

**Deutsche Kälte-
und Klimatagung**



Deutsche Kälte- und Klimatagung 2021

Dresden

17. – 19. November 2021

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
H. www.dkv.org

Maritim Hotel & Internationales Congress Center Dresden

Devrientstraße 10-12/Ostra-Ufer 2
01067 Dresden
T. +49 (0) 351 216 1070
E. meeting.dre@maritim.de
H. www.maritim.de
H. www.maritim.com

Inhaltsverzeichnis

Studierendenvorträge.....	3
Arbeitsabteilung I.	9
Kryotechnik	
Arbeitsabteilung II.1	21
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung II.2	39
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung III	51
Kälteanwendung	
Arbeitsabteilung IV	65
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	
Rechenzentrum	82

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

S.01

Experimentelle Untersuchungen der Benetzbarkeit mikrostrukturerter Kupferoberflächen für hohe Drücke

Alexej Kloster*, Niklas Buchholz, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Trotz der hohen technischen Bedeutung von Verdampfungsprozessen, speziell des Blasensiedens, die in vielen Bereichen der Energie- und Verfahrenstechnik genutzt werden, sind die genauen Einflüsse für die Entstehung einer Dampfblase noch ungeklärt. Bisher werden die Randwinkel der Dampfblasen für alle Kohlenwasserstoffe einheitlich mit 35° angenommen. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass die Größe des Randwinkels von vielen weiteren Faktoren abhängt, darunter die Oberflächenbeschaffenheit der Heizflächen. Durch ein tieferes Verständnis dieser Zusammenhänge lassen sich Heizoberflächen entwickeln, die zu einer gesteigerten Wärmeübertragung führen.

Deswegen werden dynamische Randwinkelmessungen in einer für den Überdruck modifizierten Druckkammer an sandgestrahlten Kupferoberflächen mit gesättigten Kohlenwasserstoffen durchgeführt. Der Randwinkel von i-Pentan wird in einem Temperaturbereich von 20 °C – 100 °C in eigener Atmosphäre im Sättigungszustand gemessen. Dafür werden dynamische Messungen vom Anwachsverlauf eines Tropfens, sowie das Neubildungs- und Abreißverhalten untersucht und analysiert. Die Messungen werden mit einem optischen Randwinkel-messgerät durchgeführt.

Die Untersuchungen ergeben, dass das Volumen sowie der Durchmesser an der Grenzfläche von Tropfen und Kupferprobe mit steigender Temperatur sinken. Zudem bleibt der Randwinkel mit steigender Temperatur annähernd konstant.

Stichwörter:

Randwinkel, Benetzbarkeit, Kohlenwasserstoffe im Sättigungszustand

S.02

Optimierung einer Kreiselpumpe für den Einsatz in einer Adsorptionskältemaschine

F. Dehner

Technische Universität Dresden, BITZER Professur für Kält-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden
franz.dehner@mailbox.tu-dresden.de

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der numerischen Strömungssimulation eines Kreiselpumpenkopfes. Die Pumpe ist Teil einer Adsorptionskältemaschine, die mit Wasser bei einem Einlassdruck von ca. 70 mbar (absolut) betrieben wird. Aufgrund von auftretenden Geräuschen und Vibrationen während des Betriebs der Pumpe, soll diese mittels Simulation auf Kavitation untersucht werden. Dabei ist das Ziel, die Gebiete und Haupteinflussfaktoren der Kavitation ausfindig zu machen. Vor der Strömungssimulation wurde der Pumpenkopf in einem Reverse-Engineering-Verfahren, mittels eines 3D-Scanners gescannt und aus diesem anschließend ein CAD-Modell erstellt, welches dann in ANSYS implementiert wurde.

Für die Simulation wurde angesichts des Aufwandes ein einphasiges Modell gewählt. Die Ergebnisse der Simulation zeigten, dass der Dampfdruck lokal an den Schaufelspitzen unterschritten wird und somit an diesen Stellen Kavitation auftritt. Zudem gab es einen Vorschlag zur Änderung der Gehäusegeometrie zu einem Spiralgehäuse. Dieser resultierte aus Rückströmungen und Turbulenzen im Auslassbereich. Den Abschluss bildete eine Parameterstudie, bei der die Drehzahl und der Auslassdruck als Faktoren identifiziert wurden, die die Kavitation hauptsächlich beeinflussen.

S.03

Aufbau und Wiederinbetriebnahme einer Anlage zur Untersuchung des Wärmeübergangs beim Sieden

M. Halberstadt, Andrea Luke

Universität Kassel, Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

S.04

Einfluss externer Prozessfluidzufuhr auf das Förderverhalten von Schraubenspindelpumpen mit degressiver Spindelsteigung

Oliver Obst, Marian Lottis, Mohammad Deeb, Andrea Luke

Universität Kassel, Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

ist ausgefallen!

S.05

Untersuchung der Strömungseigenschaften im Absorber einer Diffusions-Absorptionskältemaschine

Franziska Fuhs*, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland
franziska.fuhs@igte.uni-stuttgart.de

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Wird die Beheizung der Anlage mit Abwärme aus Fern- oder Nahwärme, sowie solarer Wärme gewährleistet, kann mit ihr klimafreundlich Kälte bereitgestellt werden.

Im geneigten Rohr des Absorbers strömen Flüssigkeit und Gas im Gegenstrom zueinander. Dabei wird Kältemitteldampf aus dem Gas in die Flüssigkeit absorbiert. Der Stofftransport des Kältemittels geschieht dabei durch die Phasengrenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit. Die Steigerung der Stoffübertragung an der Phasengrenzfläche ist eine Möglichkeit, sowohl die Kälteleistung als auch die Leistungszahl der DAKM zu erhöhen. Die Eigenschaften der Phasengrenzfläche stellen dabei wichtige Einflussfaktoren auf den Stofftransport im Absorber dar. Die Eigenschaften der Phasengrenzfläche werden wiederum durch das Strömungsverhalten der Flüssigkeit und des Gases beeinflusst. Die Strömungseigenschaften innerhalb des Absorbers waren bisher jedoch unbekannt und konnten quantitativ und qualitativ nur sehr schwer abgeschätzt werden.

Mit einem entwickelten Versuchsstand sollen ausgewählte Strömungseigenschaften im Absorber untersucht werden. Dazu wird in einem Rohr die Gas- und Flüssigkeitsströmung des Absorbers mit Wasser und Luft nachempfunden. Dabei werden die Durchflüsse von Gas und Flüssigkeit sowie die Rohrreinigung variiert. Mit den gewonnenen Ergebnissen lassen sich Informationen zum Abflusszustand, zur spezifischen Phasengrenzfläche,

zum Turbulenzverhalten der Flüssigkeitsphase und zu der Strömungsform der Zweiphasenströmung ableiten. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Luft-Wasser-System auf den Absorber der DAKM wurde betrachtet und ist gegeben.

Im Rahmen des Vortrags wird der Versuchsstand und die damit erzielten Ergebnisse vorgestellt. Zudem wird auf die Relevanz der Ergebnisse für den Absorber der DAKM eingegangen. Ein Ausblick auf zukünftige Verbesserungen der Stoffübertragung im Absorber wird gegeben.

Stichwörter:

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Absorber, Strömungseigenschaften, Luft-Wasser-System, Zweiphasenströmung

S.06

Einsatz von SnSb als alternatives Regeneratormaterial im Gifford-McMahon Prozess

A. Jung¹, Ch. Haberstroh¹, S. Kamusella²

¹TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden

²Leybold Dresden GmbH, Zur Wetterwarte 50, 01109 Dresden

annika_leonie.jung@mailbox.tu-dresden.de

Die Gifford-McMahon Kältemaschine kann Temperaturen bis unter 4 K produzieren. Der dafür verwendete Regenerator in einem Kaltkopf einer Gifford-McMahon Kältemaschine dient dem effektiven Zwischenspeichern der thermischen Energie des Kältemittels Helium. Die bislang verbauten Blei-Regeneratoren sind aufgrund der RoHS-Richtlinie in Zukunft nicht mehr nutzbar. Neben Bismut ist Zinn ein aussichtsreicher Ersatz mit einer geringen Wärmeleitung und einer hohen spezifischen Wärmekapazität.

Durch theoretische Betrachtungen mittels des Simulationsprogramms ReGen3.3 wurden die Kälteleistungsverluste durch Einsatz von Sn0.95Sb0.05 als Regeneratormaterial abgeschätzt, sowie das Verhalten des Regenerators bei veränderter spezifischer Wärmekapazität untersucht. Die Ergebnisse dieser Simulation wurden durch praktische Messungen an dem mechanischen Kaltkopf COOLPOWER 10 MD der Firma Leybold GmbH verifiziert. Es wurden Änderungen der Prozessparameter zur Kompensation der Kälteleistungsverluste erprobt, wobei sich vor allem eine Verlängerung des Regenerators positiv auswirkte.

Stichwörter:

Gifford-McMahon, Regenerator, SnSb, RoHS

S.07

Veränderung der Leistungskennlinie im Dauerbetrieb

Untersuchung eines wassergekühlten Kaltwassersatzes mit Schraubenverdichter

Andreas J. Höß^{*1}, Dr. Davide Ziviani², Dr. James E. Braun³, Dr.-Ing. Eckhard A. Groll⁴

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

¹ahoess@purdue.edu

²dziviani@purdue.edu

³jbraun@purdue.edu

⁴groll@purdue.edu

Gegenstand der Arbeit ist die Veränderung der Leistungskennlinie eines Kaltwassersatzes im Langzeitbetrieb. Untersucht wird ein wassergekühlter Kaltwassersatz mit Schraubenverdichter und einer Kälteleistung von 513 kW mit dem Kältemittel R-134a. Hierfür wurde zu Beginn der Testreihe eine Leistungskennlinie des Kaltwassersatzes in definierten Teil- und Volllastsituationen als Referenz erstellt.

Um das Lastverhalten im Versuchsverlauf möglichst realistisch wiederzugeben, wird ein Testverfahren beschrieben, das unterschiedliche Leistungsbereiche abdeckt. Durch eine erhöhte Beanspruchung der Komponenten wird zudem ein beschleunigter Alterungsverlauf der Kälteanlage und insbesondere des Kompressors herbeiführt.

Der Langzeitbetrieb wird in regelmäßigen Abständen unterbrochen, um die Leistungswerte in den Laststufen der Referenzmessungen erneut zu erfassen und mit selbigen abzugleichen. Damit der Leistungsrückgang anteilig auf die Komponenten des Kaltwassersatzes zurückgeführt werden kann, werden die Betriebsstoffe vor und während des Langzeitbetriebs auf ihre Eigenschaften geprüft. Qualitätsänderungen lassen hierbei Rückschlüsse auf Vorgänge in der Kälteanlage wie beispielsweise Korrosion oder Abrieb zu.

Ziel der Arbeit ist es mit Hilfe der erhobenen Daten Wartungs- und Instandhaltungsprozesse zeitlich und lastabhängig zu optimieren.

Stichwörter:

Kaltwassersatz, Chiller, Industriekälte, Leistungsmessung

S.08

Planung einer Kälteversorgung auf Basis natürlicher Kältemittel für die Gärtankkühlung eines Weingutes unter Verwendung von erneuerbarem Strom aus einer PV-Anlage mit Stromspeicher

Fabio Tyroller

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim

ist ausgefallen!

S.09

Assessing the performance limits of a variable-speed residential heat pump system

John K. Brehm¹, David Augustine², Davide Ziviani¹, Eckhard A. Groll¹

¹Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University,
West Lafayette, IN, USA

2QM Power, Inc.,

Kansas City, MO, USA

brehm3@purdue.edu;

daugustine@qmpower.com;

dziviani@purdue.edu;

groll@purdue.edu

Most of the ducted split-type heat pump systems in the world feature fixed-speed compressors and fans. To meet forthcoming minimum energy rating requirements, reduce operational costs of the heat pump, and increase environmental sustainability, the efficiency of heat pump systems must be improved. Variable-speed

equipment offers significant advantages for load modulation and has the ability to increase the seasonal performance significantly. Additionally, novel electrical motor technologies, such as permanent magnet (PM) motors can reduce the power consumption of the drives by up to 25-55% compared to the widely used permanent split capacitor (PSC) motor.

In this study, a ducted fixed-speed heat pump system with a cooling capacity of 17.6 kW and a seasonal coefficient of performance (SCOP) rating of 4.11 is analyzed to quantify the theoretical performance limits that could be obtained by increasing the motor efficiency of the condenser fan, the evaporator fan and the compressor. Furthermore, the performance increase by replacing the fixed-speed components with variable-speed equipment is evaluated. A detailed charge-sensitive system simulation model that was previously developed by the authors and validated using experimental data obtained with the same unit was employed to carry out parametric studies to evaluate the impact of variable-speed compressor and indoor/outdoor fans on the SCOP rating.

The study showed a 0.9% improvement of SCOP with every percentage increase of compressor motor efficiency. The dependence of the evaporator fan and condenser fan motor efficiency on SCOP was lower, but considering the generally low motor efficiencies of these components, a noticeable efficiency gain can be achieved. In variable-speed equipment, the motor efficiency of the component at minimum operational point was the significant factor on SCOP. The motor efficiency at intermediate and maximum speed had only marginal effects on the SCOP. This showed the importance of equipment with high motor efficiencies at low speeds for ducted split- system heat pumps. The change of the fixed-speed system to a fully variable-speed heat pump resulted in a high gain of SCOP, proving the superiority of a variable-speed system. Overall, the model predicted an SCOP gain of 35% when changing the system to a fully variable system with state-of-the-art high efficient motors.

Keywords:

Optimization, Variable-speed Compressor, Fan Motor Efficiency, Permanent Magnet Motor

S.10

**Inbetriebnahme einer Anlage zur Ermittlung von
Explosionsgrenzen von Kältemitteln**

Nicolas Gastrop,

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim

ist ausgefallen!

I.01

Heliumverflüssiger für das SM-18 Projekt am CERN

Marco Mühlegger^{*1}, Manuel Messmer¹, Paolo Selva¹, Roland Werz¹

¹Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz
marco.muehlegger@linde-kryotechnik.ch; manuel.messmer@linde-kryotechnik.ch;
paolo.selva@linde-kryotechnik.ch; roland.werz@linde-kryotechnik.ch

ist ausgefallen!

I.02

Heliumverflüssigungs- und Rückgewinnungsanlagen im Bereich der Forschung

Wilhelm Vorbuchner

Vorbuchner GmbH & Co. KG, Oberaign 8, 84558 Kirchweidach
wilhelm.vorbuchner@vorbuchner.com

Vorbuchner cryogenics ist ein international tätiger Hersteller von Gasverflüssigungsanlagen und Anlagen zur Gasrückgewinnung. Das Kerngeschäft sind kryotechnische Anlagen mit einem Temperaturbereich von -269 °C (4,4 K) bis -271,5°C (1,5 K). Diese Hightech-Anlagen werden in unserem familiengeführten Unternehmen ausgelegt, konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen.

Im vorliegenden Beitrag werden vorrangig die optimale Auslegung eines Heliumverflüssigers, der Prozess selbst, sowie die Auswahl der Kernkomponenten thematisiert. Hierzu zählen unter anderem Kreislaufkompressoren, dynamisch gasgelagerte Expansionsturbinen, Aluminium-Plattenwärmeübertrager und der Ausfrier-Reiniger.

Vorgestellt werden einige aktuelle Projekte wie der Bau selbstausgelegter Turbinen und des LN2-Vorreinigers. Dieser mit Flüssigstickstoff arbeitende Reiniger ist so ausgelegt, dass die Anfangverschmutzung des Heliums auch über 5 % liegen kann. Beispiele wie die Berechnung des Wirkungsgrades verschiedener Turbinen sollen helfen, Theorie und Praxis zu verbinden.

Zusätzlich werden die Kernthemen der Heliumrückgewinnung angesprochen: Auswahl von Analytik, automatische Verteilerpanels und die Rückgewinnungs-Kompressoren.

Der Vortrag geht auf den vollständigen Heliumkreislauf ein, welcher üblicherweise innerhalb einer Forschungseinrichtung/Universität betrieben wird, und stellt den Stand der Technik dar.

Stichwörter:

Heliumverflüssiger, Heliumrefrigerator, Schraubenkompressor, dynamisch gasgelagerte Expansionsturbinen, Aluminium-Plattenwärmeübertrager, Heliumrückgewinnungsanlagen

I.03

Heliumkälteanlage am SupraLab@HZB

Planungen, Aufbau und Inbetriebnahme

Stefan Rotterdam^{1*}, Dr. Wolfgang Anders¹, Sven Erdmann¹, Jochen Heinrich¹, Svenja Heling¹, Axel Hellwig¹,
Karsten Janke¹, Kim Rautert², Jens Rother²

¹Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Bereich BE-IAS,
Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland
stefan.rotterdam@helmholtz-berlin.de

²RAK Industrial Consulting GmbH, Warnholtzstrasse 5, 22767 Hamburg, Deutschland
kim.rautert@rak-consulting.de

Das Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) errichtet im Rahmen einer Förderung durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) das Anwendungslabor SupraLab@HZB. Damit wird die Forschung und Entwicklung im Bereich leistungsfähiger, supraleitender Hochstrom-Kavitäten vorangetrieben, wie man sie für Synchrotronstrahlungsquellen der nächsten Generation benötigt.

Das Labor erweitert die vorhandene kryogene Infrastruktur am HZB um eine Heliumkälteanlage mit einer Leistung von ca. 180 W auf dem Temperaturniveau 1,8 K in der ersten Ausbaustufe. In einer zweiten Ausbaustufe sind ca. 280 W möglich. Die Anlage basiert auf einer hochintegrierten Coldbox mit Expansionsturbinen und kalten Kompressoren sowie einer abgesetzten 2K-Box. Sie stellt neben dem Temperaturniveau 1,8 K weitere Kühlleistung bei 5 K und 60 K zur Verfügung.

Der Beitrag gibt einen Überblick zu den Planungen, dem Aufbau sowie den ersten Inbetriebnahmeschritten der Kälteanlage.

Stichwörter:

Heliumkälteanlage, Kalte Kompressoren, Supraleitende Kavitäten, Synchrotronstrahlungsquelle

I.04

Praktische Inbetriebsetzungstechnik einer 1.8K-Heliumkälteanlage

Planung, Durchführung & technische Herausforderungen

Kim Rautert^{1*}, Jens Rother¹, Stefan Rotterdam², Dr. Wolfgang Anders², Sven Erdmann², Jochen Heinrich²,
Svenja Heling², Axel Hellwig², Karsten Janke²

¹RAK Industrial Consulting GmbH,
Warnholtzstrasse 5, 22767 Hamburg, Deutschland
kim.rautert@rak-consulting.de

²Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Bereich BE-IAS,
Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland
stefan.rotterdam@helmholtz-berlin.de

ist ausgefallen!

I.05

Heat Loads measurements at the XFEL cold linac

R. Ramalingam, Y. Bozhko, S. Barbanotti, T. Schnautz

Maschine - Kryogenik - Supraleitung (MKS), DESY, 22607 Hamburg
rajinikumar.ramalingam@desy.de
<https://mks.desy.de/>

The European X-Ray Free Electron Laser (EuXFEL) at DESY is in operation since the beginning of 2017. The free electron laser is based on a superconducting linear accelerator that delivers electrons to the undulator section with beam energy up to 17.5 GeV. The linear accelerator consists of 96 cryomodules operating at a temperature of 2K; each 12 m long module is an assembly of 8 superconducting cavities and one superconducting magnet.

This paper focusses on the measurement of the static and dynamic heat loads of the cryomodules assembled in the linac. Heat loads are an important parameter to evaluate the efficiency of the refrigerator system, the quality of the cryomodule assembly and installation and the accelerating cavity performances, being the dynamic heat loads proportional to the cavity quality factor (Q0, the ratio of the stored energy to the dissipated energy).

The paper describes at first the procedure to measure the static and dynamic heat loads of the main linac at different beam energy levels. The measurement results are then summarized and compared with the values measured for the single cryomodules at the test stands in the Accelerator Module Test Facility (AMTF) at DESY.

Keywords:

European XFEL, Thermal performance, Superconducting accelerator.

I.06

Die Kälteanlage für FAIR – eine große Herausforderung an die Kryotechnik

**Marion Kauschke^{1*}, Holger Kollmus¹, Claus Schroeder¹, Alexander Täschner¹
Elias Mai², Markus Diehl², Anna Errante², Paolo Selva²**

¹GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, CRY, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt, Germany
M.Kauschke@gsi.de

²Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz
Elias.Mai@linde-kryotechnik.ch

In den nächsten Jahren wird bei GSI das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) entstehen. An FAIR wird eine nie dagewesene Vielfalt an Experimenten möglich sein, durch die Physiker aus aller Welt neue Einblicke in den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums, vom Urknall bis heute, erwarten. Das Herzstück ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 1100 Metern. An diesen schließt sich ein komplexes System von Speicherringen und Experimentierstationen an. Sowohl der Ringbeschleuniger SIS100 wie auch der supraleitende Fragment Separator (Super-FRS) bestehen hauptsächlich aus supraleitenden Magneten, die in internationalen Kollaborationen entwickelt und gefertigt werden.

Für die Kälteanlage stellt FAIR zwei große Herausforderungen. Einerseits werden während des Experimentierbetriebs die SIS100 Magnete gerammt und erzeugen so dynamische Lasten, die um ein Vielfaches über den statischen Verlusten (ca. 4 kW@4K) liegen. Andererseits sind die Super-FRS Magnete mit einer kalten Masse von ~1500 t und einer Heliumspeicherkapazität von ca. 7t eine schwergewichtige Aufgabe. Für die Kühlung wird die größte einzelne Heliumkälteanlage Deutschlands mit 50 kW @ 50-80 K und 14 kW @ 4,5 K von Linde Kryotechnik gebaut.

Stichwörter:

FAIR, Helium-Kälteanlagen

I.07

20 Jahre kryogener Beschleunigerbetrieb an der Strahlungsquelle ELBE – ein Rück- und Ausblick

Christof Schneider, Peter Michel

Institut für Strahlenphysik, Strahlungsquelle ELBE
Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden
christof.schneider@hzdr.de

Im Jahr 2001 ging der Elektronenbeschleuniger ELBE mit dem ersten Elektronenstahl über 16 MeV Energie offiziell in Betrieb. Das Kernstück des Beschleunigers sind zwei supraleitende Kryostate mit TESLA-Kavitäten, welche als Alleinstellungsmerkmal den Dauerstrich- (cw-) Betrieb der Anlage ermöglichen. Maximal 40 MeV bei 1 mA Strahlstrom sind hier möglich. Die Kälteerzeugung wird durch eine Linde-Heliumanlage mit Kaltkompressorsystem bereitgestellt. Die über die Jahre angesammelten Betriebserfahrung, Anlagenupgrades und Anpassungen werden in diesem Beitrag in einem Überblick besprochen sowie geplante Weiterentwicklungen vorgestellt.

I.08

Sicherheitsaspekte bei der Durchführung von Druckprüfungen

Johannes Drache^{1*}, Nicola Magginetti¹, Pascal Erni¹

¹WEKA-AG, Schürlistrasse 8, CH-8344 Baretswil, Schweiz
j.drache@weka-ag.ch, cryo@weka-ag.ch

Drucktragende Komponenten müssen gemäß den geltenden Gesetzen, wie z. B. der PED, einer statischen Druckprüfung ausgesetzt werden. In den korrespondierenden Normen werden standardmäßig Flüssigkeitsdruckprüfungen empfohlen, aber auch Gasdruckprüfungen sind möglich.

Das Gefahrenpotenzial der Druckprüfung für umstehende Prüfer oder Dritte ist nicht zu unterschätzen. Auf Basis des Prüfdrucks und des Prüfvolumens kann die Sprengkraft als TNT-Äquivalent ausgedrückt werden. Die Schadenswirkung ist im Falle des Berstens hauptsächlich von der Sprengkraft und dem Abstand zum Prüfobjekt abhängig.

Am Beispiel der Serienfertigung von kryogenen Prozessventilen werden die nötigen Maßnahmen zur sicheren Durchführung von Druckprüfungen aufgezeigt.

Zudem wird auf die Dimensionierung von baulichen Maßnahmen wie Prüfbunkern und Einhausungen eingegangen.

Stichwörter:

Druckprüfung, Sicherheit, kryogene Armaturen, Ventile, EN12266, EN13445, EN13480, BG RCI T 039, industrielle Fertigung

I.09

Neuste Generation Tieftemperaturlieferkette

Dipl. -Ing Thomas Frank

¹ Refolution Industriekälte GmbH, Karpatenstraße 26, 76227 Karlsruhe, Deutschland
Thomas.Frank@refolution.de

Stoffe wie Organisches Material, Enzyme, Hormone, Proteine und Blutplasma werden zum erhalten der Qualität bei Tieftemperatur zwischen -40°C und bis zu -196°C gelagert, transportiert und verarbeitet. Gerade die Lieferkette des BioNtech Impfstoffes ging Anfang des Jahres groß durch die Presse. Hierzu ist eine lückenlose dokumentierte und validierte Lieferkette mit anspruchsvoller Technik notwendig. In dem Vortrag wird der neueste Stand der Technik mit geringen Emissionen, hoher Effizienz und Sicherheit mit den Kältemitteln Luft (R729), Kohlenwasserstoffe, Trockeneis und flüssig Stickstoff anhand verschiedener ausgeführter Projekte aufgezeigt.

Stichwörter:

Air cycle machine, low temperature, storage, energy efficiency, refrigeration

I.10

Float-Verfahren zur Kryokonservierung

Ein neuartiger Prozess angewendet auf rote Blutkörperchen

Tim Rittinghaus^{1*}, Stephan Kabelac², Birgit Glasmacher¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Mehrphasenprozesse,
An der Universität 1, 30823 Garbsen, Germany
rittinghaus@imp.uni-hannover.de

² Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Germany
kabelac@ift.uni-hannover.de

Blutkonserven (Erythrozytenkonzentrat) werden bei Temperaturen um 4 °C gelagert. So ist eine Haltbarkeit von maximal 42 Tagen möglich. Um eine längere Lagerdauer zu erzielen, ist der Einsatz von Kryokonservierung erforderlich. Die bekannten Kryoverfahren verwenden Blutbeutel, deren Material und Geometrie den Wärmetransport aus dem Gefriergut limitiert. Dies macht den Einsatz großer Mengen teils toxischer Gefrierschutzmittel notwendig.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Verfahren zur Kryokonservierung wasserbasierter Suspensionen wie ~~z.B.~~ Blut entwickelt. Diesem liegt der Float-Prozess zur Herstellung von Flachglas (Fensterglas) zugrunde, bei dem Glasschmelze auf einem Bad aus flüssigem Zinn erstarrt wird. Die flüssige Blutkonserve wird auf ein kaltes Bad aus Perfluorcarbon geleitet, schwimmt aufgrund geringer Dichte auf und verteilt sich auf diesem zu einer flachen Platte. Die Wärme des Gefrierguts wird an das kalte Bad und kalten Stickstoffdampf, welcher das Bad überströmt abgeführt. Die Blutkonserve erstarrt gleichmäßig zu einem Strang und kann anschließend eingelagert werden.

Stichwörter:

Kryokonservierung, Kryotechnik, Verfahren, Erythrozyten, Erythrozytenkonzentrat, Rote Blutkörperchen, Einfrieren, Blutkonserven

I.11

Neuartige magnetisch rauscharme glasfaserverstärkte Kunststoff-Kryostate für die Magnetokardiographie des menschlichen Herzens

Gregor Trommler^(a), Andreas Kade^(a), Ursula Böhm^(a), Frank Schoepe^(a), Christof Mrowietz^(b), Jürgen Scholl^(b)

^(a)Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden,
gregor.trommler@ilkdresden.de

^(b)Biomagnetik Park AG, Tempowerkring 6, 21079 Hamburg,
juergen.scholl@biomagnetik.com

Die Magnetokardiographie (MKG) ist eine innovative Methode der nicht-invasiven Diagnose, die die magnetische Aktivität des menschlichen Körpers berührungslos aufzeichnen kann. Die Magnetfelder des Körpers werden durch die Aktivität des Muskelgewebes im Inneren des Körpers verursacht. Das extrem schwache, vom menschlichen Herzen erzeugte Magnetfeld im Bereich von 10^{-9} Tesla wird von hochempfindlichen SQUID-Sensoren erfasst. Um das störende magnetische Rauschen von außen (z. B. den Einfluss des Erdmagnetfeldes) zu reduzieren, muss die Untersuchung in einer Abschirmkammer durchgeführt werden. Die Sensoren werden mit flüssigem Helium auf eine Temperatur von 4,2 Kelvin (-269 °C) heruntergekühlt, wodurch sie in den supraleitenden Zustand versetzt werden.

