt eine potenzielle Alternative zur bisherigen Kälteerzeugung unterhalb von -50 °C mit R23 dar. Nach den theoretischen Untersuchungen des CO<sub>2</sub>-Sublimationskreislaufs steht die Gestaltung des Sublimators und die Demonstrationsanlage in Kaskadenbauweise im Mittelpunkt der derzeitigen Forschung. Für die experimentellen Untersuchungen wurde die Anlage so konzipiert, dass die untere Kaskadenstufe zwischen dem CO<sub>2</sub>-Sublimationsbetrieb und einen konventionellen R23-Kreislauf umgeschaltet werden kann. Somit ist ein direkter Vergleich der beiden Betriebsweisen möglich. Während der Versuche wurden Verblockungen durch festes CO<sub>2</sub> beobachtet. Mögliche Ursache für dieses Verhalten werden diskutiert und Verbesserungsmaßnahmen getroffen. Ein kontinuierlicher Betrieb des CO<sub>2</sub>-Kreislaufs wurde bis zu einer Sublimations-temperatur von -80°C ohne deutlich erkennbare Verblockung erreicht. In einigen Betriebspunkten ist die Leistungszahl des CO<sub>2</sub>-Kreislaufs vergleichbar mit der R23-Referenz. Jedoch liegen diese Werte im Allgemeinen noch unter den erwarteten Werten, was zu weiteren Optimierungsansätzen führt, die ausführlich diskutiert werden.

Stichwörter:

CO<sub>2</sub>, R23, Sublimation, Kaskade, COP

II.1.13

## **Solar-sorptive Gewinnung von Trinkwasser aus der Luft in ariden Gebieten**

**Tamara Theimel\*, Henner Kerskes, Konstantinos Stergiaropoulos**

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung,  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart  
[theimel@igte.uni-stuttgart.de](mailto:theimel@igte.uni-stuttgart.de)

Etwa 33 % der Menschheit haben keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Besonders entlegene Regionen mit aridem Klima sind von Trinkwasserknappheit betroffen. Die direkte Kondensation von Wasser aus der Umgebungsluft mittels elektrisch betriebener Kältemaschine ist dort aufgrund des sehr niedrigen Wassergehaltes der Luft zur Trinkwassergewinnung nicht geeignet. Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird derzeit ein Verfahren entwickelt und erprobt, mit dem unter ariden Klimabedingungen auch bei niedrigen Taupunkttemperaturen effizient Trinkwasser aus der Umgebungsluft gewonnen werden kann.

Durch ein solarthermisch angetriebenes Adsorptions-Desorptionsverfahren wird eine erhöhte Taupunkttemperatur oberhalb der Umgebungstemperatur erreicht. Durch eine spezielle Prozessführung und Wärmerückgewinnung kann das gesamte adsorbierte Wasser mit der Umgebung als Wärmesenke kondensiert und als Trinkwasser gewonnen werden. Durch den Einsatz paralleler Sorptionsbetten und die Einbindung eines Wärmespeichers, können Adsorption und Desorption gleichzeitig und auch außerhalb von Sonnenscheinstunden betrieben werden. Somit wird ein kontinuierlicher Betrieb ermöglicht, wodurch aufgrund des geringen elektrischen Energieverbrauchs im Vergleich zu direkter Kondensation eine effektivere Trinkwassergewinnung aus der Umgebungsluft zu erwarten ist.

Die Betriebsweise des gesamten Prozesses wird im Labor mit Hilfe eines Hardware-in-the-Loop Teststandes erprobt und optimiert. Hierbei wird der Wärmeeintrag durch den solarthermischen Kollektor und die Umgebungsbedingungen mit einem Heizregister bzw. einer Luftkonditionieranlage emuliert.

Gleichzeitig werden verschiedene Sorptionsmaterialien untersucht und hinsichtlich ihrer Formgebung optimiert, um den Druckverlust in den Sorptionsbetten zu minimieren und den elektrischen Energiebedarf des Gesamtsystems weiter zu verringern.

Im Beitrag wird das Verfahren vorgestellt und die technischen Details erläutert. Anhand erster Mess- und Simulationsergebnisse wird die Leistungsfähigkeit und die bevorzugten Einsatzbedingungen diskutiert.

**Stichwörter:**

Trinkwasser, Adsorption, Solarthermie, Wärmespeicher, Wärmerückgewinnung

II.1.14

## **Regelung des Lösungsumlaufs von einstufigen Absorptionskälteanlagen zur Effizienzsteigerung im Betrieb**

**Stefan Petersen\*, Walther Hüls Guido, Christopher Paitazoglou**

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
Tel: +49 30 314 25183, Fax: +49 30 314 22253  
[stefan.petersen@tu-berlin.de](mailto:stefan.petersen@tu-berlin.de)

In Absorptionskälteanlagen (AKA) wird der, aus der mechanischen Kälte bekannte Verdichter durch einen thermischen Verdichter ersetzt. Dieser besteht mindestens aus dem Desorber, dem Absorber sowie in der Regel aus einem Lösungswärmeübertrager (LWT) und einer Lösungsmittelpumpe, die die Lösung vom niedrigen

Druckniveau des Absorbers auf das höhere Druckniveau des Desorbers fördert. Für diesen Vorgang wird nur ein Bruchteil der elektrischen Energie eines mechanischen Verdichters benötigt. Die Hauptenergie zur Kälteerzeugung ist eine Wärmemenge, die am Desorber eingesetzt wird, um das Kältemittel zu desorbieren. Eine häufig genutzte Effizienzkennzahl ist daher der thermische COP (coefficient of performance). Effiziente einstufige Anlagen nach dem Stand der Technik erreichen im typischen Betriebsbereich Werte zwischen 0,75 und 0,82. Unter systemtechnischen Gesichtspunkten ist der elektrische Energieaufwand, bzw. die elektrische Effizienz, bei der die Kälteleistung in Bezug zu allen Elektroenergieaufwendungen für die Kälteerzeugung (AKA, KRW, Pumpen von Kalt-, Kühl- und Heißwasser, EMSR) gesetzt wird, zu beachten. Ungefähr 80 % dieses Aufwands wird zur Rückkühlung der Anlagen, für die Kühlkreispumpe und das RKW benötigt.

Die Lösungsmittelpumpen (LMP) von Absorptionskälteanlagen werden üblicherweise nicht geregelt, sondern im Nominalzustand, unabhängig vom Auslegungszustand in einer Installation und unabhängig von den realen Betriebszuständen betrieben. Bei Grundlastanlagen mit geringen Lastschwankungen und fester Kühlwasser-eintrittstemperatur, daher relativ stabilen Lösungsmittel-Förderhöhen in der Anlage, kann dies für eine gute, machbare Effizienz genügen. Moderne, effiziente Kälteerzeugung mit thermischen Kälteanlagen wird aber sowohl die Kühlwassertemperatur als auch die Heißwassertemperatur ständig unter Effizienzkriterien, abhängig von Last und Umgebungstemperatur neu einstellen und somit auch die resultierende Förderhöhe der LMP verändern. Um unter diesen Umständen den Lösungskreis der AKA im Sinne einer guten Effizienz der AKA zu betreiben, ist die Regelung der LMP unumgänglich. Auch gilt zu beachten, dass unterschiedliche Kältebelastungen bei konstantem Lösungsumlauf zu unterschiedlicher Ausgasungsbreite der Lösung führen, die wiederum Unterkühlung und Überhitzung mindestens am Desorber- und Absorbereintritt und damit die Leistungsfähigkeit, sowie den COP der AKA beeinflusst.

Über eine Regelung der LMP auf Basis einer Zielgröße für die Effizienz des LWT kann der Lösungsvolumenstrom an die Betriebsbedingungen angepasst werden. An einer Laboranlage ist dies für 2 Kaltwasserniveaus und je 3 Antriebstemperaturniveaus in Kombination mit 6 Kühlwassertemperaturen erprobt und analysiert worden. Die Vorgabe von 75 % bis 90 % Effizienz am LWT in vier Stufen, sowie der Vergleich mit einer fest eingestellten LMP weisen je nach Betriebspunkt ein Verbesserungspotential von bis zu 15 % im COP der AKA aus. Diese Verbesserung der thermischen Effizienz reduziert direkt die abzuführende Abwärme und verringert somit direkt den dominierenden Elektroenergiebedarf des Systems auf der Rückkühlseite. Die Strategie wird in der Kühlsaison 2020 im Rahmen von ReKs (EnEff: Wärme – Regelung für energieaufwandsoptimierte Kälteerzeugungssysteme) im Feld eingesetzt und evaluiert. Die Ergebnisse aus dem Labor und den Feldtests werden präsentiert.

**Stichwörter:**

Forschung, Entwicklung, Anlagentechnik, Prozesstechnik, experimentell

II.1.15

## **Adsorptionskälte – Design strukturierter Adsorbens-Komposite für die adsorptive Kühlung**

**Marc Scherle<sup>1\*</sup>, Timothy A. Nowak<sup>2</sup>, Ulrich Nicken<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Chemische Verfahrenstechnik (ICVT), Universität Stuttgart  
Böblinger Straße 78, 70199 Stuttgart  
[marc.scherle@icvt.uni-stuttgart.de](mailto:marc.scherle@icvt.uni-stuttgart.de)

<sup>2</sup> Ernst-Berl-Institut für Technische und Makromolekulare Chemie, Technische Universität Darmstadt  
64287 Darmstadt

Seit Anfang der 1970er Jahre wird an adsorptiver Kühlung geforscht. Trotz der langen Forschungsgeschichte ist die kommerzielle Verbreitung von Adsorptionskälteanlagen begrenzt [1]. Gründe dafür sind niedrige Wirkungsgrade (COP) und Leistungsdichten (SCP), sowie der apparative Aufwand. Zur Optimierung des

Verfahrens wurden bisher entweder die Prozesstopologie und die Betriebsparameter optimiert oder an der Verbesserung der Materialien gearbeitet.

In dieser Arbeit wird die optimale Strukturierung heterogener Adsorbens-Komposite untersucht, wobei zusätzlich Prozessparameter berücksichtigt werden. Damit ist es möglich, im zugrundeliegenden Parameterraum ein globales Optimum des Wirkungsgrades (COP) zu berechnen, welches von einer geforderten Leistungskennzahl (SCP) und der Masse an inertem Material für die Wärmeübertragung abhängt.

Die Optimierung erfolgt zweistufig. In der Prozessoptimierung werden für eine gegebene Schichtdicke und Strukturierung der Adsorbens-Komposite zunächst der COP und die SCP berechnet. Durch Variation der Schichtdicke lässt sich der optimale COP bei vorgegebener SCP ermitteln, wobei sich ein eindeutiges Optimum ergibt. Im zweiten Schritt wird in der Strukturoptimierung die Strukturierung der Adsorbens-Komposite variiert. Mit Hilfe eines Materialmodells werden Transportwiderstände und Adsorptionskapazität berechnet und die Prozessoptimierung wiederholt.

Als Ergebnis erhält man eine Kurve, welchen den optimalen COP in Abhängigkeit der SCP darstellt. Mit jedem Punkt der Kurve sind optimale Prozessparameter (Zykluszeit, Schichtdicke) und Materialeigenschaften (Anteil Transportporen, Wärmeleitadditiv) verknüpft.

### **Stichwörter:**

Adsorptive Kühlung, virtuelles Materialdesign, Prozessdesign, Prozesssimulation, Optimierung

## II.1.16

# **Wasser/Ethanol – Adsorptionskältemaschine unter 0 °C**

**Marten Entrup<sup>1</sup>, Christoph Kappelhoff<sup>1</sup>, Jan Seiler<sup>1</sup>, André Bardow<sup>1,2,3\*</sup>**

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik,  
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen, Deutschland  
[abardow@ethz.ch](mailto:abardow@ethz.ch)

<sup>2</sup> ETH Zürich, Energie- und Prozesssystemtechnik – Departement für Maschinenbau und Verfahrenstechnik,  
Tannenstraße 3, 8092 Zürich, Schweiz  
[abardow@ethz.ch](mailto:abardow@ethz.ch)

<sup>3</sup> Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK-10),  
Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich, Deutschland  
[abardow@ethz.ch](mailto:abardow@ethz.ch)

Thermisch angetriebene Adsorptionskältemaschinen (AKM) können Abwärme aus Prozessen und BHKWs nutzen, um Kälte bereitzustellen. Hierbei sind vor allem Industriekälte und Kälte für die Nahrungsmittelindustrie von Interesse. AKM bieten dabei den Vorteil das umweltfreundliche Kältemittel Wasser verwenden zu können. Bei wasserbasierten AKM ist jedoch die minimal erreichbare Kühltemperatur durch den Gefrierpunkt von Wasser auf ca. 5 °C limitiert. Niedrigere Kühltemperaturen werden allerdings häufig für Industriekälte und die Nahrungsmittelindustrie benötigt.

Kühltemperaturen unterhalb von 5 °C können wasserbasierte AKM auch erreichen, indem ein Frostschutzmittel zugegeben wird. Durch die Zugabe von Glykol im Verdampfer konnten Kühltemperaturen bis 0 °C erreicht werden<sup>a</sup>. Um auch Kühltemperaturen unterhalb von 0 °C zu ermöglichen, muss der Frostschutz in der gesamten AKM sichergestellt werden. Hierzu sind Frostschutzmittel notwendig, die mitverdampfen und am Adsorptionsprozess teilnehmen.

In dieser Arbeit untersuchen wir Ethanol als mitverdampfendes Frostschutzmittel für wasserbasierte AKM. Dazu bestimmen wir den Einfluss von Ethanol und der Kühltemperatur auf die Leistungsdichte (SCP) und Leistungszahl (COP) einer 1-Bett-Laboranlage. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass mit Ethanol als Frostschutzmittel Kühltemperaturen von -5 °C mit wasserbasieren AKMs möglich sind.

<sup>a</sup>Seiler et al., International Journal of Refrigeration, 2017, 77, 39-47.

**Stichwörter:**

Thermische Kältebereitstellung, Adsorptionskälteanlage, Experimentelle Untersuchung, natürliche Kältemittel, Wasser/Ethanol

II.1.17

## Untersuchung der Austreibereinheit einer Diffusions-Absorptionskältemaschine mit Plattenaustreiber

Johannes Brunder\*, Klaus Spindler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart  
Tel.: 0049-711-685-63225, Fax: 0049-711-685-53225  
[Johannes.Brunder@igte.uni-stuttgart.de](mailto:Johannes.Brunder@igte.uni-stuttgart.de)

Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) werden durch Wärme angetrieben und arbeiten strom- und geräuschlos. Als Hotel- und Campingkühlschränke sind DAKMs mit Kälteleistungen bis ca. 100W weit verbreitet.

Eine DAKM im größeren Kälteleistungsbereich hat bei einer Beheizung durch Abwärme, Fern- oder Nahwärme sowie solarer Wärme das Potenzial klimafreundlich Kälte bereit zu stellen.

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Eine der größten Hürden dabei ist eine deutliche Steigerung der Leistungsdichte der Wärmezufuhr. Um das Ziel zu erreichen wird als Austreiber ein Plattenwärmeübertrager mit nachgeschaltetem vertikalen Thermosiphonrohr eingesetzt. Dies ermöglicht eine kompakte Bauweise und erhöht zusätzlich den Lösungsumlauf durch eine nahezu punktuelle Beheizung am Fußpunkt des Thermosiphonrohres. Zudem werden geringe Temperaturdifferenzen zwischen dem externen Antriebsmedium und der Siedetemperatur des Arbeitsmediums durch dieses Austreiberdesign erreicht.

Im Vortrag wird die Konzeption des Prüfstands zur Untersuchung des Austreiberdesigns vorgestellt. Das Förderhalten mit dem Zweistoffgemisch Ammoniak-Wasser wird unter Variation der Ammoniak-Konzentration und des Systemdrucks präsentiert. Dabei wird insbesondere der Einfluss von Strömungswiderständen im Zulauf des Austreibers, wie sie der üblicherweise in DAKMs verwendete Lösungsmittelwärmeübertrager verursacht, analysiert.

**Stichwörter:**

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Plattenaustreiber, Thermosiphonpumpe, Ammoniak-Wasser

II.1.18

## Entwicklung und Validierung eines Systemmodells einer offenen Flüssigsorptionsanlage

Wael Mandow\*, Martin Mützel, Lisa Völker, Daniel Fleig und Ulrike Jordan

Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik, Kurt-Wolter-Straße 3, 34109 Kassel  
E-Mail: [solar@uni-kassel.de](mailto:solar@uni-kassel.de), Internet: [www.solar.uni-kassel.de](http://www.solar.uni-kassel.de)  
[raderm@umd.edu](mailto:raderm@umd.edu)

Es wurde ein numerisches Modell eines Flüssigsorptionssystems entwickelt. Das System besteht aus einem intern gekühlten Absorber, einem Regenerator, sowie einem Sorptionsmittelspeicher und einer Wärmerückgewinnung im Sorptionsmittelkreis. Absorber und Regenerator bestehen aus Rohrbündel-Wärme- und Stoffübertrager mit gewellten Glasfaserplatten, die vom Sorptionsmittel (LiCl-H<sub>2</sub>O) überströmt werden und an denen Luft in Kreuzstromkonfiguration zum Sorptionsmittel entlangströmt. Das im Absorber durch die Luftfeuchtigkeit verdünnte Sorptionsmittel wird zunächst in den Speicher geleitet. Im Regenerator wird es dann durch Wärmezufuhr wieder aufkonzentriert.

Der Absorber und Regenerator werden jeweils durch dasselbe Modell, einem Ein-Knoten  $\epsilon$ -NTU-Modell, beschrieben. Die Berechnung der Temperatur und des Massenanteils des Sorptionsmittels an der Phasengrenze erfolgt iterativ. Als Austauschfläche für die Wärme- und Stoffübertragung zwischen Luft und Sorptionsmittel

wird die Oberfläche der Glasfaserplatten angesetzt, während die Rohrbündeloberfläche als charakteristische Fläche für die Wärmeübertragung zwischen Kühl-/Heizwasser und Sorptionsmittel dient. Der Sorptionsmittelspeicher wird durch zwei getrennte Speicher mit jeweils homogener Temperatur und homogenem Massenanteil abgebildet. Die entwickelten Komponentenmodelle wurden anhand von Labormessungen validiert und in TRNSYS implementiert. Das Systemmodell wurde in TRNSYS entwickelt und anhand von sowohl stationären als auch dynamischen Labormessungen validiert. Es wurden Temperaturspreizungen der Fluide, der Massenanteil des Sorptionsmittels, sowie die Effektivität, Entfeuchtungsleistungen, Entfeuchtungsbreiten und die Leistungszahl der Anlage evaluiert. Für einen Zuluftvolumenstrom von ca. 1000 m<sup>3</sup>/h wurden Entfeuchtungsbreiten zwischen 2,6 und 7,5 g<sub>w</sub>/kg<sub>tr.L</sub> erzielt. Das Systemmodell bildet die stationären sowie dynamischen Messungen in sehr guter Übereinstimmung mit den Labormessungen ab.

## II.1.19

# Energieeffiziente Regelung der Rückkühlung von Absorptionskälteanlagen

Stefan Petersen\*, Walther Hüls Guido, Jan Albers

<sup>1</sup>TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin

Tel: +49 30 314 25183, Fax: +49 30 314 22253

[stefan.petersen@tu-berlin.de](mailto:stefan.petersen@tu-berlin.de)

Die Rückkühlung von Absorptionskälteanlagen (AKA) umfasst in der Regel den Kühlkreis, bestehend aus einer Reihenschaltung von Absorber und Kondensator der AKA, einer Pumpe, eine Kurzschlussstrecke zum Anlagenschutz und dem Rückkühlwerk (RKW). Abhängig vom RKW-Typ handelt es sich um einen offenen oder geschlossenen Wärmeträgerkreislauf und bei der Kühlflüssigkeit um reines Wasser oder eine frostsichere Wasser-Glykol-Mischung. In komplexeren Systemen teilen sich mehrere Kälteerzeuger ein RKW und in der Regel einen Teil der Hydraulik. Die Regelgruppe (mit der die Eintrittstemperatur in die AKA und der Volumenstrom unabhängig von Systemparametern geregelt werden kann) ist dagegen – auch aus Sicherheitsgründen – vor jeder Kälteanlage vorhanden.