In der Veröffentlichung wird ein neuartiger magnetischer, rauscharmer Kryostat aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit geschlossenem Kühlkreislauf vorgestellt, der in der Lage ist, verdampfendes Helium direkt im Kryostaten über einen integrierten Kaltkopf eines Kryokühlers wieder zu verflüssigen. Darüber hinaus wurde der Wärmeeintrag in den Kryostaten so weit minimiert, dass die Leistung des Kryokühlers ausreicht, um verdampfendes Helium aus einer Sammelblase nach einer Außerbetriebphase des Kryokühlers wieder zu verflüssigen. Um die Untersuchung in einer für den Patienten bequemen Position durchführen zu können, lässt sich das MKG in einem Winkelbereich zwischen 0 und 45 Grad einstellen und betreiben. Die Entwicklung zielt darauf ab, eine wesentlich genauere Untersuchung des menschlichen Herzens zu ermöglichen und den derzeitigen Stand der Technik bei der Herzuntersuchung (das Echokardiogramm-EKG) für den klinischen Einsatz zu ersetzen.

Schlagwörter:

Magnetokardiographie, menschliches Herz, Kryostat, SQUID, magnetisch rauscharm, glasfaserverstärkter Kunststoff

I.12

Qualitätsmanagement in der Kryotechnik – Prozesse, Werkstoffe und Verfahren

Sebastian Hempel, Thomas Jande, Ronald Miksche

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gemeinnützige Gesellschaft mbH,
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
sebastian.hempel@ilkdresden.de

In der Forschung und Entwicklung gewinnt das Qualitätsmanagement immer mehr an Bedeutung. Die Vorteile und Chancen einer strukturierten Umsetzung der Produkt- bzw. der Dienstleistungsanforderungen rücken vor allem bei Großforschungsanlagen in den Fokus.

Getrieben durch die Industrie und Wirtschaft, sind eine Vielzahl von Normen, Richtlinien und Spezifikationen vorhanden, welche sich über alle Projektphasen hinweg mit dem Prozessmanagement, der Qualitätssicherung, der Qualitätskontrolle usw. befassen. Aufgrund der Betriebsbedingungen der Kryotechnik (sehr tiefe Tempera-

turen, Vakuum, konstruktive Besonderheiten, ...) fallen die Anwendungen nicht immer in die Geltungsbereiche der Normen und Richtlinien. Die Erklärung einer Produktkonformität, unter Mitwirkung einer Überwachungsstelle, wird an dieser Stelle sehr erschwert.

Aktuelle Forschungsprojekte zielen darauf ab, qualitätssteigernde Maßnahmen in der Kryotechnik zu definieren, um Produkte für „Mensch und Maschine“ sicher und funktionsgerecht zu entwickeln und herzustellen. Dabei stehen Auslegungs- und Berechnungsmethoden ebenso im Vordergrund, wie die Evaluierung von Fertigungsmethoden.

I.13

Linear und Rotary Stirling Kryokühler – Analyse designimmanenter Unterschiede im Wirkungsgrad

Marcel Nussberger^{1*}, Ingo Rühlich¹, Markus Mai¹, Carsten Rosenhagen¹

¹ AIM Infrarot-Module GmbH, Bereich Kühler, Theresienstraße 2, 74072 Heilbronn, Deutschland
marcel.nussberger@aim-ir.com

Stirling-Kleinkühler für den Betrieb von bildgebenden IR-Hochleistungssensoren sind aktuell entweder als Linear- oder als Rotary-Kryokühler konzipiert. Je nach Anwendungsfall überwiegen die Vorteile des einen oder anderen Konzeptes. In vielen Anwendungen ist der Wirkungsgrad ein bedeutender Parameter. Dieser ist bei Kryokühlern in Rotary-Ausführung höher als in der Linear-Version. In diesem Beitrag wird eine Analyse der beiden Kühlertypen vorgestellt. Die Ausführungen sollen die Unterschiede im Wirkungsgrad darlegen und deren Ursache erläutern.

Stichwörter:

Stirling-Kleinkühler, Cryocooler, IR detector

I.14

Neue Ideen für die Kühlung langer supraleitende Stromkabel

F. Herzog¹, T. Kutz¹

¹Messer SE & Co. KGaA, Kleinewefersstr. 1, 47803 Krefeld, Germany
friedhelm.herzog@messergroup.com

Hochtemperatur-Supraleiter bestehen aus keramischen Materialien, die in der Nähe des Normalsiedepunktes von flüssigem Stickstoff (-196°C) ihre kritische Temperatur erreichen und dann ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren. Dadurch kann elektrischer Strom verlustfrei transportiert werden. Dies ist z.B. für den Anschluss von Windparks oder Fotovoltaik-Anlagen an H₂-Elektrolyseure von großem Nutzen. Aber auch Anbindungen an Stromnetze oder die Stromverteilungen in Großstädten gehören wegen des extrem geringen Platzbedarfs für die Kabeltrassen und wegen der hohen Umweltverträglichkeit zu den potenziellen Nutzern dieser Technologie.

Die supraleitenden Kabel werden in vakuumisolierte Rohrleitungen (Kryostate) eingezogen, durch welche unterkühlter Flüssigstickstoff strömt. Da die Stromtragfähigkeit der Supraleiter mit sinkender Temperatur stark ansteigt, wird die Stickstofftemperatur vor Eintritt in den Kryostaten bis in der Nähe seines Gefrierpunktes (-210°C) abgesenkt. Vom Ende der Kabelstrecke wird der jetzt etwas wärmere Flüssigstickstoff durch eine in den Kryostaten integrierte oder eine separate Rückleitung zurück zum Kabelanfang geleitet. Hier fördert eine Zirkulationspumpe den Stickstoffstrom durch einen Unterkühler, um die aufgenommene Wärme wieder abzuführen.

Die Energieverluste des Systems werden im Wesentlichen durch den Kälteverlust des Kabelkryostaten, den Kälteverlust der Rückleitung, und den Wärmeeintrag der Zirkulationspumpe verursacht. Stattet man den

Kabelkryostaten mit einem Kühlschild aus, so sind Zirkulationspumpe und Rückleitung nicht mehr erforderlich. Flüssiger Stickstoff wird dann direkt aus dem Vorratsbehälter durch den Unterkühler geleitet und durchströmt anschließend den Kabelkryostaten. Am Kabelende wird die Stickstoffströmung in den Kühlschild eingeleitet. Dort verdampft der Stickstoff und erzeugt so die Kälte die erforderlich ist, um den Kryostat-Wärmeeinfall zu kompensieren.

Der auf den Supraleiter einwirkende Wärmestrom lässt sich so im Vergleich zu einem einfachen Kryostaten etwa um den Faktor 10 reduzieren. Dadurch sinkt auch der zur Begrenzung des Temperaturmaximums im Kryostaten erforderliche Flüssigstickstoff-Massenstrom um den Faktor 10 und der Strömungsdruckverlust verringert sich um den Faktor 100. So lassen sich Kabelstrecken von 100 km Länge realisieren, ohne dass Zwischenkühler erforderlich sind.

Stichwörter:

Hochtemperatur-Supraleiter, Unterkühler, kryogene Kühlung, Kabelkryostat

I.15

Flexible, vakuumisolierte Rohre für 80 LNG-Tankstellen in 5 Jahren: Gewonnene Erkenntnisse und wie geht es weiter

Dr. Jürgen Essler*, Meik Schubert

BRUGG Rohrsysteme GmbH, Industry Solutions, Adolf-Oesterheld-Straße 31, 31515 Wunstorf

Juergen.Essler@brugg.com

Meik.Schubert@brugg.com

Die Dekarbonisierung des Transportwesens ist eine der wichtigen Säulen auf dem Weg zur geplanten CO₂-neutralen Welt in wenigen Jahrzehnten. Hierbei zeichnet sich der Weg bei Personenkraftwagen bereits ab. Für den Lastverkehr ist dieser Weg noch nicht eindeutig absehbar. Ein erster Schritt, um weniger CO₂ beim Transport von Gütern zu emittieren, ist die Verwendung von LNG (Liquefied Natural Gas) als Kraftstoff für LKWs. Hierbei handelt es sich um den ersten kryogenen Kraftstoff, der umfangreich eingeführt wurde.

BRUGG Rohrsysteme hat in den letzten Jahren mehr als 80 LNG-Tankstellen mit verschiedenen Rohrsystemen zum Transport kryogener Gase zwischen dem Anlieferpunkt, dem LNG-Tank, der LNG-Zapfsäule und auch des häufig vorhandenen LIN-Tanks beliefert. Es handelt sich hierbei um einen Kundenkreis, der zuvor noch nie eine Berührung mit kryogenen Medien hatte, was zusätzlichen Erklärungsaufwand erforderte und erfordert.

Wir möchten unsere Erfahrungen bei dieser Einführung eines kryogenen Kraftstoffs teilen. Es wird berichtet, was gut und was weniger gut gelaufen ist.

Die möglichen Lehren, die hieraus gezogen werden können, werden mit dem Ausblick auf den nächsten kryogenen Kraftstoff LH₂ verbunden.

Stichwörter:

LNG, LH₂, Tankstelle, Erfahrungsaustausch

Erfahrungen aus dem deutschlandweiten Bau und Betrieb von über 85 Wasserstofftankstellen

Lorenz Jung

H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, EUREF-Campus 10-11, 10829 Berlin
jung@h2-mobility.de

Wir, die H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, bauen an einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland. Unser erstes Ziel ist der Betrieb von 100 Wasserstoffstationen in sieben deutschen Ballungszentren (Hamburg, Berlin, Rhein-Ruhr, Frankfurt, Nürnberg, Stuttgart und München) sowie entlang der verbindenden Fernstraßen und Autobahnen. Parallel dazu errichten wir weitere Stationen dort, wo eine Nutzfahrzeugnachfrage besteht und eine öffentliche Tankstelle für ein wachsendes Tankstellennetz für Pkw sinnvoll ist. Die H2 MOBILITY übernimmt dabei alle Aufgaben – Planung, Bau, Betrieb und Vermarktung – die für einen erfolgreichen Netzausbau und -betrieb erforderlich sind.

Der Vortrag von Lorenz Jung, Chief Projects Officer (CPO), gibt Einblicke in die Netzstrategie und den Betrieb von Wasserstofftankstellen inklusive Details zu Transport und Lagerung von druckförmigen und tiefkaltem Wasserstoff.

HyLiq-Kompetenzzentrum: LH₂-Aktivitäten und -Materialforschung

Maria Krautz, Hagen Schmidt, Dirk Lindackers*

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden
IFW Dresden, Helmholtzstraße 20, 01069 Dresden
d.lindackers@ifw-dresden.de

Vor dem Hintergrund der weithin sichtbaren Klimaproblematik gewinnt Grüner Wasserstoff als Energieträger zunehmend an Bedeutung. Mit ihm ist es möglich, regenerativ erzeugte Energie zu speichern, über große Distanzen zu transportieren und am Einsatzort sektorenübergreifend, mit hoher Effizienz und ohne CO₂-Emission nutzbar zu machen. Dieses Potential sieht auch die Bundesregierung. Im Rahmen ihrer Wasserstoffinitiative hat sie bereits auf politischer Ebene Verträge mit den Westafrikanischen Staaten und Marokko zum Export/Import von Wasserstoff geschlossen.

Die unübertroffen hohe Speicherdichte des flüssigen Wasserstoffs bietet gerade auf langen Transportwegen große Vorteile. Da weder in den zukünftigen Wasserstoff-Erzeugerregionen, noch im Verbraucherland Deutschland eine nennenswerte Infrastruktur zur Lagerung, Transport und Verteilung von Wasserstoff existiert, ist die zügige Etablierung einer hocheffizienten LH₂-Technologie unverzichtbar.

Mit den Aktivitäten des HyLiq-Kompetenzzentrums werden nicht nur Innovationen auf dem Gebiet der LH₂-Technologie vorangetrieben, sondern explizit die Behebung der systemimmanenten Nachteile von LH₂ adressiert: hoher Energieaufwand bei der Verflüssigung, boil-off während der Lagerung und des Transports sowie Umfüllverluste seien hier exemplarisch genannt. Der Beitrag gibt einen Überblick zu den aktuellen Arbeiten.

I.18

Praktische Aspekte bei der Gestaltung von Lagern und Antrieben bei Pumpen für kryogene Flüssigkeiten

Dr. P. Sass, S. Zielke, H. Bischoff, R. Schöndube

SciDre GmbH, 01069 Dresden

p.sass@scidre.de

Durch die fortschreitende Entwicklung von Hochtemperatursupraleitern wird ein immer breiteres Anwendungsfeld geschaffen. Speziell in der Kälte- und Kryotechnik sind aufgrund der anfallenden Kälte neue Anwendungen denkbar. Am Beispiel der Entwicklung einer Pumpe für kryogene Flüssigkeiten werden Magnetlevitation mithilfe von Supraleitern dargestellt und die ingenieurstechnischen Herausforderungen aufgezeigt.

I.19

Verflüssigung von Wasserstoff durch magnetische Kühlung

T. Gottschall, E. Bykov, C. Salazar, Y. Skourski, T. Herrmannsdörfer, J. Wosnitza,

Hochfeld-Magnetlabor Dresden, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, 01328 Dresden

t.gottschall@hzdr.de

Magnetische Materialien ändern ihre Temperatur, wenn sie einem Magnetfeld ausgesetzt werden. Dieser sogenannte magnetokalorische Effekt lässt sich nutzen, um alternative Kühlkonzepte zu entwickeln. Während in den letzten Jahren der wissenschaftliche Fokus auf der Kühlung nahe Raumtemperatur lag, ist kürzlich die magnetische Verflüssigung von Wasserstoff als Anwendungsgebiet stärker ins Blickfeld gerückt. Die konventionelle Herstellung von Flüssigwasserstoff ist ein äußerst energieintensiver Prozess. Effizienzsteigerungen sind durch den Einsatz maßgeschneiderter magnetischer Materialien und hoher Magnetfelder möglich. In diesem Beitrag werden die physikalischen Grundlagen der magnetischen Kühlung diskutiert und ausgewählte magnetokalorische Materialklassen vorgestellt. Des Weiteren werden die technologischen Herausforderungen und Vorteile thematisiert.

I.20

Blasenwachstum in flüssigem Methan infolge Druckabsenkung unter Schwerelosigkeit

Niklas H. Weber^{1*}, Michael E. Dreyer²

¹ Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik – Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Strömungsmechanik, ZARM, Am Fallturm 2, 28359 Bremen, Germany
niklas.weber@zarm.uni-bremen.de

² Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik – Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Fachgebiet Strömungsmechanik, ZARM, Am Fallturm 2, 28359 Bremen, Germany
michael.dreyer@zarm.uni-bremen.de

Raketenoberstufen verwenden aufgrund ihrer hohen Energiedichte verflüssigte Gase als Treibstoffe. Um längere Missionsdauern zu erlauben, ist es notwendig, das thermodynamische Verhalten des Systems bei diversen Manövern vorherzusagen. Eines dieser Manöver ist die Druckabsenkung durch Entnahme der Gasphase. Die dem Tank unvermeidlich zugeführte thermische Energie führt zur Verdampfung und ansteigendem Druck, der

unterhalb des erlaubten Drucks gehalten werden muss. Ein weiterer Nutzen der Druckabsenkung ist es, die Flüssigkeit für die Verwendung in den Turbopumpen zu konditionieren. Dabei wird durch ein Verschieben der vom Dampfdruck abhängigen Sättigungstemperatur die Flüssigkeit durch Verdampfung gekühlt. Durch ein erneutes Bedrücken wird die Flüssigkeit unterkühlt. Dies ist notwendig, um Strömungskavitation bei der Förderung in den Pumpen zu vermeiden.

Bei einer Druckabsenkung wird die Flüssigkeit, die sich initial auf der Sättigungstemperatur des Anfangsdrucks befindet, überhitzt. Dieser überhitzte Zustand ist instabil und wird durch Phasenübergang an Flüssigkeitsoberflächen abgebaut. Dabei ist das Verhalten von Keimstellen von besonderem Interesse, da Dampfblasen, die dort entstehen, aufgrund der gleichmäßigen Überhitzung der Flüssigkeit deutlich schneller anwachsen als bei einem Siedeprozess. Eine Modellierung auf der technischen Skala erfordert ein Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen dem Strömungsfeld und dem Wärme- und Stofftransport auf der Modellskala.

Um den Druckabsenkungsprozess zu untersuchen, wurde eine Serie von Experimenten im Fallturm der Universität Bremen durchgeführt. Während der Freifallzeit von 5 Sekunden wurde der Druck oberhalb der Oberfläche von flüssigem Methan (als Einstoffsystem) abgesenkt und das Wachstum einer Einzelblase an einer künstlich angebrachten Keimstelle untersucht. Das Anwachsen der Dampfblase wurde mit theoretischen Modellen verglichen. Da die Druckabsenkung, im Gegensatz zum Blasensieden aufgrund von einer eingebrachten Wandüberhitzung, eine gleichmäßige Überhitzung in der Flüssigkeit erzeugt, sind diese Experimente in besonderer Weise für einen Vergleich zwischen Experiment, Numerik und Theorie geeignet. Zudem ermöglicht es der fehlende Auftrieb, das Blasenwachstum ohne überlagerte Strömung zu beobachten.

Stichwörter:

Mikrogravitation, Methan, Phasenwechsel, Blasenwachstum

I.21

Kältesystems der Kalten Neutronenquelle bei RID Delft

Francesco Dioguardi*, Fred Catseman, Daan Maessen

Stirling Cryogenics BV | Science Park Eindhoven 5003 | 5692 EB Son | The Netherlands
f.dioguardi@stirlingcryogenics.eu

Durch das Hinzufügen einer kalten Neutronenquelle am Reaktorinstitut der Technischen Universität Delft war ein Kühlsystem erforderlich, das 20K-Kühlung bereitstellt, um das LH₂-Bad flüssig zu halten.

Da dieses LH₂-Bad neben dem Reaktorkern platziert wird, benötigte RID ein Kühlsystem mit voller Redundanz, 10 bis 120 % Kapazitätsvariation und niedrigstem Energieverbrauch, aber es soll außerhalb der Reaktorhalle positioniert werden.

In dieser Präsentation beschreiben wir das Design dieses Systems, um diese Anforderungen zu erfüllen und präsentieren die Testergebnisse während der Inbetriebnahme, um die Funktionalität des Systems nachzuweisen.

Stichwörter:

Kalte Neutronenquelle, 20K-Kühlung, flüssiger Wasserstoff

Konzentrationsverschiebungen in einem kryogenen Gemischkältekreislauf mit mikrostrukturiertem Wärmeübertrager

Jonas Arnsberg^{1*}, Steffen Grohmann^{1,2}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
jonas.arnsberg@kit.edu

² Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21, 76331 Karlsruhe, Deutschland
steffen.grohmann@kit.edu

Auf dem Joule-Thomson-Effekt basierende kryogene Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) stellen eine kostengünstige, effiziente und beliebig skalierbare Technologie für die Kühlung bei Temperaturen unter 100 K dar. Damit eignen sich Prozesse wie der mit weitsiedenden Kältemittelgemischen betriebene Linde-Hampson-Prozess beispielsweise für die Kühlung hochtemperatur-supraleitender Stromkabel. Im Betrieb führen die unterschiedlichen Löslichkeiten der Gemischkomponenten im Verdichteröl sowie Flüssigkeitsansammlungen in kalten Totvolumina zu einer Veränderung der zirkulierenden Gemischzusammensetzung, was in der Prozessentwicklung beachtet werden muss. Zur Optimierung der Prozesseffizienz und der Charakterisierung dieser Zusammensetzungsverschiebung beim Einsatz eines neuartigen kompakten mikrostrukturierten Wärmeübertragers wurden Untersuchungen an Stickstoff-Kohlenwasserstoff-Gemischen durchgeführt. Die Zusammensetzungen der eingesetzten Gemische wurden dabei gravimetrisch bei der Befüllung und im Betrieb offline mit einem kalibrierten Gaschromatographen bestimmt. Die auf diese Weise erhobenen Daten zeigen eine geringere relative Verschiebung der Zusammensetzung als allgemein in der Literatur beschrieben, was auf das geringere innere Volumen des eingesetzten Wärmeübertragers zurückgeführt werden kann.

Stichwörter:

Gemischkältekreisläufe, Verschiebung der Zusammensetzung, Stickstoff-Kohlenwasserstoff-Gemische, mikrostrukturierter Wärmeübertrager

Modellierung des Kälteverbunds und Evaluation der übergeordneten Regelungsalgorithmen zur Effizienzsteigerung der Kälteversorgung eines Hochschulcampus

Nikolai Kononenko^{1*}, Arno Reimann¹, Felix Ziegler¹

¹Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik,
Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik, Marchstraße 18, 10587 Berlin
nikolai.kononenko@tu-berlin.de

Die Kälteversorgung in einem Kälteverbund mit mehreren örtlich voneinander getrennten Kälteerzeugern und Verbrauchern stellt einige Herausforderungen bei der Auslegung und Regelung. Die Komplexität der optimalen Betriebsführung eines Kälteverbunds wird durch die Unterschiedlichkeit der einzelnen Erzeugungsstellen einerseits und unterschiedliche Bedarfsanforderungen der Verbraucher andererseits verursacht und erfordert den Einsatz intelligenter Regelungsalgorithmen. Diese Regelungsalgorithmen basieren grundsätzlich auf Informationen über die aktuelle Nutzung, z. B. jahreszeitabhängige Belegung der Gebäude, Feiertage, die aktuelle Wetterlage und anderes mehr. Daraus wird ein wahrscheinliches Lastprofil für den konkreten Fall vorausgesagt. Für eine effiziente Kältebereitstellung im Verbund sind die Daten der Erzeuger, aber auch Leitungsgeometrien und die Möglichkeit der Nutzung von anderen Kälteerzeugungstechnologien wie z. B. der freien Kühlung zu berücksichtigen. Um dies zu untersuchen und Regelungsalgorithmen zu evaluieren, wurde ein Simulationsmodell entwickelt.

Diese Veröffentlichung zeigt den Entwicklungsprozess zur mathematischen Modellierung des Kälteverbundsystems in der Simulationsumgebung Modelica sowie die Methode zur Evaluation der Regelungsalgorithmen. Zur Veranschaulichung werden die Simulationsergebnisse eines Teils der im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „Eneff: HCBC 1. Umsetzungsphase HochschulCampus Berlin-Charlottenburg“ (BMWi-FKZ: 03ET1632A), geplanten Maßnahme Kälteverbund „Nord“ auf dem Campus der Technischen Universität Berlin gezeigt. Der betrachtete Teil des Verbunds umfasst drei Erzeugungsknoten und vier Verbraucherzapfstellen mit einer thermischen Belastung von ca. 1,5 MW Kälte bei 8 °C. 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.

Stichwörter:

Kälteverbund, Simulation, Auslegung, Regelungsalgorithmen

II.1.02

Wärmeübergang in Mikrokanal-Wärmeübertragern

Experimentelle Untersuchungen zum Potential additiv gefertigter Mikrokanal-Geometrien mit verschiedenen Kältemitteln

Kevin Einsle², Benedikt Bederna¹, Theresa Kramer^{1*}, Mario Raddatz², Riley B. Barta¹, Uwe Gampe², Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Proessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik

²Technische Universität Dresden, Professur für thermische Energiemaschinen und -Anlagen

kevin.einsle@tu-dresden.de
benedikt.bederna@tu-dresden.de
theresa.kramer@tu-dresden.de
mario.raddatz@tu-dresden.de
riley.barta@tu-dresden.de
uwe.gampe@tu-dresden.de
ullrich.hesse@tu-dresden.de

* Korrespondenzautor

Die Halbleiterkomponenten der Leistungselektronik werden immer kleiner und leistungsstärker und verlangen damit immer höhere Kühlleistungsdichten. Gegenwärtig arbeiten über 95% der industriell eingesetzten Anwendungen aus dem stationären wie auch mobilen Sektor mit Kühlkonzepten auf Basis einer konventionellen Luft- oder Flüssigkeitskühlung. Eine Kühlung über die Verdampfung von Kältemitteln in Wärmeübertragern direkt an den aktiven Elementen soll den Wärmeübergang verbessern und damit, durch Reduzierung der erforderlichen Fläche, das spezifische Gewicht der eingesetzten Wärmeübertrager senken. Herausforderungen hierbei sind unter anderem die zuverlässige Regelung in allen Betriebszuständen und eine sichere Integration in bestehende Systemarchitekturen. Dazu wird ein nicht toxisches und nicht brennbares HFO-Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotential untersucht. Es werden Benchmarktests zu Wärmestromdichten in additiv gefertigten Mikrokanal-Wärmeübertragern mit verschiedenen Kühlkanal-Geometrien für das HFO-Kältemittel und Luft vorgestellt. Dabei ist es durch den Einsatz additiver Fertigungstechnologien erstmalig möglich, die Restriktionen bei der konventionellen Fertigung der Kühlkanäle, wie sie beispielsweise bei Printed Circuit Heat Exchangers auftreten, zu umgehen und neue Kanalgeometrien experimentell zu untersuchen. Hierzu wurde eigens ein speziell für diesen Themenkomplex entwickelter Versuchsstand errichtet, welcher den Austausch der Mikrokanal-Geometrien, die Verwendung verschiedener Kühlmedien und damit eine Vergleichbarkeit der Geometrien und Fluide hinsichtlich Druckverlust- und Wärmeübergangskorrelationen gewährleistet. Damit wird ein Ansatz zur Entwicklung spezieller Wärmeübergangskorrelationen für Mikrokanal-Wärmeübertrager mit verschiedenen Geometrien verfolgt. Der Versuchsstand für verschiedene Wärmeübertrager-Geometrien wird wegen seiner hohen Modularität und Flexibilität zusammen mit den bisher schon abgeleiteten Erkenntnissen für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten eingesetzt.

Stichwörter: Mikrokanal-Wärmeübertrager, Wärmeübergangskorrelationen, additive Fertigung, SLM, Leistungselektronikkühlung, Leistungselektronik, Cold-Plate

Energetische Analyse eines Kältemittelkreislaufs mittels VDMA 24247-2 und exergetischer Bewertung mit einem Excel-Tool

Simon Schröder*, Michael Arnemann

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),
76133 Karlsruhe, Deutschland
simon.schroeder96@web.de
michael.arnemann@h-ka.de

Die Methodik zur exergetischen Bewertung von Anlagen ist bekannt. Mit VDMA 24247-2 „Energieeffizienz von Kälteanlagen: Anforderungen an das Anlagenkonzept und die Komponenten“ wird ein anderes anschauliches Verfahren ermöglicht. Die Ergebnisse sind vergleichbar.

Für die einfache Anwendung beider Methoden hilft eine Software. Es wird ein selbst entwickeltes Excel-Tool vorgestellt, mit dem es möglich ist, einen einfachen Kältemittelkreislauf zu berechnen und zu bewerten. Die Berechnung des Kreislaufes ist mit nahezu allen Kältemitteln möglich, auch mit vordefinierten Gemischen.

Die Daten des Kältemittelkreislaufs werden in einer Eingabemaske definiert. In der Eingabemaske kann zudem gewählt werden, ob die Exergieverluste in den einzelnen Komponenten und in der Gesamtanlage mit betrachtet werden sollen. Der einfache Kältemittelkreislauf kann zusätzlich mit einem internen Wärmeübertrager ausgestattet und die Berechnung mit diesem durchgeführt werden.

Die Berechnung erfolgt automatisch. Es werden die thermodynamischen Zustände (Druck, Temperatur, Enthalpie, Entropie) an den einzelnen Punkten des Kreislaufes berechnet und in einer Tabelle ausgegeben. Der Kreislauf wird ebenfalls automatisch für alle Kältemittel in einem $\log(p)$ - h -Diagramm dargestellt. Für einige ausgewählte Kältemittel sind auch T - s -Diagramme hinterlegt, in welchen der Kältemittelkreislauf dargestellt wird. Für die Berechnungen wird die Stoffdatenbank Refprop 10.0 mit dem dazugehörigen Excel-Add-In verwendet. Das Programm funktioniert auch mit mini-Refprop und eignet sich somit auch für den Einsatz in der Lehre. Neben diesem ist die Verwendung als Basis für die Auslegung von Kälteanlagen denkbar, da sich das Tool durch eine gute Anschaulichkeit und Übersichtlichkeit auszeichnet und als Excel-Tool keiner zeitaufwändigen Einarbeitung bedarf.