Aus der Literatur und zuletzt durch die Ergebnisse vom Forschungsprojekt „EnEff: Wärme - Feldtest Absorptionskälteanlagen für KWKK-Systeme“, in 16 Installationen dokumentiert, entfallen auf den Kühlkreis üblicherweise ca. 80 % der elektrischen Aufwendungen zur Kälteerzeugung mit einstufigen Absorptionskälteanlagen. Die Aufteilung des Elektroenergieaufwands auf die Pumpe und das RKW ist abhängig von der Art des RKW sowie der hydraulischen Ausgestaltung des Rohrnetzes, häufig findet sich im Jahresmittel eine hälftige Aufteilung. Der oder die RKW-Ventilatoren werden abhängig von der geforderten Rückkühlleistung in der Regel stufenlos auf einen Sollwert für die Kühlfluidtemperatur geregelt. Die Pumpe wird dagegen üblicherweise mit konstantem Auslegungsvolumenstrom betrieben.

Durch Safarik et. al. wurde ein Ansatz eines zeitlich veränderlichen aber lastunabhängigen Kühlwassersollwertes bei einer mit Solarwärme angetriebenen Absorptionskälteanlage mit trockenem Rückkühlwerk demonstriert. Mit gemessenen Werten zwischen ca. 0,02 und 0,03 kWh<sub>el</sub>/kWh<sub>0</sub> ist der spezifische Elektroenergieverbrauch merklich niedriger als nach DIN 18559-7. Ähnliches wurde im Projekt EnSim mit drei unterschiedlich konstanten Sollwerten für die Kühlfluidtemperatur ( $t_{iK0}^{set} = 15, 20 \text{ und } 25 \text{ °C}$ ), sowie einem zeitlich konstanten Kühlgrenzabstand  $\Delta T_{wb} = 10 \text{ K}$  zur veränderlichen Feuchtkugeltemperatur  $t_{wb}$  ermittelt. Nienborg et. al. untersuchten in Simulationen, sowie temporär an zwei realen Systemen mit modellbasierter Regelung unter Berücksichtigung der Last- und Klimabedingungen, die erzielbaren Einsparungen variabler gegenüber fester Kühlwassertemperatur und erreichten Einsparungen von 15-40 %. Paitazoglou et al. berichten von experimentell ermittelten Einsparungen im Elektroenergiebedarf von bis zu 60 %, die durch eine Regelung der Kühlwasserpumpe in Ergänzung zu einer last- und klimaabhängigen Temperatursollwertvorgabe für das RKW erreicht wurden. Der Volumenstrom wird dafür auf eine feste Differenz zwischen AKA Ein- und Austrittstemperatur im Kühlkreis und damit unabhängig von der Ventilatorumdrehzahl geregelt.

Ein neuer Ansatz, der hier vorgestellt wird, basiert auf gleichen Wärmekapazitätsströmen in der Kühlflüssigkeit und dem Luftvolumenstrom, womit Ventilatorumdrehzahl und Pumpendrehzahl miteinander gekoppelt werden. Dieser Ansatz ermittelt analytisch für jeden Lastfall und damit jede Kombination aus Kälteleistung und Umgebungsbedingungen (hier vor allem Temperatur) den Aufwands-effizientesten Betriebspunkt für die

Kühlkreispumpe und das RKW in Abhängigkeit zueinander. Die Strategie wurde konzeptionell auf einen Industriecontroller implementiert und wird in der Kühlsaison 2020 im Rahmen von ReKs (EnEff: Wärme – Regelung für energieaufwandsoptimierte Kälteerzeugungssysteme) im Feld eingesetzt und evaluiert. Grundlagen und Ergebnisse werden präsentiert. Die neue Strategie öffnet damit erstmals die Möglichkeit Effizienz und maximale Lastdeckung zu kombinieren, ohne dass das System, die Kühlkreispumpe oder das RKW durch die Regelung unterhalb ihrer Möglichkeiten fixiert oder limitiert werden.

**Stichwörter:**

Kältezentralen, Energieeffizienz, Rückkühlung, Abwärme, Sorption, Monitoring, Volumenstromregelung

II.1.20

## Visualisierung und Optimierung der Flüssigkeitsverteilung in einem Plattenabsorber

Nico Mirl\*, Klaus Spindler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung,  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart  
[Nico.Mirl@igte.uni-stuttgart.de](mailto:Nico.Mirl@igte.uni-stuttgart.de)

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) werden derzeit experimentelle Untersuchungen zur Effizienzsteigerung einer Ammoniak/Wasser Absorptionswärmepumpe durchgeführt. Alle Wärmeübertrager innerhalb dieser Absorptionswärmepumpe sind als Plattenwärmeübertrager ausgeführt. Im Absorber wird die arme Lösung über eine Düse in den Eintrittskanal des Plattenwärmeübertragers zerstäubt. Hierdurch wird zum einen die arme Lösung mit einer möglichst großen Oberfläche zur Absorption mit dem Kältemittel zusammengeführt. Zum anderen wird durch die Zerstäubung auch die Lösung auf die Plattenspalte verteilt. Eine optimale Verteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte ist insbesondere für die weitere Absorption unter Wärmeabfuhr innerhalb des Plattenwärmeübertragers von großer Bedeutung.

Das Ziel der Untersuchungen am Absorber besteht darin, die Wärme- und Stoffübertragung innerhalb des Plattenwärmeübertragers durch eine verbesserte Flüssigkeitsverteilung der armen Lösung auf die Plattenspalte zu erreichen. Hierfür wird ein Versuchsstand verwendet, in dem Flüssigkeitsverteilung der Zweiphasenströmung anhand des Stoffsystems Wasser/Luft optisch untersucht und optimiert werden kann. Es werden verschiedene kommerziell verfügbare Düsen untersucht und die Eintauchtiefe der Düse in den Plattenwärmeübertrager variiert. Die Ergebnisse werden mit der aktuellen Einbausituation verglichen und die Erkenntnisse auf den Absorber der Absorptionswärmepumpe übertragen. Es werden sowohl die Ergebnisse dieser Untersuchungen als auch die Potenziale einer Absorber Optimierung aufgezeigt.

**Stichwörter:**

Absorber, Absorptionswärmepumpe, Komponentenoptimierung, Strömungsvisualisierung, Zweiphasenströmung

II.1.21

## Schwerkraftunabhängigkeit von Kaltdampfprozessen – Experimentelle Daten im Vergleich mit existierenden Kriterien

### Untersuchung und Visualisierung von Einflussfaktoren

Leon P. M. Brendel\*, James E. Braun, Eckhard A. Groll

Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University  
West Lafayette, 47907-2099, USA

[\\*brendel@purdue.edu](mailto:*brendel@purdue.edu), [jbraun@purdue.edu](mailto:jbraun@purdue.edu), [groll@purdue.edu](mailto:groll@purdue.edu)

Schon in den 1990er Jahren wurden Kaltdampfprozesse intensiv für den Einsatz auf Raumschiffen untersucht. Trotzdem gibt es auch heute noch große Unsicherheiten bezüglich des Effektes der Schwerelosigkeit auf den Zweiphasenkreislauf. Mehrere Forscher haben unabhängig voneinander Kriterien vorgeschlagen, gemäß deren eine Zweiphasenströmung im geraden Rohr Schwerkraftunabhängig sein müsste. In dieser Arbeit wurden solche Kriterien mit Messdaten von einem Kaltdampfprozess verglichen, dessen Orientierung variiert wurde um verschiedene relative Richtungen der Schwerkraft zum Kreislauf einzustellen. Ein Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Schwerkraftunabhängigkeitskriterien zeigt, dass die Orientierungsunabhängigkeit des Zweiphasenkreislaufs nicht genau modelliert wurde, die existierenden Kriterien aber eine wichtige Grundlage für die Entwicklung neuer Kriterien mit Systemgültigkeit bilden.

**Stichworte:** Kältekreislauf, Kaltdampfprozess, Schwerkraft, Schwerkraftunabhängigkeit

II.1.22

## Partikelmorphologie in Flüssigeisspeichersystemen

### Systemische Betrachtungen zum Strömungsverhalten

Christoph Steffan<sup>1,2\*</sup>, Tom Wenzel<sup>1,2</sup>, Mathias Safarik<sup>1</sup>, Marcus Honke<sup>1</sup>, Ulrich Hesse<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland  
[christoph.steffan@ilkdresden.de](mailto:christoph.steffan@ilkdresden.de)

<sup>2</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland  
[Ulrich.Hesse@tu-dresden.de](mailto:Ulrich.Hesse@tu-dresden.de)

Flüssigeis bzw. Eisbrei (engl. Ice Slurry) stellt aufgrund der nutzbaren Schmelzenthalpie und der daraus resultierenden, hohen spezifischen Wärmekapazität ein vielversprechendes Speichermedium und einen besonders vorteilhaften Kälteträger in Sekundärkältenetzen dar. Die Entwicklung der Partikelmorphologie entlang eines gesamten Lade-/Entladezyklus führt unumgänglich zu einem veränderten Strömungsverhalten und hat daher maßgeblich Einfluss auf die Betriebssicherheit von Flüssigeisspeichersystemen. Bislang fokussierten verschiedene Forschungsgruppen Ihre Untersuchungen auf einzelphänomenologisch orientierte Fragestellungen. Das vorgeschlagene Manuskript soll die Ergebnisse einer umfangreichen Systembetrachtung zusammenfassen und neue Aufschlüsse hinsichtlich einer prozesssicheren Gestaltung von Flüssigeisverteilsystemen geben. Einleitend wird zunächst ein Systemmodell zur Entwicklung der Partikelmorphologie vorgestellt, welches auf Basis von Literaturrecherchen und eigenen Voruntersuchungen erarbeitet wurde. Eine Auswahl ermittelter Einflussfaktoren wurde auf das Durchströmungsverhalten von glatten Rohren (Rohrviskosimeter) und einem neuartigen Plattenwärmeübertrager experimentell untersucht. Der dabei gemessene Verlauf des Differenzdruckes dient als Basis für die Ermittlung von Vergleichskennzahlen. Die Ergebnisse werden mittels eines entwickelten Analysewerkzeuges zusammengefasst und gegenübergestellt.

**Stichwörter:**

Kälteträger, Kälteverteilnetze, Kältespeicherung, Thermische Speicher, Phasenwechselstoffe, Flüssigeis, Eisbrei, Strömungseigenschaften

II.1.23

## **Verblockungsverhalten von Flüssigeis in Wärmeübertragern**

### **„Entwicklung eines Auswertungsalgorithmus zur Charakterisierung von Verblockungserscheinungen in Flüssigeisdurchströmten Plattenwärmeübertragern“**

**Tom Wenzel<sup>1,2</sup>, Christoph Steffan<sup>1\*</sup>, Ulrich Hesse<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland  
[christoph.steffan@ilkdresden.de](mailto:christoph.steffan@ilkdresden.de)

<sup>2</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland  
[Ulrich.Hesse@tu-dresden.de](mailto:Ulrich.Hesse@tu-dresden.de)

Das Strömungsverhalten von Flüssigeis bzw. Eisbrei wird durch zahlreiche Einflussfaktoren (Stoff- und Systemparameter) bestimmt, sodass nur mit einem hohen experimentellen Aufwand schlüssige Zusammenhänge fundiert herausgearbeitet werden können. Ziel der Arbeit war es, eine Systematik zu entwickeln, um das Durchströmungsverhalten am Beispiel von Plattenwärmeübertragern unter Beaufschlagung von Flüssigeis innerhalb eines Speicherladezyklus bewerten und vergleichen zu können. Durch Variation bekannter Einflussfaktoren wurden Verblockungserscheinungen an einem Wärmeübertragerprüfstand experimentell provoziert und anhand einer Differenzdruckmessung detektiert. Den Schwerpunkt bildete die Umsetzung eines Auswertungsalgorithmus in einer MATLAB-Umgebung, mit dem es ermöglicht wird, die anfallenden Datenmengen automatisiert verarbeiten zu können. Durch eine systematische Analyse generierter Messdaten wird die Sensitivität ausgewählter Einflussfaktoren und deren Abhängigkeiten auf die Differenzdruckentwicklung quantifiziert und dargestellt. Der entwickelte Algorithmus liefert eine wichtige Grundlage zur Erarbeitung eines verbesserten Systemverständnisses.

**Stichwörter:**

Kälteträger, Kälteverteilnetze, Kältespeicherung, Thermische Speicher, Phasenwechselstoffe, Flüssigeis, Eisbrei, Strömungseigenschaften

## II.2.01

# Parameterstudie eines neuartigen Schukeyrotationsverdichter

**Bin CUI<sup>1\*</sup>, Martin GOTTSCHLICH<sup>1</sup>, Ulrich LÜDERSEN<sup>1</sup>, Stephan KABELAC<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Hochschule Hannover, Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz, Hannover, Germany  
Tel.: +49 (0)511-9296-1652, E-Mail: [bin.cui@hs-hannover.de](mailto:bin.cui@hs-hannover.de), [martin.gottschlich@hs-hannover.de](mailto:martin.gottschlich@hs-hannover.de),  
[ulrich.luedersen@hs-hannover.de](mailto:ulrich.luedersen@hs-hannover.de)

<sup>2</sup>Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Hannover, Germany  
Tel.: +49 (0)511-762-2277, E-Mail: [kabelac@ift.uni-hannover.de](mailto:kabelac@ift.uni-hannover.de)

Effizient arbeitende Verdichter sind im Allgemeinen wichtig für Anwendungen in Klima- und Kühlsystemen. Folglich steigt das Interesse an innovativen Technologien zur Leistungsverbesserung und der Erweiterung des Anwendungsgebietes. Ein neuer Rotationsverdichter mit dem Namen „Schukey-Verdichter“ wurde sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht. Die Schukey-Technologie geht auf Jürgen Schukey aus dem Jahr 1987 zurück, der ein Getriebe mit Spezialverzahnung entwickelte, welches eine charakteristische periodische Verschiebung von zwei Rotoren innerhalb eines Verdichtergehäuses ermöglicht. Abgesehen von unserer eigenen Forschungsarbeit ist uns keine weitere Entwicklung dieser Maschine bekannt.

Der Verdichter besteht aus zwei ineinandergreifenden Rotoren mit jeweils 4 Flügeln, die ungleichmäßige Drehbewegungen ausführen. Die Arbeitskammern befinden sich zwischen diesen Flügeln. Beide Rotoren besitzen die gleiche Drehrichtung, während ein Rotor beschleunigt verzögert der andere Rotor und umgekehrt. Dies führt zu einer Volumenänderung zwischen den Flügeln, in welcher die Verdichtung und Ansaugung des Arbeitsmediums stattfindet. Nach dem Überschreiten eines bestimmten Drehwinkels beschleunigt der vorher verzögerte Rotor nun, während der andere Rotor verzögert. Aufgrund der Phasendifferenz der Rotoren ändert sich das Volumen einer Arbeitskammer periodisch. Die Einlassöffnung liegt am größten Kammervolumen vor, während die Auslassöffnung zum kleinsten Kammervolumen vorliegt. Weiterhin arbeitet der Verdichter ohne Öl und Ventile. Insgesamt finden 32 Arbeitsspiele in einer Umdrehung statt.

In diesem Beitrag wird eine grundlegende Studie zum Schukey-Verdichter vorgestellt. Das Arbeitsprinzip wird ausführlich beschrieben und veranschaulicht. Erste Studien haben gezeigt, dass Änderungen im geometrischen Design der Maschine, einen direkten Einfluss auf thermodynamische Größen ausüben z.B. dem Druckverhältnis und der technischen Arbeit. Es wird ein mathematisches Modell vorgestellt, welches eine Leistungsabschätzung der Maschine mit Abbildung des Realgasverhalten ermöglicht. Zuletzt werden Optimierungsmöglichkeiten aufgelistet und mit numerischen CFD-Analysen durchgeführt.

## II.2.02

# Lebensdauerversuche an Propanverdichtern

**Dr.-Ing. K. Steinjan, Dr.-Ing. M. Böhm**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[Karl.Steinjan@ilkdresden.de](mailto:Karl.Steinjan@ilkdresden.de)

Bedingt durch die F-Gase Verordnung kommen vermehrt natürliche Kältemittel der Sicherheitsgruppe A3 (u. a. Propan) zum Einsatz.

Die Hersteller bringen für deren Einsatz neue Komponenten auf den Markt. Für die Kälteanlagenbauer stellt sich die Frage, ob die neuen Verdichter als komplexeste und teuerste Bauteile der Anlage auch die bisher üblichen Leistungszahlen und erwartbaren Laufzeiten erreichen. Die Unsicherheit besteht vor allem dort, wo die Kälteanlagen unter stark wechselnden Bedingungen an den Einsatzgrenzen der Verdichter und des Schmieröles betrieben werden müssen.

Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes wurde ein LifeTimeTest LTT500 entwickelt. Darin werden verschiedene Stresslevel definiert, welche die normalen oder grenzwertigen Betriebszustände des Verdichters repräsentieren. Diese Level mit ansteigenden Lasten werden dem Testverdichter zyklisch über 500 Stunden im LTT500 aufgeprägt. Im Referenzzustand wird die zeitliche Entwicklung der Verdichterparameter fortlaufend analysiert.

Verschiedene Stresslevel, die Möglichkeiten der Prüfung und Auswertung sowie die notwendige Prüftechnik v. a. für A3-KM werden vorgestellt.

### II.2.03

## **Noise-Vibration-Harshness: Herausforderungen für elektrische Kältemittelverdichter**

Lukas Löhmer<sup>1</sup>, Florian Wieschollek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rheinmetall Automotive AG, Neuss  
[Lukas.Löhmer@de.rheinmetall.com](mailto:Lukas.Löhmer@de.rheinmetall.com)

<sup>2</sup>Rheinmetall Automotive AG, Neuss  
[Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com](mailto:Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com)

Kältemittelkompressoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge müssen eine Reihe an bekannten und eine Vielzahl an neue Anforderungen erfüllen. Altbekannt ist hierbei die Kühlung des Innenraums des Fahrzeugs im klassischen AC-Modus. Hinzu kommt noch die Konditionierung der Batterien, um deren Leistung zu optimieren. Dabei kann eine Kühlung aber auch ein Heizen der Energiespeicher notwendig sein. Zuletzt ist im Winter ein Wärmepumpenmodus für ein effizientes Fahren hilfreich. Somit erstreckt sich der Einsatzbereich des elektrischen Kompressors vom Wärmepumpenmodus, über den AC-Modus bis hin zur Batteriekühlung.

Die Batteriekonditionierung, insbesondere deren Kühlung ist bei Ladevorgängen eine besondere Herausforderung und kann hohe Massenströme erfordern, die vom Kompressor zur Verfügung gestellt werden müssen. Dabei können Geräusche und Vibrationen entstehen, die von Insassen und Personen im Umfeld als störend wahrgenommen werden. Diese Geräusche können verschiedene Ursachen haben, äußern sich aber typischerweise in Vibrationen bzw. Schwingungen des Kompressors, die sich dann als Schall ausbreiten. Ursächlich für Vibrationen sind zum einen die sich bewegenden Komponenten (Welle, Scroll etc.) die eine Unwucht erzeugen. Des Weiteren werden Kräfte durch den Elektromotor in das Gehäuse des Kompressors induziert, die wiederum zu Vibrationen führen. Zudem hat auch die Strömung und Komprimierung des Kältemittels Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Kompressors im Betrieb.

In dem Vortrag werden das Schwingverhalten eines elektrischen Kältemittelverdichters anschaulich dargestellt, Ursachen und Folgen erläutert und Konzepte zur Optimierung vorgestellt.

#### **Stichwörter:**

Elektrischer Kältemittelkompressor, NVH

II.2.04

## Using 1D simulation to assess the transient motor behavior in a reciprocating compressor

Ján Tuhovčák<sup>1</sup>, Eric Hisao Murakami<sup>2</sup>, Christian Altenhofen<sup>3\*</sup>, Marek Lehocky<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Secop Austria GmbH, Jahnstraße 30, 8280 Fürstenfeld, Austria  
[Jan.Tuhovcak@secop.com](mailto:Jan.Tuhovcak@secop.com)

<sup>2</sup>Secop Austria GmbH, Jahnstraße 30, 8280 Fürstenfeld, Austria  
[Eric.Murakami@secop.com](mailto:Eric.Murakami@secop.com)

<sup>3</sup>Gamma Technologies GmbH, Danneckerstr 37, 70182 Stuttgart, Germany  
[C.Altenhofen@gtisoft.com](mailto:C.Altenhofen@gtisoft.com)

<sup>4</sup>Gamma Technologies GmbH, Danneckerstr 37, 70182 Stuttgart, Germany  
[M.Lehocky@gtisoft.com](mailto:M.Lehocky@gtisoft.com)

During the start-up process of a reciprocating compressor many important phenomena come together and effect the performance and reliability of the whole refrigeration unit. In order to investigate this process, it is necessary to couple different mathematical models together. This paper describes a simulation model for an analysis of a transient start up process of a compressor, taking into account thermodynamics and electric motor characteristics. The model was provided with a real torque vs. speed curve for the motor, therefore it is possible to obtain detailed results for valve behaviour, piston motion and consequently the loads inside the cylinder affecting the motor start-up speed profile. The model was calibrated using data from real compressor and the results were compared with experimental data, showing accurate trend prediction of various starting conditions and dependent requirement on motor characteristics and minimum voltage. Further usage of the developed model for shutdown or stalling is discussed together with the possibility to use the results for noise or lubrication analysis.

**Stichwörter:**

simulation, compressor, 1D, transient

II.2.05

## Sublimation von CO<sub>2</sub>-Trockeneis zur Kühlung bei Temperaturen unter -50°C

Peter Röllig\*, Joachim Germanus

ILK Dresden - Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, D-01309 Dresden  
[peter.roellig@ilkdresden.de](mailto:peter.roellig@ilkdresden.de)  
+49-351-4081-645

Ein spezielles Anwendungsgebiet der Kältetechnik ist die Bereitstellung von Kühlleistung im tiefen Temperaturbereich unter -50°C, die beispielsweise für Laborbetrieb, Gefriertrocknung oder Tieftemperaturmedizin benötigt wird. Gegenwärtig werden für solche Anwendungen meist synthetische Kältemittel mit sehr hohen GWP-Werten genutzt, die mit einer Ausnahmeregelung in der F-Gase-Verordnung EU 517/2014 noch zulässig sind. Denn in diesem speziellen Segment der Kältetechnik werden aus Sicherheitsgründen keine brennbaren Stoffe als Alternative akzeptiert. Und auch andere Technologien, wie Kaltgasprozesse, sind in diesem Temperatur- und Anwendungsbereich meist keine technisch und wirtschaftlich sinnvollen Alternativen.

Aus diesen Gründen wird vom ILK Dresden in einem Forschungsvorhaben an einer umweltfreundlichen Alternative für die Kälteerzeugung unter  $-50^{\circ}\text{C}$  gearbeitet, die auch von der Industrie akzeptiert wird. Dabei soll der natürliche, nicht brennbare Stoff Kohlendioxid als Arbeitsstoff verwendet werden. Der Tripelpunkt von Kohlendioxid liegt bei  $-56,6^{\circ}\text{C}$ . Deshalb kann nicht die Verdampfung (d. h. der Phasenübergang flüssig→gasförmig) zur Kälteerzeugung genutzt werden wie im herkömmlichen Kaldampfprozess, sondern unterhalb des Tripelpunktes die Sublimation (d. h. fest→gasförmig). Dies erfordert neue Technologien, an denen das ILK Dresden arbeitet. Es wurde u. a. ein Sublimations-Wärmeübertrager entwickelt, der wie ein herkömmlicher Verdampfer als Standard-Komponente in den  $\text{CO}_2$ -Kältekreislauf integriert werden soll. Im Vortrag werden Ergebnisse vorgestellt, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erreicht wurden.

**Keywords:**

Kohlendioxid, Trockeneis, Sublimation, Natürliche Kältemittel, Tieftemperaturkühlung

**II.2.06**

## **$\text{N}_2\text{O}$ - $\text{CO}_2$ -Gemische als Kältemittel für Temperaturen unter $-50^{\circ}\text{C}$**

**Elena Melito, Timo Maurath, Michael Kauffeld\***

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

Die EU-F-Gase Verordnung gestattet in Bezug auf das GWP-abhängige Inverkehrbringen von Kälteanlagen Ausnahmen für stationäre Anwendungen unter  $-50^{\circ}\text{C}$ . Nichtsdestotrotz werden die nicht brennbaren Kältemittel, die für diesen Temperaturbereich verwendet werden können, infolge des durch die F-Gase-Verordnung vorgeschriebenen Phase Downs von HFKWs zunehmend teurer und gleichzeitig knapper. Die verfügbaren Kohlenwasserstoffe, wie Methan und Ethan, sind aufgrund ihrer Brennbarkeit nicht in allen Anwendungen praktikabel. Der Einsatz von Kohlenstoffdioxid wird durch den Tripelpunkt bei  $-56^{\circ}\text{C}$  auf Anwendungen über  $-50^{\circ}\text{C}$  begrenzt. Mit einem Tripelpunkt von  $-92^{\circ}\text{C}$  könnte Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), auch als Lachgas bekannt, eine Alternative darstellen. Eine mögliche exotherme Zersetzung von  $\text{N}_2\text{O}$  macht jedoch zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um einen systemtechnisch sicheren Betrieb gewährleisten zu können.

Es wurde eine Gefriertrocknungsanlage entwickelt, erfolgreich aufgestellt und mit einem Gemisch aus  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CO}_2$  sowie mit verschiedenen Schmiermitteln bei Verdampfungstemperaturen bis zu  $-80^{\circ}\text{C}$  betrieben. Die erreichte Energieeffizienz ist vergleichbar mit der einer Standard-HFKW Anlage mit R23. Darüber hinaus konnte einer möglichen exothermen Zersetzung von  $\text{N}_2\text{O}$  durch unterschiedliche Maßnahmen erfolgreich entgegen gewirkt werden.

**Stichwörter:**

Kohlenstoffdioxid, Gefriertrocknung, Tieftemperaturkälte, Distickstoffoxid, Lachgas

**II.2.07**

## **Besser als R-744!**

### **Konzepte für weitere Einsatzgrenzen und höhere Effizienz**

**Dr. Robert E. Low<sup>1</sup>, Dr. Karsten Schwennesen<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup>Koura, Runcorn, GB, [bob.low@kouraglobal.com](mailto:bob.low@kouraglobal.com)

<sup>2</sup>Koura, 60437 Frankfurt am Main, [karsten.schwennesen@kouraglobal.com](mailto:karsten.schwennesen@kouraglobal.com)

Kohlendioxid (R-744) wird zunehmend als nicht-entzündliches Kältemittel in einer ganzen Reihe von Kälte- und Klimaanwendungen eingesetzt. Seine physikalischen Eigenschaften begrenzen seine Anwendung allerdings in

einigen Bereichen: der Tripelpunkt von  $-57^{\circ}\text{C}$  setzt die untere Einsatzgrenze und die sehr hohe Drucklage sowie die verminderte Effizienz bei hohen Temperaturen mindern die Attraktivität für Klimaanwendungen.

Koura untersucht daher verschiedene R-744/Fluorwasserstoff-Hybridkältemittel. Diese sind nicht-entzündlich und weisen niedrige Erderwärmungspotentiale (GWP-Werte) auf, bieten aber im Vergleich zu R-744 eine wesentlich bessere Energieeffizienz, niedrigere Betriebsdrücke und erweiterte Einsatzgrenzen.

Im Vortrag werden diese Kältemittelentwicklungen erläutert und Ergebnisse für zwei Anwendungen vorgestellt: Fluide für die Klimatisierung mit GWP-Werten unter 300 und Fluide für die Kühlung auf Temperaturen unter  $-60^{\circ}\text{C}$ .

## II.2.08

# Challenges when selecting future proof working fluids for high temperature heat pumps

Alexander Cohr Pachai

Johnson Controls Denmark APS (SABROE), Christian X's Vei 201, 8270 HOEJBJERG, DÄNEMARK

[Alexander.C.Pachai@jci.com](mailto:Alexander.C.Pachai@jci.com)

Phone: +45 8736 7000

When selecting working fluids for high temperatures the engineer often look at which refrigerant yields the best COP because the end users often focus on this figure. The topic is interesting because the industry is in a time of transition. Some working fluids have already been phased out due to ozone depletion and others are regulated due to unacceptable high global warming impact. The working fluids with low GWP are limited in temperature operation and they are perhaps also flammable. A few fluorinated fluids are non-flammable but they also contain chlorine, which by time can become subject to new regulations. However, before you use this figure there are many other topics you need to consider. One of the main barriers is that a lot of the industry knowledge and standards are built over many years using fluids for very different applications. The limitations given for one refrigerant can be very different from other types of refrigerants in a different application, here high temperature heat pumps. Will the elastomers used in the system be able to manage with the increased temperature levels? Will the sensors and transmitters survive the high temperatures? Valves? The lubricants in the heat pump is a chapter of its own with the solubility and not least the stability at high temperatures. There are many things to consider before we arrive to the calculation of the COP. COP is one value we can calculate but also other variables has to be considered such as the volumetric heat capacity and the swept volume needed for a given capacity compared to alternatives. The presentation gives an investigation of aspects and impacts of different factors for the right selection of the future proof working fluids for high temperature heat pumps.

### Keywords:

high temperature heat pumps, refrigerants, oils, components, COP

## II.2.09

# Energieeffiziente Verschaltung von Propan-Kälteanlagenmodulen

Tobias Guth<sup>1\*</sup>, Sylvia Schädlich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Ruhr West, Institut für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Lützowstrasse 5, 46236 Bottrop  
[tobias.guth@hs-ruhrwest.de](mailto:tobias.guth@hs-ruhrwest.de)

Energy System Europe GmbH) und der Hochschule Ruhr West hat daher das Ziel, eine modular aufgebaute Propan-Kälteanlage zu entwickeln, deren Effizienz durch eine intelligente Verschaltung einzelner Anlagenmodule optimiert werden kann. Hierzu wurde ein Modell in der Programmiersprache Python entwickelt, welches die

Messwerte zahlreicher Messkampagnen ausgewertet und als Ergebnis Einstellparameter für eine energieeffiziente Betriebsweise in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebspunkt liefert. In diesem Beitrag werden sowohl das Modell als auch verschiedene Betriebsszenarien der Anlage vorgestellt. Das Modell soll zukünftig in die Regelung von Kälteanlagen integriert werden, um so die Effizienz der Anlagen direkt steigern zu können.

**Stichwörter:**

Propan, R290, Energieeffizienz, Modulkopplung, Drehzahlregelung

**II.2.10**

## **Persistente Abbauprodukte von F-Gasen**

**David Behringer<sup>1\*</sup>, Felix Heydel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Öko-Recherche GmbH, Münchener Str. 23a, 60329 Frankfurt am Main, Deutschland  
[david.behringer@oekorecherche.de](mailto:david.behringer@oekorecherche.de)

Der Marktanteil ungesättigter teilfluorierter Kohlenwasserstoffe (HFO und HCFO) steigt aufgrund ihres niedrigen Treibhauspotentials immer stärker an. Vor diesem Hintergrund besteht auch ein erhöhtes Interesse an möglichen Umweltauswirkungen dieser Stoffe und ihrer atmosphärischen Abbauprodukte.

In einem Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden die Lebensphasen der Herstellung, Verwendung und Zerstörung halogener Treib- und Kältemittel und die damit einhergehenden Emissionen analysiert, mit dem Ziel festzustellen, ob halogenierte Treib- und Kältemittel mit kleinem Treibhauspotential den Eintrag umweltrelevanter Stoffe zur Folge haben können. Dabei wurde insbesondere Trifluoressigsäure (TFA) als persistentes atmosphärisches Abbauprodukt identifiziert, das bis ins Trinkwasser gelangt.

Aus der Projektion von Bedarf und Emissionen von wichtigen gesättigten und ungesättigten HFKW und HFCKW für Deutschland und die EU bis ins Jahr 2050, wurde die Menge der daraus gebildeten Trifluoressigsäure abgeschätzt. In Kooperation mit dem TZW Karlsruhe wurde ein deutschlandweites Messprogramm zum Eintrag von Trifluoracetat (TFA-Salz) über Niederschläge für die Jahre 2018 und 2019 durchgeführt. Ergänzt wurde das Projekt durch Modellierungen des Schweizer Forschungsinstituts Empa zum Beitrag des atmosphärischen Abbaus von R1234yf und R134a zum beobachteten TFA-Eintrag.

Der Vortrag wird die Ergebnisse des Forschungsprojektes vorstellen und diskutieren.

**Stichwörter:**

HFKW, HFO, TFA, Trifluoracetat, Trifluoressigsäure

**II.2.11**

## **Charakterisierung von Kältemittelverflüssigern und -verdampfern in Kälteanlagen und Wärmepumpen**

**Torsten Will M.Sc.<sup>1\*</sup>, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler<sup>2</sup>, Prof. Dr. Hans-Martin Henning<sup>1</sup>,  
Dr.-Ing. Lena Schnabel<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Simon Braungardt<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Clemens Dankwerth<sup>1</sup>,  
Lukas Joos M.Sc.<sup>1</sup>, Timo Methler M.Sc.<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Thore Oltersdorf<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Abteilung Wärme- und Kältetechnik  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland  
[torsten.will@ise.fraunhofer.de](mailto:torsten.will@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup>Technische Universität Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Thermodynamik  
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland

Wärmeübertrager sind in Kälteanlagen und Wärmepumpen die wichtigsten Komponenten für einen energieeffizienten Betrieb. Neue Designs und Verbesserungen erfordern die Charakterisierung der Performance am realen Objekt, für diesen Zweck ist am Fraunhofer ISE ein Versuchsstand zur Charakterisierung von Kältemittelverflüssigern und -verdampfern in Kälteanlagen und Wärmepumpen in Betrieb genommen worden. Es können Wärmeübertrager mit den Sekundärmedien Luft, Wasser und Sole mit verschiedensten Kältemitteln (Kohlenwasserstoffe, HFKWs, HFOs, Kältemittelgemische) bei einem Druck zwischen 2 bar und 28 bar als Kältemittelverflüssiger oder Kältemittelverdampfer vermessen werden. Der eigens entwickelte modulare Aufbau des Versuchsstandes mit Kältekreis und Hydraulikkreis und einer Anbindung mittels Bypass-Schaltung an den zu vermessenden Wärmeübertrager bietet die Möglichkeit der Vermessung einer großen Bandbreite von einsetzbaren Kältemitteln, Sekundärmedien, Leistungen und Temperaturen. Die Charakterisierung beinhaltet die Vermessung der Performance, der Kältemittelfüllmenge und der Menge des im Wärmeübertrager verbleibenden Öls im stationären Zustand sowie dem dynamischen Vereisungsverhalten und der Fehlverteilung des Kältemittels (bei Luft Kältemittelverdampfern). Ergebnisse zur Vermessung der Performance, der Eisbildung und der Kältemittelfüllmenge werden an ausgewählten Luft-Wärmeübertragern sowie an Plattenwärmeübertragern vorgestellt und diskutiert.

**Stichwörter:**

Versuchsstand, Wärmeübertrager, Performance, Kältemittelfüllmenge, Vereisung

**II.2.12**

## **Verhalten eines NH<sub>3</sub>-Verdampfers vom Bereich geringer Überhitzung bis zur Überflutung**

**Franz Sperl<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Güntner GmbH & Co. KG, Bereich Technologie- & Vorentwicklung, Abteilung Messungen & Versuche, Hans-Güntner-Straße 2 - 6, 82256 Fürstenfeldbruck, Deutschland  
[franz.sperl@guentner.com](mailto:franz.sperl@guentner.com)

Die aktuelle Entwicklung bei lamellierten Luft beaufschlagten NH<sub>3</sub>-Verdampfern geht zu überfluteten Geräten mit niedrigen Pumpraten oder zu Direktexpansionsbetrieb mit signifikanter Überhitzung am Austritt des Verdampfers. Beide Anwendungen führen zu deutlich geringeren Kältemittelfüllmengen im Vergleich zu Apparaten im klassischen, überfluteten Betrieb mit hoher Pumprate. Da für diese Betriebsarten bei Ammoniak-Verdampfern noch wenig praktische Erfahrung vorliegt, sind experimentelle Untersuchungen notwendig.

Neben den Messungen zur Entwicklung von thermodynamischen Modellen zur Berechnung der thermischen Leistung steht auch die Konstruktion von diesen modernen NH<sub>3</sub>-Verdampfern im Vordergrund solcher Untersuchungen. Diese muss angepasst werden, um ein Optimum an thermischer Leistung und Betriebssicherheit zu erzielen.

In diesem Beitrag werden verschiedene Rohrschaltungen und deren thermodynamisches Verhalten für beide Betriebsmodi untersucht und gegenübergestellt. Zudem wird der Einfluss des Kapillarrohrdurchmessers auf die Kältemittelverteilung und somit auf die thermische Leistung präsentiert. Auch ein kontinuierlicher Übergang von überhitzten zu überfluteten Betriebszuständen wird untersucht. Die damit verbundenen Effekte werden qualitativ dargestellt.

**Stichwörter:**

NH<sub>3</sub>, DX, gepumpt, Kälteleistung, Rohrschaltung, Optimierung

II.2.13

## Rotierender Verdampfer für eine Wärmepumpe oder Kältemaschine

Oliver Schmid<sup>1\*</sup>, Prof. habil. Dr.-Ing. Michael Kauffeld<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[oliver.schmid@hs-karlsruhe.de](mailto:oliver.schmid@hs-karlsruhe.de)

<sup>2</sup>Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de)

Ein rotierender Verdampfer ist die Kombination eines Radiallüfters und eines Wärmeübertragers. Der innovative Ansatz bietet die Möglichkeit, die Herausforderungen der Verdampfer-Technologien im Zusammenhang mit brennbaren Kältemitteln auf besondere Weise anzugehen. Die VDMA 24020-3 verbietet die Verwendung elektrischer Geräte mit Zündquellen in explosionsgefährdeten Bereichen. Beim Einsatz des rotierenden Verdampfers muss der elektrische Antrieb zur Erzeugung des Luftstroms nicht in unmittelbarer Nähe des Wärmeübertragers sein. Die Technologie beinhaltet zudem die Funktion eines Kältemittel-Separators auf geringem Bauraum wodurch die Kältemittelfüllmenge klein gehalten werden kann. Durch die Ausführung als Radiallüfter ist die Geräuschemission bei hohen Luftvolumenströmen verglichen mit einem Axiallüfter gering. Ein größerer Luftvolumenstrom über die wärmeübertragenden Lamellen hat zudem zur Folge, dass die Verdampfungstemperatur näher an der Umgebungstemperatur ist. Auf Grund der Fliehkräfte wird das flüssige Kältemittel zurückgehalten, weshalb keine Überhitzung notwendig ist. Der Eintrittszustand des Kältemittels in den Verdichter ist näher an der Taulinie, wodurch der Verdichter geringere Arbeit zu verrichten hat. Rotierende Verdampfer haben das Potenzial die Effizienz der gesamten Kompressionskälteanlagen zu erhöhen und gleichzeitig die Akzeptanz von Wärmepumpen in der Bevölkerung zu vergrößern.

**Stichworte:**

Wärmepumpen, Verdampfer, Lüfter

II.2.14

## Untersuchungen an Kleinkälteverdichtern

Melanie Cop<sup>1\*</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Münchner Platz 3, 01069 Dresden, Deutschland  
[melanie.cop@tu-dresden.de](mailto:melanie.cop@tu-dresden.de)  
[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)  
[ullrich.hesse@tu-dresden.de](mailto:ullrich.hesse@tu-dresden.de)

Im Jahr 2017 bildet die Haushaltskälte mit ca. 57 % den größten Anteil an der Anzahl der Kühlsysteme in Deutschland. Ein zweiter, im Wachstum begriffener, Markt für Kaltdampfprozesse ist der Einsatz von Wärmepumpen in Haushaltsgeräten wie zum Beispiel in Wäschetrocknern. Diese Anwendungsgebiete erfordern Kältesysteme mit einer Kälteleistung unterhalb von 2 kW. Trotz des Marktwachstums ist eine proportionale Zunahme des Gesamtenergiebedarfs zu vermeiden und den geltenden Effizienzanforderungen gerecht zu werden.