Die Ergebnisse und Erfahrungen mit diesem Excel-Tool sollen in dem DKV-Vortrag vorgestellt werden.

Stichwörter:

Energieeffizienz, VDMA 24247-2, Exergieanalyse, Excel-Tool

Prädiktives Screening neuartiger Kältemittelgemische mittels TREND und Validierung an einer Wärmepumpen-Geschirrspülmaschine

Katharina Stöckel*¹, Erik Mickoleit*², Larissa Schaan¹, Constantino Grau Turuelo², Ramona Nosbers¹, Andreas Jäger², Riley Barta¹, Christiane Thomas¹, Cornelia Breitkopf², Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik

²Technische Universität Dresden, Professur für Technische Thermodynamik

katharina.stoeckel@tu-dresden.de

erik.mickoleit@tu-dresden.de

larissa.schaan@tu-dresden.de

constantino.grau@tu-dresden.de

ramona.nosbers@tu-dresden.de

andreas.jaeger@tu-dresden.de

riley.barta@tu-dresden.de

christiane.thomas@tu-dresden.de

cornelia.breitkopf@tu-dresden.de

ullrich.hesse@tu-dresden.de

Die Reduzierung des Energieverbrauchs von Haushaltsgeräten wird seitens der Verbraucher und Hersteller immer stärker fokussiert. Neben der Optimierung der elektrischen Komponenten werden alternative Prozesse wie bspw. Wärmepumpensysteme für die Warmwassererzeugung oder Trocknung untersucht, was bei Anwendungen wie dem Wärmepumpen-Wäschetrockner deutlich wird. Das Einsparpotenzial weiterer Anwendungsgebiete wird im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes untersucht, wobei u. a. eine Haushalts-Geschirrspülmaschine mit Hilfe einer Wärmepumpe betrieben werden soll. Um das Potenzial voll auszuschöpfen, muss das einzusetzende Arbeitsfluid auf die benötigten Betriebsbedingungen angepasst werden.

Die Auswahl des Kältemittels erfolgt mittels prädiktiver Zustandsgleichungen für Gemische über die Software TREND. Für die Modellierung der Gemische wird eine Kombination des Multifluid-Gemischmodells mit dem auf quantenchemischen Rechnungen basierenden Modell COSMO-SAC verwendet. Die reinen Stoffe werden dabei mit Referenzgleichungen beschrieben. Das Screening erfolgt anhand eines für die Wärmepumpen-Geschirrspülmaschine angepassten Kältemittelkreislaufes und den von elektrischen Geschirrspülmaschinen definierten Randbedingungen für repräsentative Temperaturbereiche. Es erfolgt ein Vergleich der prädiktiven Fluidauswahl und Kreislaufberechnungen mit entsprechenden experimentellen Daten eines Demonstrationskreislaufs für Wärmepumpen-Geschirrspülmaschinen.

Stichwörter:

Prädiktive Screening Methoden, Kältemittelgemische, Wärmepumpen, Haushaltsgeräte

Dyn. Modellierung einer Kältemittel-Luft-Wärmepumpe

Vergleich experimenteller und simulativer Ergebnisse bzgl. der Kältemittel R290 und R436B

Janina Deichl^{1*}, Tommy Grunert², Jens-Uwe Repke¹

¹TU Berlin, Sekr. KWT 9, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

janina.deichl@tu-berlin.de

jens-uwe.repke@tu-berlin.de

²BSH Hausgeräte GmbH, Wohlrabedamm 15, 13629 Berlin

tommy.grunert@bshg.com

Mit der Einführung des neuen Energielabels im Jahr 2022 verschärfen sich die Anforderungen an einen energieeffizienten Betrieb von Haushaltsgeräten. In Bezug auf Haushaltswäschetrockner bedeutet dies zwingend eine Optimierung des Energieverbrauchs der Wärmepumpe, um weiterhin die Energieeffizienzklasse A einhalten zu können. In der Wärmepumpe beeinflussen die thermodynamischen Eigenschaften unterschiedlicher Kältemittel und -mischungen verschiedene Prozessparameter wie z. B. die Wärmeleistung der Wärmeübertrager und den Druckverlust über das Drosselorgan. Durch einen Wechsel des Kältemittels lassen sich die Fluideigenschaften gezielter an den Prozess anpassen und infolgedessen führen resultierende Energieeinsparungen zur Senkung der CO₂ Emissionen.

Nach jetzigem Stand der Technik^a erfolgt die Auswahl der unterschiedlichen Kältemittel/-mischungen i.d.R. auf den Ergebnissen einer idealen Kreisprozessberechnung. Bisherige experimentelle Untersuchungen zeigen jedoch, dass dieser Ansatz zu größeren Abweichungen führt. Eine höhere Komplexität eines Modells, zum Beispiel durch Einbindung der genauen Beschreibung der Wärmeübertrager- und eines Kapillarmodells, unterstützt bei hoch-dynamischen Prozessen den prädiktiven Charakter und liefert belastbarere Ergebnisse. Daher soll u. a. ein künftiges Kältemittelscreening bzw. der Vergleich verschiedener Kältemittel in einem dynamischen Kältemittel-Luft-Wärmepumpenmodell integriert werden.

Im Rahmen dieses Vortrags wird das entwickelte Kältemittel-Luft-Wärmepumpenmodell hinsichtlich des bereits vermessenen Kältemittel R290^b, der Kältemittelmischung R436B und der Implementierung eines möglichen Kältemittelscreenings vorgestellt und diskutiert. So werden die für z. B. das Fluid R290 parametrisierten Modelle der Komponenten des Wäschetrockners sowie auf Literaturdaten basierende Korrelationen hinsichtlich ihrer Plausibilität in Bezug auf die eigenen experimentellen und simulativen Ergebnissen untersucht. Der Fokus dieses Beitrags liegt zunächst speziell auf der Betrachtung des Kältemitteldruckverlusts in einer Kupferkapillare sowie dem Wärmeübertrager, als wichtige Elemente. Die Untersuchungen sollen Rückschlüsse auf weitere Verbesserungen des Kältemittel-Luft-Wärmepumpenmodells hinsichtlich des Einsatzes für das Kältemittelscreening ermöglichen.

Das langfristige Ziel der Arbeit ist die Weiterentwicklung des Kältemittel-Luft-Wärmepumpenmodell, um unterschiedliche Kältemittel und -mischungen bezüglich des Energieverbrauchs im Rahmen eines Reverse-Engineering-Ansatzes effizient und zielgenau bewerten zu können.

Stichwörter:

Dynamische Modellierung – Prozesssimulation - Wärmepumpe – Kältemittel

^a Roskosch, D., Venzik, V., Atakan, B.: Verfahren zur Bestimmung von Substitutionsfluiden für konkrete Kompressionskälteanlagen und Wärmepumpen Teil 2: Modellierungen höherer Komplexität, Kälte · Luft · Klimatechnik, 4.Ausgabe, 2018

^b Gabrisch, X. and Repke, J.-U.: [Modelling the two-phase flow of propane in a capillary tube: Determination of the two-phase viscosity based on detailed experiments](#), International Journal of Refrigeration, Elsevier BV, 427–442, 2020

II.1.06

Prozesse mit Anpassung der Gemischkonzentration

Jonay Brandel¹, Benedikt G. Bederna^{1*}, Riley B. Barta¹, Ullrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
benedikt.bederna@tu-dresden.de

Zeotrope Arbeitsfluide werden seit geraumer Zeit erfolgreich im Bereich der Wärmepumpen eingesetzt. Zunehmend stehen sie außerdem im Fokus der Forschung zum Organic Rankine Cycle (ORC). Dabei wird standartmäßig eine fest eingestellte Auslegungskonzentration in die Anlage eingefüllt, deren Wahl nach thermodynamischen, physikalischen oder wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgt. Denkbar ist aber auch, die Zusammensetzung des Gemisches während des Betriebs gezielt zu beeinflussen. Die Motivationen hierfür sind bei Wärmepumpen und ORC-Anlagen unterschiedlich. Konzepte zur Anpassung der Gemischkonzentration bei Wärmepumpen zielten vor allem auf eine Leistungsregelung ab, um dem gegensätzlichen Verlauf von Heizlast und Wärmepumpenleistung bei der Wärmequelle Außenluft zu begegnen.

Für den ORC-Prozess liegt die Zielstellung einer variablen Zusammensetzung darin, die Kondensationstemperatur an die schwankende Außentemperatur anzupassen und gleichzeitig den Kondensationsdruck über dem Umgebungsdruck zu halten. Mit einer solchen dynamischen Anlage können wesentliche Effizienzvorteile vor allem hinsichtlich des exergetischen Wirkungsgrades erreicht werden. Eine Änderung der Gemischkonzentration kann bei Wärmepumpen und ORC-Anlagen durch die Einbindung einer Rektifikationskolonne („aktives System“) oder eines Separators („passives System“) realisiert werden. Eine Schaltung mit Separator vermeidet zwar die Nachteile eines Systems mit Kolonne (u. a. Anlagenaufwand und Hilfsenergie), allerdings wird nur ein begrenzter dynamischer Arbeitsbereich erreicht. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die Ansätze der Zusammensetzungsbeeinflussung bei Wärmepumpen und die Forschungstätigkeit der letzten Jahre im Bereich der ORC-Anlagen. Weiterhin werden Untersuchungen zur passiven Schaltung und Kriterien für die Wahl geeigneter Arbeitsfluide bei dynamischen Systemen vorgestellt.

Stichwörter:

Zeotrope Gemische, Organic Rankine Cycle (ORC), Wärmepumpen, Aktive Zusammensetzungsanpassung

II.1.07

Anlage zur flexiblen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Einsatzpotentiale in ORC Prozessen

Benedikt G. Bederna^{1*}, Felix Micus¹, Oliver Ziegler¹, Riley B. Barta¹, Ullrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
benedikt.bederna@tu-dresden.de

Im Kontext der Debatte um Klimaneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts, stellt sich die Frage, welchen Beitrag Kälteanlagen zur Erreichung dieses Ziels erbringen müssen. Neben den bewährten Aktivitäten zur Effizienzsteigerung und Verbrauchsflexibilisierung ist auch die Erweiterung der Kälteanlagen zu einem Glied der Sektorenkopplung und bis hin zu einem Energieerzeuger denkbar. Hintergrund hierfür ist, dass sich im Zuge der Energiewende Zeiten des Elektroenergieüberschusses und des Elektroenergiemangels verstärkt gegenüberstehen werden.

Sollen Kälteanlagen als Energieerzeuger eingesetzt werden, müssen diese in der Lage sein, Rechtsprozesse wie den Organic Rankine Cycle (ORC) oder den Kalina-Prozess zu realisieren. Dies geht in der Regel einher mit dem Bedarf nach einer reversiblen Kompressions-Expansions-Maschine. Beispielhaft soll hierfür ein theoretisches Anlagenkonzept vorgestellt werden, bei dem eine Absorptionskälteanlage um eine Kompressor-Expander-

Einheit ergänzt wird und damit in der Lage ist, neben dem Betrieb als thermisch angetriebene Kälteanlage ebenso als Kompressionskältemaschine oder als Stromerzeuger mittels Kalina-Prozess zu arbeiten. In einem exemplarischen Anwendungsfall muss die Kältelast eines Kühlhauses gedeckt werden, wobei ein Blockheizkraftwerk (BHKW) als Wärmequelle dient. Unabhängig von der Abwärme des BHKWs kann mittels des Verdichters die Kältelast immer sicher gedeckt und zusätzliche Abwärme im Expander verstromt werden. Auf dieser Basis untersucht die vorliegende Arbeit u. a. eine Betriebsweise, bei der durch dieses BHKWs und die Kraft-Wärme-Kälte-Anlage Regelleistung zur Stabilisierung des Netzes bereitgestellt wird, während diese gleichzeitig die Primäraufgabe der Kältebereitstellung erfüllt.

Stichwörter:

Klimaneutralität, Sektorenkopplung, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Organic Rankine Cycle (ORC), Kalina-Prozess, Absorptionskälte

II.1.08

Analyse eines thermischen Energiespeichersystems für die industrielle Kälteversorgung

Aufbau eines Labordemonstrators für die experimentelle Validierung

Alexander Emde^{1,2*}, Bijan Seyed Sadjjadi^{1,2}, Alexander Sauer^{1,2}, Jannik Hoegg²

¹Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Industrielle Energiesystem,
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland
alexander.emde@ipa.fraunhofer.de

²Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart, Deutschland
bijan.seyed-sadjjadi@eep.uni-stuttgart.de

Im Zuge der Dekarbonisierung industrieller Produktionssysteme spielen neben der CO₂-armen Bereitstellung elektrischer Energie auch die klimafreundliche Bereitstellung von industrieller Wärme und Kälte eine wichtige Rolle. Mehr als 65 % des Energieverbrauchs der deutschen Industrie ist auf thermische Prozesse zurückzuführen (Umweltbundesamt – Energieverbrauch Deutschlands (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energetraegern-sektoren>)).

Nicht nur der Einsatz von erneuerbaren Energien und die energieeffiziente Ressourcennutzung dienen als Mittel der Energiewende. Durch Bereitstellung von Energieflexibilität kann auf die fluktuierende Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energien reagiert werden und das Netz entlastet werden. Kompressionskältemaschinen (KKM), welche mit elektrischer Energie versorgt werden, können in Kombination mit einem thermischen Kältespeicher auf die fluktuierende Erzeugung von erneuerbaren Energien angepasst werden, ohne die nachgeschalteten Verbraucher beeinflussen zu müssen. Durch die Einbindung eines thermischen Speichers kann zum einen ein energieeffizienterer Betrieb der KKM's erreicht werden, indem diese nach Möglichkeit zu jedem Zeitpunkt innerhalb des effizientesten Betriebsfenster gefahren werden können. Zum anderen bietet die Einbindung eines thermischen Energiespeichers eine Entkopplungsmöglichkeit zwischen Verbrauch und Erzeugung. Damit kann über die Kälteversorgung eine Energieflexibilisierungsmöglichkeit angeboten werden, wodurch Kosteneinsparungen, durch die Adressierung flexibilitätsbezogener Geschäftsmodelle, erreicht werden können.

Dieser Artikel zielt auf die Analyse und die Bewertung der Einbindung eines thermischen Energiespeichers in die Kälteversorgung innerhalb industrieller Produktionssysteme ab. Im Zuge dessen wird ein industrielles Kälteversorgungssystem in eine Anlage mit Labormaßstab überführt und so die Möglichkeit geschaffen, Betriebsstrategien eines thermischen Kältespeichers innerhalb des industriellen Kälteverbands zu untersuchen. Diese Betriebsstrategien streben einen wirtschaftlichen und ökologischen Betrieb des Kälteversorgungssystems an und werden im Vorfeld simulativ anhand eines digitalen Zwillinges bestimmt. Dieser Artikel beschreibt im ersten Schritt die identifizierten Betriebsstrategien. Als nächstes wird der Aufbau des Kälte demonstrators beschrieben und das erarbeitete Konzept erläutert. Anschließend werden die ersten Ergebnisse aus einem

Design-of-Experiment vorgestellt, welche Aussagen zu Skalierbarkeit, Übertragbarkeit der Ergebnisse, Rückschlüsse auf den realen Anwendungsfall und Betriebsstrategien des Kältespeichers in Kombination mit der Bereitstellung von Kälte zulassen. Der Labordemonstrator bietet so eine realitätsnahe Bewertungsgrundlage für die Einbindung thermischer Speicher in die Kälteversorgung eines Produktionsprozesses und leistet somit einen Beitrag zur Transformation der Energiesysteme hin zu mehr Klimaneutralität.

Stichwörter:

Thermische Energiespeicherung, Kompressionskältemaschine, Energieflexibilität, Demand-Side-Management, Betriebsstrategien, Regelungsstrategien, Energieversorgung, Kältesysteme, Kältespeicher

II.1.09

Experimentelle Untersuchungen zur Beladungsleistung in Eisspeichern in Abhängigkeit der Nukleationstemperatur und Eisbildung

Henriette Süß^{1*}, Faruk Al-Sibai¹, Reinhold Kneer¹

¹ RWTH Aachen, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, Augustinerbach 6, 52062 Aachen, Deutschland
suess@wsa.rwth-aachen.de

Eisspeicher sind Niedertemperaturspeicher, die Energie über die Erstarrungs- und Schmelzenergie im Phasenübergang von Wasser zu Eis speichern. Ein Kältefluid fließt durch Wärmeübertrager, die dem Speicherwasser thermische Energie entziehen. Wird die Nukleationstemperatur im Speicherwasser unterschritten, bildet sich Eis auf der Wärmeübertrageroberfläche. Nach einem Ansatz von Oechsle und Spindler [1, 2] kann die Beladungsleistung optimiert werden, indem die Oberfläche des Wärmeübertragers behandelt wird, sodass die Nukleationstemperatur abgesenkt wird und die Eisbildung auf dem Wärmeübertrager so verzögert werden kann.

Untersuchungen an einem Modelleisspeicher am Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen (WSA) zeigen, dass die Nukleationstemperatur durch den Einsatz von rauen Wärmeübertrageroberflächen reproduzierbar gesenkt werden kann und die Vereisung so verzögert werden kann. Die Beladungsleistung des Eisspeichers kann dadurch jedoch nicht gesteigert werden. In Vergleichsversuchen von einer direkten Eisbildung am Wärmeübertrager und einer verzögerten Eisbildung durch Absenken der Nukleationstemperatur, ist die Menge des gebildeten Eises deutlich größer, wenn die Eisbildung nicht verzögert wird. Die Menge an gebildetem Eis, sowie damit auch die Beladungsleistung des Eisspeichers sind bei einer direkten Eisbildung am Wärmeübertrager unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Wärmeübertragers.

Stichwörter:

Eisspeicher, Beladungsleistung, Nukleation, Vereisung

Literaturverzeichnis

- [1] Oechsle, U., Spindler, K., Eisspeicher – Stand der Technik und Ansatzpunkte zur Optimierung der Beladung sowie deren Modellierung, DKV-Tagung, Kassel, 2016
- [2] Oechsle, U., Untersuchung der Nukleation an Wärmeübertrageroberflächen in einem Eisspeicher, Dissertation, Universität Stuttgart, 2020

II.1.10

Holzpelletbetriebene Absorptionskälteanlage

Manuel Kausche^{1*}, Martin Helm¹, Manuel Riepl¹, Wolfgang Aich²

¹ ZAE Bayern e.V., Bereich *Energiespeicherung* – Arbeitsgruppe *Wärmetransformation*,
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching, Deutschland
Manuel.Kausche@ZAE-Bayern.de

² HDG Bavaria GmbH, Siemensstr. 22, 84323 Massing, Deutschland

ist ausgefallen.

II.1.11

Effizienzsteigerung einer NH₃/H₂O-Absorptionskältemaschine

**Experimentelle Untersuchung eines Anlagenkonzepts
mit Plattendesorber und asymmetrischem Plattendephlegmator**

Luisa Haak*, Nico Mirl, Klaus Spindler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
Luisa.Haak@igte.uni-stuttgart.de

Beim Absorptionskältemaschinen-Prozess wird die Antriebsenergie weitgehend in Form von Wärme zugeführt. Wird beispielsweise industrielle Abwärme oder Wärme aus regenerativen Energieträgern zum Antrieb verwendet, ist mit Absorptionskältemaschinen eine sehr klimaschonende Kälteerzeugung möglich.

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) werden aktuell experimentelle Untersuchungen zur Effizienzsteigerung von NH₃/H₂O-Absorptionssystemen durchgeführt. Entwickelt wurde ein Desorber-Konzept mit einem direkt von der reichen Lösung durchströmten Plattenwärmeübertrager. Zur Erhöhung des Ammoniakmassenanteils im Kältemittel wird ein Plattendephlegmator mit nachgeschaltetem Kondensatabscheider verwendet. Verglichen mit den verbreitet eingesetzten Desorbern in Behälterbauweise mit integrierter Rektifikationskolonne zeichnet sich das Desorber-Konzept mit Plattenwärmeübertrager durch eine sehr geringe Füllmenge sowie geringe Fertigungskosten aus. Ein Nachweis für die hohe Effizienz des Absorptionssystems mit Plattendesorber ist bereits für den Betrieb als Wärmepumpe im Rahmen des Projekts „Optimierung von Absorptionswärmepumpen zum Einsatz im Wärmenetz 4.0“ erbracht.

In diesem Beitrag wird das Konzept des direkt durchströmten Plattendesobers auf die Absorptionskältemaschine übertragen. Es werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen vorgestellt und mit der Absorptionskältemaschine aus der Dissertation von Zetsche [1] verglichen. Insbesondere wird der Einfluss des Ammoniakmassenanteils des Kältemittels sowie der Einfluss der internen Wärmerückgewinnung im Plattendephlegmator analysiert. Eine Herausforderung bei der Optimierung des Plattendephlegmators hinsichtlich eines höheren übertragenen Wärmestroms stellen die unterschiedlich großen Volumenströme der beiden Fluidströme, Kältemitteldampf und reiche Lösung, dar. Dies führt dazu, dass bei der Verwendung von symmetrischen Plattenwärmeübertragern die Kanäle der reichen Lösung mit geringer Strömungsgeschwindigkeit und zudem ungleichmäßig durchströmt werden.

Zur Lösung dieser Problemstellung wird ein asymmetrischer Plattenwärmeübertrager als Dephlegmator eingesetzt. Die unterschiedlichen Strömungsquerschnitte für den Kältemitteldampf und die reiche Lösung werden ausschließlich durch die Strömungsführung unter Verwendung von Platten mit herkömmlicher Plattenprägung realisiert. Durch Infrarotaufnahmen wird die Funktion des asymmetrischen Plattendephlegmators im Betrieb

der Absorptionskältemaschine überprüft. Die Effizienz der Absorptionskältemaschine wird anhand des Wärmeverhältnisses diskutiert.

Stichwörter:

Absorptionskältemaschine, Ammoniak/Wasser, Komponenteoptimierung, Dephlegmator

[1] Zetzsche, M., Experimentelle Untersuchungen und regelungstechnische Optimierung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine in Kombination mit einem solar angetriebenen Kühlsystem mit Eisspeicher, Dissertation, Universität Stuttgart, 2012

II.1.12

Leistungssteigerung einer Diffusions-Absorptionskältemaschine durch Erhöhung des Hilfgasvolumenstroms

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

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

Eine DAKM in einem größeren Kälteleistungsbereich hat bei einer Beheizung durch Abwärme, Fern- oder Nahwärme sowie solarer Wärme das Potenzial beispielsweise für die Gebäudekühlung klimafreundlich Kälte bereit zu stellen.

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Im Gegensatz zu beispielsweise Kompressionskältemaschinen wird das Kältemittel einer DAKM nicht durch Drosselung auf einen niedrigeren Absolutdruck verdampft, sondern durch Partialdruckabsenkung in eine Hilfgasatmosphäre verdunstet. Um kontinuierlich Kälteleistung zu erzeugen, muss das gasförmige Kältemittel in einem weiteren Prozessschritt wieder aus dem Hilfgas absorbiert werden. Der Transport des Hilfgas vom Verdunster zum Absorber im sogenannten Hilfgaskreislauf beruht auf dem Dichteunterschied zwischen dem mit Kältemittel angereichertem und dem an Kältemittel armen Hilfgas. Untersuchungen in der Literatur belegen die entscheidende Bedeutung einer Steigerung des Hilfgasumlaufs für eine Erhöhung der Kälteleistung der DAKM.

Im Vortrag werden experimentelle Untersuchungen an einem Prototyp einer DAKM vorgestellt. Der Hilfgasvolumenstrom wird kontinuierlich und eingriffsfrei mittels Clamp-On Ultraschallmessverfahren gemessen. Der Hilfgasvolumenstrom kann sowohl durch Steigerung der Antriebskräfte als auch Reduzierung der Druckverluste im Hilfgaskreislauf erhöht werden. Es werden Entwicklungsschritte des Prototyps zur Steigerung des Hilfgasvolumenstroms vorgestellt und evaluiert.

Stichwörter:

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Hilfgaskreislauf, Clamp-On Ultraschallmessung, Ammoniak-Wasser

II.1.13

Offener Absorptionsprozess zur Raumlufentfeuchtung einer Gasdruckregelanlage

Lisa Völker*, Daniel Fleig, Ulrike Jordan

¹ Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel, Deutschland

Offene Absorptionsanlagen zur Luftentfeuchtung stellen eine Alternative zu Adsorptionsrotoren und Kondensationsentfeuchtern dar. Die im Forschungsvorhaben untersuchte offene Absorptionsanlage besteht aus zwei Wärme- und Stoffübertragern – dem Absorber und dem Regenerator –, einem Sorbensspeicher und einem internen Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung im Sorbenskreis. In den Wärme- und Stoffübertragern wird Luft direkt in Kontakt mit dem Sorbens gebracht. Die Raum-Zuluft wird in einem Rohrbündelabsorber, der intern gekühlt werden kann, entfeuchtet. Dabei wird der Wasserdampf vom Sorbens absorbiert. Die Kühlung des Absorptionsprozesses erfolgt durch einen offenen Verdunstungskühlturm. Anschließend wird das verdünnte Sorbens unter Zufuhr von Wärme im Regenerator wieder aufkonzentriert. Die Wärmebereitstellung für die Regeneration erfolgt mit einer Solarthermieanlage und mit Gas-Absorptionswärmepumpen.

Die offene Absorptionsanlage befindet sich seit Sommer 2020 im Feldtest, wo sie zur Luftentfeuchtung in der Gasdruckregelanlage (GDRA) Neu-Eichenberg eingesetzt wird. In der GDRA wird Erdgas von ca. 70 bar (Ferntransportnetz) auf ca. 16 bar (Versorgungsnetz) entspannt. Um eine Mindestaustrittstemperatur des Erdgases nach dem Entspannungsprozess nicht zu unterschreiten, wird es vor der Entspannung erwärmt. Die zulässige Mindestaustrittstemperatur hängt von der jeweiligen Strategie des Netzbetreibers ab. In der untersuchten GDRA ist eine Taupunktregelung implementiert, die für eine hinreichende Erdgas-Vorerwärmung sorgt, um nach dem Entspannungsprozess Kondensation an den Rohroberflächen zu vermeiden. Durch die sich daraus ergebenden sommerlichen Gasaustrittstemperaturen bis zu 20 °C ist ein hoher Vorwärmbedarf erforderlich. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Vorwärmbedarf des Erdgases durch Absenkung der Raumluftfeuchte zu reduzieren.

Die eingesetzte offene Absorptionsanlage entfeuchtet die Zuluft zur GDRA kontinuierlich mit einer Luftwechselrate von 1/h. Die Entfeuchtungsleistungen und die Effektivität der Wärme- und Stoffübertrager wurden untersucht. Zudem wurden Energieeinsparungen aufgrund der verminderten Erdgasvorerwärmung unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs für die Regeneration sowie der Stromverbräuche für Pumpen und Ventilatoren der Absorptionsanlage evaluiert. Erste Messdaten aus dem Jahr 2020, in dem die Absorptionsanlage ohne Kühlturm betrieben wurde, zeigen, dass eine durchschnittliche Entfeuchtungsbreite von 5 g/kg im Sommer erzielt werden kann. Die Effektivität im Absorber lag durchschnittlich bei 0,7.

Stichwörter:

Offene Absorptionsanlage, Luftentfeuchtung

II.1.14

Optimale Volumenstromregelung für einstufige H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlagen

Jan Albers^{1*}, Walther Hüls Guido¹, Carsten Hausherr¹, Stefan Petersen¹

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT-2, Marchstraße 18, 10587 Berlin, Germany
jan.albers@tu-berlin.de

Die wesentlichen Zielstellungen für die Regelung von Absorptionskälteanlagen bestehen darin, eine geforderte Kälteleistung auf einem geforderten Temperaturniveau im Kaltwasser bereitzustellen. Darüber hinaus kommt der Auskühlung des Heißwassers bzw. der Einhaltung einer bestimmten Austrittstemperatur aus dem Desorber eine hohe Bedeutung zu. Die Einhaltung dieser dritten Zielstellung ist insbesondere für die erreichbare Energieeffizienz in Verbindung mit KWK-Anlagen und bei der Nutzung von regenerativen Wärmequellen wichtig.