Die Kernkomponente und der Hauptverbraucher der Kleinkältesysteme ist der Kältemittelverdichter. Ein Optimierungsansatz betrifft bei dieser Komponente den Schmierstoff. Der gezielte Einsatz von Additiven verspricht die Erhöhung der Kälteleistungszahl. Darüber hinaus bietet der systemische Ansatz effizientere auf den Prozess angepasste Kältemittel einzusetzen die Möglichkeit die Kälteleistungszahl zu verbessern.

Zwei durchgeführte Messreihen greifen die genannten Ansätze auf. Durchgeführt wurden die Messungen auf einem normgerechten Verdichter-Leistungsprüfstand gemäß DIN EN 13771-1 gelang es eine Verbesserung der Leistungszahl nachzuweisen. Die Betriebsparameter orientieren sich je nach Anwendungsgebiet an den gültigen Normen wie die DIN 12900. Die Untersuchung betrachtet zum einen Hubkolbenverdichter aus der Kühltrocknung, der mit Ölen gleicher Viskositätsklassen und unterschiedlichem Viskositätsindex vermessen wurde. Zum anderen fand ein Kältemittel Drop-In an einem Rollkolbenverdichter aus der Haushaltswärmepumpenanwendung statt.

**Stichwörter:**

Kolbenverdichter, Leistungsmessung, Drop-In Kältemittel, Kältemittelöl

II.2.15

## Experimentelle Analyse eines Schmiermittels für Kohlenwasserstoff-Kältemittelgemische

Katharina Stöckel\*<sup>1</sup>, Ramona Nosbers<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik

[katharina.stoeckel@tu-dresden.de](mailto:katharina.stoeckel@tu-dresden.de)

[ramona.nosbers@tu-dresden.de](mailto:ramona.nosbers@tu-dresden.de)

[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

[ullrich.hesse@tu-dresden.de](mailto:ullrich.hesse@tu-dresden.de)

In den letzten Jahren wächst der Markt für Geräte, die Kältemittel auf Kohlenwasserstoff-Basis verwenden, insbesondere für die Anwendung im Haushalt. Kohlenwasserstoffe gelten aufgrund ihres geringen GWP sowie ihres niedrigeren Preises vor allem für Kleingeräte als praktikable Alternativen zu H-FKW und kommen in der EU bereits seit Langem in Haushaltskühlgeräten zum Einsatz. Aber auch für weitere Anwendungen, wie beispielsweise Wärmepumpen-Wäschetrockner, werden sie mittlerweile eingesetzt. Insbesondere bei diesen kann es exergetische Vorteile bringen, Kältemittelgemische mit Temperaturleit einzusetzen, die dem luftseitigen Temperaturleit im Wärmeübertrager angepasst sind.

Beim Wechsel zu neuen Kältemitteln muss zumeist der Kompressor und auch der jeweilige Schmierstoff angepasst werden. Die sich einstellenden thermophysikalischen Eigenschaften des Kältemittel-Schmierstoff-Gemischs sind, vor allem beim Einsatz von Kältemittelgemischen, nur schlecht vorhersehbar und müssen daher experimentell bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenschaften eines neuen Kompressorenschmierstoffs für den Einsatz mit zeotropen Kohlenwasserstoff-Kältemitteln experimentell betrachtet. Die Ergebnisse einer Mischung aus Kohlenwasserstoffen und einem Polyolesteröl (POE) werden dargestellt und hinsichtlich ihrer relevanten thermophysikalischen Eigenschaften diskutiert.

**Stichwörter:**

Natürliche Kältemittel, Kältemittelgemische, Kältemittel-Öl-Gemische, Stoffdatenuntersuchung

II.2.16

## **Netzprobleme: Phasenüberwachung für Verdichter, Pumpen und Ventilatoren**

**Dr. Christian Ellwein**

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, D-74670 Forchtenberg

[Christian.Ellwein@kriwan.de](mailto:Christian.Ellwein@kriwan.de)

Maschinen wie Verdichter, Pumpen oder Ventilatoren müssen vor kritischen Zuständen und der Gefahr von Beschädigung geschützt werden. Neben etlichen anderen Parametern wie Temperaturen, Vibration oder Motorströmen spielt die Netzspannung eine besondere Rolle, weil die Qualität der Versorgungsspannung ursächlich für viele Probleme in einer Maschine verantwortlich sein kann. Gleichzeitig sind Netzprobleme häufig transienter Natur: das heißt, sie entstehen zu einem bestimmten Zeitpunkt, wirken eine Zeit lang und verschwinden in vielen Fällen wieder. Das macht die Suche nach den Ursachen schwierig. Eine weitere Herausforderung liegt darin, dass Probleme mit der Spannungsversorgung nicht zwingend am eigentlichen externen Versorgungsnetz liegen müssen. Sie können auch an der Verkabelung einer Anlage, an anderen Maschinen in räumlicher Nähe, an Frequenzumrichtern und manchem mehr liegen. Zusätzlich ist die Messung der Spannungen in der Praxis von einigen Herausforderungen begleitet, die unbeabsichtigt die Messungen verfälschen können: so können EMV-Probleme, Feuchtigkeit oder andere Einflüsse den Messfehler erheblich beeinflussen. In diesem Vortrag werden diese Randbedingungen sowie typische Auswirkungen von Netzproblemen beschrieben und Lösungswege aufgezeigt.

II.2.17

## **Hocheffizienter Axialventilator mit breitem Anwendungsspektrum**

**Patrick Stern, Product & Market Manager**

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

Phone: +49 (7938) 81 568, Fax: +49 (7938) 81 9568

[Patrick.Stern@de.ebmpapst.com](mailto:Patrick.Stern@de.ebmpapst.com)

Bisher waren Axialventilatoren im Durchmesserbereich von 300 bis 500 mm eher für Anwendungen mit niedrigen Drücken vorgesehen. Mit der AxiEco-Baureihe überwindet ebm-papst Mulfingen diese Barriere und erschließt damit Anwendungsmöglichkeiten für Axialventilatoren – neben den klassischen Verdampfer- und Verflüssigeranwendungen – mit Gegendrücken von bis zu 500 Pa.

Der Vortrag zeigt außerdem, dass im aerodynamischen Design eines Ventilatorlaufrades viel Potenzial steckt, um die Energieeffizienz des kompletten Ventilators zu verbessern und damit die heutigen Effizienzanforderungen der Eco-Design-Richtlinie zu übertreffen bzw. die zukünftigen Effizienzanforderungen zu erfüllen. Diese hohe Energieeffizienz beim Ventilator schafft Planungssicherheit beim Gerätehersteller.

II.2.18

## Untersuchung einer kommerziellen R744 Supermarktkälteanlage mit Ejektortechnologie

Johannes Doll<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>1</sup>, Mark Sever<sup>2</sup>, Christian Schlemminger<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, 7491 Trondheim, Norwegen

<sup>2</sup>Danfoss d.o.o., HR-10000 ZAGREB, Kroatien

<sup>3</sup>SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norwegen

[Christian.Schlemminger@sintef.no](mailto:Christian.Schlemminger@sintef.no)

Im Bestreben nach einer nachhaltigen Energienutzung kommt Kälteanlagen eine besondere Bedeutung zu, die CO<sub>2</sub> als natürliches Arbeitsfluid verwenden. Integrierte Lösungsansätze, die neben konventioneller Kühlung auch eine Wärmerückgewinnung in Form von Warmwasseraufbereitung und Gebäudebeheizung einbinden, leisten einen besonderen Beitrag zur Energieeffizienz im Gebäudesystem der Supermärkte. Die Energieeffizienz von Booster- und Parallelkompressionsanlagen kann durch den Einsatz von Ejektoren verbessert werden. In dieser Arbeit wurden Messdaten einer realen Anlage in Deutschland erhoben. Während der Datenaufbereitung wurden die Massenströme und technische Arbeit mit Hilfe von Näherungspolynomen der Kompressoren simuliert. Die vorliegende Arbeit behandelt die Gegenüberstellung verschiedener Betriebsmodi. Der Vergleich von Ejektorbetrieb gegenüber dem Betrieb mit elektronischen Expansionsventil zeigt eine Steigerung Leistungszahl um 10 % bei 20°C Umgebungstemperatur. Durch die zusätzliche Anwendung von Überhitzungsregelung mit überfluteter Verdampfung konnte eine weitere Effizienzsteigerungen von 14 % bei 22°C Umgebungstemperatur ermittelt werden. Ein Vergleich der kombinierten Jahresarbeitszahl ergibt eine mögliche Effizienzsteigerung von 18 %.

### Stichwörter:

Transkritische CO<sub>2</sub>-Supermarkt-Kälteanlage, Ejektor, Betriebscharakteristik, Effizienzsteigerungen

II.2.19

## Leistungsverhalten von Schraubenverdichtern im Langzeitbetrieb

### Eine empirische Untersuchung

Andreas J. Höß\*, Dr.-Ing. Eckhard A. Groll

Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University  
177 S. Russel St., West Lafayette, IN 47907-2099, USA

[ahoess@purdue.edu](mailto:ahoess@purdue.edu)

In der Praxis wird die Leistung und Effizienz von Kältemaschinen noch immer aufgrund unzureichenden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen gemindert. Teilweise werden leistungserhaltende Maßnahmen zu spät durchgeführt oder erst dann, wenn der Verdichter bereits grundlegende Schäden mit sich gezogen hat.

Gegenstand des aktuellen Projektteils ist die Beschreibung des Teststandes und die notwendigen Änderungen im bestehenden Testaufbau. Des Weiteren wird auf die Datenerhebung und deren Aufbereitung eingegangen. Anhand aktuell erfasster Daten, werden Faktoren näher erläutert, die zu einer Leistungsminderung führen. Abschließend folgt eine Vorschau auf die folgenden Untersuchungsschritte.

Ziel der Arbeit ist es die Wartung von Kaltwassersätzen und insbesondere Schraubenverdichtern zu optimieren. Besonders in Bezug auf das vermehrte Aufkommen von sogenannten Predictive Maintenance Eigenschaften von Kältemaschinen soll eine Datengrundlage geschaffen werden. Auf deren Basis werden in weiteren Schrit-

ten Algorithmen erarbeitet, die das Leistungsverhalten eines Kaltwassersatzes mit Schraubenverdichter im Langzeitbetrieb realitätsnah und auf andere Systeme übertragbar wiedergeben. Dies erlaubt auch einen Effizienzvergleich unterschiedlicher Verdichtertechnologien.

**Stichwörter:**

Kaltwassersatz, Chiller, Schraubenverdichter, Leistungsabnahme, Predictive Maintenance

II.2.20

## Ejektoren für Wärmepumpen – Grobauslegung mittels 1D Strömungssimulation

Adam Buruzs<sup>1\*</sup>, Klemens Marx<sup>1</sup>, Michael Lauer<sup>1</sup>, Constantin Zenz, Christoph Reichl<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[adam.buruzs@ait.ac.at](mailto:adam.buruzs@ait.ac.at)

In konventionellen Wärmepumpensystemen wird über das Expansionsventil das flüssige Kältemittel auf Verdampferdruck entspannt. Durch den isenthalpen Drosselprozess entstehen Verluste, die je nach Druckgefälle mehr oder weniger ausgeprägt sind. Diese Energiedissipation lässt sich durch den Einsatz von Ejektoren reduzieren. In Ejektoren wird die freigesetzte kinetische Energie während der Druckreduktion teilweise zurückgewonnen, was sich wiederum positiv auf den COP (engl. Coefficient of Performance) im Vergleich zu konventionellen Wärmepumpen auswirkt. Für die geometrische Auslegung eines Ejektors sind in der Regel numerische Strömungssimulationen notwendig. Das Ejektor-Design muss dem vorherrschenden Betriebszustand der Wärmepumpe angepasst werden. Im Gegensatz zu zeitaufwendigen 3D-Strömungssimulationen liefert eine 1D-Simulation deutlich schnellere Ergebnisse, die zur Ejektor-Grobauslegung und auch für das physikalische Verständnis sehr wertvoll sind. In dieser Arbeit beschreiben wir die Entwicklung eines 1D-Simulationstools, mit dem die strömungsmechanischen Gleichungen gelöst werden und damit physikalische Kennzahlen von Ejektoren in Abhängigkeit des Betriebszustands (Temperatur, Druck, Kältemittel) und Geometrie berechnet werden können. Die Ergebnisse basieren auf dem HEM (engl. Homogeneous Equilibrium Model) Ansatz für die Ermittlung der Überschallströmung eines 2-phasengemisches (flüssig und dampfförmig). Der Vergleich mit einem ausgeführten Ejektor für R600 zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Messdaten.

**Stichwörter:**

Numerische Simulation, Strömungsmechanik, Ejektor Design, R600

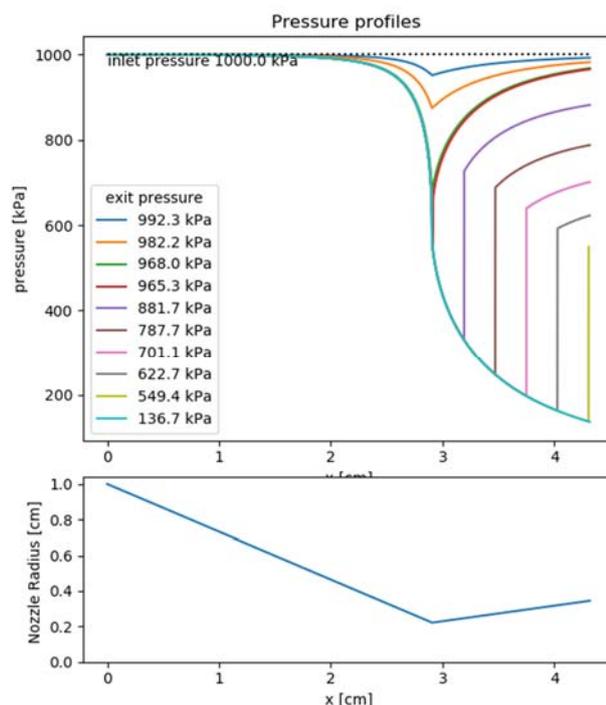


Abbildung 1: Simulierter Druckverlauf in der konvergent-divergent Düse in Abhängigkeit der Druckdifferenz für R600 (oben) sowie die Geometrie der Düse (unten).

## Innovative LiBr/H<sub>2</sub>O Absorber-Technologien für niedrige Kälteträgertemperaturen

Dmitrij Gorlovsky<sup>1\*</sup>, Ivo Eiermann<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>Johnson Controls, Global Product Management Absorption Chillers & Heaters,  
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland  
[Dmitrij.Gorlovsky@jci.com](mailto:Dmitrij.Gorlovsky@jci.com)

<sup>2</sup>Johnson Controls, Global Product Management Absorption Chillers & Heaters,  
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland  
[Ivo.Eiermann@jci.com](mailto:Ivo.Eiermann@jci.com)  
Tel. (0162/1090112)

Praxisbeispiele von LiBr/Wasser Absorptionskältemaschinen für Kälteträgertemperaturen bis 0°C und -6°C.

Einsatz von Fernwärme-angetriebenen Single Effect Double Lift LiBr/Wasser Absorptionskältemaschinen zur Einhaltung niedriger Rücklauftemperaturen in Fernwärmenetzen.

Betriebssicherheit durch 2 stufige Verdampfer- / Absorber-Konstruktion bei LiBr/Wasser

Absorptionskältemaschinen und Wärmepumpen.

### **Stichwörter:**

LiBr/Wasser – Absorptionskältemaschine für niedrige Kälteträgertemperaturen von 0°C bis -6°C, Wärmepumpen, Fernwärme, Betriebssicherheit.

III.01

## Wirkung von Ejektoren in CO<sub>2</sub> Wärmepumpen

### Einfluss der Ventilator Drehzahl und Kistenstapelung auf Luftgeschwindigkeit am Produkt

Andres Hegglin

E-jector AG, Reutlingerstrasse 116, CH 8404 Reutlingen, SCHWEIZ  
[hegglin@ejector.ch](mailto:hegglin@ejector.ch)

Vermeehrt werden Ejektoren in transkritischen CO<sub>2</sub> Anlagen zur Steigerung der Systemeffizienz eingesetzt. Ihren besten Wirkungsgrad haben Ejektoren bei hohen Drücken und entsprechenden Gastemperaturen. Die Erfahrung zeigt, dass Leistungssteigerungen bis über 20 % zu erreichen sind. Naheliegend ist daher die Anwendung von Ejektoren auch in Wärmepumpen.

Untersucht wurde an einer umschaltbaren CO<sub>2</sub>-betriebenen Wärmepumpe mit 80 kW Wärmeleistung der Einsatz eines regelbaren Ejektors im Vergleich zum standardmässigen Betrieb ohne Ejektor. Über zwei Jahre wurde der Betrieb abwechselungsweise in beiden Betriebsarten geführt, dokumentiert und verglichen. Die Ejektor-Betriebsweise zeigt in jedem Betriebsfall eine deutliche Effizienzsteigerung. CO<sub>2</sub> Wärmepumpen mit Ejektoren sind auf Grund der Effizienzverbesserung in ihrem Gütegrad vergleichbar mit jenen mit synthetischem Kältemittel betriebenen Wärmepumpen. Im Lichte der Kältemitteldiskussion führt diese Bauart von Wärmepumpen für den Betreiber zu wesentlich höherer Investitionssicherheit.

III.02

## Vergleichende Untersuchung von effizienzsteigernden Maßnahmen an einer transkritischen CO<sub>2</sub>-Versuchskälteanlage

Christian Doerffel<sup>1\*</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorstechnik, 01062 Dresden  
[christian.doerffel@tu-dresden.de](mailto:christian.doerffel@tu-dresden.de)

In der gewerblichen Kälteversorgung nimmt der Marktanteil von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen seit einigen Jahren stetig zu. Insbesondere bei höheren Umgebungstemperaturen zeigt sich aufgrund des transkritischen Betriebs häufig eine niedrigere Energieeffizienz im Vergleich zu Kälteanlagen mit anderen Kältemitteln. Daher werden unter anderem die Parallelverdichtung, Ejektoren oder Expansionsmaschinen zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit sowie externe Unterkühlungskreisläufe eingesetzt, um die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

An der TU Dresden wurde eine Versuchsanlage konzipiert und aufgebaut, die einen direkten Vergleich aller genannter Maßnahmen in einer Anlage unter gleichen Randbedingungen ermöglicht. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden Messergebnisse der Versuchsanlage unter variierenden Randbedingungen vorgestellt und eine Einordnung hinsichtlich der Wirksamkeit der effizienzsteigernden Maßnahmen vorgenommen.

Die jeweiligen Schaltungsvarianten werden auf ihre optimalen Einsatz- und Randbedingungen hin untersucht und die entsprechenden Einsatzgrenzen benannt.

**Stichwörter:**

R744, Energieeffizienz, Parallelverdichtung, Expander, Ejektor, Unterkühlung

III.03

## Direktes Kühlen, Klimatisieren und Heizen mit CO<sub>2</sub> in einem System ohne Zwischenkreislauf

Manuel Decasper<sup>1\*</sup>, Jonas Schönenberger<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Frigo Consulting AG, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz  
[m.decasper@frigoconsulting.ch](mailto:m.decasper@frigoconsulting.ch)

Es wird eine CO<sub>2</sub>-Kälteanlage vorgestellt, welche als Integralsystem ausgeführt wurde. Mit dem Integralsystem wird die anfallende Abwärme der Kälteanlage genutzt, um das Heizsystem zu entlasten. Zusätzlich ist das System so weiterentwickelt, dass dieses den gesamten Wärmebedarf des Gebäudes oder Supermarktes abdecken kann, indem es durch einen Aussenverdampfer einen Wärmepumpenbetrieb ermöglicht. Das Aussergewöhnliche neben dem standardmässigen Kühlprozess, der Abdeckung der Heizlast mit Abwärme und allenfalls eines zusätzlichen Aussenverdampfers besteht darin, dass die gesamte Heiz- und eine allfällige Klimlast ohne Zwischenkreislauf im ganzen Gebäude verteilt wird. Dies geschieht über Deckenlüftungsgeräte, Wandgeräte oder Lüftungsregister. Mit dem System kann in verschiedenen Räumen gleichzeitig gekühlt und geheizt werden.