Neben der Antriebswärme wird zum Betrieb von Absorptionskälteanlagen auch Elektroenergie benötigt (z.B. für die Versorgungspumpen im Heiß-, Kühl und Kaltwasser sowie zum Betrieb des Rückkühlwerks). In einem Feldtest von Absorptionskälteanlagen für KWKK-Systeme (FAkS, FKZ 03ET1171A-D) hat sich gezeigt, dass ab einem Primärenergiefaktor der Wärme von ca. 0,4 kWh_{PE}/kWh_{EE} Absorptionskältesysteme, bei dem aktuell gültigen PE Faktor für Strom vorteilhaft gegenüber Kompressionskältesystemen werden. Da ca. 50 % der Fernwärmesysteme in Deutschland einen niedrigeren PE-Faktor haben, ist das Einsatzpotential groß und entscheidend von dem Elektroenergiebedarf abhängig. Im Beitrag wird daher eine modellbasierte Regelstrategie beschrieben, mit der es durch die gleichzeitige Regelung von Heiß-, Kühl- und Kaltwasservolumenstrom gelingt, den spezifischen Strombedarf – d. h. den gesamten Strombedarf der Kälteerzeugungsanlage in

Bezug zur geforderte Kälteleistung – auf ein Minimum zu begrenzen. Die möglichen Einsparungen an Elektroenergie durch die Strategie mit optimalen Volumenströmen gegenüber der Ausgangssituation mit konstanten Volumenströmen liegen i.d.R. zwischen 20 und 40 %. Die Höhe der Einsparungen ist abhängig von der Höhe der konstanten (Auslegungs-)Volumenströme sowie vom Lastverlauf und der Umgebungstemperatur.

Zur Herleitung der Strategie wird die Methode der charakteristischen Gleichungen für Absorptionskälteanlagen zusammen mit Näherungen für die Volumenstromabhängigkeit der ansonsten als konstant angenommenen Steigungs- und Verlustparameter in der charakteristischen Gleichung verwendet.

Die Umsetzung der Strategie konnte im Rahmen des Forschungsprojektes ReKs (Regelung energieaufwands-optimierter Kälteerzeugungssystem, FKZ 03ET1583) seit Herbst 2020 auf mehreren Industrie-Controllern von Absorptionskälteanlagen erfolgreich realisiert werden. Für den Beitrag ist daher neben der theoretischen Herleitung der Strategie auch eine Auswertung von Messwerten aus dem Sommer 2021 vorgesehen.

Stichwörter:

Energieeffizienz, charakteristische Gleichung, modellbasierte Regelung, Industrie Controller, Regelgüte

II.1.15

Vermessung einer Adsorptions-Gaswärmepumpe

Experimentelle Ergebnisse und simulative Bewertung des Einsatzes für die Beheizung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

Andreas Velte*¹, Simon Leisner¹, Gerrit Földner¹

¹ Fraunhofer ISE, Wärmepumpen- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 12, 79102 Freiburg, Deutschland

andreas.velte@ise.fraunhofer.de

Gasbetriebene Sorptionswärmepumpen können eine effiziente Alternative zu einem herkömmlichen Gas-Brennwertgerät für die Beheizung von Gebäuden darstellen.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Vermessung eines Funktionsmusters einer Adsorptions-Gaswärmepumpe mit einer Nennleistung von ca. 40kW dargestellt, die im Projekt AdoSan-LXB in Zusammenarbeit von Fraunhofer mit mehreren Partnern entwickelt wurde. Die neuentwickelte Geräteregelelung erlaubt eine Vermessung in Anlehnung an EN12309 (Gasbefeuerte Sorptions-Geräte für Heizung und/oder Kühlung mit einer Nennwärmebelastung nicht über 70 kW) im Hybridbetrieb zwischen reinem Gasbrennwertbetrieb und Einbindung der Sorptionsmodule. Abhängig von den Temperaturen des Heizkreis und der Niedertemperatur-Wärmequelle konnte im reinen Sorptionsmodulbetrieb bereits eine Reduktion des Gasverbrauchs zwischen 15 % und 30 % gemessen werden.

Ausgehend von den Messdaten wird anhand von Systemsimulationen dargestellt, inwieweit sich der Gasverbrauch durch den Einsatz eines solches Geräts im Vergleich zum Gas-Brennwertgerät reduzieren lässt. Dabei werden die beiden Niedertemperatur-Wärmequellen Erdsonde und Abluft für ein Referenzgebäude miteinander verglichen.

Stichwörter:

Gaswärmepumpe, Adsorption, EN12309, Gas-Brennwertgerät

II.1.16

Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagen

Dymola-Modell einer H₂O/LiBr-Absorptionskälteanlage zur detaillierten Analyse des dynamischen Anlagenverhaltens und Entwicklung von Betriebsstrategien

**Michael Wernhart^{1*}, René Rieberer¹,
Sandra Zlabinger^{2,3}, Viktor Unterberger^{2,3}, Markus Göllles^{2,3}**

¹ Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
michael.wernhart@tugraz.at

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

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

Absorptionskälteanlagen können einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von CO₂-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 wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Heat Pumping Systems Control (HPC)“ zwei Absorptionskälteanlagen (AKA) – eine mit der Stoffpaarung Ammoniak/Wasser (NH₃/H₂O) und eine mit der Stoffpaarung Wasser/Lithiumbromid (H₂O/LiBr) – untersucht, um für unterschiedliche Anwendungen Regel- und Betriebsstrategien (z. B. zur Effizienzerhöhung im Teillastbetrieb des Verdampfers) entwickeln zu können. Zur detaillierten Analyse der Zustandsänderungen in den AKAs wurden dynamische Simulationsmodelle in der Modellierungssprache Modelica entwickelt und mit Messdaten validiert.

Im Rahmen dieses Konferenzbeitrags soll das dynamische Simulationsmodell der H₂O/LiBr-AKA verwendet werden, um das dynamische Verhalten der einzelnen Komponenten (z. B. Generator und Verdampfer) bei Betriebspunktänderungen, die bei realem Betrieb (z. B. bei solarthermischer Kühlung) auftreten können, näher zu analysieren. Darauf aufbauend sollen unter anderem mögliche Betriebsstrategien für die Erzielung eines effizienteren Anlagenbetriebs oder höherer Verdampferleistungen untersucht werden (z. B. die Auswirkungen einer höheren Generatoreintrittstemperatur auf die Massenströme und LiBr-Massenanteile sowie die erforderliche Rückkühlleistung).

Stichwörter:

Komponentenmodelle, Modelica, Wasser/Lithiumbromid

II.1.17

Analyse des Reifwachstums und der Abtauung in gekühlten Kanälen

**Liam M. F. Cammiade^{1*}, Jonas Klingebiel², Hacer Karakus¹, Kenneth Gadow¹, Valerius Venzik², Dirk Müller²,
Faruk Al-Sibai¹, Reinhold Kneer¹**

¹ RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung,
Augustinerbach 6, 52056 Aachen, Deutschland
cammiade@wsa.rwth-aachen.de

² RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de

Reif wächst auf Oberflächen unterhalb des Taupunktes der umgebenden Luft und unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser. Im Falle eines Lamellenwärmeübertragers (typischer Einsatz in luftbasierten Kälte- und Wärmepumpensysteme) wirkt der Reif wie eine thermische Isolierschicht und erhöht den Strömungswiderstand. Die Folge ist eine starke Abnahme der thermischen Leistung des Wärmeübertragers, sodass die Gesamtanlageneffizienz negativ beeinträchtigt wird. Für den Erhalt einer vorgegeben thermischen Leistung ist daher das regelmäßige Abtauen der Reifschicht unabdingbar.

In dieser Studie wird ein kombiniertes Modell des Wärme- und Stofftransports in einer Kanalströmung während der Reifbildung und dem anschließenden Abtauen vorgestellt. Die Modellierung der Reifbildung auf einer gekühlten Wand, die sich in einem Luftstrom befindet, erfordert in den Simulationen eine Diskretisierung

sowohl des Luftstroms als auch der Reifschicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die thermische Leistung von Wärmeübertragern entscheidend vom luftseitigen Wärmeübergang abhängt und weniger stark vom Wärmeübergangswiderstand beeinflusst wird. Die Modellierung des Abtauens erfordert eine genaue Erfassung der Wärmeleitung des bereiften Substrates in axialer Richtung und der Wärmeübertragung innerhalb der Reifschicht selbst, während die Modellierung der umgebenden Luft eine untergeordnete Rolle einnimmt. Aufgrund vieler unbekannter Parameter, wie z. B. der dichteabhängigen Wärmeleitfähigkeit in der Reifschicht, wird das Modell durch experimentelle Daten kalibriert und validiert.

Abschließend wird ein Konzept für ein vereinfachtes Berechnungswerkzeug vorgestellt, welches beide zuvor beschriebenen Modelle kombiniert. Das Ziel ist die Erfassung des energetischen Optimums in Abhängigkeit der gewählten Randbedingungen, wie etwa der im Mittel zur Verfügung stehenden Luftkühlleistung oder den der Einlasslufteigenschaften (Temperatur, Feuchte, und Geschwindigkeit).

Stichwörter:

Reifbildung, Abtauung, Feuchte Luft, Modellbildung, Simulation

II.1.18

Untersuchung von Mikrowärmeübertragern im Kältekreis

Dipl.-Ing. Markus Müller^{1*}, Sophie Worofka¹, Dr.-Ing. Karl Steinjan¹

¹Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Hauptbereich Kälte- und Wärmepumpentechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland

markus.mueller@ilkdresden.de

Wärmeübertrager mit sehr feinen Strukturen bieten mehr innere Oberfläche pro Volumen und können somit höhere Leistungen im gleichen Bauraum übertragen. Bei geschickter Wahl der Geometrien können auch höhere Wärmedurchgangs-koeffizienten erreicht werden. Andererseits sind Aspekte wie Druckverluste und Verschmutzung zu berücksichtigen. Schlüssel für solche Wärmeübertrager sind entsprechende Fertigungsverfahren, die zuverlässig kleine Strukturen im Mikrometerbereich ermöglichen. Der 3D-Druck von Metallen und insbesondere von Partnern entwickelte modifizierte 3D-Druckverfahren bieten hier Potentiale.

Im Rahmen geförderter Forschungsprojekte wurden Mikrowärmeübertrager mit verschiedenen Verfahren und Geometrien gefertigt und untersucht. Die Wärmeübertrager wurden auf verschiedenen Prüfständen mit Wasser und Kältemittel untersucht. Im Rahmen der Nachrechnung der experimentell bestimmten Wärmeübertragung, wurden verschiedene Theorien für das Verhalten des Wärmeübergangs und der Druckverluste untersucht.

Stichwörter:

Mikrowärmeübertrager, Verdampfer, Verflüssiger, Wärmeübergang, 3D-Druck

II.1.19

Experimentelle Untersuchung eines CO₂-Sublimationskreislaufs im Dauerbetrieb

Yixia Xu*, Riley B. Barta, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
01062 Dresden, Deutschland
yixia.xu@tu-dresden.de
riley.barta@tu-dresden.de
ullrich.hesse@tu-dresden.de

Für die Kälteerzeugung unterhalb von -50°C werden häufig konventionelle Kältemittel mit sehr hohem GWP-Wert wie z. B. R-23 (GWP₁₀₀ = 12690) oder brennbare Kältemittel wie z. B. R-170 eingesetzt. Auf der Suche nach nichtbrennbaren Ersatzkältemitteln scheint das natürliche Kältemittel Kohlendioxid (CO₂) eine Möglichkeit zu sein. Forschungsarbeiten der letzten Jahre haben gezeigt, dass ein Kaldampfprozess mit CO₂ auch bis unterhalb seines Tripelpunkts (ca. -56°C und 5,2 bar), also in den Sublimationsbereich, betrieben kann. Jedoch basieren fast alle bisherigen Ergebnisse solcher CO₂-Sublimationskreisläufe nur auf relativ kurzen Betriebszeiten von einigen Minuten bis wenigen Stunden.

In dieser Studie wurden Dauerbetriebsversuche einer Kaskadenanlage durchgeführt, die mit einem CO₂-Sublimationskreislauf in der unteren Stufe ausgestattet ist. Während des Versuchs wurden zwar Schwankungen im Massenstrom und im Sublimationsdruck aufgrund von Verblockungen durch festes CO₂ beobachtet, diese führten jedoch nicht zur Unterbrechung der Versuche. Die Gründe für die Schwankungen und weitere Optimierungsansätze werden ausführlich diskutiert. Die Kälteleistung und die Effizienz der Anlage über die gesamte Versuchsperiode werden dargestellt und mit bisher publizierten Daten bei kurzzeitigem Betrieb verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der CO₂-Sublimationskreislauf auch für einen Dauerbetrieb geeignet erscheint.

Stichwörter:

CO₂, Sublimation, Kaskade, Dauerbetrieb

II.1.20

Effizienzorientierte Erzeugerfolgeschaltungen in Kälteversorgungssystemen

Stefan Petersen*, Walther Hüls Guido, Carsten Hausherr, Jan Albers

¹TU 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

Die Kältetechnik ist verantwortlich für den größten Energieverbrauchszuwachs im Gebäudesektor. Sind mindestens zwei Kälteerzeugungsanlagen (KEA) der gleichen, oder auch unterschiedlicher Technologien installiert, so kann man von einem Kälteerzeugungssystem (KVS) sprechen. Typische Kälteerzeugungsanlagen (KEA) basieren z. B. auf elektrisch betriebene Kompressionskälteanlagen (KEA_{el}) oder thermisch angetriebenen Sorptionskälteanlagen (KEA_{th}) und beinhalten alle betriebsnotwendigen Nebenaggregate wie z. B. Versorgungspumpen, RKW, etc. Letztere können bei Umgebungstemperaturen $t_{Umgebung}$ unterhalb der geforderten Kaltsoltemperatur t_0^{set} zur sogenannten „Freien Kühlung“ (KEA_{FK}) eingesetzt werden.

Die Um-, bzw. Zu- und Abschaltung von einzelnen KEA eines KVS ist vom Betreiber hinsichtlich geeigneter Kriterien zu veranlassen. Häufig kommen übergeordnete, automatisierte Leitsysteme (ÜLT) zum Einsatz. Folgeschaltungen bauen dabei häufig nach dem Stand der Technik auf folgenden, starren Kriterien auf:

- (Grund- / Spitzen-) Last, Anlagengröße / Leistungsbereich,
- Abweichung Soll / Ist der Kaltwasservorlauftemperatur zum Nutzer ($t_{0N} - t_0^{set}$),
- KEA_{FK} werden unter Berücksichtigung einer Temperaturdifferenz ($t_0^{set} - t_{Um,g}$) freigegeben.

Alle diese Kriterien verfolgen wirtschaftliche oder effizienzorientierte Zielstellungen. Die resultierenden Folgeschaltungen, werden diesen Zielen jedoch häufig nicht gerecht. Signifikante Einflussfaktoren auf die Effizienz bleiben unberücksichtigt oder werden zu grob pauschalisiert. Dabei erlaubt der Begriff der Effizienz sowohl eine Bewertung nach diskreten Energiearten (elektrisch, thermisch), eine Kennzahl für jeglichen Energiebedarf (primärenergetisch, CO₂ – Emission, etc.) als auch eine monetäre Bewertung, sofern die jeweiligen Kennzahlen (spez. Kosten, Primärenergiefaktoren, CO₂ Faktoren, etc.) bekannt sind.

Basierend auf den Betriebskennfeldern sowie physikalischen und empirischen Anlagenmodellen arbeitet ein, an der TU Berlin entwickelter Systemregler, um die Effizienz des Systems durch intelligente Folgeschaltungen in jeder Betriebssituation im Bestpunkt zu halten. Das Konzept von Grund- und Spitzenlasterzeugern wird abgelöst und durch eine Auswahl der bei den jeweiligen Bedingungen effizientesten Erzeuger, ersetzt. Exemplarisch ist in Abbildung 1 die Verschiebung des sinnvollen Umschaltpunkts zwischen einer KEA_{th} und einer KEA_{FK}, abhängig von $t_{Um,g}$, dargestellt (Kreuzungspunkt gleichfarbiger Linien), der sich sowohl hinsichtlich der Temperatur- als auch der geforderten Leistung ändert. Auch die Leistungsfähigkeit einer Kälteerzeugungsanlage ist abhängig von der Umgebungstemperatur. Einerseits bedingt durch das Betriebskennfeld, andererseits z. B. auch aufgrund thermisch ausgereizter Wärmeübertrager wie hier im Beispiel der KEA_{FK}, deren Leistungsfähigkeit von knapp 70 kW bei 3°C Umgebungstemperatur auf ca. 35 kW bei 7°C zurückgeht.

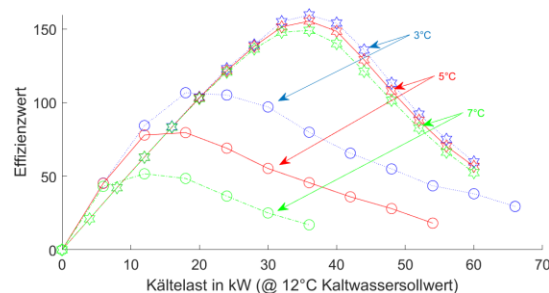


Abbildung 1: Effizienz- und Leistungsvergleich KEA_{FK} (Kreise) und KEA_{th} (Sterne)

Analysen der Einflussfaktoren auf verschiedenen KEA-Arten, die Funktionsweise des Systemreglers (SR), konzeptionelle Ergebnisse von KES mit bis zu neun KEA werden genauso wie Beispiele aus der praktischen Anwendung mit drei bis vier KEA präsentiert.

Stichwörter:

Kältezentralen, Energieeffizienz, Regelung, Wirtschaftlichkeit, Monitoring, Entwicklung

II.1.21

Ein neues effizientes Verfahren zur Eisbrei-Erzeugung

Sebastian Gund^{*1}, Oliver Schmid¹, Michael Kauffeld¹

¹Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umweltechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

sebastian.gund@h-ka.de

oliver.schmid@h-ka.de

michael.kauffeld@h-ka.de

Mit dem Fortschreiten der Energiewende wird der Bedarf an kostengünstigen, effizienten und zuverlässigen Energiespeichern immer größer. Müssen große Mengen thermischer Energie gespeichert werden können Phasenwechselmedien(PCM) eine platzsparende Möglichkeit sein. Ein relativ kostengünstiges und nicht-toxisches PCM mit herausragenden thermischen Eigenschaften ist Eis – in Form von Eisbrei sogar pumpfähig. Die gängigste Methode Eisbrei herzustellen ist, Eis von einer gekühlten Oberfläche abzukratzen. Dabei ent-

stehen hohe Verluste. In der Vergangenheit sind viele weitere Verfahren zur Eisbrei-Erzeugung entwickelt worden, die sich großtechnisch nicht durchsetzen konnten. In dieser Arbeit wird ein neues energieeffizientes und wartungsarmes Verfahren zur Eisbrei-Erzeugung vorgestellt und hinsichtlich seiner thermischen Eigenschaften untersucht.

Stichworte:

Thermische Energiespeicherung, Eisbrei, Eisbrei-Erzeugung

II.1.22

Eisbrei-Erzeugung aus unterkühlten Fluiden

Sebastian Gund^{*1}, Oliver Schmid¹, Michael Kauffeld¹

¹Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

sebastian.gund@h-ka.de

oliver.schmid@h-ka.de

michael.kauffeld@h-ka.de

Mit der Unterkühlungsmethode könnte in Zukunft sehr energieeffizient Eisbrei hergestellt werden. Dabei wird eine Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt abgekühlt und anschließend gezielt zur Kristallisation angeregt. Für die großtechnische Anwendbarkeit dieser Methode müssen aber Faktoren, wie z. B. die Instabilität der Unterkühlung und die geringe erreichbare Unterkühlung verbessert werden. Dieser beiden Faktoren werden hauptsächlich von der Grenzfläche zwischen dem unterkühlten Fluid und der Substratoberfläche bestimmt. Nicht-metallische sowie amorphe Substratoberflächen zeigen sehr gute Eigenschaften und es können, richtig eingesetzt, sowohl die Stabilität als auch die Unterkühlbarkeit verbessert werden. In dieser Untersuchung werden verschiedene Konfigurationen von Substratoberflächen und Fluiden auf ihre Stabilität und Unterkühlbarkeit untersucht und dabei auch die Strömungsgeschwindigkeit des fließenden Fluides mitberücksichtigt. Durch die Untersuchung kann eine Voraussage darüber getroffen werden, wie sich Eisbrei-Erzeuger, in annähernd realen Systemen unter bestimmten Parameterkonfigurationen, verhalten.

Stichwörter:

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

II.1.23

MCHX: Vermessung und Simulation bei Vereisung

Simon Braungardt^{*1}, Thilo Hartleif¹, Hannes Fugmann¹

¹ Fraunhofer ISE, Wärmepumpen- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 12, 79102 Freiburg, Deutschland

simon.braungardt@ise.fraunhofer.de

Gelötete Aluminium Microchannel-Wärmeübertrager sind eine Alternative zu Rundrohr-Lamelle Wärmeübertragern, die durch günstigeren Preis, geringeren Materialeinsatz, geringere Kältemittelfüllmenge und bessere Recyclingfähigkeit Vorteile verspricht. Im Einsatz als Verdampfer für Wärmepumpen stehen diesen Vorteilen zwei Probleme gegenüber: Größere Fehlverteilung des Kältemittels auf die Stränge und schlechteres Vereisungs- und Kondensatablaufverhalten.

In diesem Beitrag werden Ergebnisse der Vermessung von zwei Microchannel-Verdampfern für stationäre Wärmepumpen vorgestellt. Die Verdampfer wurden am Fraunhofer ISE auf einem Teststand für Kältekreis Komponenten mit dem Kältemittel R290 vermessen. Auf der Luftseite konnte über eine Luftstrecke die Temperatur und Feuchte, sowie der Volumenstrom variiert werden. Über schnell schließende Ventile und anschließende Absaugung des Kältemittels konnte die im Betrieb im Verdampfer befindliche Kältemittelmenge in verschie-

denen Betriebspunkten ermittelt werden. Die beiden vermessenen Wärmeübertrager unterscheiden sich in ihrem Lamellenabstand und sind ansonsten baugleich.

Ausgehend von den Messdaten wird anhand einer Simulation dargestellt, welchen Effekt das unterschiedliche Vereisungsverhalten der Verdampfer auf die Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe hätte. Dafür wird in einem Modell der Effekt des Eises auf den Wärmeübergang am Verdampfer abgebildet. Dadurch ergibt sich im Vereisten Zustand ein verringerter COP. Weiterhin wird die für die Abtauung benötigte Energiemenge modelliert. Mit diesem Modell wird für ein beispielhaftes Gebäude mit Wetterdaten eines Testreferenzjahres die Jahresarbeitszahl für verschiedene Szenarien ermittelt.

Stichwörter:

Wärmepumpe, R290, Microchannel, Vereisung, Abtauung

II.2.01

Schraubenverdichter für industrielle R718 Wärmepumpen

Thomas W. Mösch^{1*}, Konrad Klotsche¹, Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden,
BITZER-Prof. für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
thomas.moesch@tu-dresden.de

Der Wärmebedarf deutscher Industrieprozesse wird derzeit überwiegend durch fossile Brennstoffe gedeckt. Gerade im Temperaturbereich bis 200 °C ist in vielen Prozessen die Nutzung von Abwärme mittels Wärmepumpen sinnvoll. Aufgrund der guten thermodynamischen und ökologischen Eigenschaften und der guten Integrierbarkeit in bereits vorhandene Dampfnetzwerke diverser Industrieprozesse wird Wasser als Kältemittel (R718) für zukünftige industrielle Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) vorgeschlagen.

Die im Rahmen dieser Veröffentlichung untersuchten Schraubenverdichter stellen hierbei einen guten Kompromiss dar, hohe Volumenströme und hohe Druckverhältnisse in einer Stufe zu gewährleisten, wie sie für den Einsatz von R718 in HTWP benötigt werden. In der Untersuchung wird insbesondere auf die Unterschiede möglicher Rotorprofile und Rotorgestaltungen eingegangen. Der Vergleich verschiedener Rotorkonzepte wird mithilfe der kommerziellen Software SCORG™ für die Randbedingungen ausgewählter Industrieprozesse durchgeführt.

Stichwörter:

Hochtemperaturwärmepumpen, R718, Schraubenprofiloptimierung, SCORG™

II.2.02

Zentrifugal-Verdichter für eine Wärmepumpe zur Anwendung in Satelliten

Patrik Fröhlich*, Christof Zwysig

Celeroton AG, Industriestrasse 22, 8604 Volketswil, Schweiz
*patrik.froehlich@celeroton.com

Die Nutzlast von Hochleistungs-Telekommunikationssatelliten nimmt ständig zu. Parallel dazu führt die Entwicklung von Satelliten mit sehr hohem Durchsatz zu höheren Wärmeverlusten. Um die Fähigkeit zur Wärmeabfuhr von Radiatorpaneelen zu erweitern, muss die Radiatortemperatur erhöht werden ohne die Temperatur der internen Komponenten zu erhöhen. In einer übernächsten Generation von Satelliten soll hierfür ein Wärmepumpensystem eingesetzt werden. Damit kann im Vergleich zu anderen Temperaturkontrollsystemen mehr Wärme mit der gleichen Abstrahl-Oberfläche abgeführt werden. Als Herzstück der Wärmepumpe kommt aufgrund der Anforderungen an Gewicht, Grösse, Lebensdauer, Vibrationsemissionen und Ölfreiheit ein Radial-Turboverdichter (auch Zentrifugal-Verdichter) zum Einsatz. Für Weltraumanwendungen ist Ammoniak das bewährte Kältemittel, was aber für einen Zentrifugal-Verdichter aufgrund der hohen absoluten Drücke und anderer Gasparameter eine grosse Herausforderung ist. Dieser Artikel gibt einen Einblick in die Herausforderungen in der Anwendung von Wärmepumpen im Allgemeinen und Zentrifugal-Verdichtern im Speziellen in Weltraumanwendungen und mit speziellen Kältemitteln wie Ammoniak.

II.2.03

Herausforderungen bei Rückgewinnung der Expansionsarbeit in Wärmepumpen und Kälteanlagen

Riley B. Barta^{*1,2}, Christian Doerffel¹, Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹,
Davide Ziviani², und Eckhard A. Groll²

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

²Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University

riley.barta@tu-dresden.de

christian.doerffel@tu-dresden.de

christiane.thomas@tu-dresden.de

ullrich.hesse@tu-dresden.de

dziviani@purdue.edu

groll@purdue.edu

* Korrespondenzautor

Aufgrund der gestiegenen Fokussierung auf Umweltschutz und Energieeffizienz bei Wärmepumpenanwendungen und Kälteanlagen werden zunehmend auch Verlustquellen untersucht, die bisher wenig beachtet wurden. Ein Beispiel davon stellen Verluste in thermostatischen Expansionsventilen oder Kapillarrohren dar. Im theoretischen Vergleichsprozess werden die Zustandsänderung als Isenthalpe angenommen und die Abweichungen von der Realität werden meist vernachlässigt. Die zwei üblichsten Lösungen für die Rückgewinnung von Expansionsarbeit sind Ejektoren und Expansionsmaschinen, deren Einsatz in den letzten 10 Jahren durch verschiedene Hersteller forciert wurde. Im Rahmen dieser Veröffentlichung, werden die Herausforderungen bei den Anwendungen von Ejektoren und Expansionsmaschinen in einer Wärmepumpe und einer Kälteanlage diskutiert. Die unterschiedlichen Aspekte hinsichtlich der Auslegung, Produktion und Systemregelung werden anhand eines Turbo-Expanders betrachtet, welcher in einer R-410A Split-Gerät-Haushaltswärmepumpe eingesetzt wurde sowie einer Kolben-Expansions-Kompressionsmaschine für das Kältemittel CO₂. Weiterhin wird die Anwendung von Ejektoren in CO₂-Kälteanlagen anhand von zwei konkreten Anlagen mit unterschiedlicher Verschaltung diskutiert. Die im Rahmen entsprechender Versuchsreihen gesammelten Erfahrungen werden beschrieben und derzeitige Wissenslücken im Bereich der Forschung und Entwicklung werden identifiziert.