Es wird eine Supermarkt-Verkaufsstelle vorgestellt, welche sich seit 2018 mit diesem System in Betrieb befindet. Dazu wird die grundlegende Funktionsweise des Systems erläutert und auf die essenziellen Systemeigenschaften eingegangen. Ausserdem werden Betriebsdaten präsentiert und Chancen und Risiken des Systems aufgezeigt. Neben dem Aufzeigen von verschiedenen Betriebsituationen, wird darauf eingegangen, was bei der Auslegung von solchen Systemen zu berücksichtigen ist. Zusätzlich wird das Verhalten des Energieverbrauchs dieser Supermarkt-Verkaufsstelle analysiert und Optimierungspotential aufgezeigt.

**Stichwörter:**

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

III.04

## Schwingungstechnische Optimierung von Kälteaggregaten für den Einsatz auf Lastkraftwagen

Robin Langebach<sup>\*1</sup>, Tobias Pfliehinger<sup>1</sup>, Miroslav Andjelkovic<sup>1</sup>, Jan Kröger<sup>2</sup>, Vincent Stötzel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft,  
THE SCHAUFLEER FOUNDATION Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie  
[Robin.Langebach@hs-karlsruhe.de](mailto:Robin.Langebach@hs-karlsruhe.de)

<sup>2</sup>termotek GmbH, Gottlieb-Daimler-Str. 3, 76532 Baden-Baden  
[Jan.Kroeger@termotek.de](mailto:Jan.Kroeger@termotek.de)

Kleinkälteaggregate werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Einige von ihnen sind dabei besonderen Einsatzbedingungen ausgesetzt. Dies können extreme Temperaturen und UV-Strahlung sein oder auch zusätzliche Belastungen durch Schwingungen. Im konkreten Fall sind Schadensfälle an Kleinkälteaggregaten durch starke Vibrationsbelastung beim Einsatz auf Lastkraftwagen eingetreten. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Modalanalyse des bestehenden Aggregats durchgeführt und somit das Antwortspektrum an kritischen Stellen der Konstruktion ermittelt. Im Ergebnis der Untersuchungen und Optimierungen konnten konstruktive Verbesserungen vorgeschlagen und umgesetzt werden, die auf eine deutlich bessere Haltbarkeit des Aggregats unter den gegebenen Belastungen schließen lassen.

**Stichwörter:**

Kleinkälteaggregat, Schwingungen, Modalanalyse, Antwortspektrum

## R744-Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion für Bahnanwendungen

Peter Schrank<sup>\*1</sup>, Alexander Rauch<sup>1</sup>, Andreas Presetschnik<sup>2</sup>, René Rieberer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Virtual Vehicle Research Center, Department: Thermal Management Systems,  
Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Österreich  
[peter.schrank@v2c2.at](mailto:peter.schrank@v2c2.at), [alexander.rauch@v2c2.at](mailto:alexander.rauch@v2c2.at)

<sup>2</sup>Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG, HVAC Business,  
Liebherrstraße 1, 2100 Korneuburg, Österreich

<sup>3</sup>Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik,  
Inffeldgasse 25b, 8010 Graz, Österreich

Im österreichischen F&E-Projekt „*eco2jet*“ wird eine umweltfreundliche, energie- und kosteneffiziente R744-Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion für Bahnanwendungen entwickelt. Die Anlage wird auf dem Klimakammerprüfstand und in weiterer Folge im regulären Fahrbetrieb des Zugbetreibers ÖBB (Österreichische Bundesbahnen) betrieben und evaluiert.

Die Verwendung des natürlichen Kältemittels R744 (CO<sub>2</sub>) stellt, aufgrund des vernachlässigbaren *GWP*-Wertes und der hervorragenden thermodynamischen Eigenschaften im Wärmepumpenbetrieb, eine zukunftsorientierte Technologie u. a. für Bahnanwendungen dar. Verglichen zu herkömmlichen Kälteanlagen, erhöht die *eco2jet*-Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion die Energieeffizienz maßgeblich.

Eines der Ziele ist es, neben der möglichst geringen Umweltbelastung, die Komfortbedingungen für die Passagiere in einem breiten Anlagenbetriebsbereich bestmöglich zu erfüllen. Hierzu ist es notwendig eine fortschrittliche Anlagenarchitektur in Verbindung mit neuartigen Wärmeübertragern, Kältemittelverdichtern mit Zylinderabschaltung und einer intelligenten Anlagensteuerung zu entwickeln. Im Laufe des Forschungsprojektes werden zusätzlich noch prädiktive Wartungsstrategien erarbeitet und erprobt, welche die Betriebs- und Wartungskosten für den Betreiber senken und die Ausfallssicherheit signifikant erhöhen sollen.

Dieses Manuskript beinhaltet eine allgemeine Systembeschreibung, Messergebnisse vom Klimakammerprüfstand sowie Simulationsergebnisse der *eco2jet*-Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion.

### Keywords

Bahn, Nah- und Fernverkehr, Kälteanlage, Wärmepumpe, R744 (CO<sub>2</sub> - Kohlenstoffdioxid), HVAC

## Untersuchung des Druckverlusts von Kfz-Kältemittelleitungen mit R1234yf

Robin Meinert<sup>1\*</sup>, Gerhard Schmitz<sup>2</sup>

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Thermodynamik  
Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland  
[robin.meinert@tuhh.de](mailto:robin.meinert@tuhh.de), [schmitz@tuhh.de](mailto:schmitz@tuhh.de)

Die Auslegung und Modellierung des Kältemittelkreislaufes im Automobil erfolgt häufig mit der Modellierungssprache Modelica, sowie deren graphischer Oberfläche Dymola. Die einzelnen Komponenten werden lediglich in einer Raumdimension aufgelöst, wobei Einflüsse der Geometrie vernachlässigt werden. Die verbindenden Leitungen zwischen den Bauteilen werden dabei als gerade Rohre mit äquivalenter Länge modelliert oder gänzlich vernachlässigt, obwohl die hervorgerufenen Druckverluste einen signifikanten Einfluss auf die

Gesamteffizienz des Prozesses haben können. In diesem Projekt sollen daher die Kältemittelleitungen eines Serienfahrzeugs experimentell, wie auch numerisch mittels 3D-Feldsimulationen hinsichtlich ihrer Druckverluste untersucht werden.

Dafür wurde am Institut für Technische Thermodynamik der technischen Universität Hamburg ein Versuchstand errichtet, mit dem einzelne Prüfkörper bei definierten Eintrittsbedingungen mit dem Kältemittel R1234yf durchströmt werden können. Dabei können Drücke bis 24 bar, Temperaturen von – 15 °C bis 130 °C und Masseströme bis 300 kg/h unabhängig voneinander eingestellt werden. Nach einer Validierungsmessung mit einem geraden Rohr wurde zunächst eine Saugleitung vermessen. Es zeigt sich, dass sowohl mit der eindimensionalen, als auch mit der dreidimensionalen Betrachtungsweise der Druckverlust zu niedrig berechnet wird. Der Grund wird in einem Schlauchabschnitt vermutet, wessen Innenstruktur unbekannt ist und nicht gesondert modelliert wurde. In folgenden Untersuchungen soll daher der Einfluss des Schlauches als einzelne Komponente untersucht und analysiert werden, um somit die Vorhersagegenauigkeit von Simulationen zu verbessern.

### III.07

## **Neuartige Softwarelösung Virtus Caelum der Eckelmann AG**

### **Auf der herstellerunabhängigen Cloud-Plattform für den Handel der Bosch.IO Retail Service Dashboard**

**Felix Ringwald**

Eckelmann AG, Berliner Str. 161, 65205 Wiesbaden  
[f.ringwald@eckelmann.de](mailto:f.ringwald@eckelmann.de)

Sowohl die Software Applikationen von Eckelmann als auch die Cloud-Plattform der Bosch.IO sind eine echte Weltneuheit.

Die Eckelmann AG hat mit den Virtus Caelum Apps gleich zwei neuartige Software Applikationen für die Kälte- und Gebäudeleittechnik im Handel entwickelt. Die Überwachung, Diagnose, Fernwartung und Konfiguration von Kälteanlagen und Gebäudeleittechnik ist nun überall und in Echtzeit bequem über das Internet möglich. Die App „Virtus Basic Desk“ bietet Fernservice-Dienstleistern und Betreibern die Möglichkeit Kälteanlagen mit der Steuerungstechnik von Eckelmann online zu überwachen. Die App „Virtus Alarm Desk“ ermöglicht es darüber hinaus, Kälteanlagen auch herstellerunabhängig zu überwachen.

Beide Apps werden über das Bosch.IO Retail Service Dashboard, eine unabhängige, sichere und hochverfügbare Cloud-Anwendung, bereitgestellt. Dies ist revolutionär. Noch nie gab es eine herstellerunabhängige Plattform für den Handel, die alle Akteure nutzen und auf der sie kooperieren, ganz gleich ob als Betreiber, Hersteller, App-Anbieter, Kältefachbetrieb oder Service-Partner. Darüber hinaus reduziert es für Unternehmen die Komplexität, indem es Schnittstellenprobleme mit Dritten löst und gleichzeitig die Vielzahl unterschiedlicher Softwarelösungen reduziert. Das bestehende wirtschaftliche Ökosystem erhält mit dieser Plattform seinen digitalen Zwilling. Bosch.IO stellt als neutraler Betreiber alle Grundfunktionen der neuen Branchen-Plattform bereit.

## Energy Efficient Data Centre Cooling Systems with Indirect Evaporative Cooling

Marius Ciucas M.Sc., Prof. Dr. Christian Fieberg

Westfälisches Energieinstitut der Westfälischen Hochschule Gelsenkirchen  
[marius.ciucas@w-hs.de](mailto:marius.ciucas@w-hs.de)

The worldwide electrical power consumption of data centres is in the range of hundreds of TWh and is a global concern. In order to guarantee a reliable operation of data centres, on the one hand operators require a larger amount of cooling capacity reserves. On the other hand, a cost-optimized and energy efficient cooling system is required, since this has a considerable impact on the total energy consumption.

In addition to the required claims, the environmental-friendly design and operation of data centre cooling is becoming increasingly important.

Air cooling plays a big part in the data centre industry. The established way to generate cooling air in data centres is by using compressor cooling with GWP-relevant refrigerants. For several years indirect evaporative cooling (IEC) concepts using air handling units has become an alternative, which uses outdoor air temperature as a heat sink and in addition spray water to cool down the outdoor air further when needed. These so called IEC air handling units allow data centre operation even for summer conditions of 32 °C and even 35 °C without compression cooling. Nevertheless, the effort includes high pressure drops in the unit and thus high electrical power consumption.

The new concept of indirect evaporative cooling presented here, still uses outdoor air to remove the data centre heat, but thanks to a patented heat recovery arrangement, the typical pressure drops of air handling units are largely reduced.

A combination of fans, counter flow heat exchangers and indirect evaporative cooling achieve comparable capacities compared to the standard systems, but need less electrical power and no refrigerants.

Prototyping a first unit, building a test rig for a proof of concept and a calculation tool is developed to extend the results to a 400 kW data centre.

A demonstration plant is planned for a Norwegian data centre operator, which shall be monitored and optimized by the authors. By illustrating the process of cooling, we show how the system performs in the simulations at different conditions, as well as the next steps in the development process.

## Modellentwicklung und -validierung eines kältetechnischen Prozesses zur Gefriertrocknung als Grundlage für die Prozessauslegung

Thomas Keller<sup>1\*</sup>, Michael Kovar<sup>2</sup>, Magdalena Wolf<sup>1</sup>, Bernhard Sirnik<sup>2</sup>, Gerold Macheiner<sup>2</sup>, Tobias Pröll<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verfahrens- und Energietechnik,  
Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien, Österreich  
[magdalena.wolf@boku.ac.at](mailto:magdalena.wolf@boku.ac.at)

<sup>2</sup>SBM Schoeller-Bleckmann Medizintechnik Gesellschaft m.b.H., a Syntegon company,  
Pharmastraße 1, 2630 Ternitz, Österreich

In der pharmazeutischen Verfahrenstechnik gewinnt die Gefriertrocknung als produktschonendes Trocknungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Dafür werden neben tiefem Vakuum (ca. 0.001 mbar<sub>abs</sub>) auch tiefe

Temperaturen zwischen  $-50^{\circ}\text{C}$  und  $-70^{\circ}\text{C}$  benötigt, was prozesstechnisch durchaus eine Herausforderung ist. Bei der Planung und Dimensionierung dieser Systeme wird mehrheitlich auf Erfahrungswerte gesetzt. Diese Arbeit fokussiert daher auf die Entwicklung und Validierung eines kältetechnischen Modells auf Basis thermodynamischer Grundlagen. Dieses Modell soll in weiterer Folge zur Auslegung von Gefriertrocknungsprozessen dienen.

Dazu wird der Prototyp einer Gefriertrocknungsanlage, die mit einer Kompressionskältemaschine arbeitet, untersucht. Die Kältemaschine erzielt Temperaturen bis zu  $-70^{\circ}\text{C}$ . Als Kältemittel wird R452A verwendet, die Verdichtung des Kältemittels erfolgt mit zwei zweistufigen Kolbenverdichtern. Die Anlage wurde als Prototyp für die Serienproduktion angefertigt und dient als Grundlage für Dimensionierung.

Für die Modellentwicklung wird eine begleitende Prozesssimulation mit der Prozesssimulationssoftware IPSEpro durchgeführt. Auf Basis der Prozesssimulation können Zustands- und Prozessgrößen abgebildet und mit Messdaten aus dem Prototyp verglichen werden. Das erlaubt eine Validierung des kältetechnischen Modells und liefert eine fundierte Grundlage für weitere Auslegungen. Das Modell gibt ein tieferes Prozessverständnis und ermöglicht die Darstellung verschiedener Lastfälle.

Ergänzend werden für die Dimensionierung der Einzelkomponenten (Verdichter, Verdampfer, Kondensator, Wärmeträgersystem) theoretische Modelle entwickelt, die mit Messdaten aus der Prototypen-Anlage verglichen werden, um erste Abschätzungen über die Größen der Komponenten zu erhalten.

Erste Ergebnisse zeigen, dass die theoretischen Modelle für die Bestimmung der Kälteleistung und der Verdichtergröße gut mit den Messdaten korrelieren und eine erste Grobabschätzung der Komponentengröße möglich ist.

**Stichwörter:**

Gefriertrocknung, Kältemaschine, Modell-Validierung, R452A, Anlagendimensionierung

**III.10**

## **Die Kühltette im Seetransport – der Erfolg des Kühlcontainers**

**Y. Wild**

Dr.-Ing. Yves Wild Ingenieurbüro GmbH, Klopstockstraße 21, 22765 Hamburg  
[office@drwild.de](mailto:office@drwild.de)

**III.11**

## **Einsatz von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem Fokus: Gebäudewärmeversorgung**

**Volker Weinmann<sup>1\*</sup>, Norman Gerhardt<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW) e.V., Postfach 3007, 30030 Hannover und Daikin Airconditioning Germany GmbH, Inselkammerstraße 2, 82008 Unterhaching  
[weinmann@izw-online.de](mailto:weinmann@izw-online.de)

<sup>2</sup>Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE, Königstor 59, 34119 Kassel  
[norman.gerhardt@iee.fraunhofer.de](mailto:norman.gerhardt@iee.fraunhofer.de)

In Deutschland und Europa wird die energiepolitische Diskussion derzeit stark von Wasserstoff als universellem Energieträger für die Energiewende geprägt. Um diesen Beitrag leisten zu können, muss Wasserstoff  $\text{CO}_2$ -neutral in ausreichender Menge hergestellt werden. Da dies aktuell noch nicht der Fall ist, ist eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Sektoren notwendig, um zu entscheiden, wo der Einsatz von grünem Wasserstoff sinnvoll ist und wo Alternativen zum Gelingen der Energiewende vorhanden sind.

Das Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik, IZW e.V. hat dazu das Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) in Kassel beauftragt, den Einsatz von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem mit dem besonderen Fokus auf die Gebäudewärmeversorgung zu untersuchen und dabei mit dem direkten Stromeinsatz in Wärmepumpen in Relation zu setzen.

Das Ergebnis der Studie ist eindeutig: Wasserstoff ist als Heizenergie für Gebäude keine Option. Die benötigte erneuerbare Energiemenge zur Bereitstellung von Wasserstoff für die Gebäudewärme ist 500 bis 600 Prozent größer als die Menge, die für die Nutzung von Wärmepumpen zur Wärmeerzeugung benötigt wird.

**Stichwörter:**

Wasserstoff, Energieversorgung, Gebäudewärmeversorgung, Wärmepumpe

III.12

## **Erfahrungen der Laborindustrie mit der Umsetzung der F-Gase-Verordnung damals und heute**

**Birgit Ladwig**

Fachverband Analysen-, Bio- und Labortechnik, SPECTARIS e.V.,  
Werderscher Markt 15, 10117 Berlin  
[ladwig@spectaris.de](mailto:ladwig@spectaris.de)

Die Branche der Laborgeräte und deren Einsatzgebiete von Kältemitteln inkl. der fluorierten Treibhausgase werden vorgestellt. Des Weiteren werden die 2014 mit der F-Gase-Verordnung aufgekommenen Herausforderungen in der Umstellung auf alternative Kältemittel erläutert, wie diese bearbeitet wurden und wo nach wie vor ungelöste Aufgaben bestehen.

III.13

## **Alternative Kältemittel im Licht der F-Gase-Verordnung: Entscheidungsprozesse und technische Erwägungen**

**Philippe Raulff**

JULABO GmbH, Eisenbahnstraße 45, 77960 Seelbach  
[p.raulff@julabo.de](mailto:p.raulff@julabo.de)

Nach einem Überblick über ausgewählte Anwendungen der Temperiersysteme wird der technische Entscheidungsprozess bei der Suche nach alternativen Kältemitteln im zeitlichen Verlauf präsentiert und es gibt einen Einblick in die notwendigen Veränderungen der Gerätekonzeption. Abschließend wird auf nach wie vor bestehenden Herausforderungen eingegangen.

III.14

## **Illegale Kältemittel – eine Herausforderung für die gesamte Branche**

**Joachim Gerstel**

EFCTC (European Fluorocarbons Technical Committee), Rue Bélliard, 40 – 1040 Brussels, Belgium  
[fluorocarbons@cefic.org](mailto:fluorocarbons@cefic.org)

Im kommenden Jahr wird sich die Quotenreduzierung der europäischen F-Gase-Verordnung ein weiteres Mal verschärfen. Parallel wird die Quotenregelung durch tausende Tonnen illegal gehandelter Kältemittel unterwandert. Untersuchungen des EFCTC zeigen, dass die Schmuggelware bis zu einem Drittel der gesamten Marktmenge ausmacht – als CO<sub>2</sub>-Äquivalent vergleichbar mit den Emissionen von 20 Kohlekraftwerken. Illegal gehandelte HFKW sind damit nicht nur eine Bedrohung für den Klimaschutz, sondern für die gesamte Kälte- und Klimabranche – von Hersteller und Distributoren über das Handwerk bis hin zu den Anlagenbetreibern.