II.2.04

Halbhermetische NH₃-Schraubenverdichter für Einzel- und Verbundsysteme

P. Ziegler

SRM Germany GmbH, Hasenäcker 12, 88142 Wasserburg

Peter.ziegler@srm-germany.de

II.2.05

Stability Against Orientation Changes of a Vapor Compression Cycle in Two Configurations

*Leon P. M. Brendel¹, Stephen L. Caskey², James E. Braun¹, Eckhard A. Groll¹

¹Purdue University, School of Mechanical Engineering, Ray W. Herrick Laboratories
177 S. Russell Street, West Lafayette, IN, USA
[*brendel@purdue.edu](mailto:brendel@purdue.edu)

²Air Squared Inc., 510 Burbank St., Broomfield, CO, USA

Vapor compression cycles are rarely used in microgravity environments. Although the energy savings would be appreciable, the uncertainty of the cycle behavior in microgravity is too large relative to more established cooling technologies. One approach to increase confidence is testing the cycle at different orientations on the ground by changing the gravity vector direction experienced by the cycle. A previous study found a liquid-to-liquid vapor compression cycle could operate continuously through 360 degrees. Increased stability of the cooling capacity was found during higher mass fluxes. The instability was quantified by the deviation of a measurement due to inclination changes from its steady-state value. The study was continued with the same test rig but instead of tube-in-tube heat exchangers with a liquid for heat exchange, fin-tube heat exchangers were used with air as the heat exchange medium. The smaller diameter of the fin-and-tube evaporator lead to higher mass fluxes which further increased the stability of the cycle compared to the previous study. At similar mass fluxes, the different heat exchangers resulted in comparable instabilities. The main stability indicator was the evaporator cooling capacity but the mass flow rate or suction pressure showed similar trends. The orientation changes on the ground were compared to parabolic flight data also collected with the same test rig. The gravity changes during the parabolic flights changed the measurements less than the inclination changes for most samples.

Keywords:

Vapor compression cycle, orientation, inclination, gravity, stability

II.2.06

Neue Generation von Verdampfern für CO₂ und A2L Kältemittel

S. Filippini, U. Merlo

LU-VE Group, Via Caduti della Liberazione 53, Uboldo, 21040, Italien
stefano.filippini@luvegroup.com; umberto.merlo@luvegroup.com

Ab dem 1. Januar 2021 hat das durch die europäische Verordnung 517 von 2014 eingeführte Phase-Down-Programm für fluorierte Treibhausgase seine dritte Stufe erreicht. Ab diesem Jahr ist die Menge an Tonnen CO₂-Äquivalent, die in Form von fluorierten Gasen in den Markt der Europäischen Union importiert werden darf, auf 45 % des Durchschnittswerts des Dreijahreszeitraums 2009-2012 (Bezugswert) begrenzt.

Kältemittel mit hohem GWP („Global Warming Potential“) erodieren einen höheren Anteil der verfügbaren Quote als Kältemittel mit niedrigerem GWP, wodurch die absolute Menge an HFC / HFO (kg), die in Verkehr gebracht werden darf, effektiv begrenzt wird.

Der Klima- und Kältemarkt ist von dieser Begrenzung stark betroffen. In letzter Zeit beobachten wir den erzwungenen Übergang von weit verbreiteten Kältemitteln zu Mischungen von HFKW's und HFO's mit niedrigerem GWP.

Aufgrund der Natur von Mischungen haben diese Kältemittel einen Temperaturgleit, der in einigen Fällen sehr groß sein kann. Es ist wichtig, das Verhalten eines Kältemittels mit dieser Eigenschaft zu verstehen, um das System richtig zu dimensionieren und einzurichten

Diese Kältemittel fallen unter die Sicherheitskategorie ASHRAE A2L (leicht entflammbar) und ihre Verwendung erfordert besondere Aufmerksamkeit.

Die LU-VE Gruppe bietet eine ganze Reihe von gewerblichen Verdampfern an, die speziell für den sicheren Betrieb mit Kältemitteln der A2L-Klassifizierung ausgelegt sind, deren Verbreitung in den kommenden Jahren vermutlich von Bedeutung sein wird.

Einen alternativen Ansatz im Kampf gegen fluorierte Gase bietet die Natur. Die Verwendung von natürlichen Kältemitteln ermöglicht es, die von den europäischen Vorschriften auferlegten Beschränkungen zu umgehen. In diesem Szenario wird CO₂ als effiziente und nachhaltige Alternative in vielen kommerziellen und sogar industriellen Anwendungen vorgeschlagen.

In der Tat erleben wir die Entwicklung von CO₂-Systemen nicht mehr nur in der Gewerbekälte, einer seit langem etablierten Praxis, sondern auch in der Industriekälte. Um diesen speziellen Markttrend zu adressieren, hat LU-VE eine innovative Reihe von Industriekühlern entwickelt, die so konzipiert sind, dass sie optimal mit CO₂ arbeiten und die Wärmeübertragungsleistung weiter verbessern.

Die LU-VE Gruppe ist seit über 15 Jahren führend in der Verwendung von CO₂ als Kältemittel und bietet viele Lösungen für Anwendungen im Mittel- und Niedertemperaturbereich. Darüber hinaus sind ab diesem Jahr Kapazität, Luftstrom und Leistungsaufnahme aller CO₂-Verdampferfamilien von LU-VE, EUROVENT-zertifiziert.

Stichwörter:

Verdampfer, CO₂, A2L Kältemitteln, Wärmetauscher

II.2.07

Reduzierung der Kältemittelfüllmenge in R717-Kälteanlagen

Eric Gerstenberger

thermofin GmbH; Entwicklung/Versuchsstände; Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund
eric.gerstenberger@thermofin.de

Im Zusammenhang mit der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 werden natürliche Kältemittel mehr und mehr (bzw. wieder) interessanter. Das Kältemittel R717 wird dabei seit mehr als einem Jahrhundert im großindustriellen Bereich eingesetzt. Vermehrt finden sich Anlagen mit überfluteter Betriebsweise von Verdampfern, aber auch Anlagen mit Trockenexpansion werden mehr und mehr eingesetzt. Dabei stehen maximale Effizienz der Anlage sowie Reduzierung der Kältemittelfüllmenge im Vordergrund.

Auf einen luftbeaufschlagten Wärmeübertrager hat die Reduzierung des Ammoniak-Massenstroms einen großen Einfluss auf die konstruktive Bauweise. Am Versuchsstand der thermofin GmbH wurden Untersuchungen von Verdampfern mit Trockenexpansion sowie überfluteter Verdampfung durchgeführt. Zudem wurden Füllmengenbestimmungen unternommen, welche die vorhandene Menge an R717 im Verdampfer während des Betriebs angeben.

Weiterhin werden Vergleiche zwischen überfluteten Verdampfern und Trockenexpansions-Verdampfern dargestellt. Hierbei wird auf den Einsatz und Machbarkeit in der Praxis eingegangen, da die Verdampfer auch bei schwankenden Lasten (Türöffnung Kühlraum, Vereisung Lamellen, schwankende Kühllast usw.) zuverlässig arbeiten müssen.

Stichwörter:

R717; Low Charge; Füllmenge

II.2.08

Bestimmung der Füllmenge von Wärmeübertragern

Dr.-Ing. Karl Steinjan¹, Dipl.-Ing. Konstantin Bratanitsch¹

¹Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH,
Hauptbereich Kälte- und Wärmepumpentechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
Karl.Steinjan@ilkdresden.de

In der Kältetechnik werden aktuell vermehrt natürliche aber teils brennbare Kältemittel eingesetzt. Für diese Kältemittel ist eine möglichst exakte Bestimmung der für den Betrieb notwendigen Füllmenge wichtig. Denn von der Füllmenge der Anlage hängen die nach der DIN EN 378 empfohlenen Sicherheitsmaßnahmen bzw. Aufstellbedingungen ab.

Verdampfer und Verflüssiger stellen bei der Berechnung der Füllmenge eine besondere Herausforderung dar, da das Kältemittel sowohl flüssig als auch gasförmig vorliegt. Das genaue Verhältnis zwischen den beiden Phasen hängt von verschiedenen Faktoren ab und lässt sich bisher nicht zuverlässig voraus berechnen.

Zur Verbesserung der Datenlage sollte im Rahmen eines Forschungsprojektes die Füllmenge verschiedener Wärmeübertrager-Bauformen untersucht und bestimmt werden. Der erste Schritt dazu war die Entwicklung einer zuverlässigen Messmethode. Diese Entwicklung und ihre Fehlschläge, sowie auch einige Ergebnisse der Messungen werden vorgestellt.

Stichwörter:

Wärmeübertrager, Füllmenge, Messmethode, Verdampfer, Verflüssiger

II.2.09

Natürliche Kältemittel – R-744 im ganzjährigen subkritischen Betrieb mit Verdunstungsverflüssiger

Michael Rabenstein

Evapco Europe GmbH, Insterburger Straße 18, 40670 Meerbusch
mrabenstein@evapco.de

Der Einsatzbereich von CO₂ als natürliches Kältemittel hat sich in den Jahren deutlich erweitert. Das Komponentenangebot (Ventile, Verdichter, ...) ist ebenfalls gewachsen. Durch die Kombination von Gaskühlern mit der adiabaten Vorkühlung ist ein ganzjähriger subkritischer Betrieb nichts wirklich Neues. Daraus resultieren mögliche Vereinfachungen im Anlagenaufbau und ein optimierter Energiebedarf (besonders im Sommer). Altbekannte Herausforderungen, zum Beispiel mit NH₃/CO₂ Kaskaden (evtl. Bildung von Hirschhornsalz), könnten durch **2-Stufige CO₂ Anlagen** gelöst werden.

Durch den Einsatz der z. B. für NH₃ bewährten Verdunstungskühlung wird auch für CO₂ die Leistung pro m² Grundfläche deutlich erhöht!

Stichwörter:

Ganzjährig subkritischer Betrieb, CO₂-Verdunstungsverflüssiger, Energieeffizienz, Hybrid-Verdunstungsverflüssiger

II.2.10

Experimentelle Untersuchung eines Kohlendioxidgemischs zur Erzeugung von Temperaturen unter -50 °C

Melanie Cop^{1*}, Riley B. Barta¹, Ullrich Hesse¹,

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
Münchner Platz 3, 01069 Dresden, Deutschland

melanie.cop@tu-dresden.de

riley.barta@tu-dresden.de

ullrich.hesse@tu-dresden.de

In der Umweltsimulation werden technische Bauteile zur Überprüfung von Qualität und Beständigkeit künstlich erzeugten Umgebungsbedingungen in Klimaprüfkammern ausgesetzt. Die Anwendung zeichnet sich durch besondere Anforderungen an Temperaturkonstanz und Abkühlgeschwindigkeit der Luft im Prüfraum aus. Zur Bereitstellung besonders tiefer Temperaturen bis etwa -80 °C stellen Kaskadenkälteanlagen mit dem Hoch-GWP-Kältemittel R23 in der kalten Stufe den etablierten Standard dar. Vor dem Hintergrund der gesetzlich vorgesehenen Treibhausgasreduktion resultieren aus dem GWP₁₀₀ von 14 800 wirtschaftliche wie politische Hemmnisse. Somit ist langfristig ein Ersatz von R23 unerlässlich.

Aktuelle Marktentwicklungen bieten bereits nicht brennbare zeotrope Ersatzkältemittel auf Kohlenstoffdioxidbasis und nur etwa 10 % des Treibhauspotentials von R23. Bisher mangelt es jedoch noch an Anlagentests und der Untersuchung des Anlagenverhaltens.

In einem aktuellen Forschungsvorhaben fand der Retrofit einer Umweltsimulationskammer mit einem Prüfraumvolumen von 280 l für ein neuartiges Kältemittelgemisch mit kleinem Temperaturgleit statt. Der Beitrag stellt die Modifikationen der Anlage, die Ergebnisse der Inbetriebnahme und erste Funktionstests vor. Initiale energetische Untersuchungen der Kammer im Vergleich zu einer R-23-Anlage sind geplant.

Stichwörter:

Tieftemperaturkältemittel, Umweltsimulationskammer, Kältemittelgemisch

II.2.11

Low GWP HFO Kältemittel in der Gewerbe-Kälte – Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit durch Wärmerückgewinnung

Hans-Dieter Küpper^{1*}, Arnd Lagies²

^{1,2}Chemours Deutschland GmbH, Dornhofstraße 34, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland

hans-dieter.kupper@chemours.com

arnd.lagies@chemours.com

In der Gewerkekälte wurden während der letzten Dekaden verschiedene neue Technologien entwickelt, hauptsächlich getrieben durch Umweltschutz-Forderungen wie sie zum Beispiel in der F-Gase Verordnung formuliert sind. Alternativen basierend auf CO₂ (R-744) als Kältemittel (sub- und transkritische Systeme) oder basierend auf Propan (R-290) als Kältemittel (steckerfertige oder Waterloop Systeme) wurden in den letzten Jahren entwickelt. Aber immer noch laufen viele Anwendungen auf FKW (HFC) basierenden Kältemittel wie R-404A, R-449A, R-513A etc. und somit auf einem hohen GWP Niveau. In diesem Kontext werden Technologien wie Wärmerückgewinnung zur weiteren Optimierung des Energieverbrauchs von Supermärkten immer häufiger angewendet.

Diese Präsentation zeigt eine kosten- und energieeffiziente Alternative, basierend auf Low GWP HFO Kältemitteln, die mit hoher Energieeffizienz und sehr niedrigem GWP eine nachhaltige ökonomische Lösung liefert. Durch die Nutzung von Wärmerückgewinnung können Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zusätzlich gesteigert werden.

gert werden. Es werden verschiedene Technologien und etliche Kombinationen detailliert untersucht im Hinblick auf ökonomische und ökologische Aspekte während des gesamten Lebenszyklus.

Stichwörter:

Energieeffizienz, Lebenszykluskosten, CO₂ Reduktion, A2L, HFO, Kältemittel, Wärmerückgewinnung

II.2.12

R-1234ze(E) als Kältemittel für Kühlhäuser

Stefan Schuessler

Honeywell Deutschland GmbH
stefan.schuessler@honeywell.com

In einer richtungsweisenden Studie wurden in Frankreich die Effizienz von zwei Chillersystemen in einem Kühlhaus miteinander verglichen. Zum Einsatz kamen die Kältemittel Ammoniak (NH₃) und das niedrig GWP Kältemittel R-1234ze(E). Der Vortrag erläutert die nachgewiesene Steigerung der Effizienz von R-1234ze(E) gegenüber Ammoniak in dieser Anwendung.

Das Projekt wurde vom französischen Unternehmen Quercy Refrigeration für die Obstgenossenschaft Aiguillon (COFRA) im Südwesten Frankreichs in Auftrag gegeben. In einem direkten Vergleich übertraf R-1234ze(E) laut der Analyse des Energy Efficiency Ratio (EER) NH₃ in Kältemaschinen um 25 %. COFRA gab die Studie mit dem Ziel in Auftrag, ihren jährlichen Stromverbrauch von durchschnittlich 300 T€/Jahr zu senken.

Es wird aufgezeigt, wie die relevanten langfristigen regulatorischen Anforderungen auf europäischer und nationaler Ebene erfüllt werden können und sowohl die Energie- als auch die Wartungskosten (OPEX) gesenkt werden können.

Stichwörter:

Chiller, R-1234ze, Ammoniak

II.2.13

Kältemittelgemische auf Basis von CO₂ – Neue Testergebnisse

Dr. Robert E. Low¹, Dr. Karsten Schwennesen²

¹Koura, Runcorn, GB
bob.low@kouraglobal.com

²Koura, 60437 Frankfurt am Main
karsten.schwennesen@kouraglobal.com

Kältemittelgemische aus Kohlendioxid (R-744) und fluorierten Komponenten nutzen die guten Eigenschaften von CO₂ als Kältemittel, ermöglichen aber gegenüber R-744 sowohl weitere Einsatzgrenzen als auch höhere Effizienzen und damit niedrigere Energieverbräuche. Dies ist insbesondere mit Hinblick auf den Einsatz im thermischen Management von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen attraktiv.

Über die grundlegenden Entwicklungen und ermutigende erste Ergebnisse wurde bereits auf der DKV-Tagung 2020 berichtet.

Die praktische Erprobung sowohl in der Tieftemperaturkühlung als auch in mobilen Klimaanlage/Wärmepumpen schreitet voran und die guten Ergebnisse bestätigen die Erwartungen.

Im Vortrag werden neuesten Testergebnisse mit diesen Kältemitteln in stationären Anlagen und in PKW-Klimaanlagen bzw. Wärmepumpen vorgestellt.

II.2.14

PATHWAYS TO NET ZERO:

THE GOAL OF DECARBONIZATION BY 2050 AND THE RELATED ISSUES FOR RACHP

L.J.M. Kuijpers ^a

A/genT Environmental Consultancy, Mgr. Boermansstraat 15, 5911BA Venlo (NL)

T: 0031 6 535 01145 Email: lambert.kuijpers@kpnmail.nl

^a (senior advisor to the UNEP TEAP RTOC; this paper has been written in a personal capacity)

The COP-15 in Paris (2015) agreed to hold the increase in global temperature to well below 2°C above pre-industrial levels – while pursuing efforts to limit the increase to 1.5°C (all by 2100). This would be done via voluntary national efforts (Nationally Determined Contributions (NDCs)), to decrease the amount of global warming emissions by decarbonizing all relevant sectors. The sequence is described from the COP-15, via the IPCC Special Report on “Global Warming of 1.5°C” (defining the science-based target for the global temperature increase) to the development of decarbonization scenarios by many countries during the period 2018-2021 for carbon neutrality. A brief assessment is given of the currently renowned *pathways* to net-zero carbon-based emissions by 2050, which describe various ways in addressing climate change. This includes the profound task for society to implement an enormous number of coordinated actions on a global scale as soon as possible. As a background, an elaboration is presented on what a net-zero target meant in the 19th century vis a vis now, when human impacts on nature become more and more dominant in an increasingly complex society, where a sustainable restoration of the environment in a broader context needs urgent attention. It then explores technology issues, particularly energy streams that are currently ‘Business as Usual’ and the *pathways* that would be needed to change from the BAU streams now to a total decarbonization by 2050. Next, major issues are focused on that would need urgent attention in the RACHP sector, including energy efficiency, managing refrigeration demand lowering, as well as good practices. An extensive assessment is made of four important, literature-based approaches how to best address the net-zero challenge. As a result, a preliminary priority list is made for possible (strategic) actions to be considered. Further analysis how to comply with a 2050 net-zero target for RACHP in the total of future decarbonization activities is presented, with a number of important conclusions for ways forward as of immediately.

Keywords:

Circular economy, energy flows, energy efficiency, low-GWP refrigerants, nature balance, net-zero, pathways to net-zero, RACHP, refrigeration demand, regenerative practices, sustainability.

II.2.15

Untersuchungen zum Effekt der Polymerisation von HFO-Kältemitteln

Alexander Türke*, Michael Goldberg

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

alexander.tuerke@ilkdesden.de

In den letzten Jahren wurden in Autowerkstätten im Zusammenhang mit dem vermehrten Einsatz des HFO-Kältemittels R1234yf vereinzelt helle Ablagerungen insbesondere in Klimaservicegeräten gefunden. Diese konnten als Polymerisat des R1234yf identifiziert werden. Als Quelle des Polymerisats wurden R1234yf-Neuwareflaschen vermutet. [1]

Nachdem in einem ersten Laborversuch eine starke Polymerisationsreaktion des R1234yf bei einer Auslagerung für eine Woche bei 100 °C in einem nicht-evakuierten Druckgefäß nachgewiesen werden konnte, erfolgten detaillierte Untersuchungen zum Einfluss der Parameter Temperatur und Einwirkdauer, Inertgasgehalt (Luft),

Feuchte und Öl auf die Entstehung von Polymerisat. Zusätzlich wurde die Polymerisationsfähigkeit weiterer HFO-Kältemittel (z. B. R1234ze) und die von HFO-Gemischen untersucht.

Neben der Umsatzrate (Masse Polymerisat bezogen auf die Kältemittelmenge) wurde auch die Menge des entstehenden Abbauproduktes Fluorwasserstoff (HF) bestimmt. Im untersuchten Parameterbereich konnten Umsatzraten von bis zu 10 % und HF-Gehalte von bis zu einigen 100 ppm beobachtet werden.

Literatur

[1] <https://www.autoservicepraxis.de/nachrichten/kfz-werkstatt/dann-hat-es-zoom-gemacht-2644648>

Stichwörter:

HFO Kältemittel, R1234yf, Fluorwasserstoff, HF

II.2.16

Screening for new future-proof refrigerants for high-temperature heat pumps

Alexander Cohr Pachai^{a,*}, Cordin Arpagaus^b, Armin Hafner^c

^aJohnson Controls Denmark ApS
alexander.c.pachai@jci.com

^bEastern Switzerland University of Applied Sciences, Institute for Energy Systems

^cNorwegian University of Science and Technology (NTNU)

Screening for new refrigerants for high-temperature heat pumps may appear a trivial task; however, there are many more topics in the search than meets the eye. In the standard EN 14825:2018, heat pumps with outlet temperatures above 65°C are considered high-temperature heat pumps. In this work, however, 'high temperature' will be defined as above 100°C, partly because industrial heat pumps can already deliver between 80°C and 90°C as standard. Demonstration projects have shown good results with heat pumps working at temperatures up to 180°C. In this work, working fluids up to 250°C have been screened as this is envisioned by the EU commission to be the working range for heat pumps. Other sources claim that temperatures up to about 400°C are possible, and this will be dealt with as well.

When performing a screening, it must be considered which temperature lift to use to compare different working fluids. The global focus on efficiency is a very important parameter, and this is of course included in the process - but which working fluids should be included? In this work, various papers have been researched to include the most looked into working fluids. Calculations have also been made on other fluids, which are not so frequently discussed, with very high critical temperatures. Other parameters are size and weight of the equipment, which are reflected in the price. The required swept volumes have been compared, and several other parameters have been evaluated.

Concerns arise when looking into the internal environment of the heat pump: can O-rings withstand the high temperatures, how will the lubricants react to temperatures above 180°C-200°C and is it possible to reach temperatures of 250°C or will new solutions be required for this as well? One refrigerant - water - stands out in connection with heat pumps for extremely high temperatures. Water has a critical point of 374°C (373.99°C) at 217.7 bar(a).

II.2.17

Clevere EC-Ventilatoren gepaart mit einer intelligenten IoT-Lösung für mehr Effizienz und Übersicht im Kühlturm

Ralf Braun

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Bachmühle 2, 74673 Mulfingen
Ralf.Braun@de.ebmpapst.com

In Kühltürmen gehören die eingesetzten Ventilatoren zu den zentralen und damit wichtigsten Komponenten. Sie sind maßgeblich dafür verantwortlich, die bei der Kühlung eines Prozesses oder einer Anlage entstehende Wärme effizient an die Umgebungsluft abzuführen, sowie ein angenehmes Klima in Produktionshallen und Rechenzentren oder großen Gebäudekomplexen wie Hotelanlagen und Supermärkten zu gewährleisten.

Nicht nur die Effizienz spielt hierbei eine immer größere Rolle, sondern auch eine vorausschauende Wartung, um Stillstandszeiten zu minimieren, automatisierte Überwachung und Dosierung von Verbrauchsmaterialien und eine automatisierte Überwachung des pH-Werts. Ebenso haben die Betreiber von Kühltürmen eine Dokumentationspflicht, die viel Mühe und Zeit in Anspruch nimmt.

Dieser Vortrag gibt einen aktuellen Überblick über EC-Ventilatoren für Kühltürme und zeigt auf, wie die wichtigsten Prozesse im Kühlturm und die Dokumentationspflicht mit einer intelligenten IoT-Lösung automatisiert werden können.

II.2.18

MEMS Sensoren für die Überwachung von Kältemittelverdichtern

Franz Joseph Pal^{1*}, Robin Langebach¹,
Miroslav Andjelkovic¹, Tobias Pflieginger¹, Ulf Ahrend¹, Ullrich Hesse², Christian Ellwein³

¹ Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik
franz_joseph.pal@h-ka.de

² Technische Universität Dresden, BITZER-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
Institut für Energietechnik

³ Friedrich Kriwan-Stiftung der Firma KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH,
Allmand 11, D - 74670 Forchtenberg

Die Detektion von Fehlern an rotierenden Maschinen wie zum Beispiel Pumpen, Ventilatoren oder Turbinen etabliert sich zu einem festen Bestandteil der Zustandsüberwachung (engl. *Condition Monitoring*) und ist bald längst nicht mehr nur als Trend, sondern als werdender Standard zu beobachten. Hierbei sind neben genauen Fachkenntnissen zum Maschinenverhalten auch die Wahl der zu untersuchenden Prozessparameter und die dafür notwendigen Sensoren zur Feststellung eines Fehlerzustandes relevant. Für Kältekreisläufe bieten verschiedene Hersteller bereits Lösungen zur Überwachung an. Dabei werden kältetechnische Kenngrößen im Kreislauf gemessen und in elektronischen Messsystemen zusammengeführt und verarbeitet. Für Kältemittelverdichter existieren ebenfalls erste Überwachungsmodule, die im Wesentlichen elektrische Kenngrößen mit Drücken und Temperaturen in der Maschine und im Kältekreislauf verarbeiten. Die Aussagekraft dieser gemessenen Größen ist jedoch begrenzt. Sie kann unter anderem durch Schwingungsmesstechnik erheblich erweitert werden. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wurde ein alternativer Ansatz für die perspektivische Detektion von Fehlerzuständen an Kältemittelverdichtern untersucht. Hierfür wurden zunächst Low-Cost MEMS Beschleunigungssensoren hinsichtlich ihrer Eignung für die Zustandsüberwachung mittels Schwingungsanalyse evaluiert, Anforderungen an ein digitales Messsystem erarbeitet sowie ein Ausblick über die adressierbaren

Fehler aufgezeigt. Hauptaugenmerk lag dabei auch auf der Auswertung des Zeitsignals und den dazugehörigen Frequenzspektren für eine mögliche Fehlerklassifizierung.

Stichwörter:

Verdichter, Schwingungen, *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), Beschleunigungssensoren, Zustandsüberwachung, Predictive Maintenance

II.2.19

Mehrwegeventile für Wärmepumpenanwendungen

Volker v. Rad, Peter Bohnenstengel, Jean-Jacques Robin, Eike Willers*

Otto Egelhof GmbH & Co. KG, Stuttgarter Strasse 60, 70736 Fellbach

e.willers@egelhof.com

Wärmepumpen und Kälteanlagen kommen aus Gründen der Energieeffizienz sowohl im stationären Bereich als auch bei mobilen Geräten stark zur Anwendung. Um in Plug-in Hybrid- sowie Batteriefahrzeugen die elektrische Reichweite zu optimieren, wird das winterliche Wärmedefizit, das im Verbrennungsmotor aufgrund des Wirkungsgrades durch die Motorabwärme gedeckt wird, über die Klimaanlage, die auch eine Wärmepumpenfunktion beinhaltet, abgedeckt.

Um die Vielzahl der verschiedenen Schaltungen von mobilen Wärmepumpensystemen mit vertretbarem Aufwand abdecken zu können, müssen die Ventile modular aufgebaut sein. Hierbei kann beispielsweise auf der Hochdruckseite ein neuartiges 3/2 Wegeventil verwendet werden, das das Kältemittel von der Hochdruckseite des Kompressors je nach Betriebsmodus zu den jeweiligen Wärmetauschern umleitet. Durch die motorische Verstellung ist der kumulierte Stromverbrauch extrem gering. Die interne Leckage ist wegen der Verwendung von hydraulisch dichten Keramikscheiben als Ventilkörper extrem gut, unabhängig von den anliegenden Druckdifferenzen, dies trägt zu einer optimierten Thermodynamik und einem besseren COP bei.

Natürlich können die jeweiligen Ventile auch für den gewerblichen Bereich verwendet werden, mit den gleichen Vorteilen im Betrieb.

Mit dem Baukastensystem können viele verschiedene Charakteristika dargestellt werden, ohne die Grundstruktur zu ändern. Dies wird durch Modifikation der Ventilkörper erreicht, beispielsweise durch variable Nuten für die Darstellung eines Expansionsorgans und eine große Durchlassöffnung für die alternative Durchströmung mit einem Niederdruckgasstrom im Falle der Umschaltung im Wärmepumpenbetrieb. Die Ventiltypen können für die meisten chemischen und natürlichen Kältemittel verwendet werden. Auch Ventilblöcke mit mehreren integrierten Ventilen wurden entwickelt.

Die durchlaufenen Validierungen und verschiedenen Charakteristika der möglichen Keramikscheiben werden vorgestellt, Fortschritte in der energetischen Optimierung durch gute Druckverluste und auch sehr geringe Antriebsenergien können entsprechend hergeleitet werden.

II.2.20

Ammoniak-Gasabsorptionsanlagen der Olympia-Bobbahn in Peking

Thomas Winzer*

Projekt-Management, Johnson Controls Process Systems, G. Daimler Str. 8; 68165 Mannheim

Thomas.Winzer@jci.com

Johnson Controls hat für das Bobbahn Projekt für die Olympischen Winterspiele in Peking (China) im Jahr 2022 neben anlagentechnischen Ausrüstungen auch Planungs- und Inbetriebnahme-Leistungen geliefert.

Bei diesem Ammoniak-Kälteanlagenprojekt werden Gasabsorptionsanlagen benötigt, um im Havariefall mit Freisetzung von Ammoniak die Umgebung der Sportstätten zu schützen.

Mit Hilfe einer Ausbreitungsberechnung wurde zur Sicherung der Umgebung eine Reduktion der Freisetzungskonzentration von 15.000 ppm auf ca. 750 ppm erforderlich.

Hierfür wurden von Johnson Controls in Kooperation mit Fa. Mietzsch GmbH Lufttechnik Dresden Ammoniak - Gasabsorptionsanlagen konzipiert und ihre Funktionsweise in einem Versuchsaufbau nachgewiesen.

Im Vortrag werden neben der Vorstellung des Bobbahn-Projektes die Anforderungen an die Ammoniak - Gasabsorptionsanlagen erläutert. Neben deren Funktionsweise und der Ermittlung wichtiger Kenngrößen wird der Versuchsaufbau und die gemessenen Versuchsergebnisse für die Gasabsorption bei Auswahl bestimmter Sprühdüsen beschrieben.

II.2.21

Breakdown products of HFOs/HCFOs in the atmosphere

Dimitrios Papanastasiou

Honeywell / EFCTC

II.2.22

Effects of TFA on the Environment

Janet Bormann

Murdoch University, Australia (Co-Chair of the UNEP Environmental Effect Assessment Panel)

II.2.23

Impacts of TFA from Mobile Air-conditioning in China, India and the Middle East

Prof. Ravishankara

University of Colorado

III.01

Sicherheit und Energieeffizienz bei der NH₃-Kälteanlage – Paulaner Brauerei München

Olaf Pollex

Johnson Controls, Industriekälte IREF, Merkurring 33-35, 22143 Hamburg/Deutschland
Olaf.Pollex@jci.com

Vorstellung NH₃-Großkälteprojekt mit den zugehörigen sicherheitstechnischen Anforderungen sowie Maßnahmen und Strategien zur Energieeinsparung. Reduzierung des NH₃ Ausstoßes über die Maschinenraum Notbelüftung unter Verwendung eines Absorptions-Wäschers.

Praxisbeispiel zum Betrieb eines Alkoholwasserkreislaufes zur Kühlung von Lagertanks und dem Brauwassersystem zur Versorgung des Brauprozesses.

Stichwörter:

NH₃-Großkälteprojekt, sicherheitstechnische Anforderungen, Alkoholwassersystem, Abgaswäscher, Brauwassersystem, Reduzierung NH₃ Ausstoß

III.02

Off-grid Blockeisherstellung in Indonesien

Jörg Waschull^{1*}, Wolfgang Henschler¹, Andreas Rittsche¹, Frank Stegmüller², Rudolf Rauch²

¹Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
joerg.waschull@ilkdresden.de

²Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, De RITZ Building, Level 3A
Jl. HOS Cokroaminoto No. 91, Menteng 10310 Jakarta, Indonesia

Indonesien ist die größte Volkswirtschaft Südostasiens. Das Land hat sich ehrgeizige Klimaschutzziele gesteckt. Die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit unterstützt diese Bemühungen unter anderem durch gemeinsame Projekte mit indonesischen Partnern auf dem Gebiet der Kältetechnik. In diesem Kontext wurde am ILK Dresden eine vollständig solar versorgte Blockeismaschine für die indonesische Fischereiwirtschaft entwickelt und gebaut, die folgende Anforderungen erfüllen sollte:

- Herstellung von mindestens 1000 kg Blockeis an der Hälfte der Kalendertage eines Jahres,
- Vermeidung eines Backup-Generators und Minimierung elektrischer Speicher,
- Nutzung eines natürlichen Kältemittels,
- Produktion von so viel vollständig gefrorenen Eisblöcken am Tag, wie möglich.

Zur Lösung dieser Aufgaben wurden eine R290-Kälteanlage, die eine einstrahlungssynchrone Kälteerzeugung ermöglicht, eine teillastfähige Blockeismaschine und ein adaptiver Steuerungsalgorithmus entwickelt. Die off-grid Blockeismaschine wurde beim Entwicklungspartner in Indonesien durch lokale Firmen aufgebaut und in Betrieb genommen. Präsentiert werden konzeptionelle und experimentelle Vorarbeiten, das Anlagenkonzept, die realisierte Blockeismaschine sowie erste Betriebsdaten.

Stichwörter:

Blockeis, solar, Photovoltaik, R290

III.03

Grenzen und Chancen des Einsatzes von Standard-Kälteunits in der Chemieindustrie

Carsten Möbus*¹, Linda Balfe²

¹ BASF SE, 67056 Ludwigshafen am Rhein, Germany
carsten.moebus@basf.com

² Infracore GmbH & Co. Höchst KG, 65926 Frankfurt am Main
Linda.Balfe@infracore.com

Für Kälteanwendungen in chemischen Produktionsanlagen gibt es eine Vielzahl von individuellen Anforderungen, die in den meisten Fällen zu einem individuellen Design der Kälteunits führen. In der Konzeptphase wird oftmals geprüft, ob Standard-Kälteunits zum Einsatz kommen können, weil diese durch das standardisierte Design deutlich kostengünstiger in den Investitionskosten sind und i.d.R. eine kürzere Lieferzeit haben.

Im DKV Arbeitskreis, der sich aus Vertretern des Fachgebietes Kälte mehrerer deutscher Chemiefirmen zusammensetzt, haben sich die Mitglieder der Fragestellung gewidmet, für welche wiederkehrenden Anwendungen eine modifizierte Standardausführung eine Lösung darstellen könnte.

Der Beitrag erläutert, welche Kriterien, die sich im Umfeld einer chemischen Prozessanlage stellen, von Klimakälte-Standardanlagen nicht erfüllt werden und mit welchen Anpassungen der Einsatz besser möglich wäre. Dazu gehören Themen aus der MSR-Technik, Werkstofftechnik, Sicherheitstechnik und der Dokumentation, die für das Personal aus Betrieb, Projektierung und Instandhaltung relevant sind.

Der DKV Arbeitskreis favorisiert den Einsatz natürlicher Kältemittel, auch in standardisierten Kälteunits. Für einen möglichst flexiblen Einsatz im Umfeld chemischer Produktionsanlagen ist dafür eine höherwertige Ausführung erforderlich. Damit ließe sich der Einsatz nachhaltiger Technologien mit einem Kostenvorteil für Standardisierung verbinden.

Stichwörter:

Industriekälte, Standardisierung, Instandhaltung, natürliche Kältemittel

III.04

Anwendung von LiBr/H₂O – Absorptionswärmepumpen in Fernwärmenetzen

Dmitrij Gorlovsky*

Johnson Controls, Global Product Management Absorption Chillers & Heaters,
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland
Dmitrij.Gorlovsky@jci.com

Absorptionswärmepumpen mit der Arbeitsstoffpaarung LiBr/H₂O gewinnen als Brückentechnologie zur industriellen Abwärme-Nutzung in deutschen Fernwärmenetzen an Bedeutung.

Mit Wasser als Kältemittel sind auch in Zukunft keinerlei umweltpolitische Einschränkungen zu erwarten.

Im Vortrag werden verschiedene Fallstudien zur Anwendung neuartiger wärmebetriebener „Single Effect Double Lift“ LiBr/H₂O-Absorptionskältemaschinen mit hybrider Nutzung niedriger Rücklauftemperaturen von Fernwärmenetzen beschrieben.

Auf der Basis von 2 stufigen Verdampfer-/Absorber-Konstruktionen wird bei LiBr/H₂O Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen eine hohe Verfügbarkeit, Funktionssicherheit und Effektivität erreicht.

Erklärvideo [Product video - Oxycom IntrCooll 4 Season - YouTube](#)

Stichwörter:

LiBr/H₂O Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen in Fernwärme- und Fernkälteanwendungen
Innovative mit Fernwärme angetriebene „Single Effect / Double Lift“ Absorptionskältemaschinen
Absorptionswärmepumpen vom Typ 1 in Fernwärmeanwendungen, Praxisbeispiele

III.05

Digitale Geschäftsmodelle für die HVAC/R Industrie

Dr. Christian Ellwein

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, 74670 Forchtenberg
Christian.ellwein@kriwan.de

Digitalisierung – die zentrale Frage

Bei der Digitalisierung muss man sich die wesentliche Frage stellen „*warum* machen wir das eigentlich?“ Dabei gibt es eigentlich nur eine Antwort, die langfristig erfolgreich sein wird: weil wir durch die Digitalisierung unserer Produkte und Services echten Kundennutzen schaffen, der in einer vernünftigen Zeit (return on invest, ROI) in der Gewinn-und-Verlust-Rechnung messbar ist. Wir müssen die Digitalisierung von Anfang an so denken, dass Kundennutzen entsteht.

Predictive Maintenance

Viele Verdichter werden solange betrieben, bis ein Schaden entsteht und der Prozess durch einen ungeplanten Ausfall des Verdichters unterbrochen wird oder aber eine Wartung wird in festen Zeitintervallen durchgeführt ohne die tatsächliche Belastung der Verdichter zu beachten. Moderne Verdichterschutzrelais ermöglichen genau das: beginnend bei einfachen Parametern wie der kumulierten Laufzeit und Motorstarts des Verdichters werden weitere wichtige Werte wie Lagertemperaturen, Heißgastemperatur oder Leistungsaufnahme gemessen und können kontinuierlich an Regler oder SCADA Systeme weitergegeben werden. Es ist möglich, in den Verdichterschutzrelais auch Warnschwellen für diese Daten zu hinterlegen und so – angestoßen durch das Expertenwissen des Verdichterherstellers – Empfehlungen für Wartungen zu geben.

After-sales Business beim Hersteller fördern

Wenn der Verdichter wie oben beschrieben selber den Bedarf einer Wartung angemeldet hat, ist es im nächsten Schritt wichtig, dass die Wartung fachgerecht durchgeführt wird. Es gibt am Markt immer wieder auch billige Kopien von Originalersatzteilen. Sie sind auf den ersten Blick oft kaum vom hochwertigen Original zu unterscheiden, haben in vielen Fällen aber qualitative Mängel. Durch einen neuartigen QR-Code mit einem eingebauten Security-Element kann das verbessert werden. Dieses Security-Element verhindert ein Duplizieren des QR-Codes. Das eröffnet auch die Möglichkeit, Kunden beim Einsatz von so gekennzeichneten und digital registrierten Original-Ersatzteilen Loyalitätsprogramme oder andere Vorteile wie eine verlängerte Garantie anzubieten.

Ebenso ist es möglich, beim Einsatz mehrerer Komponenten eines Herstellers (Verdichter, Regler, Sensoren), die durch diesen QR-Code gekennzeichnet und digital registriert wurden, ein Bonusprogramm aufzusetzen. Durch Digitalisierung kann ein Hersteller so sein cross-selling unterstützen und den Umsatzanteil an einer Anlage erhöhen.

Weitere liegen Geschäftsmodelle liegen in der **verbesserten Fehlersuche im Feld**. Hierbei geht es um die Visualisierung des aktuellen Zustands des Verdichters und seiner Historie. Schließlich können auch **Poka-Yoke und Lean Produktion bei der Herstellung des Verdichters** unterstützt werden. Dabei geht es um die einfache und fehlersichere Programmierung von Elektronik, die zum Verdichter gehört.

III.06

Inverterbasierte Standard-Schaltschränke in der Kältetechnik

Wie mit standardisierten Schaltschränken Geld gespart und die Qualität erhöht werden kann

Markus Eberhardt*, Andreas Risius

KIMO RHVAC Controls GmbH, Hüttendorfer Weg 60, 910768 Fürth, Deutschland
applications@frigokimo.com

ist ausgefallen!

III.07

Augmented Reality – Anwendungsbeispiele aus der Kältetechnik

Robin Langebach^{1*}, Fahmi Bellalouna¹, Volker Stamer², Wolfgang Scholten³, Bert Stenzel³

¹ Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik
Robin.Langebach@h-ka.de

² Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, The Schaufler Academy, Peter-Schaufler-Straße 3,
72108 Rottenburg-Ergenzingen

³ Historische Kälte- und Klimatechnik e. V. (HKK), Bruno-Dreßler-Straße 14,
63477 Maintal

Bei der Aus- und Weiterbildung von Fachpersonal in der Kälte- und Klimatechnik werden gerne Anschauungsobjekte wie Schnittmodelle oder funktionsfähige Kleinanlagen verwendet. Dies unterliegt jedoch häufig den Einschränkungen, dass die verwendeten Objekte häufig transportabel sein müssen. Auch mit großen Mühen ist es darüber hinaus nur selten möglich, die vollständige Funktionsweise nachvollziehbar darzustellen. Aus diesem Grund hat sich ein Konsortium um die Hochschule Karlsruhe herausgebildet, welches das klare Ziel verfolgt moderne, computergestützte Methoden auf Basis von Augmented Reality und Virtual Reality auch für die Kältetechnik sinnvoll nutzbar zu machen. Dabei wurden in einem ersten Schritt gemeinsam mit Studierenden der Hochschule ein Schraubenverdichter sowie der historisch wertvolle AS-Rotor (Rot-Silber-Kühlautomat) als weltweit erste hermetische Kältemaschine virtualisiert. Unter Zuhilfenahme integrierter Informationen und Interaktionen ist es möglich, auf spielerisch einfachen Weg einen Zugang zur Funktionsweise dieser beiden vergleichsweise komplexen Maschinen zu erlangen. Im Rahmen des Vortrags werden die erstellten Applikationen erläutert und praktisch vorgeführt. Mit den Aktivitäten verfolgen alle Beteiligten das erklärte Ziel, die jüngere und digitale Generation auf unsere Branche aufmerksam zu machen und für die technischen Inhalte und Berufe der Kältetechnik begeistern zu wollen.

Stichwörter:

Augmented Reality, AR, Kältemittelverdichter, Schraubenverdichter, Rot-Silber-Kühlautomat

III.08

CO₂ Wärmepumpen für Großküchen

Armin Hafner

Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen
armin.hafner@ntnu.no

In enger Zusammenarbeit werden CO₂ Wärmepumpen für Großküchen der Akshaya Patra Foundation, in Indien entwickelt und gebaut. Diese sollen zum einen den gesamten Kühlbedarf liefern, der bisher von H-FCKW-Anlagen bereitgestellt wurde. Zum andern soll damit Warmwasser mit rund 90 °C erzeugt werden. Dieses Heißwasser wird für das Zubereiten der Mahlzeiten verwendet. Darüber hinaus werden die vorhandenen Raumkühlsysteme durch ein zentrales Kühlsystem ersetzt, indem gekühltes Wasser zirkuliert. Um den zeitlichen Schwankungen des Kalt- und Warmwasserbedarfs gerecht zu werden, werden entsprechende thermische Speicher integriert.

Dieses integrierte Anlagenkonzept ermöglicht eine erhebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen der Kälteanlagen und ersetzt Warmwasserbereiter, die bisher mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Darüber hinaus reduziert das integrierte Gesamtsystem den Primärenergiebedarf und damit die Energiekosten um über 30%.

Eine detaillierte Beschreibung der Pilotanlage und erste Ergebnisse von der Inbetriebnahme werden Hauptbestandteil dieses Beitrages zur diesjährigen DKV Tagung sein.

Stichwörter:

R744 / CO₂ chiller, heat pump, ejector; ecodesign

III.09

Was in der Gewerbekälte nicht gemacht wird, aber dringend getan werden sollte

R. Baust

Robert Schiessl GmbH, Kolpingring 14, 82041 Oberhaching
R.Baust@schuessl-kaelte.de

DKV e.V., München
baust@dkv.de

Der im August 2021 erschienene 6. Sachstandsbericht (AR6) des IPCC bezeichnet es als zweifelsfrei, (unequivocal) dass die Menschheit die Erderwärmung verursacht hat. Der Zusammenhang zwischen Erderwärmung und das Wetterextreme häufiger und intensiver auftreten, wird nicht mehr als Wahrscheinlichkeit, sondern als „established fact“ genannt.

Dem Wetterextrem „Hitzeperiode“ folgt meistens großflächiges Feuer. Letztes Jahr waren Australien und Kalifornien betroffen, dieses Jahr Südosteuropa. Das Unwetter im Rheinland hat Schäden in nie dagewesener Weise angerichtet. Die unglücklichen betroffenen Personen werden wohl eher von Katastrophe als von Klimawandel sprechen.

Zwar hat die Kälte- u. Klimabranche mit seinem Stromverbrauch und F-Gas Emissionen nur einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen, die zur Erderwärmung geführt haben, das sollte aber nicht als Grund gelten keine umweltgerechten Anlagen zu bauen. In der Presse und auch auf der DKV-Tagung werden zwar immer wieder Leuchtturmprojekte vorgestellt, aber in der Masse bleibt es leider häufig bei Teelichtern. Angesichts der aktuellen Probleme mit Schwarzhandel von Kältemittel und der aktuellen Diskussion um steigende Werte von TFA im Wasser und R23 in der Atmosphäre muss aufgepasst werden, dass aus den Teelichtern keine Grablichter werden.

Diese Aspekte und die sich daraus ergebene Verantwortung bleiben in der Gewerbekälte leider häufig unberücksichtigt. Es herrscht die sich aus den Zwängen des Tagesgeschäftes ergebene, achselzuckende Einstellung vor „es wird doch kalt“.

Im Vortrag zeigt der Autor konkrete Beispiele auf, mit denen der Energieverbrauch und letztlich die CO₂ Emissionen, häufig mit geringem Aufwand, erheblich reduziert werden können.

III.10

Untersuchung effizienzsteigernder Maßnahmen an einer CO₂-Kälteanlage unter Teillast

Christian Doerffel^{1*}, Riley B. Barta¹, Ullrich Hesse¹

¹TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden

christian.doerffel@tu-dresden.de

riley.barta@tu-dresden.de

ullrich.hesse@tu-dresden.de

In der gewerblichen Kälteversorgung nimmt der Marktanteil von CO₂-Kälteanlagen seit einigen Jahren stetig zu. Insbesondere bei höheren Umgebungstemperaturen sinkt die Energieeffizienz von den Anlagen aufgrund des transkritischen Betriebs deutlich. Um diesem Effekt entgegenzuwirken werden Kreislaufferweiterungen wie beispielsweise Parallelverdichter, Ejektoren oder Expansionsmaschinen zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit sowie externe Unterkühlungskreisläufe eingesetzt, um die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern.

An der TU Dresden wurden mit einer CO₂-Versuchskälteanlage Messungen durchgeführt mit dem Ziel einen direkten Vergleich aller genannter Maßnahmen in einer Anlage anzustellen. In vorangegangenen Veröffentlichungen wurde die jeweilige Systemeffizienz in Abhängigkeit der Rückkühlbedingungen untersucht. In diesem Beitrag werden weitere Ergebnisse dieser Untersuchungen bei erweitertem Messbereich präsentiert und ein weiterer Fokus auf das Teillastverhalten der Systeme gelegt.

Daraus werden Empfehlungen abgeleitet und präsentiert, welche Kombinationen effizienzsteigernder Maßnahmen unter welchen Randbedingungen sinnvoll einsetzbar sind.

Stichwörter:

R744, Energieeffizienz, Parallelverdichtung, Expander, Ejektor, Unterkühlung, Teillastbetrieb

III.11

Energieflexibilisierung im Supermarkt

Nicolas Fidorra^{1*}, Jonathan Kistner¹, Wilhelm Tegethoff¹

¹TLK-Thermo GmbH, Rebenring 31, 38106 Braunschweig, Deutschland

n.fidorra@tlk-thermo.com

Der Ausbau erneuerbarer Energien im Zuge der Energiewende führt zu einer erhöhten Fluktuation der Stromerzeugung. Die Lastverschiebung auf Verbraucherseite kann einen wichtigen Beitrag zur Stabilität des Stromnetzes und Reduktion der Spitzenlastkraftwerke liefern. Supermärkte sind in Deutschland für einen jährlichen Strombedarf von rund 16 TWh verantwortlich und verwenden davon rund die Hälfte für die Kältebereitstellung. Eine Flexibilisierung des Strombedarfs der Supermarktkälteanlagen könnte somit einen relevanten Beitrag zur Stromnetzstabilisierung leisten.

Die Energieflexibilisierung basiert darauf, dass thermische Energie auf einem niedrigen Temperaturniveau gespeichert und der Betrieb der Kälteanlage somit in einem gewissen Rahmen zeitlich variabel ist. Für die Speicherung können grundsätzlich zwei Möglichkeiten unterschieden werden: Erstens können die (tief)-gekühlten Waren in den Kühlmöbeln und -räumen als Speichermasse dienen. Zweitens können diese um zusätzliche kalte thermischer Energiespeicher, z. B. Eisspeicher, ergänzt werden.

Dieser Beitrag untersucht das Potential dieser beiden Möglichkeiten zur Lastverschiebung in einem typischen Supermarkt. Ein dynamisches Simulationsmodell bildet die R-744-Verbundkälteanlage sowie die einzelnen Kühlmöbel ab. Der Temperaturverlauf innerhalb jedes einzelnen Kühlmöbels sowie die benötigte elektrische

Leistungsaufnahme werden in hoher zeitlicher Auflösung berechnet. Für verschiedene Szenarien (Sommer/Winter, Feiertag/Wochentag) wird das Potential in Hinblick auf Dauer und Höhe der Lastreduktion bewertet.

Stichwörter:

Supermarkt, Thermische Speicher, Flexibilisierung

III.12

Festigkeitsprüfanlage für industrielle Anwendung – aber sicher!

Thomas Schnerr*, Andreas Rittsche, Rene Seidel

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

thomas.schnerr@ilkdresden.de

Im Zeitraum 2013 bis 2015 wurde im ILK Dresden ein öffentlich gefördertes Projekt zur kombinierten Festigkeits- und Dichtheitsprüfung bearbeitet. Kern des Konzeptes war eine gefahrlose und automatisierte Festigkeitsprüfung von CO₂-Anlagen auf pneumatischem Weg in Kombination mit der Dichtheitsprüfung unter Nutzung eines detektierbaren Prüfgases. Details des Prüfkonzeptes und des aufgebauten Funktionsmusters wurden zur DKV-Jahrestagung 2015 vorgestellt.

Inzwischen wurde das damalige Konzept in die industrielle Anwendung überführt. Im Rahmen des Vortrages wird der Ablauf vom akademischen Funktionsmuster bis zum kundenspezifisch erweiterten und optimierten Prüfstand für den Industrieinsatz dargestellt.

Um das Prüfkonzept in den vorhandenen Fertigungsprozess zu integrieren, mussten diverse Herausforderungen gelöst werden. Dies beinhaltete die Skalierung auf größere Prüflingsvolumina, höhere Drücke, die Möglichkeit der parallelen Prüfung und ein praktikables Sicherheitskonzept.

Die umgesetzte Lösung beinhaltet mehrere begehbare Prüfkammern. Es musste ein schlüssiges Sicherheitskonzept erstellt werden, das den Zugang zur jeweiligen Prüfkammer während der Festigkeitsprüfung verhindert, für die nachfolgende manuelle Feinlecksuche jedoch zulässt. Für unterschiedliche Arten von zu prüfenden Baugruppen wurden individuelle Prüfprogramme erstellt, die neben den jeweils anzuwendenden Prüfbedingungen auch Unterprogramme zur Funktionsprüfung der in den Baugruppen integrierten Magnetventile enthalten.

Analog zum Funktionsmuster wurde eine Prüfgasrückgewinnung integriert, die eine 95 %-ige Rückgewinnung des eingesetzten Helium-Stickstoff-Gemisches je Prüfzyklus ermöglicht. Die Speicherung des Prüfgases erfolgt in Gasflaschen bei ca. 180 bar. Prüfgasverluste werden mittels automatischer Nachspeisung ersetzt.

Die Erfassung der Baugruppe und Zuweisung des entsprechenden Prüfprogrammes wurde mittels Barcodeerkennung realisiert. Nach Abschluss der Prüfung werden die Ergebnisse der einzelnen Prüfschritte als Protokolldatei per Email versendet. Die Bedienung der Anlage erfolgt menügeführt per Touchscreen. Über Bildschirme werden aktuelle Programmpunkte, Handlungsaufforderungen an den Bediener und Anlagenzustände visualisiert. Mittels Remote-Verbindung kann die Anlage ferngewartet werden.

Stichwörter:

Lecksuche, Festigkeitsprüfung, R744

III.13

Thermische Behaglichkeit in elektrischen Bussen

Messungen und experimentelle Analyse

Francesco Cigarini^{1*}, Tu-Anh Fay¹, Florian Straub¹ und Dietmar Göhlich¹

¹Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Sekr. H 10 / H4128, Technische Universität Berlin,
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Deutschland
f.cigarini@tu-berlin.de

Der hohe Energieverbrauch des Klimasystems führt in batterieelektrischen Bussen aufgrund der Versorgung aus der mitgeführten Batterie zu einer erheblichen Beschränkung der verfügbaren Reichweite. Die Einstellung der Innenraumtemperatur in Linienbussen ist in Deutschland durch die VDV-Schrift 236 geregelt. Die dort vorgegebenen Temperaturen sind jedoch weder empirisch noch theoretisch begründet. Dies kann zu einem ineffizienten Betrieb des Klimasystems führen, da die Innentemperatur oft auf zu hohe Werte eingestellt wird. In dieser Arbeit wird eine experimentelle Analyse durchgeführt, um eine Korrelation zwischen Klimaeinstellungen, Energieverbrauch und der thermischen Behaglichkeit der Fahrgäste herzustellen. Es werden in mehreren Messungen der Energieverbrauch und die relevanten Klimaparameter (wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, usw...) für verschiedene Außen- und Innentemperatureinstellungen aufgenommen und mit der thermischen Behaglichkeit der Fahrgäste verglichen. Darüber hinaus werden die Messungen in zwei elektrischen Bussen mit unterschiedlichen Klimasystemen durchgeführt, um den Einfluss der spezifischen Konfiguration und Architektur des Klimasystems zu bewerten.

III.14

Natürliche Kältemittel in Schienenfahrzeugklimaanlagen

Untersuchungen zur Energieeffizienz

Ingwer Ebinger ^{1*}, Lutz Boeck ²

¹HAW Hamburg, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg
ingwer.ebinger@haw-hamburg.de

²Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co. KG
Industriestrasse 60, 04435 Schkeuditz
lutz.boeck@Wabtec.com

Schienenfahrzeuge und damit die in Ihnen installierten Klimaanlagen sind für eine sehr lange Nutzungsdauer konzipiert. Deshalb sind über die Investitionskosten hinaus auch die Unterhaltungs- und Betriebskosten genauer zu betrachten. Die Leistungsaufnahme von Klimaanlagen stellt einen bedeutenden Anteil am Energiebedarf der Schienenfahrzeuge dar. Bei Fernverkehrsfahrzeugen können das 15 % bis 25 % und bei Regionalverkehrsfahrzeugen bis zu 40 % des Gesamtenergiebedarfes sein. Neben dem Anlagenkonzept zur Luftaufbereitung spielt dabei das in den Kältemaschinen eingesetzte Arbeitsmittel, das Kältemittel, eine entscheidende Rolle.