III.15

## **„Anwendung von Ammoniak-Wasser-Absorptionskältemaschinen in gewerblichen und industriellen Bereichen“**

**Christoph Heyse**

AKM Industrieanlagen GmbH – Augustusstr. 8a – 45721 Haltern am See  
[heyse@akm-industrieanlagen.de](mailto:heyse@akm-industrieanlagen.de)

### **1. Funktion NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Absorptionskältemaschinen**

Kurze Erläuterung des Kältekreislaufes mit Hinweisen auf Besonderheiten

### **2. Ammoniak oder Lithiumbromid**

Technische Einsatzgrenzen für die unterschiedlichen Systeme (Temperatur, Leistung)

### **3. Einbindung in Energiesysteme**

Anhand von groben Schemen die Einbindung erklären

### **4. Peripherie**

Notwendige Hauptkomponenten für den Betrieb einer KWKK-Anlage

### **5. Anwendungen**

Typische Anwendungsbereiche aus Gewerbe und Industrie

### **6. Projektbeispiele**

Erläuterung von umgesetzten Projekten anhand von Fotos und Fließbildern

### **7. Förderungen**

Hinweise auf Förderungen von Sorptionskältemaschinen

## Integration einer Kompressionskälteanlage in ein Flüssigabsorptionssystem

Lisa Völker<sup>1\*</sup>, Wael Mandow<sup>1</sup>, Daniel Fleig<sup>1</sup>, Ulrike Jordan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Kassel, Institut für thermische Energietechnik, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland  
[solar@uni-kassel.de](mailto:solar@uni-kassel.de)

In Klimatisierungsanlagen erfolgt die Raumluftentfeuchtung in der Regel durch Kondensationsentfeuchtung mit anschließender Erwärmung der Zuluft. Durch den Einsatz einer offenen Flüssigabsorptionsanlage zur Luftentfeuchtung kann die Taupunktunterschreitung der Luft jedoch vermieden werden. Die zu konditionierende Luft wird im Absorber mit einer hygroskopischen Flüssigkeit, dem Sorptionsmittel, in Kontakt gebracht und aufgrund der Wasserdampfpartialdruck-Differenz der beiden Fluide entfeuchtet. Das dadurch verdünnte Sorptionsmittel wird anschließend unter Wärmezufuhr im Regenerator wieder aufkonzentriert.

In der vorliegenden Simulationsstudie wird ein Hybridsystem betrachtet, das aus einer Kompressionskälteanlage (KKA) und einer offenen Absorptionsanlage mit flüssigem Sorptionsmittel (LiCl-H<sub>2</sub>O) besteht, bei dem der Verflüssiger und der Regenerator miteinander gekoppelt sind. Es wurden insgesamt 42 Betriebspunkte mit verschiedenen Außenlufttemperaturen ( $T=24\text{...}34^\circ\text{C}$ ) und -feuchten ( $x=10\text{...}16 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr,Luft}}$ ) untersucht. Die Deckungsrate der von der KKA bereitgestellten Verflüssigerwärme zur Regeneration des Sorptionsmittels, die stark vom Verhältnis der sensiblen zu den latenten Lasten abhängt, wird in Abhängigkeit der Außenluftzustände ermittelt. Das Ziel der Simulationsstudie besteht darin, die so erzielten Einsparungen elektrischer Energie gegenüber einer konventionellen Kondensationsentfeuchtung zu evaluieren.

Bei dem untersuchten Hybridsystem wird die zu konditionierende Luft zunächst im Absorber auf eine definierte Zuluftfeuchte ( $x=8 \text{ g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{tr,Luft}}$ ) entfeuchtet und anschließend im Verdampfer auf eine definierte Zulufttemperatur ( $T_{\text{sol}}=18^\circ\text{C}$ ) gekühlt. Der Verflüssiger der KKA und der Regenerator der Absorptionsanlage sind durch einen Wasserkreis miteinander verbunden, um die Verflüssigerwärme zur Regeneration zu nutzen. Das Flüssigabsorptionssystem ist in der Simulationsumgebung TRNSYS abgebildet. Die Wärme- und Stoffübertrager basieren auf einem NTU-Effektivitätsmodell. Die KKA ist in Dymola modelliert, bestehend aus einem Direktverdampfer (Lamellenwärmeübertrager), einem Verdichter, einem Verflüssiger (Plattenwärmeübertrager) und einem Expansionsventil. Die Kopplung der beiden Systeme erfolgt mittels Co-Simulation. Um die definierten Zuluftzustände zu erhalten, wurde eine Regelungsstrategie implementiert. Die Leistungsregelung des Verdichters erfolgt stufenlos. Die Heißwassertemperatur im Regenerator wurde als wesentliche Stellgröße zur Regelung der Luftfeuchte identifiziert. Aus diesem Grund ist es je nach Außen- und Zuluftbedingungen notwendig, dem Wasserkreis nach dem Verflüssiger Wärme zu- oder abzuführen, um eine Leistungsanpassung von Regenerator und Verflüssiger zu erzielen. Die dafür notwendigen Heiz- bzw. Kühlleistungen wurden evaluiert. Der resultierende COP des Gesamtsystems unter Berücksichtigung aller Pumpen und Ventilatoren liegt für die untersuchten Betriebspunkte im Bereich zwischen 1.5 und 4.5. Die Ergebnisse zeigen, dass der COP deutlich sinkt, sobald eine Nachheizung zum Erreichen der erforderlichen Regenerationstemperatur nötig ist. Es wurde angenommen, dass die Nachheizung elektrisch erfolgt. Für das betrachtete System ist in der Regel eine Nachheizung nötig, sobald die latente Kühllast gegenüber der sensiblen Kühllast überwiegt. Im Vergleich zu einem konventionellen System mit Kondensationsentfeuchtung, welches ebenfalls in Dymola abgebildet wurde, ergibt sich für das Hybridsystem in 80 % der 42 betrachteten Betriebspunkte eine Verminderung der elektrischen Leistungsaufnahme. Die in diesen Betriebszuständen erzielten Energieeinsparungen liegen zwischen 8 und 47 %.

## Absorptionswärmepumpen

### Analyse einer gasbefeuerten Absorptionswärmepumpe mit kältemittelgekühltem Abgaswärmeübertrager

Philipp Wagner\*, Erol Bademcioglu, René Rieberer

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

Gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen (GAWPs) können im Vergleich zu herkömmlichen Gas-(Brennwert)-Kesseln im Bereich der Raumwärmeerzeugung einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung des Energieeinsatzes sowie der Treibhausgasemissionen leisten. Bei hohen Temperaturen im Heizungswasserrücklauf (über 50 °C) kann das Potential der Brennwerttechnik bei konventionellen Heizungsanlagen nicht ausgenutzt werden, da das Abgas im Abgaswärmeübertrager nicht unter den Taupunkt abgekühlt werden kann. Da der Nachrüstmarkt („Retro-fit-Bereich“) eine große Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele hat, ist es notwendig eine Technologie zu entwickeln, welche unter allen Betriebsbedingungen eine Rauchgaskondensation ermöglicht. In diesem Zusammenhang stellt eine GAWP mit einem kältemittelgekühlten Abgaswärmeübertrager, welcher nach dem Verdampfer in den Kältekreislauf integriert wird, eine vielversprechende Lösung dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine GAWP mit einer Heizleistung von 18 kW bei unterschiedlichen Betriebspunkten in Anlehnung an DIN EN 12309:2016 vermessen. Dadurch konnte ein Vergleich der saisonalen Effizienz zwischen einer GAWP mit kältemittelgekühltem und mit heizungswasserrücklaufgekühltem Abgaswärmeübertrager angestellt werden. Zusätzlich wurde ein ökologischer Vergleich beider Varianten mit einem herkömmlichen Gaskessel durchgeführt.

**Stichwörter:**

Ammoniak/Wasser, Absorption, Energieeffizienz, ökologischer Vergleich

## Experimental investigation of "waterloop" refrigeration systems for supermarkets

Patrick Koschel

TU Dresden/NTNU, Bitzer-Chair of Refrigeration, Cryogenics and Compressor Technology, Dresden, Germany

Decentralized waterloop systems are becoming more popular, especially for smaller retail stores. In contrast to centralized systems, there are advantages in terms of a low refrigerant charge, no need for a machine room and a flexible operation of the refrigerant cycles.

The analysis of a waterloop system in Trondheim reveals that the choice of the correct waterloop flow temperature as the main influencing parameter has a significant impact on the system performance. It can be shown that the optimal waterloop flow temperature is 20°C, because this enables an energy-efficient operation of the refrigerant cycles and at the same time ensures sufficient heating of the supermarket through the heat recovery unit for most ambient temperatures.

In comparison with a centralized system, no significant benefits could be found with regard to the required electrical energy of the refrigeration system for most ambient temperatures. Only at higher ambient temperatures of above 20°C the waterloop system is expected to perform better. Moreover, the lower refrigerant charge of the waterloop system has hardly any influence on the total environmental impact compared to the centralized system.

Consequently, the main advantages of the waterloop system are simplicity and lower costs of investment and operation.

**Keywords:**

Waterloop system, R744 booster system, supermarket refrigeration system, heat recovery unit, drycooler

IV.01

## **Digitaler Zwilling einer Wärmepumpe für die prognosebasierte Betriebsführung**

**Reinhard Jentsch<sup>1\*</sup>, Judit Aizpuru<sup>1</sup>, Michael Lauer<sup>1</sup>, Tilman Barz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[reinhard.jentsch@ait.ac.at](mailto:reinhard.jentsch@ait.ac.at)

Bei der Prüfung nach EN-14511 und EN-14825 werden Leistungskennzahlen von Wärmepumpen unter verschiedenen Teillast- und klimatischen Bedingungen erhoben. Die Effizienz des Prüfablaufs ist dabei stark abhängig von den Einstellungen des Bedienpersonals und deren Erfahrung bei der Einschätzung von Wechselwirkungen zwischen der Wärmepumpe, als Black-Box-System, und der Prüfinfrastruktur.

Im Beitrag wird gezeigt, wie ein digitaler Zwilling der Wärmepumpe für die prognosebasierte Betriebsführung der Leistungsprüfung eingesetzt werden kann. Dazu wird ein Modelica-Modell einer Wärmepumpe als Functional Mockup Unit (FMU) mit den Realdaten der Prüfung zu einem digitalen Zwilling verknüpft. Mit jedem neuen Satz an Messwerten werden die Modellparameter adaptiv identifiziert und das Modell re-kalibriert. Der digitale Zwilling liefert dem Bediener Vorschläge zu optimalen Einstellungen, die bisher nur aufwändig und iterativ während des Prüfbetriebs abgeleitet werden konnten.

Das Vorschlagssystem wurde in der AIT Testinfrastruktur implementiert und erstmalig eingesetzt. Es liefert verlässliche Vorschläge. Als ein Ergebnis der Prüfung resultiert ein kalibriertes Wärmepumpenmodell.

### **Stichwörter:**

Digitaler Zwilling, adaptive Modellkalibrierung, Leistungsprüfung

IV.02

## **Kältenetz für höhere Effizienz und Netzdienlichkeit**

**Björn Nienborg\*, Moritz Notheis, Philipp Kurzlechner, Jana Seiz, Peter Engelmann**

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de](mailto:bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de)

Das Fraunhofer ISE ist im letzten Jahrzehnt dynamisch gewachsen. Heute bilden fünf Gebäude einen zusammenhängenden Campus. Während der Wachstumsphase wurde die Gebäudetechnik schrittweise um neue Lasten und Erzeuger erweitert. Infolgedessen gab es im Jahr 2017 Kältenetze auf 5 verschiedenen Temperaturniveaus, die von einer Reihe von Kälteerzeugern versorgt wurden. Das neueste Gebäude verfügt über einen 500 m<sup>3</sup> großen Kaltwasserspeicher, der die freie Strahlungskühlung der Büroräume während des größten Teils des Jahres ermöglichen soll.

Die vielfältige Struktur führt zu einem hohen Wartungsaufwand und einer ineffizienten Kälteversorgung, insbesondere in Teillastzeiten. Um diese Nachteile zu überwinden, wurden in den vergangenen 2 Jahren die bestehenden Kühlnetze miteinander verbunden und die Temperaturniveaus angeglichen. In diesem Zusammenhang wurden 200m<sup>3</sup> Speicherkapazität neu installiert und der bestehende Speicher ebenfalls in das Gesamtnetz eingebunden. Die Kältebereitstellung erfolgt nun durch die zwei neuesten Bestandskältemaschinen. Das Gesamtsystem wird derzeit in Betrieb genommen.

In einem ersten Schritt wird die verfügbare Speicherkapazität genutzt, um die Anteil der freien Kühlung sowie die Auslastung der Kältemaschine zu erhöhen. Zusätzlich wird das System so vorbereitet, dass es zur Spitzenlastabdeckung dient und dem Stromnetz Flexibilität verleiht.

Auf der Konferenz werden wir einen Überblick sowohl über die ursprüngliche Systemleistung als auch über die neue Netzkonfiguration geben. Zusätzlich wird das Energieeinsparungs- und Flexibilitätspotenzial auf der Grundlage historischer Messdaten bewertet, sowie erste Ergebnisse des Anlagenbetriebs dargestellt.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts „FlexGeber“ (FKZ03EGB0001A) erstellt.

**Stichwörter:**

Kältespeicher, Freie Kühlung, Lastverschiebung, Flexibilität, Netzdienlichkeit

IV.03

## Flexibilisierung eines Wärmepumpensystems durch Nutzung einer exergiebasierten Regelstrategie

Matthias Eydner<sup>1\*</sup>, Tobias Henzler<sup>2</sup>, Konstantinos Stergiaropoulos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland, Tel: 0711/685-67241; Email: [matthias.eydner@igte.uni-stuttgart.de](mailto:matthias.eydner@igte.uni-stuttgart.de)

<sup>2</sup>Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland, Tel: 0711/685-62093; Email: [tobias.henzler@igte.uni-stuttgart.de](mailto:tobias.henzler@igte.uni-stuttgart.de)

<sup>3</sup>Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE), Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland, Tel: 0711/685-62084; Email: [konstantinos.stergiaropoulos@igte.uni-stuttgart.de](mailto:konstantinos.stergiaropoulos@igte.uni-stuttgart.de)

Wesentliche Ziele der deutschen Bundesregierung für den Gebäudebereich sind es, neben der Reduzierung des Energiebedarfs eine deutliche Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger zu erreichen. Hierbei ist nicht nur die Energieeffizienz im Fokus, sondern auch die Frage, inwieweit der zunehmende Anteil erneuerbarer Energieträger mit volatiler Erzeugungsleistung in die elektrischen Verteilnetze eingebunden werden kann. Aufgrund der zeitweiligen Diskrepanz zwischen Stromangebot und verbraucherseitiger Nachfrage müssen zukünftig alle Flexibilisierungspotenziale, u. a. im Gebäudesektor, auf dem rund ein Drittel des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt, nutzbar gemacht werden.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Beitrag ein Modell vorgestellt, das die Flexibilisierung der Wärmebereitstellung mit einer Wärmepumpe in Kombination mit einem Pufferspeicher behandelt. Dabei werden für die Flexibilisierung vor allem kurzzeitige Potenziale adressiert, die aufgrund von Differenzen zwischen netzseitigem Angebot und der verbraucherseitigen Nachfrage im Tagesverlauf resultieren. Der Pufferspeicher und die Wärmepumpe werden in der Simulationsumgebung TRNSYS modelliert. Zur Bewertung der zum jeweiligen Zeitpunkt nutzbaren Energie im Speicher wird eine exergetische Bilanzierung vorgenommen. Damit kann durch Bestimmung der gespeicherten Exergie, dem tagesabhängigen Exergiebedarf der RLT-Anlage und der möglichen Exergiezufuhr mit dem Wärmeerzeuger eine bedarfsgerechte Beladungsregelung des Speichers im flexiblen Betrieb erfolgen. Ein Signal für die momentane Netzauslastung dient dazu, um geeignete Beladungszeiträume zu definieren. Das hierfür verwendete Steuerungs- und Regelungskonzept kombiniert zu diesem Zweck eine regelbasierte mit einer modellprädiktiven Regelung. Ein exemplarisches Bürogebäude mit einer raumlufthechnischen Anlage (RLT) dient als Anwendungsbeispiel. Die Ergebnisse des flexiblen Betriebs werden sowohl jährlich, als auch für charakteristische Typtage der Heizperiode vorgestellt und mit den Ergebnissen eines wärmegeführten Betriebs (ohne Flexibilisierung) hinsichtlich der Energieaufwände, Stromkosten sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen.

**Stichwörter:**

Flexibilität und Lastmanagement, Wärmepumpe, Wärmespeicherung (Pufferspeicher), RLT-Anlage, exergetische Bewertung, thermisch-energetische Simulation (TRNSYS)

## Virtueller Prüfstand zur Bewertung cloudbasierter Algorithmen für die Gebäudeautomation

Thomas Storek<sup>1\*</sup>, Silas Koßler<sup>1</sup>, Sazvan Saeed<sup>1</sup>, Marc Baranski<sup>1</sup>, Alexander Kümpel<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center,  
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustr. 10, 52064 Aachen, Deutschland  
[tstorek@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:tstorek@eonerc.rwth-aachen.de)

Das zunehmende Bewusstsein für Klimaschutz führte in den letzten Jahren zu verstärkter Forschung und Entwicklung im Bereich der Gebäudeenergietechnik. Insbesondere in der Gebäudeautomation werden Regelungskonzepte entwickelt, die es ermöglichen volatile dezentrale Energieanlagen intelligent und optimal zu regeln, da klassische Regelungsansätze hier zunehmend an ihre Grenzen stoßen.

Die durch die Digitalisierung zunehmende Vernetzung technischer Anlagen sowie der zeitweise hohe Bedarf an Rechenleistung einiger zum einsatzkommender Algorithmen führt dazu, dass viele zukünftige Automationsprogramme direkt als Cloudservice entwickelt werden. Cloudsysteme stellen hierbei nicht nur kostengünstig, flexibel und bedarfsorientiert Rechenleistung zur Verfügung, sondern sind auch hochverfügbar.

Neben den Effizienzansprüchen und der Emissionseinsparung muss Gebäudeautomation insbesondere zuverlässig den Nutzerkomfort sicherstellen. Oftmals werden Automationsprogramme individuell für ein bestimmtes Gebäude entwickelt. Ein wichtiger Schritt ist hierbei ein umfassender Test der Automationsfunktionen. Hierbei werden die Reaktion des Programms auf simulierte Eingangswerte überprüft. Die Effizienz wird hierbei in der Regel nicht betrachtet und kann erst nach längerem Betrieb bewertet werden und das Programm vor Ort angepasst werden. Dieser Prozess ist nicht nur aufwendig und langwierig, sondern auch kostenintensiv.

In diesem Beitrag wird ein virtueller Prüfstand vorgestellt, der es ermöglicht schon während des Entwicklungsprozesses Regelungskonzepte nicht nur zu plausibilisieren, sondern durch eine Kopplung mit einer 1-D Simulation des Energiesystems auch a-priori die zu erwartende Effizienz zu bewerten. Durch Nutzung identischer cloudbasierter Kommunikationsinfrastruktur im Prüfstand und der realen Anlage wird diese ebenfalls vorab in die Tests miteinbezogen. Dies führt dazu, dass die Kommunikationsinfrastruktur bei der späteren Integration ins reale Gebäude nur unwesentlich konfiguriert werden muss, was die Anzahl eventueller Fehlerquellen stark reduziert. Insgesamt wird durch die Nutzung eines virtuellen Prüfstandes zukünftig die Entwicklung, Inbetriebnahme sowie die Wartung von Gebäudeautomationssystemen kostengünstig ergänzt und unterstützt.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03ET1495A.

### Stichwörter:

Digitalisierung, Internet der Dinge, IoT, Gebäudeautomation, Inbetriebnahme

## Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern, Lösungsvorschläge international

Marek Miara

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[marek.miara@ise.fraunhofer.de](mailto:marek.miara@ise.fraunhofer.de)

Der Gebäudesektor spielt in jedem Land eine bedeutende Rolle für den Energieverbrauch. Neben der Stromerzeugung und dem Transportsektor ist er der wichtigste Sektor in Bezug auf die Emission von Treibhausgasen. Die massive Reduktion der CO<sub>2</sub>,eq-Emissionen von Gebäuden und die langfristige Erreichung eines klimaneutralen Gebäudesektors können da-her als untrennbar miteinander verbunden betrachtet werden.

Neue Wohngebäude werden oft mit einer Hülle und einem Heizsystem gebaut, die auf einen niedrigen Energieverbrauch ausgerichtet sind und ein Potenzial für den Einsatz von Technologien für erneuerbare Energien, wie z. B. Wärmepumpen, aufweisen. Bei Mehrfamilienhäusern ist die Herausforderung, Wärmepumpentechnologien und erneuerbare Energien einzusetzen, komplexer. Die Eigentumsverhältnisse bei Mehrfamilienhäusern variiert zwischen den Mitgliedsländern des IEA-HPT-Durchführungsabkommens. Während in einigen Ländern Mehrfamilienhäuser häufig im Besitz lokaler Städte, Gemeinden oder Wohnungsbaugesellschaften sind, ist das Eigentum eines Gebäudes in anderen Ländern auf Wohnungseigentümer aufgeteilt.