Bisher werden in Serien-Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge vorzugsweise synthetische Kältemittel genutzt. Eine Ausnahme bilden die im ICE-3 der BR403/406 installierten Klimaanlagen mit Kaltluft-Kältemaschinen. Zukünftig sollen in Schienenfahrzeugklimaanlagen vorrangig natürliche Kältemittel zum Einsatz kommen. Neben Luft sind dabei die natürlichen Kältemittel Kohlendioxid und Propan attraktiv. In dem Vortrag wird die Energieeffizienz dieser natürlichen Kältemittel im Vergleich zu dem bisher häufig eingesetzten Kältemittel R134a auf Basis praxisnaher Randbedingungen sowohl im Kältemaschinen- als auch im Wärmepumpenbetrieb gegenübergestellt. Abschließend wird auf die sich bei diesen Einsatzfällen ergebenden anlagentechnischen Herausforderungen eingegangen.

Stichwörter:

Natürliche Kältemittel, Klimaanlagen, Schienenfahrzeuge

III.15

Automotive electric scroll compressors for low charge R290 mobile and stationary systems

Dr. Eng. Paul Bouteiller*, Dr. Eng. Georges Khoury

Sanden International (Europe) GmbH, 35190 Tinteniac, Frankreich
Paul.bouteiller.nj@g-sanden.com

The heat pumps and refrigeration sectors are actively working toward the reduction of the global environmental footprints of thermodynamics machines. The main levers of actions are efficiency improvements, usage of environmentally friendly refrigerants, lower refrigerant loads and tightness to reduce refrigerant leakages.

The natural R290 refrigerant is a major trend today thanks to its good thermodynamic properties, very low GWP and cost. R290 is an alternative solution to replace high GWP fluids and comply with the F-gas regulation.

However, it requires strong safety measures to mitigate the risks related to the flammability of R290, thus limiting the usage of R290 in indoor systems and high capacity machines.

This article shows how automotive air conditioning compressors can contribute in the refrigerant load reduction. Combined with compact heat exchangers, such compressors allow the development of systems using less than 150g of R290 refrigerant.

The study shows the possibility to develop systems providing up to 15 kW of heating capacity for household heat pumps or 8kW cooling capacity in positive refrigeration applications.

The Sanden electric compressors achieve high capacities levels with so little amount of refrigerant thanks to their low internal volumes and their wide operation ranges.

The study presents the test results and benefits of these compressors in heat pump and refrigeration applications.

III.16

Monitoring, Energieerfassung, Energieabrechnung in wassergeführten Verteilsystemen

Bernd Wittenberg

Belimo Stellantriebe Vertriebs GmbH, Welfenstraße 27, 70599 Stuttgart
bernd.wittenberg@belimo.de

Oft kommt es in den Sommermonaten zu Diskussionen ob und welche Leistungen erreicht werden.

In der Anlage verbaute Thermometer können erste Informationen zu den Temperaturen liefern, aber ohne Kenntnis des Volumenstroms kann die Energie nicht berechnet werden.

Wenn aber die zur Verfügung gestellte Energie für alle Beteiligten einfach dargestellt werden kann und das permanent und rückwirkend, dann wären wir einen deutlichen Schritt weiter.

Beispiel:

Wenn also das System jederzeit Energiedaten dokumentiert und einfach zur Verfügung stellt, dann kann bei möglichen Unzufriedenheiten einfach geprüft werden, wo mögliche Probleme sind:

- in der Erzeugung: zuviel oder zu wenig Volumenstrom
- in der Verteilung: sind die Tauscherflächen sind in der Lage die Energiemengen zu übertragen

Beispiel:

Wenn die Energiemengen jederzeit dokumentiert werden, dann kann auch die effektiv abgenommene Leistung der einzelnen Nutzer sauber abgerechnet werden. Gerade bei Mieterwechsel kann auch nachträglich auf den Tag genau abgerechnet werden.

Dieses Bild wird von der Armatur automatisch generiert:

so können Sie sehr einfach einen Erzeuger, eine Kältemaschine oder einen Kältekreislauf monitoren

III.17

Flexibilisierung der Kälteversorgung »FlexKaelte«

Flexibilisierung von Kälteversorgungssystemen für den elektrischen Energieausgleich in Deutschland »FlexKaelte«

M.Eng. Christoph Goetschkes

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Abteilung Energiesysteme
Osterfelder Straße 3, 46047 Oberhausen, Deutschland
christoph.goetschkes@umsicht.fraunhofer.de

Aufgrund der Zunahme volatil einspeisender erneuerbarer Energien ins Stromnetz, steigt der Bedarf am elektrischen Energieausgleich zur Netzstabilität. Die Kälteversorgung umfasst ca. 14 % des elektrischen Energiebedarfes in Deutschland. Das Forschungsvorhaben »FlexKaelte« verfolgt das Ziel, das Potential der Flexibilisierung der Kälteversorgung in Deutschland zu ermitteln.

Im Rahmen einer Metastudie wurden Recherchen zum Kältesektor in Deutschland durchgeführt und insgesamt 75 Kälteanwendungen identifiziert. Diese werden in mehrere Anwendungstypen gegliedert. Aufgrund der Heterogenität innerhalb der Studienlage und der dadurch resultierenden Datenunschärfe, lassen sich schwer konkrete Aussagen für den Kältebedarf bestimmter Bereiche treffen. Insgesamt ist dennoch ein Anstieg des Kältebedarfs in Deutschland in den letzten Jahren zu erkennen.

Messungen an ausgewählten Standorten sollen die Anwendungen besser charakterisieren und einen Lastgang-generator stützen. Um Flexibilisierungspotenziale bestimmen zu können, werden die generierten Bedarfslastgänge für Optimierungsrechnungen unter Berücksichtigung von Versorgungs- und Strommarktszenarien verwendet. Abschließend soll eine App zur Bestimmung des Flexibilisierungspotenzials für lokale Anwender entwickelt werden.

Stichwörter:

Flexibilisierung, elektrischer Energieausgleich, Kälteversorgung

III.18

Effiziente Kälteversorgung durch Flexibilisierung

Anja Hanßke^{1*}, Olaf Koeppen²

^{1*} Technische Universität Berlin, Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik,
Marchstraße 18, 10587 Berlin
anja.hansske@mailbox.tu-berlin.de

² Technische Universität Berlin, Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik,
Marchstraße 18, 10587 Berlin
o.koeppen@tu-berlin.de

ist ausgefallen!

III.19

Zweistufige adiabatische Hallen-Kühlung

Frank Meyer zur Heide

DeTec GmbH, Windmeierweg 4, 32758 Detmold
mzh@de-tec.net

Die **zweistufige** adiabatische Kühlung ermöglicht besonders in den Sommermonaten ein **behagliches Raumklima und eine kühle Produktionshalle** ohne klassische teure Kompressions- oder Klimakälte und spart bis zu 80 % der Energiekosten und 90 % der CO₂-Emissionen ein. Somit kann das System einen erheblichen Beitrag zur Behaglichkeit in großen Räumen, zur Prozess- und Arbeitssicherheit und zur Erreichung unserer europäischen Klimaziele leisten. Leider findet das Thema in der Fachausbildung keine oder nur untergeordnet eine Rolle.

Mit einem Kubikmeter Wasser können bis zu 590 Kilowatt Kälte erzeugt werden. Hier sind bei klassischer Kompressionskälteanlagen 200-300 Kilowattstunden Strom erforderlich. Da das System mit einem hohen Anteil an Frischluft arbeitet, werden Bestandteile wie Staube, Vieren, etc. abgeführt und des Weiteren wird eine statische Aufladung der Luft verhindert.

Erklärvideo [Product video - Oxycom IntrCool 4 Season - YouTube](#)

III.20

Frostprävention in Kühlhäusern

Numerische Analyse eines offenen Absorption-Systems zur Entfeuchtung und Frostprävention in gewerblichen Kühlhäusern

Felix Hochwallner^{1*}, Christoph Reichl¹,
Johann Emhofer¹

¹ AIT – Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich
felix.hochwallner@ait.ac.at

Frostbildung an Luftkühlern in gewerblichen Kühlhäusern verringert die Gesamteffizienz von Kälteanlagen, da wiederkehrende Abtauzyklen durchgeführt werden müssen, um die Luftkühler zu enteisen. Während dieser Abtauzyklen muss der Luftkühler zuerst auf Temperaturen deutlich oberhalb von 0 °C aufgeheizt und danach wieder abgekühlt werden. Dabei wird einerseits ungewollt Wärme in das Kühlhaus übertragen und andererseits muss wertvolle Kühlenergie aufgebracht werden, um den aufgeheizten Luftkühler nach dem Abtauvorgang wieder auf Temperaturen unterhalb von 0 °C abzukühlen.

In einem vorhergehenden Projekt, "Liquid Desiccant and Evaporative Cooling System (LDEC)", wurde der Einsatz von ionischen Flüssigkeiten als Absorptionsmittel in einem Entfeuchtungssystem in Wohngebäuden von AIT untersucht. Mithilfe dieser Technologie konnte im Sommer bis zu 30 % an Kühlenergie eingespart werden. Außerdem wurde festgestellt, dass das LDEC-System mit der Abwärme der Kälteanlage energetisch sinnvoll betrieben werden kann, und dass ein Einsatz der ionischen Flüssigkeiten bei Temperaturen unterhalb von 0 °C möglich ist.

Aufbauend auf diesem Vorprojekt wird in dieser Arbeit ein Luftentfeuchtungssystem auf der Basis von Fallfilmabsorbieren präsentiert, welches die Frostbildung an den Luftkühlern in Kühlhäusern vollständig verhindert. Durch die Anordnung eines Fallfilmabsorbiers vor dem Luftkühler wird die Taupunkttemperatur der Luft unterhalb der Oberflächentemperatur des Luftkühlers gebracht. Die verdünnte ionische Flüssigkeits-Wasser Lösung wird anschließend mit der Abwärme der Kälteanlage regeneriert. Mit Hilfe von numerischen Simulationen in der

Software Dymola/Modelica wird der energetische Nutzen bei verschiedenen Betriebszuständen diskutiert. Durch die Validierung der verwendeten Modelle für den Absorber und Regenerator mit detaillierten CFD-Modellen, bieten die Simulationen zusätzlich die Möglichkeit diese Komponenten passend auszulagern.

Stichwörter:

Fallfilmabsorber, Frostbildung, Absorption, Entfeuchtung, Kühllhäuser

III.21

Einfluss des Abtauzeitpunktes auf die Zykluseffizienz

Jonas Klingebiel^{1*}, Christoph Höges¹, Valerius Venzik¹, Dirk Müller¹

¹RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de

Die Entstehung von Reif an den Lamellen des Verdampfers von Luft-Wasser-Wärmepumpen ist unvermeidlich, wenn die Lufttemperatur unter die Temperatur des Taupunkts abgesenkt wird. Die Reifbildung senkt die Energieeffizienz der Anlage, sodass das periodische Abtauen der Reifschicht notwendig ist. Stand der Technik ist eine zeitgesteuerte Abtauung, bei der die Abtauung in Abhängigkeit der Lufttemperatur eingeleitet wird. Da die Luftfeuchtigkeit und die Betriebsweise jedoch einen starken Einfluss auf das Reifwachstum haben, führt dies zu ineffizienten Abtauzyklen.

Im Rahmen dieses Beitrags sollen daher effizientere Abtaustrategien untersucht werden. Dazu wird innerhalb dieser Studie eine Potentialabschätzung auf Basis einer experimentellen und simulativen Untersuchung für unterschiedliche Betriebspunkte durchgeführt. Der Lamellenwärmeübertrager wird dazu in einer Klimakammer bei veränderlichen Umgebungsbedingungen und Leistungen untersucht. Dazu werden alle relevanten Messgrößen (Reifmasse, Reifschichtdicke, luftseitiger Druckverlust) erfasst. Weiterhin wird ein Simulationsmodell des Verdampfers in der Modellierungssprache Modelica basierend auf der TiL Suite weiterentwickelt, sodass die Reifbildung und Abtauung gekoppelt modelliert werden kann. Das Modell wird anschließend mit den experimentellen Messdaten kalibriert und validiert, um tiefergehende Analysen physikalischer Effekte durchführen zu können.

Auf diese Weise kann der Einfluss des Abtauzeitpunktes auf die Zykluseffizienz (Reifbildung und Abtauung) systematisch sowohl experimentell als auch simulativ bestimmt werden. Die Studie präsentiert eine Verringerung der Zykluseffizienz in Abhängigkeit des Abtauzeitpunktes gegenüber dem energetischen Optimum um bis zu 20 %. Darüber hinaus werden Parameterstudien vorgestellt, in denen der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Reifwachstum quantifiziert wird.

Stichwörter:

Abtauzeitpunkt, Experiment, Simulation, Reifwachstum, Feuchte Luft

Lösungsmittelrecycling mit Kaltluftkältetechnik

Dipl. -Ing Thomas Frank

¹ Refolution Industriekälte GmbH, Karpatenstraße 26, 76227 Karlsruhe, Deutschland
Thomas.Frank@refolution.de

In vielen Prozessen fallen Schadstoffemissionen in Abgasströmen an und müssen vor dem Ausstoß in die Umwelt aufbereitet werden. Diese Grenzwerte sind in der TA-Luft festgelegt, welche erstmals seit 2002 überarbeitet wurde. Refolution hat zusammen mit HOF Sonderanlagenbau und Mirai Intex ein neues Verfahren mit nur Luft als Kältemittel in der Tieftemperaturstufe entwickelt. Relevante Stoffe wie Aceton (-70°C), Ethanol (-55°C) und Dichlormethan (-90°C) werden aus dem Abgasstrom auskondensiert und können damit zu 99% recycelt werden. Das System ist in der Lage mehrere Abgasströme gleichzeitig zu reinigen und auch bei feuchten Abgasen das Wasser ausfrieren. Die Ausfrierzonen in den Wärmeübertragern werden durch die flexible Temperaturregelung der Kaltluftmaschine minimiert. Dabei ermöglichen Wechselwärmetauschern einen kontinuierlichen Betrieb der Anlage.

Stichwörter:

Air cycle machine, low temperature, recycling, solvents, energy efficiency

IV.01

Energieverbrauch während COVID-19 Maßnahmen

Untersuchung des Energie- und Wasserverbrauchs sowie der Luftqualität in kommunalen Gebäuden

Florian Stinner^{1*}, Alexander Kümpel¹, Dirk Müller¹

¹RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
fstinner@eonerc.rwth-aachen.de

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 Die COVID-19 Pandemie hat die Welt in den Jahren 2020/21 erschüttert. Zum Schutz vor Infektion wurden von Regierungen Gegenmaßnahmen ergriffen, die sich auf den Betrieb von Gebäuden und deren Medienverbrauch ausgewirkt haben. Insbesondere kommunale Gebäude (z. B. Schulen, Kindergärten, Verwaltungsgebäude) durchliefen im Zeitverlauf mehrere Maßnahmen (Öffnung/Schließung, unterschiedliche Belegung oder andere Hygienekonzepte).

In dieser Veröffentlichung soll der Energieverbrauch und Wasserverbrauch, sowie die Luftqualität anhand von Energiemonitoringdaten in 122 ausgewählten Gebäuden einer Stadt in Nordrhein-Westfalen untersucht werden. Hierbei wird ein Fokus auf einen Vergleich von Gebäuden mit raumluftechnischen Geräten gelegt. Wenn verfügbar werden Daten aus CO₂-Sensoren für die Bewertung der Luftqualität während Präsenzzeiten herangezogen. CO₂-Daten wurden nur für Gebäude mit RLT-Anlagen aus deren Gebäudeautomation erhoben.

CO₂-Messungen oberhalb von 2000 ppm wurden nicht festgestellt. Nur 2 % der Messungen lagen zwischen 1000-2000 ppm. In Präsenzzeiten stieg der thermische Energieverbrauch um 9 bis 49 % aufgrund von vermehrten Lüften an. In Gebäuden mit RLT-Anlage stieg der Heizbedarf jedoch nur um durchschnittlich 4 %. Der Wasser- und elektrische Bedarf sank um 11 bzw. 12 %.

Stichwörter:

COVID-19, Energieverbrauch, RLT-Anlagen, Luftqualität, CO₂, kommunale Gebäude

IV.02

KUEHA: Kühlen mit der vorhandenen Heizungsanlage

Teil 2: Kühlwirkungen in Bestandsgebäuden

Markus Arendt^{1*}, André Kremoke¹, Clemens Felsmann¹

¹TU Dresden, Institut für Energietechnik, Helmholtzstraße 14, 01062 Dresden, Deutschland
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 häufig. 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.

Aufbauend auf dem Vortrag von der DKV-Tagung 2020, wo der Schwerpunkt auf die praktischen und simulativen Untersuchungen im Raum (Heizflächendurchströmung und -umströmung mit gekühlten Freien Heizflächen sowie der Temperierungseffekt und die Kältebereitstellung) lag, wird jetzt das Augenmerk auf den Kühlenergiebedarf sowie die Reduzierung der Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 gelegt. Hierzu wurde neben dem Monitoring der Felduntersuchungen auch eine bidirektional gekoppelte Anlagen- und Gebäudesimulation genutzt, um anhand mehrerer Gebäudemodelle eine Bewertung durch reproduzierbare Randbedingungen durchzuführen. Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass die Übertemperaturgradstunden in Bestandsgebäuden eine deutliche Reduzierung erfahren. Somit kann eine Kühlung mit der vorhandenen Heizungsanlage die thermische Situation in Gebäuden deutlich entschärfen.

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

Stichwörter:

Kühlung, Heizflächen, Wärmepumpe, Feldtest, Simulation, Übertemperaturgradstunden, Thermische Behaglichkeit

IV.03

Dauerfeldmessung der Lärmbelastung durch Luftwärmepumpen

Erste Ergebnisse

Björn Nienborg^{1*}, Thore Oltersdorf, Danny Günther

¹Fraunhofer ISE – Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg,
bjorn.nienborg@ise.fraunhofer.de

Der zunehmende Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen zur Heizung von Gebäuden führt zu einer potenziell erhöhten Lärmbelastung der Bevölkerung. Im Rahmen des Fördervorhabens "WP-QS im Bestand" sollen daher an rund zehn Wärmepumpenanlagen im Feld Dauerschallmessungen durchgeführt werden, um die real auftretende Lärmbelastung im Jahresverlauf zu erfassen.

Das grundlegende Vorgehen hierzu wurde am Beispiel von ersten Testmessungen auf der DKV-Tagung im vergangenen Jahr vorgestellt. Für die Bewertung wird dabei insbesondere die Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) herangezogen, welche Immissionsrichtwerte und eine Anleitung zu deren Ermittlung vorgibt. Zusätzlich werden psychoakustische Größen wie die Lautheit oder Schärfe der Betriebsgeräusche bewertet, da diese gemäß vorausgegangenen Studien maßgeblich zur empfundenen Lästigkeit beitragen.

Im diesjährigen Beitrag sollen nun erste Ergebnisse der Langzeitmessung (>6Monate) an mindestens zwei Wärmepumpenanlagen präsentiert werden.

Stichwörter:

Luft-Wärmepumpe, Schall, Akustik, Lärm, Immissionen, Lästigkeit

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.04

Umstellung von Wärmepumpen auf Low GWP HFO Kältemittel –

Steigerung der Energieeffizienz und Verbesserung der Nachhaltigkeit

Hans-Dieter Kupper^{1*}, Arnd Lagies²

^{1,2}Chemours Deutschland GmbH, Dornhofstraße 34, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland
hans-dieter.kupper@chemours.com
arnd.lagies@chemours.com

ist ausgefallen!

IV.05

Höchster Wohnkomfort mit Smarter Wärmepumpentechnologie

Dirk Gebhardt^{1*}

¹Nibe Systemtechnik GmbH, Planung, Am Reiherpfahl 3, 29223 Celle, Deutschland
Gebhardt@nibe.de

Die derzeit bereits deutlich spürbaren Klimaveränderungen können nicht mehr nur allein durch Heizung und Warmwasserbereitung mit der Wärmepumpe begegnet werden, immer häufiger stellt sich die Frage nach einer effizienten, aber kostengünstigen Kühlung im Sommer. Hinzu kommen Anforderungen an den Luftwechsel in immer dichteren Gebäuden mit z. B. KfW 55 oder KfW 40 (40+).

Besonders effizient kann man die Anforderungen dieser Gebäude mit einer Kombination der Wärmepumpe mit Erdwärme und einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung sowie Smarten Technologien im Zusammenspiel mit einer Eigenstromversorgung erfüllen. Das funktioniert sowohl bei Einfamilienhäusern, aber auch im Geschosswohnungsbau im Neubau und oft sogar in der Sanierung.

Der Beitrag soll die Möglichkeiten modernster Erdwärmepumpentechnologien zum Heizen, Kühlen und der Warmwasserbereitung, von Photovoltaikanlagen und Lüftungssystemen in Kombination mit „Smarten“ Technologien vorstellen.

Erdwärme als stetig verfügbare Energie kann in der Heizperiode als effiziente Wärmequelle genutzt werden. In der Kühlperiode bietet sie sich ebenso als effiziente Wärmesenke an. Mit einfachem Schaltungsaufwand kann eine „Passive Kühlung“ hergestellt werden. Dabei benötigen die teilweise mit modernsten Pumpen ausgestatteten Anlagen nur minimal Strom, der zusätzlich mit eigenen Stromerzeugern bereitgestellt werden kann. Eine Lüftung mit Wärmerückgewinnung unterstützt dabei sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb die Funktionen der Raumklimatisierung.

Der Wärmepumpenregler übernimmt dabei die Regelungsaufgaben und unterstützt und ergänzt mit einer Fülle von „Smarten“ Technologien den hocheffizienten und komfortablen Betrieb. Wetterdaten, Strompreisdaten, Wärme- und Stromspeicherungsverfahren sowie intelligente Anpassungen der Nutzung an das individuelle Verbraucherverhalten helfen dabei, bis zu 20 % und mehr Energie zu sparen. Eine schnelle und einfache Einbindung in externe Smart Home Systeme sowie eine Vernetzung mit anderen Systemen ist ebenso selbstverständlich wie die Fernanzeige, -überwachung und -einstellung der Funktionen von überall her. Das ermöglicht es dem Fachhandwerker, dem Kunden auf schnellem Weg bei einfach zu lösenden Serviceaufgaben zu helfen. Selbstverständlich kann auch der Kunde die vielfältigen Möglichkeiten zur komfortablen Nutzung seiner Wärmepumpe zu seinem Vorteil nutzen.

Eine „Smarte“ Wärmepumpe kann bei höchstem Nutzer-Komfort mit einem Minimum an Stromverbrauch aus den öffentlichen Netzen einen größtmöglichen Nutzen für die Umwelt leisten und somit die Energiewende im Wohnungsbau, nicht nur im Neubau, sondern auch in der Sanierung, unterstützen. Nicht nur Einfamilienhäuser,

auch im Geschosswohnungsbau gibt es entsprechende Anwendungen. Anhand von Beispielen und Zahlen werden die Technologien und Anwendungen beschrieben und mit herkömmlichen Systemen verglichen.

IV.06

Die besten Speicher gibt es schon Intelligent Building Operations – Prädiktiver Gebäudebetrieb

Markus Werner

MeteoViva GmbH, Karl-Heinz-Beckurts-Straße 13, 52428 Jülich

markus.werner@meteoviva.com

Speichertechnologien kommt beim Ausbau der Erneuerbaren Energien genauso wie bei der Sicherstellung und Optimierung der Fernwärmeversorgung eine absolute Schlüsselrolle zu. Mit dem steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien an der Stromproduktion in Deutschland nimmt die Dynamik in den elektrischen Netzen zu, und das Lastmanagement gewinnt an Bedeutung. Stromproduktion und -bedarf schwanken im Zeitverlauf und sind nicht deckungsgleich. Daher ist es wichtig, dass überschüssiger Strom gespeichert werden kann, um dann in Zeiten, in denen die Nachfrage die Produktion übersteigt, auf gefüllte Speicher zurückgreifen zu können. In der Fernwärmeversorgung stoßen die Städtetze an ihre Kapazitätsgrenzen. Während die Erzeugungsseite weiter optimiert werden kann, sind dem Transport in den bestehenden Netzen physikalische Grenzen gesetzt, und die angeschlossenen Verbraucher rufen meist zur selben Zeit hohe Wärmemengen ab.

Diese Erkenntnisse sind nicht neu, und sie haben zur Entwicklung neuer elektrischer und thermischer Speicher und zur Einführung variabler Strompreise und einer drastischen Erhöhung der Lastpreise bei vielen Fernwärmeversorgern geführt.

Mit einer simulationsbasierten, vorausschauenden Fahrweise aktiviert MeteoViva die Gebäudemasse als thermischen Speicher und ermöglicht durch smarte Steuerdaten eine Lastverschiebung und Flexibilisierung der Nutzung von elektrischer und thermischer Energie.

Im Vortrag wird die Technologie „MeteoViva Climate“ im Kontext der Lastverschiebung und Flexibilisierung erklärt und gezeigt, wie ohne große Investitionen durch den Einsatz smarterer Steuerdaten gleichzeitig das Klima im Gebäude verbessert sowie die Betriebskosten und der CO₂-Fußabdruck signifikant verringert werden können.

IV.07

Optimierte Regelung von Wärmepumpensystemen:

Cloudbasierte Bewertung und Integration der Regelung in die Systemdimensionierung

**Felix Stegemerten^{1*}, Christian Vering^{1*}, Marwa Maghnie¹, Sebastian Ostlender¹, Fabian Wüllhorst¹,
Anjo Niewöhner², Marc Baranski², Alexander Kümpel¹, Philipp Mehrfeld¹, Dirk Müller¹**

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum,
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52070 Aachen
cvering@eonec.rwth-aachen.de

² aedifion GmbH, Hohenzollernring 72, 50672 Köln, Deutschland

Der Einsatz von Wärmepumpensystemen zur Gebäudebeheizung steigert die Einbindung regenerativer Energiequellen in die Energieversorgungskette des Gebäudesektors. Dadurch kann der Bezug von Energie aus fossilen Energiequellen gemindert werden, was die Reduktion der Treibhausgasemissionen impliziert und ein hohes

Nachhaltigkeitspotential eröffnet. Wesentliche Aspekte zum Ausschöpfen dieses Nachhaltigkeitspotentials sind zum einen die optimale Systemdimensionierung und zum anderen die optimale Regelung. Diese sind jedoch maßgeblich voneinander abhängig und der sich einstellende Betrieb ist im Auslegungsschritt nicht perfekt vorhersagbar. Nach der Auslegung, die mit Sicherheitsfaktoren beaufschlagt werden muss, um die Unsicherheit des Betriebs berücksichtigen zu können, erfolgt in der Praxis die Einstellung der Regelung aufgrund fehlender zeitlicher Ressourcen häufig ohne ausreichende Tests, woraus sich ein reduziertes Nachhaltigkeitspotential einstellt.

Aus diesem Grund wird im ersten Teil dieser Arbeit ein cloudbasiertes Framework erweitert, welches einfache und schnelle Tests von Reglern ermöglicht und damit die Bewertung der Betriebscharakteristik erlaubt. Das Framework wird in einem simulativen Anwendungsfall zur Bewertung und Verbesserung eines Wärmepumpenreglers demonstriert. Für die Reglertests kommunizieren die Regler über eine Cloud-Plattform mit der zugehörigen virtuellen Regelstrecke. Durch eine Programmierschnittstelle sind Simulationen von modellbasierten Energiesystemen als Web-Service über die Plattform verfügbar. So können sowohl Hardware als auch virtuelle Regler mithilfe der Simulationen in der Cloud-Infrastruktur getestet werden. Für die Tests der Regler werden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt. In einer ersten wird ausschließlich der vorhandene Regler ohne Systemmodell betrachtet, in einer zweiten wird das Systemmodell für intensivere Untersuchungen hinzugezogen. Zur Bewertung der Regelqualität werden unterschiedliche Key Performance Indicators aus der Literatur, wie die integrale Regelabweichung, hinzugezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Regler im Betrieb Abweichungen vom vorgegebenen Sollwert und somit ein hohes Fehlermaß aufweist. Das dadurch reduzierte Nachhaltigkeitspotential verdeutlicht die Notwendigkeit, den Regler bereits im Auslegungsprozess integriert zu testen und an die jeweiligen Systemzustände anzupassen.