Bei Mehrfamilienhäusern sind unterschiedliche wärmetechnische Aspekte von Bedeutung. Erstens variiert der Anteil des Warmwasserbedarfs am Gesamtwärmebedarf aufgrund unterschiedlicher Baustandards sowie unterschiedlicher klimatischer Bedingungen. Zweitens wird das Temperaturniveau des Heizsystems außer vom energetischen Gebäudezustand und dem Standort auch durch das installierte Wärmeübertragungssystem beeinflusst. Der Umgang mit der Vielfalt der Wärmebedarfscharakteristik birgt fortan die Herausforderung auf dem Weg zu einer breiteren Verbreitung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern.

In Rahmen des Annex 50 „Heat Pumps in Multi-Family Buildings for space heating and DHW“ wurde ein Konzept erstellt, die möglichen Lösungsvarianten von Wärmepumpensystemen in Mehrfamilienhäusern auf einer übergeordneten Ebene zu kategorisieren. Als Ergebnis werden sieben „Lösungsgruppen“ vorgestellt. Parallel wurden Praxisbeispiele aufgesucht und auf einer standardisierten Art und Weise beschrieben. Alle Beispiele sind auf der Annex-Webseite <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/case-studies/> zu Verfügung gestellt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpensysteme, Mehrfamilienhäusern, Annex 50, Gebäudesektor

IV.06

## Großwärmepumpen zur Nahwärmeversorgung – Untersuchung von Betriebsstrategien

Shengqing Xiao<sup>1\*</sup>, Dimitri Nefodov<sup>1</sup>, Markus Richter<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1</sup>, Michael Wördemann<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik, Professur Technische Thermodynamik, 09107 Chemnitz, Deutschland  
[shengqing.xiao@mb.tu-chemnitz.de](mailto:shengqing.xiao@mb.tu-chemnitz.de)

<sup>2</sup>Viessmann Deutschland GmbH, 12357 Berlin  
[wodm@viessmann.com](mailto:wodm@viessmann.com)

Wärmepumpen ermöglichen eine umweltfreundliche und energieeffiziente Wärmeversorgung, wenn erneuerbare Energiequellen (Strom und Wärme) genutzt werden. Deswegen gewinnen Wärmepumpen im Rahmen der Energiewende gegenüber traditionellen Heizkesseln mit einer Verbrennung von fossilen Brennstoffen an Bedeutung. In diesem Kontext wird im Verbundvorhaben „Zwickauer Energiewende Demonstrieren – ZED“ der Einsatz von einem Wärmepumpen-Speicher-System zur Realisierung eines Null-Emissions-Quartiers in der Stadt Zwickau untersucht. Dieses Vorhaben entstand im Rahmen der Förderinitiative des BMBF und des BMWi mit dem Titel „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ und startete im November 2017.

Im Projekt sollen die Wärmepumpen den Rücklauf eines bestehenden Fernwärmenetzes als Wärmequelle nutzen. Wegen des begrenzten Quellenvolumenstroms ist die Standard-Temperaturspreizung im Verdampfer der meisten marktüblichen Wärmepumpenanlagen nicht ausreichend, um die vorliegende Heizlast zudecken. Als eine mögliche Lösung kann die Beimischschaltung auf der Wärmequellenseite eingesetzt werden, um die Temperaturdifferenz zu erhöhen, wodurch die Heiz-Leistungszahl sinkt. Eine andere Lösungsvariante ist die Erhöhung der Temperaturspreizung direkt am Verdampfer. Auch in diesem Fall sinkt die Heiz-Leistungszahl.

In dieser Arbeit werden zwei Schaltungen bzw. Betriebsstrategien von Wärmepumpen theoretisch untersucht: a) Einbau der Beimischschaltungen im Wärmepumpensystem mit Standard-Temperaturspreizung im Verdampfer (5 K) und b) konstanter Wasservolumenstrom im Verdampfer mit variierender Temperaturspreizung bis 15 K. Die Untersuchungen des Wärmepumpensystems erfolgten mit dem Simulationsprogramm EBSILON®Professional.

Die Simulationen der Betriebspunkte zeigen, dass die Wärmepumpen mit variierender Temperaturspreizung im Verdampfer bessere Heiz-Jahresarbeitszahlen erreichen.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Heizung, Nahwärme, Hydraulik, Schaltung, Spreizung, Simulation, EBSILON®Professional

IV.07

## **Einfluss von Trinkwarmwasser-Systemvarianten auf die Performance von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern**

**Michael Kropp<sup>1\*</sup>, Oliver Hörnle<sup>1</sup>, Manuel Lämmle<sup>2</sup>, Jeannette Wapler<sup>2</sup>, Constanze Bongs<sup>2</sup>, Stefan Hess<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH,  
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg  
[michael.kropp@inatech.uni-freiburg.de](mailto:michael.kropp@inatech.uni-freiburg.de)

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Wärmepumpen (WP) haben ein hohes Potential zur Verringerung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudesektor. Im Mehrfamilienhaus (MFH)-Bestand bestehen jedoch technische Herausforderungen wie die notwendigen höheren Temperaturniveaus für die Wärmebereitstellung und die Quellen-Verfügbarkeit. Diese Herausforderungen hemmen derzeit eine weitere Verbreitung der WP als Hauptwärmeerzeuger. Durch eine Sanierung der thermischen Gebäudehülle reduzieren sich in MFH der Bedarf an Heizwärme und auch deren Vorlauf-Temperatur erheblich, so dass der Anteil der Trinkwarmwasser (TWW)-Bereitung an der gesamten Wärmebereitstellung zunimmt.

Um diesen Einfluss auf die Effizienz einer Außenluft/Wasser-Wärmepumpe als Hauptwärmeerzeuger für Heizung und TWW-Bereitung (jeweils mit elektrischem Heizstab als Backup) zu untersuchen, wurde ein Vergleich von drei Systemvarianten zur zentralen TWW-Bereitung für ein saniertes MFH in Karlsruhe durch-geführt. Das Referenzsystem 1 weist einen Warmwasserspeicher mit internem Wärmeübertrager und System 2 eine zentrale Frischwasserstation auf. Bei System 3 ist zusätzlich zur zentralen Frischwasserstation eine Ultrafiltrationseinheit im Zirkulationsrücklauf installiert. Der Vergleich basiert auf Systemsimulationen in Dymola Modelica.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass – für die betrachteten Randbedingungen – durch den Einsatz einer zentralen Frischwasserstation (System 2) die Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe + Heizstab) für die TWW-Bereitung von 2,4 auf 2,7 gesteigert werden kann. Der Einbau der Ultrafiltrationseinheit im Zirkulationsrücklauf erhöht die Jahresarbeitszahl für die TWW-Bereitung weiter auf 3,0 und die Gesamt-Jahresarbeitszahl für TWW und Raumwärme steigt von 2,9 auf 3,1. Der Gesamtjahresstromverbrauch zur Bereitung von TWW und Raumwärme kann um etwa 7 % gesenkt werden.

**Stichwörter:**

TWW-Bereitung, Ultrafiltrationseinheit, Wärmepumpe, Mehrfamilienhaus, LowEx-Bestand

## Experimentelle Versuche zu Ver- und Enteisung am Luft/Sole-Wärmeübertrager

Jakob Metz<sup>1\*</sup>, Danny Günther<sup>1</sup>, Tobias Helling, Constanze Bongs<sup>1</sup>, Michael Birk

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Solare Energiesystems ISE, Freiburg  
[jakob.metz@ise.fhg.de](mailto:jakob.metz@ise.fhg.de)

Wärmepumpen (WP) sind in Mehrfamilienhäusern (MFH) deutlich unterrepräsentiert. Zentrale quellenseitige Hemmnisse im innerstädtischen Kontext sind: die geringe Flächenverfügbarkeit seitens Erdreich-WP sowie die Vorgaben der TA Lärm seitens Außenluft-WP. Im BMWi-geförderten Projekt „HEAVEN“ (FKZ: 03ET1540B, [www.lowex-bestand.de/index.php/heaven-viessmann](http://www.lowex-bestand.de/index.php/heaven-viessmann)) wird die kombinierte Nutzung dieser Wärmequellen mittels Erdwärmesonden (EWS) und Luft/Sole-Wärmeübertrager (WÜT) untersucht. Neben den spezifischen Vorteilen jeder Quelle werden durch hydraulische Kopplung der Quellen weitere Synergien erschlossen, wie das Enteisen des WÜT mittels Energie aus dem Erdreich.

Unterschreitet die Temperatur der WÜT-Oberfläche die Taupunkttemperatur der Außenluft, fällt am WÜT Kondensat aus. Liegt die Oberflächentemperatur dabei unter 0°C, wächst eine Frost- oder Eisschicht auf, welche sich zunehmend negativ auf die erzielbare Wärmeleistung auswirkt und daher regelmäßig abgetaut werden muss. Um im vorgestellten System weder auf die ineffiziente direktelektrische Abtauung noch auf die Erwärmung des großen Solevolumens durch Kältekreisumkehr zurückgreifen zu müssen, wird eine Abtauung über den Wärmeeintrag aus der EWS angestrebt.

Vor diesem Hintergrund behandelt der Konferenzbeitrag die experimentelle Untersuchung eines 20 kW Luft/Sole-Lamellen-Rohr-Wärmeübertragers mit Fokus auf der Vermessung in feuchter Umgebung. Es werden Frost- und Eisbildung unter Variation der Randbedingungen (Lufteintrittstemperatur und -feuchte) und der Systemparameter (Luft- und Solevolumenstrom sowie Soleeintrittstemperatur) systematisch analysiert und die Vereisungscharakteristik anhand von Massenzuwachsrate und Leistungsabnahme dargestellt.

Die Lufttemperatur zeigt einen linearen Einfluss auf die Frostzuwachsrate (0,9 g/s bei -5°C und 1,7 g/s bei 5°C), ebenso ist der Einfluss der Luftfeuchte (RH) annähernd linear mit 0,4 g/s bei 60 % RH und 2,7 g/s bei 87 % RH. Dabei nimmt die mittlere zeitliche Leistungsdegradation mit der Luftfeuchte zu (-2 %/h bei 60 % RH und -10 %/h bei 87 % RH). Der Luftvolumenstrom zeigt einen starken Einfluss auf die Leistungsabnahme, bedingt durch veränderte Frost- und Eiseigenschaften bei geringen Luftgeschwindigkeiten. So zeigen Versuche bei halber Lüfterdrehzahl nach 15 kg Frostaufbau eine Reduktion der Leistung um ca. 85 %, während diese bei identischen Randbedingungen und voller Lüfterdrehzahl nur um ca. 15 % zurückgeht. Ferner zeigen Versuche mit hohen Frostmassen, dass sich die Leistungsabnahme mit zunehmender Vereisung zunächst verstärkt und sich bei nahezu verblocktem WÜT einem konstanten Minimalwert annähert.

Die Untersuchung der niedertemperaturigen Soleenteisung zeigt, dass durch die geringen Soletemperaturen von durchschnittlich 6,5°C im Mittel 44 % Schmelzwasser abfließen und 46 % Restkondensat verbleiben. Mit steigender Initialfrostmasse, der Frostmasse bei Beginn der Enteisung, kann der relative Anteil Restkondensat deutlich reduziert und zugleich die Schmelzrate erhöht werden. Bereits mit 2,9°C Solevorlauftemperatur konnte der WÜT enteist werden, wobei das Restkondensat mit 66 % einen hohen Anteil aufweist.

## Leistung einer n-Butan Hochtemperatur-Wärmepumpe

Bernd Windholz<sup>1\*</sup>, Michael Lauermann<sup>1</sup>

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

Um Klima- und Energieziele zu erreichen wird unter anderem der Einsatz von Wärmepumpen empfohlen, da sie die Dekarbonisierung unterstützen und eine erhöhte Abwärmenutzung ermöglichen. Schmid et al. stellten Butan als vorteilhaftes Kältemittel für Temperaturen über 100 °C vor. Aus diesen Arbeiten entstand eine Hochtemperatur-Wärmepumpe mit n-Butan (R600) als Kältemittel und einem Ejektor im Kältemittelkreislauf. Die Demonstration dieser speziellen Wärmepumpe in einer industriellen Umgebung durch Zauner et al. zeigte, dass sie noch optimiert werden kann. Schlemminger et al. analysierten die dabei gewonnenen Messdaten mit dem Fokus auf den Ejektor und kamen zu dem Schluss, dass weitere Tests notwendig sind. Der gegenständliche Beitrag präsentiert neue Messdaten, die im Rahmen einer Testkampagne im Labor des AIT aufgenommen wurden. Der Einfluss verschiedener Parameter wie der Temperaturen und der Volumenströme auf der Quellen- und der Senkenseite sowie der Verdichterdrehzahl auf Leistung und Effizienz der Wärmepumpe wird untersucht. Die Ergebnisse werden mit den Auslegungsdaten der Wärmepumpe verglichen.

### Stichwörter:

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Butan, Ejektor, Labor

## Effiziente industrielle Abwärmenutzung mit Wärmepumpen in der Stahlindustrie

Franz Helminger<sup>1\*</sup>, Sabrina Dusek<sup>1</sup>, Johannes Krämer<sup>1</sup>, Veronika Wilk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien  
[franz.helminger@ait.ac.at](mailto:franz.helminger@ait.ac.at)

Wärmepumpen werden zukünftig vermehrt eine wichtige Rolle zur Dekarbonisierung von industriellen Prozessen spielen. Sie bieten die Möglichkeit Niedertemperatur-Abwärme in nutzbare Prozesswärme auf höherem Temperaturniveau umzuwandeln. Dabei handelt es sich nicht nur um eine Energieeffizienzmaßnahme, die Integration von Wärmepumpen führt auch zur Elektrifizierung industrieller Prozesse und kann somit auch zur erhöhten Nutzung erneuerbarer elektrischer Energie beitragen [1].

Wenngleich der potenzielle Nutzen an Industrie-Wärmepumpen erkannt wurde und Interesse besteht, sind diese in Industrieprozessen noch nicht sehr verbreitet. Anwendungsbeispiele und Demonstrationsprojekte finden sich jedoch bereits in energieintensiven Industriesektoren wie der Nahrungsmittelbranche, Baustoffherstellung und der Papier- und Zellstoffindustrie. Industrie-Wärmepumpen könnten auch in sogenannten integrierten Stahlwerken zum Einsatz kommen, sie wären bereits jetzt für manche Prozesse geeignet.

In diesem Beitrag wird aufbauend auf Informationen aus der Literatur, bezüglich der Verbesserung der Energieeffizienz von bestehenden integrierten Stahlwerken [2] [3] der mögliche Einsatz von Industrie-Wärmepumpen untersucht. Anhand eines theoretischen Fallbeispiels aus der Stahlindustrie soll die Effizienzsteigerung durch die Integration einer dampfgenerierenden Wärmepumpe verständlich gemacht werden.

[1] Geyer et al.: "IndustRIES: Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie."

[2] Pulm und Raupenstrauch: "Roadmap Industrie - Energieeffizienz in der Eisen- und Stahlindustrie."

[3] Sprecher et al.: "Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie"

### Stichwörter:

Industrielle Abwärmenutzung, Dampferzeugung, Industrie-Wärmepumpen

IV.11

## R600-Hochtemperaturwärmepumpe – Messdaten bei sub- und transkritischem Betrieb

Manuel Verdnik<sup>1\*</sup>, René Rieberer<sup>1</sup>

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

Hochtemperaturwärmepumpen ermöglichen die Bereitstellung von Prozesswärme durch Anheben von Abwärme auf ein für Prozesse nutzbares Temperaturniveau, wodurch sie eine Alternative zu fossil befeuerten Wärmeerzeugern darstellen. R600 (n-Butan) ist als „natürliches Kältemittel“ durch einen niedrigen GWP-Wert gekennzeichnet und hinsichtlich in der Atmosphäre verbleibender Abbauprodukte unproblematisch. Durch Realisierung einer transkritischen Prozessführung kann der Einsatzbereich des verwendeten Kältemittels hin zu höheren Temperaturen erweitert werden.

Zur messtechnischen Analyse im Labor wurde eine Hochtemperaturwärmepumpe mit einem Kolbenkompressor als einstufige Anlage mit Niederdrucksammler ausgeführt, die Sauggasüberhitzung wird mittels internem Wärmeübertrager (IHX) bewerkstelligt. Im Rahmen experimenteller Untersuchungen wurde die Leistungszahl der Wärmepumpe (COP) in verschiedenen Betriebspunkten ermittelt. Im subkritischen Betrieb konnte bei einer Wärmequelleneintrittstemperatur von 60 °C und einer Wärmesenkenaustrittstemperatur von 120 °C ein COP von 4,4 und im transkritischen Betrieb bei einer Wärmesenkenaustrittstemperatur von 160 °C ein COP von 3,1 erreicht werden.

**Stichwörter:**

Transkritischer Prozess, n-Butan, Kompressionswärmepumpe, experimentelle Untersuchung

IV.12

## Regelung einer Rotationswärmepumpe

Andreas Längauer<sup>1\*</sup>, Bernhard Adler<sup>1</sup>, Michael Lauer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ecop Technologies GmbH, Forschungs- und Entwicklungsabteilung, Perfektastraße 73, 1230 Wien, Austria  
[office@ecop.at](mailto:office@ecop.at)

<sup>2</sup>AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria  
[michael.lauer@ait.ac.at](mailto:michael.lauer@ait.ac.at)

Die auf dem Joule-Prozess basierende Rotationswärmepumpe (RHP) bietet neben den Vorteilen eines umweltfreundlichen und nicht brennbaren Arbeitsgases auch die Möglichkeit über einen sehr großen Temperaturbereich, mit vergleichsweise hohem COP (Coefficient of Performance), eingesetzt zu werden. Durch diese bisher noch nicht verfügbare Flexibilität im Vergleich zu konventionellen Wärmepumpen und den grundsätzlich neuartigen Aufbau besteht sehr großes Potential, die Wirtschaftlichkeit einer RHP durch optimale Regelung zu erhöhen. Es können im Wesentlichen der Temperaturhub über die Hauptrotordrehzahl und der Arbeitsmittel-Massenstrom über die Ventilator-drehzahl unabhängig voneinander geregelt und auf die vorliegenden Randbedingungen optimal angepasst werden. Zudem können weiters noch wie üblich die Massenströme der Prozessmedien dynamisch eingestellt werden. Die somit resultierende Erweiterung der Regelparameter ergibt die Möglichkeit eines sehr flexiblen Betriebes und wird in Verbindung mit der Technologie der Rotationswärmepumpe vorgestellt. Die in dieser Arbeit entwickelten Regelkonzepte sowie die grundsätzlichen Ansätze diese zu verbessern und zu optimieren werden schließlich an einer ausgeführten Anlage im Industriemaßstab demonstriert und validiert.

**Stichwörter:**

Rotationswärmepumpe, Regelung, Flexibilität, Hochtemperatur

## Feldmessung von Wärmepumpen im EFH-Bestand mit Fokus auf die Heizkreistemperaturen

Danny Günther<sup>1\*</sup>, Jeannette Wapler<sup>1</sup>, Robert Langner<sup>1</sup>, Sebastian Helmling<sup>1</sup>, Marek Miara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Solare Energiesystems ISE, Freiburg  
[danny.guenther@ise.fhg.de](mailto:danny.guenther@ise.fhg.de)

U. a. in [IWES/IBP 2017] wird der Wärmepumpentechnologie eine Schlüsselrolle für die Umsetzung der Wärmewende eingeräumt. Gleichzeitig wird darin betont, dass sich deren Einsatz keinesfalls auf den Neubaubereich, in dem sich Wärmepumpen bereits etabliert haben, beschränken darf. Die Anteile im Sanierungsbereich sind derzeit noch gering, was mit den speziellen Herausforderungen, wie den erforderlichen Temperaturen zur Raumheizung oder der Erschließung geeigneter Wärmequellen, zusammenhängt. Darüber hinaus fehlt es an entsprechenden Demonstratoren.

Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „WPsmart im Bestand“ (FKZ: 03ET1272A; Projekthomepage: <http://wp-smart-im-bestand.de/>) wurden bis Juli 2019 Elektro-Wärmepumpen im EFH-Bestandsbereich messtechnisch untersucht und hinsichtlich Effizienz und Betriebsverhalten bewertet. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen werden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und sind in Gebäuden der Baujahre 1850 bis 2001 installiert. Der Zustand der Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert. Von den über 50 untersuchten Anlagen werden 9 bivalent (Gas- oder Ölkessel) und die übrigen Systeme überwiegend monoenergetisch betrieben. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe oder Ventilator) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. Bei den hybriden Systemen werden bei der Mehrzahl der Anlagen zusätzlich der Gas- bzw. der Ölverbrauch gemessen. In den Hydraulikkreisläufen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet. Darüber hinaus widmet sich das Projekt der Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen mittels modellbasierter Analysen und Feldmessung, worauf in diesem Beitrag nicht eingegangen wird.

Der Konferenzbeitrag umfasst zum einen die Hauptergebnisse für über 50 Wärmepumpen in der finalen Auswerteperiode von Juli 2018 bis Juni 2019. Dabei stehen die Jahresarbeitszahlen und die direkt quantifizierbaren Effizienzeinflüsse, wie die Systemtemperaturen und die erforderlichen Hilfsenergien, im Vordergrund. Als Übergang zum zweiten Teil des Beitrages wird über die Energieanteile für Trinkwassererwärmung und Raumheizung der Einfluss des letztgenannten Betriebsmodus auf die Effizienz hervorgehoben. Anschließend werden die Ergebnisse einer Analyse der zur Raumheizung erforderlichen Temperaturen präsentiert. Hierbei werden, vor dem Hintergrund der installierten Wärmeübergabesysteme (Fußbodenheizung, Heizkörper, Gebläsekonvektoren sowie kombinierte System) und der energetischen Qualität der Gebäudehülle, die auf Basis der Messdaten ermittelten Heizkurven vorgestellt. Die Ausführung der Ergebnisse erfolgt umfassend für unterschiedliche Systemgruppen (bspw. Art des Wärmeübergabesystems) und Besonderheiten werden anhand konkreter Anlagenbeispiele näher erläutert.

### Quelle:

IWES/IBP 2017 Fraunhofer IWES/IBP (2017): Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende

IV.14

## **Wärmepumpen im Praxistest – Messdatenbasierte Analyse des Betriebsverhaltens**

**Manuel Prinzing\*, Matthias Berthold, Mick Eschmann, Stefan S. Bertsch**

NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs,  
Institut für Energiesysteme IES und Wärmepumpen-Testzentrum WPZ  
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Schweiz  
[manuel.prinzing@ost.ch](mailto:manuel.prinzing@ost.ch)

Bei genormten Prüfstandmessungen zeigen Wärmepumpen eine hohe Energieeffizienz. Es stellt sich jedoch die Frage, ob diese Effizienz auch unter realen Bedingungen im Feld erreicht werden. Entscheidend ist das Zusammenspiel der Wärmepumpe mit der gesamten Heizungsanlage, sowie die Einstellungen des Wärmepumpenreglers. Ziel der Wärmepumpen Feldmessung ist es, eine gesamtschweizerische Energieverbrauchserhebung sowie effektive Arbeitszahlen zu erfassen.

Diese aktuelle Feldmessung schließt an die frühere, langjährige Feldmess-Kampagne «FAWA» an. Durch die technologische Weiterentwicklung und Digitalisierung ist es heute jedoch möglich, die WP-Feldmessungen zu automatisieren und hochauflösende Datenreihen einer Vielzahl von Sensoren zu erfassen. Basierend auf diesen qualitativ hochwertigen Datenreihen kann das Betriebsverhalten detailliert analysiert und in einem weiteren Schritt optimiert werden. Derzeit befinden sich über 20 Luft/Wasser und Sole/Wasser-Wärmepumpen in dem Feldmessprogramm.

Dieser Vortrag soll den Ablauf und die Methodik der Feldmessung beschreiben, welche vom Wärmepumpen-Testzentrum (WPZ) und der Interstaatlichen Hochschule für Technik (NTB) in Buchs SG im Auftrag von EnergieSchweiz bzw. des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt werden. Außerdem werden erste Erkenntnisse zum Betriebsverhalten und mögliche Optimierungspotentiale von Wärmepumpenanlagen präsentiert. Typische Effizienzwerte und Fehler werden aufgezeigt. Als entscheidend für die Analyse hat sich die Wahl korrekter Systemgrenzen herausgestellt, um Anlagen fair miteinander (oder auch mit fossilen Heizsystemen) vergleichen zu können.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Feldmessung, Datenauswertung, Energieeffizienz, Anlagenoptimierung

IV.15

## **Schallimmissionen von Luftwärmepumpen**

### **Methodik zur Langzeitmessung im Feld**

**Björn Nienborg<sup>1\*</sup>, Thore Oltersdorf, Stefan Henninger, Danny Günther**

<sup>1</sup>Fraunhofer ISE – Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg,  
[bjorn.nienborg@ise.fraunhofer.de](mailto:bjorn.nienborg@ise.fraunhofer.de)

Außenluft-Wärmepumpen unterliegen den Auflagen nach der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm, welche Immissionsrichtwerte vor schutzbedürftigen Räumen in Wohngebieten von tagsüber 50 bzw. nachts 35 dB(A) vorsieht.

Hersteller sind jedoch nur verpflichtet, den Schalleistungspegel, welcher die Schallemissionen beschreibt, anzugeben. Dieser wird gemäß EN12102 bei den Normbetriebsbedingungen nach EN14511-2 (7°C Lufttemperatur) gemessen und basiert somit auf lediglich einem stationären Betriebspunkt. Die stark variierenden Betriebsbedingungen, die sich im Realbetrieb über das Jahr einstellen finden keine Berücksichtigung.

Beispielhafte Labormessung haben jedoch gezeigt, dass der Schallpegel je nach Betriebspunkt um bis zu 7 dB(A) variiert und direkt vor einer Abtauerung 11dB(A) höher liegen kann, als im unvereisten Zustand [1]. Daneben gibt es regelmäßig Medienberichte über Beschwerden von Anwohnern über Wärmepumpenlärm.

Zur Evaluierung der realen Schallemissionen im Feld hat das Fraunhofer ISE daher ein Messverfahren entwickelt, welches in Kombination mit einem energetischen Monitoring bei zehn Feldanlagen im Bestand angewendet werden soll. Im vorliegenden Beitrag wird die zugrundeliegende Methodik am Beispiel einer ersten Feldmessung dargelegt. Im Fokus steht dabei die Abgrenzung der Schallimmissionen als Folge der Wärmepumpe vom Umgebungsschall.

[1] Schulze et al.; Ermittlung der Geräuschemissionen und Möglichkeiten der Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärmepumpen; UBA-FB 001969, 2014

**Stichwörter:**

Luft-Wärmepumpe, Schall, Akustik, Lärm, Immissionen

**Danksagung:**

Die vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des Projekts „WP-QS im Bestand“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert (FKZ 03EN2029A).

IV.16

## KUEHA: Kühlen mit der vorhandenen Heizungsanlage

Markus Arendt<sup>1\*</sup>, André Kremoke<sup>1</sup>, Clemens Felsmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Dresden, Institut für Energietechnik, Helmholtzstraße 14, 01062 Dresden, Deutschland  
[markus.arendt@tu-dresden.de](mailto:markus.arendt@tu-dresden.de)

Besonders in urbanen Gebieten kommt es in den Sommermonaten zu zunehmenden thermischen Belastungen und durch den steigenden Wärmeschutz von Gebäuden verschärft sich die im Inneren einstellende thermische Situation. Eine eingeschränkte Thermische Behaglichkeit kann dann zu Nutzerbeschwerden, eingeschränkten Arbeitsleistungen und gerade bei älteren Menschen zu massiven gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen.

Eine Nachrüstung von Lösungen zur sommerlichen Raumkühlung ist meist aus verschiedenen Gründen problematisch. Häufig kommen sogenannte dezentrale Klima-Split-Systeme zum Einsatz. Bedenklich ist hierbei vor allem der Einsatz von Elektroenergie und die meist ungenutzte Abgabe der Abwärme an die Umwelt.

Mit dem im Projekt verfolgten Ansatz, Freie Heizflächen zur Kühlung einzusetzen, wird eine alternative Möglichkeit zur sommerlichen Raumkühlung einer Praxiserprobung unterzogen. Dabei soll die Kältebereitstellung vorzugsweise unter Einbeziehung regenerativer Energien erfolgen.

Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die praktische Erprobung und Demonstration. Hierfür stehen mehrere Anlagen unterschiedlicher Nutzung, Größe, Bauart sowie anlagen-, mess- und regelungstechnischer Ausstattung zur Verfügung.

Messtechnische Untersuchungen haben gezeigt, dass unter Nutzung der vorhandenen Heizungsanlage, in welcher Kaltwasser umläuft, eine deutliche Kühlwirkung erreicht werden kann. Die Intensität des Temperierungseffektes steigt mit zunehmender Raumtemperatur und es kann ein Temperaturabsenkungspotential von mehr als 3 K ermittelt werden.

Praktische und simulative Untersuchungen haben bestätigt, dass mit dem Konzept der durchgängigen Kühlung über Freie Heizflächen ein signifikanter Anteil des Kühlenergiebedarfes gedeckt werden kann. Dieser Grundkühlenergiebedarf kann durch regenerative Energien bereitgestellt werden (z. B. Sole/Wasser-Wärmepumpe).

Das Projekt wird gefördert durch das BMWi aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen: 03ET1461AF).

IV.17

## Kältemittelreduktion in Propan-Wärmepumpen – aktuelle Arbeiten

Clemens Dankwerth<sup>1\*</sup>, Timo Methler<sup>1</sup>, Thore Oltersdorf<sup>1</sup>, Peter Schossig<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Department Heating and Cooling Technologies,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de](mailto:clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de)

Auf Grund der F-Gase-Verordnung besteht derzeit großer Bedarf Wärmepumpen zu entwickeln, die Kältemittel mit geringem Global Warming Potential (GWP) nutzen. Viele der hierfür verfügbaren Kältemittel unterliegen im technischen Einsatz höheren Sicherheitsanforderungen und/oder sind aufgrund der kontinuierlichen Reduzierung der am Markt verfügbaren Mengen an synthetischen Kältemitteln teurer im Einkauf geworden. Die Reduzierung der Kältemittelmenge und die Entwicklung einfacher, standardisierter und robuster Verfahren zur Absicherung sind daher aktuell wichtige Fragestellungen. In der Wärmepumpenbranche wird Propan derzeit als ein Kältemittel gehandelt, das langfristig die Ansprüche der F-Gase-Verordnung abdeckt und einen effizienten Betrieb ermöglicht.

Für brennbare Kältemittel, wie Propan, ist die Minimierung der Füllmenge von großer Bedeutung, um das Sicherheitsrisiko so gering wie möglich zu halten. Am Fraunhofer ISE wurde in Voruntersuchungen mit verschiedenen Optimierungen ein füllmengenreduzierter Wärmepumpenkreis aufgebaut, mit dem die Leistungsgrenzen für eine Kältemittelfüllmenge von maximal 150 g untersucht und bewertet worden ist. Die Ergebnisse wurden auf der DKV-Tagung 2019 in Ulm vorgestellt und haben gezeigt, dass diese Anlage eine Heizleistung von ~8 kW (B0/W35) bereitstellen kann.

Die Fortführung dieser Arbeiten ist im Rahmen eines durch das BMWi geförderten Projekts unter Beteiligung mehrerer Wärmepumpenhersteller geplant. Ziel ist die Schaffung einer gemeinsamen Auslegungsbasis, die Abstimmung von Vorgehen zur Bewertung der Anlagensicherheit sowie die Bündelung von Interessen.

Fachlicher Kern des Projekts ist eine breite vergleichende Validierung und Bewertung von Komponenten in füllmengenreduzierten Kältekreislösungen. Die Datenbasis, die durch die Vermessung von bis zu 80 unterschiedlichen Kältekreislösungen und die Vermessung von Komponenten an Einzelprüfständen entsteht, soll zur Auswahl geeigneter Kombinationen dienen und perspektivisch zu Auslegungswissen aufbereitet werden.

Im Rahmen des Vortrags auf der DKV-Tagung 2020 sollen das Projekt in seinen methodischen Ansätzen und Zielsetzungen sowie der aktuelle Stand der bis dahin vorliegenden Untersuchungen vorgestellt werden.

**Schlagwörter:** Wärmepumpe, Propan, Füllmenge, F-Gase-Verordnung

IV.18

## Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von HFO basierenden Kältemittel-Lösungen mit niedrigem GWP in Wärmepumpen-Anwendungen

Ewa Pawlak<sup>1</sup>, Hans-Dieter Küpper<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Chemours Deutschland GmbH, Frankfurter Straße 229, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland  
[ewa.pawlak@chemours.com](mailto:ewa.pawlak@chemours.com)  
[hans-dieter.kupper@chemours.com](mailto:hans-dieter.kupper@chemours.com)

Getrieben durch Energieeffizienz-Forderungen und gesetzliche Beschränkungen wie die F-Gas Verordnung suchen Wärmepumpen OEM Hersteller nach alternativen Kältemittel Lösungen. HFO basierende niedrig-GWP Kältemittel können helfen, die System Effizienz zu steigern und den Arbeitstemperaturbereich zu erweitern während die geringsten CO<sub>2</sub> Emissionen erzeugt werden. A2L klassifizierte Kältemittel erlauben einen erweiterten Anwendungsbereich bei höchstem Sicherheitsniveau im Vergleich zu A3 klassifizierten Kältemitteln.

Diese Präsentation vergleicht verschiedene relevante Parameter und stellt die durch A2L niedrig-GWP Kältemittel bereitgestellten Vorteile für weite Leistungsbereiche von A/W und B/W Wärmepumpen heraus.

**Stichwörter:**

A2L, HFO, Kältemittel, Energieeffizienz, CO2 Reduktion, Sicherheit

IV.19

## Integrales Design von Kältemittel, -kreis & System

Christian Vering<sup>1\*</sup>, Fabian Wüllhorst<sup>1</sup>, Philipp Mehrfeld<sup>1</sup>, Markus Nürnberg<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[cvering@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:cvering@eonerc.rwth-aachen.de)

Der Einsatz von Wärmepumpen forciert eine nachhaltige Wärmeversorgung des Gebäudesektors, da zukünftig mit Strom und Umweltwärme ressourcenschonende Energiequellen eingesetzt werden können. Allerdings ist die Marktdurchdringung der Wärmepumpe durch hohe Investitionen gehindert. Konventionelle Auslegungen führen zu einer Überdimensionierung der Wärmepumpe, um die Versorgungssicherheit sicherzustellen. Allerdings belegen Studien, dass diese ebenso bei nicht-konventioneller Auslegung sichergestellt ist.

Die Auslegung von Wärmepumpen hängt wesentlich von Entscheidungen auf drei Ebenen ab: Kältemittel-, Wärmepumpen- und System-Ebene. Letztere umfasst im Rahmen dieses Beitrags die Wärmepumpe, den Heizstab, den Heizungspuffer- und den Trinkwarmwasserspeicher sowie die Regelung. Die drei Ebenen weisen Wechselwirkungen untereinander auf. Anerkannte Auslegungsverfahren betrachten die Ebenen allerdings separat. Wechselwirkungen werden teilweise konservativ abgeschätzt oder vernachlässigt.

Ein Verfahren zur simultanen Auslegung der drei Ebenen existiert in der Gebäudeenergie-technik bisher nicht. In der Verfahrenstechnik erlaubt das Verfahren der Prozessintensivierung drastische Reduktionen vordefinierter Metriken, zum Beispiel Kosten und Emissionen. Die daraus abgeleitete systematische Prozessintensivierung löst ein integriertes Auslegungsproblem durch superstrukturbasierte Optimierungsrechnungen. Dieses Verfahren ist für die Auslegung von Wärmepumpensystemen anwendbar.

Im Rahmen des Beitrags wird die systematische Prozessintensivierung von Wärmepumpensystemen vorgestellt. Hierbei wird nach der Spezifikation des Einsatzszenarios eine Superstruktur relevanter Optionen generiert. Anschließend wird das nichtlineare multikriterielle Optimierungsproblem mit einem genetischen Algorithmus gelöst. Als Metriken werden Kosten mit der Annuitätenmethode und Emissionen mit der TEWI-Methode (Total Equivalent Warming Impact) definiert. Durch Variation der Einsatzszenarien wird zusätzlich eine robuste Auslegung sichergestellt.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die integrierte, kosten- und emissionsoptimale Auslegung von Kältemittel, Wärmepumpe und System. Im Vergleich zu konventionellen Auslegungsverfahren können annualisierte Kosten um 15 % und Emissionen um 10 % gesenkt werden. wird die nominelle Leistung der Wärmepumpe um 50 % reduziert. Diese Ergebnisse unterstreichen das Potential mit systematischer Prozessintensivierung, kostengünstige und nachhaltige Versorgungssysteme im Gebäudesektor zu etablieren.

**Stichwörter**

Wärmepumpenauslegung, Integrierte Auslegung, Genetischer Algorithmus, Superstrukturdesign

## Auslegungstool zur energieeffizienten Kühlung von Gebäuden

**Andreas Dümmler<sup>1\*</sup>, Kerstin Oetringer<sup>1</sup>, Joachim Götttsche<sup>1</sup>, Stefan Lambach<sup>2</sup>,  
Marek Kowalski<sup>2</sup>, Klaus Backes<sup>2</sup>, Mario Adam<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Solar-Institut Jülich(SIJ), Energieeffiziente Gebäudetechnik,  
Heinrich-Mußmann-Str. 5, 52428 Jülich, Deutschland  
[duemmler@sjj.fh-aachen.de](mailto:duemmler@sjj.fh-aachen.de)

<sup>2</sup>Hochschule Düsseldorf, Zentrum für Innovative Energiesysteme,  
Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf, Deutschland  
[stefan.lambach@hs-duesseldorf.de](mailto:stefan.lambach@hs-duesseldorf.de)

Thematisch widmet sich das Projekt Coolplan-AIR der Fortentwicklung und Feld-Validierung eines Berechnungs- und Auslegungstools zur energieeffizienten Kühlung von Gebäuden mit luftgestützten Systemen. Neben dem Aufbau und der Weiterentwicklung von Simulationsmodellen erfolgen Vermessungen der Gesamtsysteme anhand von Praxisanlagen im Feld.

Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Vermessung, Simulation und Integration rein luftgestützter Kühltechnologien. Im Bereich der Kälteerzeugung wurden Luft-Luft-Wärmepumpen, Anlagen zur adiabaten Kühlung bzw. offene Kühltürme und VRF-Multisplit-Systeme (Variable Refrigerant Flow) im Feld bzw. auf dem Teststand der HSD vermessen. Die Komponentenmodelle werden in die Matlab/Simulink-Toolbox CARNOT integriert und anschließend auf Basis der zuvor erhaltenen Messdaten validiert

Einerseits erlauben die Messungen das Betriebsverhalten von Anlagenkomponenten zu analysieren. Andererseits soll mit der Vermessung im Feld geprüft werden, inwieweit die Simulationsmodelle, welche im Vorgängerprojekt aus Prüfstandmessungen entwickelt wurden, auch für größere Geräteleistungen Gültigkeit besitzen. Die entwickelten und implementierten Systeme, bestehend aus verschiedensten Anlagenmodellen und Regelungskomponenten, werden geprüft und dahingehend qualifiziert, dass sie in Standard-Auslegungstools zuverlässig verwendet werden können.

Zusätzlich wird ein energetisches Monitoring eines Hörsaalgebäudes am Campus Jülich durchgeführt, das u. a. zur Validierung der Kühllastberechnungen in gängigen Simulationsmodelle genutzt werden kann.

### **Stichwörter:**

Simulation luftgestützter Kühltechnologien, Laborvermessung, Feldvermessung, Gebäude-Monitoring, Carnot-Toolbox