Basierend auf der Betriebscharakteristikanalyse kann die Regelung im zweiten Teil der Arbeit in den Auslegungsprozess des Wärmepumpensystems integriert werden. Dazu werden die klassische Heizkurvenregelung und die modellprädiktive Regelung als Anwendungsfälle verwendet. Dabei müssen bei einem konventionellen System die Größen der Wärmepumpe, des Heizstabes, des Pufferspeichers sowie des Trinkwarmwasserspeichers festgelegt werden. Zur Wärmepumpendimensionierung zählt implizit auch die Wahl des Kältemittels und des Kältemittelkreislaufs. Die vorgestellten Untersuchungen unterstreichen das Potential einer modellprädiktiven Regelung. Die integrale Regelabweichung wird im Vergleich zu einer Heizkurvenregelung um 60 % reduziert. Durch die verbesserte Regelung und gleichzeitiger Einhaltung des Komforts sinkt zudem der Energiebedarf um 10-20 % je nach Systemauslegung. Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, den Regelalgorithmus bereits im Auslegungsprozess festzulegen, um die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Wärmepumpensystems zu maximieren.

IV.08

Kostenoptimale Regelung von Wärmepumpen im Smart Grid

Christian Karczewski^{1*}, Tobias Henzler¹, Konstantinos Stergiaropoulos¹

¹ Universität Stuttgart,
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
christian.karczewski@igte-uni-stuttgart.de

Der Ausbau erneuerbarer nicht regelbarer Stromerzeuger und die Erhöhung der Last durch Umstellung der Wärmeversorgung auf elektrische Wärmeerzeuger in Wohngebäuden erhöhen die Notwendigkeit die Last auf Seiten der Stromverbraucher zu regeln. Die thermische Speicherfähigkeit von Gebäuden ermöglicht es Wärmepumpen als flexible Lasten zu betreiben. Für den flexiblen Betrieb der Wärmepumpe in Abhängigkeit externer Preissignale und unter Einhaltung der raumklimatischen Sollwerte sind auf der Verbraucherseite intelligente Regelalgorithmen erforderlich. Ein kostenoptimaler Betrieb der Wärmepumpen stellt Stromanbieter vor die Frage, welche Lastveränderung von den Gebäuden in seinem Bilanzkreis durch einen Preissprung hervorgerufen werden kann.

In diesem Beitrag wird zuerst ein zweistufiger Regelalgorithmus vorgestellt, der auf einer modellgestützten prädiktiven Regelung der Raumlufttemperatur basiert. Durch die Prädiktion unterschiedlicher Heizkurven wird

ein Betriebspunkt der Wärmepumpe ermittelt, der ein Optimum aus Nutzerkomfort und wirtschaftlichem Betrieb darstellt. Als weiteres Ergebnis wird in diesem Beitrag das Lastverhalten deutscher Einfamilienhäuser untersucht, welches aus einer kostenoptimalen Regelung der Wärmebereitstellung von Wärmepumpen resultiert.

IV.09

Entwicklung eines reversiblen Kältesatzes mit CO₂ als Kältemittel für Gewerbe und Quartiere

Jonas Welte

BKW Kälte-Wärme-Versorgungstechnik GmbH, Benzstraße 2, 72649 Wolfschlugen
Tel.: 07022 5003 61
j.welte@bkw-kuema.de

ist ausgefallen!

IV.10

Zukunftssichere Auslegung von RLT-Geräten im Zeichen des Klimawandels

Christian Fieberg

Westfälisches Energieinstitut, Westfälische Hochschule Gelsenkirchen Bocholt Recklinghausen,
Professor für Gebäudetechnik, Neidenburger Str. 43, 45897 Gelsenkirchen
Tel: 0209-9596-306
christian.fieberg@w-hs.de

Der Klimawandel ist mittlerweile eine allgemein anerkannte Tatsache. Daher sollten alle Maßnahmen der Technischen Gebäudeausrüstung daran gemessen werden, den Primärenergieverbrauch so gering wie möglich zu halten, dabei aber auch die geforderten Raumzustände während der Gebäude- und Anlagennutzung sicherzustellen.

Bisher wurden die möglichen Auswirkungen des Klimawandels in größeren Zusammenhängen betrachtet und beispielsweise auf Stadt- oder Quartiersplanungen angewandt. Eine Analyse der Auswirkungen für ein Gebäude oder ein einzelnes RLT-Gerät zeigt hingegen klare und praktische Erkenntnisse, die direkt in die Gebäudetechnik Eingang finden können.

Heute geplante Gebäude und deren RLT-Anlagen werden mit großer Wahrscheinlichkeit auch noch in 15 bis 20 Jahren in Betrieb sein, so dass lokale Klimaänderungen heute bereits mitgedacht und -geplant werden sollten.

Die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes bieten diese Möglichkeit mit lokalen Wetterdaten für die Bezugsjahre 2015 und 2045.

Am Beispiel eines Zentralluftgerätes einer Krankenhaus-Intensivstation wurde für die 15 Wetterstationen der VDI 4710, Blatt 3 in Deutschland untersucht, wie sich die Leistungsanforderungen von heute zum Jahr 2045 hin ändern werden und welche Konsequenzen sich daraus für die Planung ableiten lassen. Hierbei werden die Leistungen, Energieverbräuche und Betriebszeiten der einzelnen RLT-Komponenten analysiert und verglichen.

Darüber hinaus wurde erstmalig ein „Deutschlandwetter“ auf Basis der Regionen berechnet. Dieser Ansatz liefert die stündlichen Witterungsverhältnisse für das Bundesgebiet. Wenn diese Methode auf die tatsächlichen Wetterdaten der zurückliegenden Jahre angewandt wird, kann damit analog zum Wind- und Solarindex ein

Heiz- bzw. Kühlindex beschreiben werden. Damit lassen sich Modellierungsansätze zur Beschreibung der Energiewende im Gebäudesektor deutlich verbessern.

IV.11

Untersuchung von Luftströmung in großen Räumen mit Verringerung des Simulationsaufwandes

Stephan Lehr^{1*}, Thomas Tian²

¹ Technischer Berater, August-Bebel-Str. 15D, 01219 Dresden, Deutschland
info@lehrconsulting.de

² Tian Building Engineering, Kronberger Str. 10, 14193 Berlin, Deutschland
thomas.tian@building-engineering.de

Räume für große Personenzahlen wie Theater, Oper oder Kino, zusammenfassend als Saal zu bezeichnen, werden neben Kühl- und Heizflächen zur Klimatisierung auch mit Zuluft versorgt. Dabei wird im einfachsten/üblichen Fall die zugeführte Luftmenge pro Person zur Abführung der thermischen Last bzw. zur Einhaltung des CO₂-Wertes (z. B. < 1000 ppm) nach aktueller Norm, nach veralteten Normen oder nach Empfehlungen verwendet und keine weitere Detailbetrachtung z.B. zur lokalen Behaglichkeit (CO₂-Wert, Geschwindigkeit) durchgeführt. Bereiche mit unbehaglichen Zuständen im Saal sind so nicht zu erkennen und Hinweise, welche auch preisrelevant sein können, sind so nicht zu geben.

Eine vertiefte Betrachtung ermöglicht eine Strömungssimulation zur Ermittlung von Größen wie der Luftgeschwindigkeit w , der Raumlufttemperatur t , der Kohlenstoffdioxidkonzentration CO₂ oder des Luftalters im Detail und an beliebigen Stellen der simulierten Geometrie. Die Simulation muss aber als zusätzlicher Aufwand im Planungsprozess der Technischen Gebäudeausrüstung (HOAI) erbracht werden. Argumente für Simulationen sind einerseits die lizenzfreie Nutzung von Freeware wie bspw. für die Strömungsmechanik das Programm OpenFOAM in der Industrie- oder Universitätsversion und andererseits Programme zur effizienten Geometriebearbeitung wie das Programm BIMHVACTool, welche hier zum Einsatz kommen.

Weiterhin ist der Bearbeitungsaufwand des Simulationsingenieurs abhängig von der Detailierung der Geometrie als auch den Fehlern in einer zur Verfügung gestellten Geometrie. Der Berechnungsaufwand ist z. B. abhängig von der Detailtiefe durch eine gesteigerte Anzahl von Berechnungspunkten, auf welche durch Vereinfachung von Geometrieinformationen Einfluss genommen werden kann, z. B. bei der Art der Abbildung der Personen, und der Vergabe der Randbedingungen.

Dieser Beitrag zeigt an der Geometrie eines generischen Saals verschiedene Ansätze zur Vereinfachung einer Strömungssimulation und somit prinzipielle Möglichkeiten einer Verringerung des Bearbeitungs- und Berechnungsaufwands auf. Die Ergebnisse werden hinsichtlich des Einflusses der Vereinfachungen der Strömungssimulation (w , t , CO₂) bewertet.

Stichwörter:

numerische Simulation, Behaglichkeit, Klimatisierung, OpenFOAM/BIMHVACTool

IV.12

Optimierte Luftführung bei maschineller Lüftung von Klassenräumen

Anders Berg^{*}, Tobias Henzler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart
Tel: +49 711/685-62088
anders.berg@igte.uni-stuttgart.de

Die kontinuierliche Verschärfung der energetischen Anforderungen führen dazu, dass Gebäudehüllen von neu errichteten oder sanierten Gebäuden hochgedämmt und luftdicht ausgeführt werden. Dies hat zur Folge, dass die Infiltration wesentlich verringert wird, so dass der hygienisch erforderliche Außenluftwechsel für das Gebäude ohne Lüftungstechnische Maßnahmen nicht erreicht werden kann. Auch mit einer häufig eingesetzten Fensterlüftung kann die geforderte Luftqualität im Raum nicht dauerhaft sichergestellt werden. In Schulen, die in der Regel eine hohe Personenbelegungsdichte aufweisen, wirkt sich eine unzureichende Raumluftqualität negativ auf das Lernvermögen und die Leistungsfähigkeit der Schüler aus.

Um die geforderte Luftqualität im Aufenthaltsbereich von Schülern zu gewährleisten, ist daher eine maschinelle Lüftung erforderlich. Hierbei ist jedoch nicht nur der nominelle Außenluftstrom relevant, sondern auch die örtliche Luftverteilung im Raum, die u. a. von der Anordnung der Luftdurchlässe abhängig ist. Deren Wirksamkeit kann über die Lüftungseffektivität im Aufenthaltsbereich bewertet werden. Durch eine hohe Lüftungseffektivität kann bei gleichem Außenluftstrom eine verbesserte Raumluftqualität für die Personen im Raum erreicht werden. Folglich besteht bei einer verbesserten Lüftungseffektivität die Möglichkeit, den Außenluftstrom ohne Beeinträchtigung der Luftqualität zu reduzieren. Dadurch können entsprechende energetische Einsparungen für den Lufttransport und die -konditionierung und somit eine Reduktion der CO₂-Emissionen erzielt werden.

Ziel des vorgestellten Forschungsvorhabens ist es, einen Planungsleitfaden für eine optimierte Luftführung in Klassenräumen zu erstellen. Dafür werden zunächst die Lüftungseffektivitäten von häufig eingesetzten Schullüftungskonzepten ermittelt und deren Defizite aufgezeigt. Hierzu werden für ein Referenzklassenzimmer Strömungssimulationen und experimentelle Untersuchungen durchgeführt und dabei die Auswirkungen der Luftführung im Raum analysiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Optimierungsmaßnahmen für die Luftführung entwickelt, die stabile Raumzustände und die Sicherstellung der Luftqualität bei unterschiedlichen Nutzungsrandbedingungen ermöglichen. Zur Ermittlung des Energieeinsparpotentials durch eine verbesserte Lüftungseffektivität werden anhand von thermisch-energetischen Jahressimulationen die Energieaufwände unterschiedlicher Luftführungskonzepte verglichen. Abschließend werden die Erkenntnisse des Vorhabens in einen Planungsleitfaden als Hilfestellung für Fachplaner überführt.

In diesem Beitrag werden die bisherigen Ergebnissen der Strömungssimulationen und der experimentellen Untersuchungen vorgestellt.

IV.13

Charakterisierung von Lüftungseffektivität und thermischer Effizienz von Pendellüftern

Sven Auerswald^{1*}, Thibault Pflug¹, Arnulf Dinkel¹, Constanze Bongs¹

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
sven.auerswald@ise.fraunhofer.de

Als ein Teil der Transformation des deutschen Energiesystems, mit dem Ziel bis zum Jahr 2030 die Treibhausgasemissionen um 55 % gegenüber 1990 zu senken, muss auch der Wohngebäudebestand energetisch modernisiert werden. Neben weiterentwickelten Technologien zur Energiebereitstellung ist für dieses Ziel auch eine Verbesserung der Gebäudeeffizienz notwendig. Dies führt nach Sanierung meist zu einer höheren Luftdichtigkeit der Gebäude. Damit entsteht die Herausforderung, dass die Innenräume effektiv mit ausreichend Frischluft versorgt werden müssen unter gleichzeitiger Minimierung der Lüftungswärmeverluste. Hierzu ist der Einsatz von Lüftungsgeräten mit Wärmerückgewinnung zielführend. Werden dezentrale Geräte eingesetzt, geschieht dies über kontrollierte Gebäudehüllendurchbrüche in Kombination mit Einheiten zur Wärmerückgewinnung aus der Gebäudeabluft. Ein Beispiel für derartige Systeme aus dem

Wohngebäudebereich sind die Pendellüfter. Bei diesen Geräten handelt es sich um raumweise dezentral und paarweise in die Fassade integrierte Lüftungsgeräte. Pendellüfter aktivieren ihre regenerative Wärmerückgewinnung durch eine alternierende Betriebsweise des Lüftungsvolumenstroms. Hierbei nimmt ein Wärmespeicherelement (Regenerator) in der Abluftphase die Wärme aus dem Abluftstrom auf und gibt diese in der Zuluftphase wieder an die Zuluft ab. Aufgrund ihrer einfachen Einsetzbarkeit in der Sanierung bestehender Gebäude haben diese Geräte in den letzten Jahren deutliche Marktzuwächse verzeichnet. Durch die alternierende Betriebsweise und dezentrale Anordnungen entstehen jedoch neue Fragestellungen in Hinsicht auf Lüftungseffektivität und Effizienz der Wärmerückgewinnung. Zur Charakterisierung der Lüftungseffektivität von Pendellüftersystemen wurde in Feldmessungen verschiedener Gebäude der erreichte Luftaustausch mittels CO₂ als Spurengas nach ISO 16000-8 bewertet. Parallel dazu wurde mithilfe eines neu errichteten Teststandes nach dem Spülluftverfahren aufbauend auf der EN 13141-8 die Energieeffizienz der Wärmerückgewinnung bewertet. Für beide Charakterisierungen wurde insbesondere auf das Rezirkulations- und Kurzschlussverhalten der Geräte eingegangen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in dem Beitrag vorgestellt.

IV.14

Techno-ökonomische und ökologische Perspektiven für Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand

Stefan Hess¹, Katrin Scharf¹, Jeannette Wapler², Rebekka Eberle¹,
Raphael Vollmer¹, Constanze Bongs², Hans-Martin Henning¹

¹ Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH,
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg
stefan.hess@inatech.uni-freiburg.de

² Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Wärmepumpen (WP) haben ein hohes Potential zur Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen im Gebäude-sektor. In Deutschland betrug ihr Marktanteil bei neu gebauten Einfamilienhäusern im Jahr 2020 bereits 46 %. Bei Mehrfamilienhäusern (MFH) betrug der Anteil im Neubau 24 %, Tendenz steigend. Bei der Gebäudesanierung hat die WP allerdings bislang nur einen Anteil von insgesamt 6 %, von denen ein Großteil auf Einfamilienhaus-Sanierungen entfallen dürfte. Die Verbreitung der WP im MFH-Bestand ist also noch sehr gering.

Bei bestehenden MFH gibt es technische Herausforderungen wie die hohen Temperaturniveaus für Trinkwarmwasser und Raumwärme und die begrenzte Flächen-Verfügbarkeit für Erdsonden bzw. Geräuschemissionen von Außenluft-Einheiten. Wirtschaftliche Hemmnisse sind erheblich höhere Investitionskosten im Vergleich zum Gaskessel sowie das Investor-Nutzer-Dilemma bei Mietwohnungen. Entwicklungen im Energiesystem (CO₂-Abgabe, verringerte Netzentgelte, Power2Gas Technologien, etc.) werden voraussichtlich jedoch dazu führen, dass sich die Wirtschaftlichkeit der WP im MFH-Bestand verbessert. Zusätzlich werden durch den weiter stark steigenden Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor die spezifischen CO₂-Emissionen von WP weiter stark abnehmen.

Im Projekt LowEx-Bestand (www.lowex-bestand.de) wurden für verschiedene Größen sanierter MFH aus den 1960er Jahren techno-ökonomische und ökologische (CO₂-basierte) Vergleiche zwischen Gaskessel, monoenergetischer Kompressions-WP und bivalentem System bestehend aus WP und Gaskessel durchgeführt. Invest-Zeit-punkt war das Jahr 2020, Betrachtungszeitraum bis 2040. Es wurde jeweils die Barwert-optimierte Kombination zwischen Sanierung der Gebäudehülle und Vollkosten des Wärme-Bereitstellungssystems ermittelt. Die Investitionskosten der System- und Hüllkomponenten basierten dabei auf dem Baukosten-Index. Mögliche zukünftige Entwicklungen der Strom- und Gas-Bezugspreise und der spezifischen CO₂-Emissionen von Gas und Netzstrom wurden aktuellen Studien entnommen. Es wurden umfassende Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Die beispielhaften Ergebnisse zeigen, dass im Fall des sanierten MFH die beiden Wärmepumpen-Lösungen vergleichbare Wärme-Gestehungskosten erreichen wie das Gaskessel-System (incl. BAFA-Förderung von 35 % Investitionszuschuss für das mono-energetische WP-System und 30 % für das bivalente System). Die gegenüber dem Gaskessel eingesparten CO₂-Emissionen liegen im Fall kostenoptimal ausgelegter und betriebener Systeme während der Nutzungsdauer für das bivalente WP-System bei 45 %, für das mono-energetische System bei 60 %.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Mehrfamilienhaus, LowEx-Bestand, Energieeffizienz, Treibhausgas-Emissionen

IV.15

Klimafreundliche Wärmepumpen für den sanierten Gebäudebestand

Methodik zur Langzeitmessung im Feld

**Thore Oltersdorf^{1*}, Clemens Dankwerth¹, Sebastian Helmling¹, Jeannette Wapler¹, Torsten Will¹
Johannes Brugmann², Christian Penner²**

¹ Fraunhofer ISE, Wärmepumpen- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 12, 79102 Freiburg, Deutschland
thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de

² Stiebel Eltron GmbH & Co KG, Dr.-Stiebel-Straße 33, 37603 Holzminden, Deutschland
christian.penner@stiebel-eltron.de

Zur umweltfreundlichen Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern bedarf es heute neuer Konzepte, die den diversen Anforderungen größerer Gebäude gerecht werden. Je nachdem mit welchem Anspruch Dämmung und Heizenergiebedarf ausgelegt und umgesetzt wurden, kommt es zu unterschiedlichen Anteilen an Wärmeenergie für Warmwasserbereitung oder Heizenergiebedarf in einem sanierten Altbau. In jedem Fall besteht Bedarf nach einer hohen Vorlauftemperatur: dies ergibt sich aus den versorgungstechnischen Randbedingungen solch sanierter Gebäude. Erstens kann für den Heizbetrieb nicht in jedem Fall von Flächenheizungen ausgegangen werden. Zweitens kann es sich gemäß DVGW W 551 bei der Warmwassererzeugung um eine Großanlage handeln, so dass am Speicheraustritt 60°C bereitgestellt werden kann.

Mit Hilfe dieser Spezifikationen wurde eine innovative Wärmepumpe großer Leistung mit dem Ziel entwickelt, eine akzeptable Anlageneffizienz bei niedrigen Außenbedingungen zu erreichen. Der Kältekreis wurde ausgelegt und in Betrieb genommen auf Basis des Kältemittels R454C, welches einen GWP₁₀₀ von 148 aufweist. Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des BMWi-Projektes „Neue Kältemittel für Hochtemperatur-Wärmepumpen“ (FKZ 03ET1488). In diesem Beitrag werden die Projektergebnisse vorgestellt. Dabei wird auf wichtige Zwischenziele, die experimentelle Vermessung der letztlich entwickelten Anlage und erste Feldversuchsergebnisse eingegangen.

Stichwörter:

Wärmepumpe, R454C, Mehrfamiliengebäude, Enthitzer, Feldversuch

IV.16

Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand: Feldergebnisse

Constanze Bongs^{1*}, Jeannette Wapler¹, Arnulf Dinkel¹

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
constanze.bongs@ise.fraunhofer.de

Zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands spielt die Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudesektor eine zentrale Rolle. Insbesondere im Gebäudebestand liegen aufgrund niedriger Sanierungsraten und im Regelfall konventioneller Ersatzlösungen für bestehende Heiztechnik besondere Herausforderungen vor. Gegenstand des laufenden Projektvorhabens „LowEx-Bestand“ [1] ist es, für das Segment der Bestands-Mehrfamilienhäuser (MFH) Systemlösungen aufzuzeigen, die es ermöglichen, auch in diesen Gebäuden einen Beitrag zur Dekarbonisierung zu leisten. Im Schwerpunkt werden hier Wärmepumpensysteme untersucht. Neben umfangreichen theoretischen Untersuchungen werden im Projektverbund LowEx im Bestand unterschiedliche Lösungen für Wärmepumpensysteme in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden entwickelt und in die Praxis gebracht. Diese umfassen Hybridwärmepumpen mit optimierten Regelungsansätzen, die Anwendung von PVT-Kollektoren als Wärmequelle für das Wärmepumpensystem, die Entwicklung eines kombinierten Wärmequellensystems aus Luftaußeneinheit und Erdsonde sowie die Entwicklung eines Hochtemperatur-Wärmepumpensystems mit neuartigem Low-GWP Kältemittel. Diese im Rahmen des Projekt-Verbunds entwickelten Lösungen und deren Umsetzungen im Feld werden vorgestellt. Weiter werden exemplarische Ergebnisse aus dem begleitenden wissenschaftlichen Monitoring der umgesetzten Anlagen präsentiert.

[1] Projekt-Verbund „LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von sanierten Bestandsgebäuden (LowEx-Bestand)“:
www.lowex-bestand.de

IV.17

Arbeitstitel: Groß-Wärmepumpen in Deutschland

M. Wördemann

Viessmann Deutschland GmbH, Kanalstraße 13, 12357 Berlin
wodm@viessmann.com

IV.18

Hochtemperaturwärmepumpen bis zu 250°C

Eine Konzeptstudie und EU-Forschungsvorhaben

Franz Helminger^{1*}, Johann Geyer², Julian Unterluggauer¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria
franz.helminger@ait.ac.at

² Enertec Naftz & Partner GmbH & Co KG, Asperngasse 4, 8020 Graz, Austria

Elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen haben sich als geeignet erwiesen, um in Industrieprozessen Wärme auf nachhaltige und effektive Weise bereitzustellen und damit die Gesamtenergieeffizienz zu verbessern. Wärmepumpen mit für industrielle Anwendungen ausreichender Leistung sind nach dem Stand der Technik für Vorlauftemperaturen bis 100 °C marktverfügbar. Einzelne Hersteller bieten Hochtemperaturwärmepumpen mit Vorlauftemperaturen bis 130°C [1] an. Verschiedene Projekte mit Demonstrationsanlagen auf TRL7 zeigen die technische Machbarkeit von Nutzungstemperaturen bis etwa 150 °C [2][3]. Eine Erhöhung der technisch realisierbaren Nutzungstemperaturen erhöht das Umsetzungspotenzial, sie birgt jedoch Problemstellungen hinsichtlich Verdichtertechnologie, Kältemittel und Kreislaufdesign. Außerdem ist mit einer

Steigerung des Temperaturhubes zwischen Wärmequellentemperatur und Wärmenutzungstemperatur zu rechnen. Bei steigendem Temperaturhub sinkt die Wärmepumpeneffizienz, für einen wirtschaftlichen Betrieb muss die Effizienz jedoch ausreichend hoch sein. Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz, die bisher wenig beachtet wurden, rücken in den Vordergrund.

In diesem Beitrag wird eine Studie für ein Kompressionswärmepumpenkonzept präsentiert, welches Nutzungstemperaturen bis zu 250°C ermöglicht. Es werden Lösungsansätze für die Problemstellungen dieser Entwicklung adressiert. Des Weiteren werden die Rahmenbedingungen für die Entwicklung dieses und ähnlicher Konzepte dargestellt, die unter anderem vom EU-Forschungsvorhaben im Programm Horizon Europe: Cluster 5 "Klima, Energie und Mobilität" im Call „HORIZON-CL5-2022-D4-01-04: Development and pilot demonstration of heat upgrade technologies with supply temperature in the range 150-250°C“ voraussichtlich ab Herbst 2022 gefördert werden. [4]

- [1] Arpagaus C, et al.: "High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials." Energy 152: 985–1010. doi:10.1016/j.energy.2018.03.166.
- [2] BAMBOO Projekt: <http://bambooproject.eu/> (accessed April 29, 2021)
- [3] DryFiciency Project website. <http://dry-f.eu/About> (accessed April 29, 2021)
- [4] European Commission: HORIZON EUROPE Working document - Cluster 5 "Climate, Energy and Mobility", https://www.ffg.at/sites/default/files/downloads/HORIZON-CL5-2021-2022_version%202021-02-24.pdf (accessed April 29, 2021)

Stichwörter:

Hochtemperaturwärmepumpen, Konzeptstudie, Nutzungstemperaturen bis 250°C

IV.19

Hochtemperaturwärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Fallstudien zur HTWP-Integration für industrielle Kälte- und Prozessheißwasserherstellung

Christian Schlemminger^{1*}, Marcel U. Ahrens^{2*}, Sverre Fossli¹, Ole Marius Moen¹, Michael Bantle¹,
Armin Hafner², Sigmund Jenssen³

¹ SINTEF Energy Research, Sem Sælands vei 11, NO-7465 Trondheim, Norwegen
Christian.Schlemminger@sintef.no

² Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,
Kolbjørn Hejes vei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen

³ Cadio AS, Terminalen 6, 7080 Heimdal

Thermische Prozesse in der Nahrungsmittelindustrie, z. B.: Molkereien, sind oftmals eine Kombination aus Erwärmung und Abkühlung eines Produktes. Prozesskühlung wird dabei meistens mittels einer Wärmepumpe erzielt, wobei Prozesswärme häufig konventionell durch die Nutzung fossiler Energieträger erzeugt wird. Integrierte Wärmepumpensysteme zur kombinierten Bereitstellung von Prozesskühlung und -wärme haben aufgrund der erzielbaren Energie- und Emissionseinsparungen gerade vor dem Hintergrund des Pariser Klimavertrags ein hohes Marktpotential.

Diese Arbeit untersucht zwei verschiedene Fallbeispiele zur Integration von Hochtemperaturwärmepumpen:

Erstens, die Integration und den Test einer neu entwickelten industriellen Hochtemperaturwärmepumpe zur Nachrüstung in einer existierenden Molkerei. Es kommen natürliche Kältemittel (R290 und R600) in einer Kaskade zum Einsatz, um zukünftige Beschränkungen und Herausforderungen mit synthetischen Kältemitteln zu umgehen. Zur Prozesskühlung wird an der Wärmequelle Eiswasser mit 0,5 °C geliefert und an der Wärmesenke Heißwasser mit 115 °C. Die Kaskade liefert 330 kW_{th} mit einer kombinierten Leistungszahl von 3,2 ± 0,3. Der kombinierte Carnot-Wirkungsgrad beträgt circa 55 %.

Zweitens, wird der Anlagenbetrieb einer neu gebauten und voll integrierten Molkerei analysiert, wobei der gesamte Prozessbedarf von Wärmepumpen gedeckt wird. Hierzu wird eine Kombination aus NH₃-Kaltwassersatz

(2400kW_{th}, -1,5 °C / 40 °C), NH₃-Wärmepumpe (1577 kW_{th}, 20 °C / 67 °C) und NH₃-H₂O Hybrid-Hochtemperaturwärmepumpen (940 kW_{th}, 60 °C / 95 °C) verwendet. Zur Entkopplung der Wärmequellen und -senken wurden thermische Energiespeicher eingesetzt. Die ermittelten Leistungszahlen der Anlagen sind 4,2, 5,3 und 5,9, was kombinierte Carnot-Wirkungsgrade von 55 %, 65 % und 53 % ergibt.

Die untersuchten Fallbeispiele zeigen, dass es technisch möglich ist durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln die Treibhausgasemissionen um bis zu ca. 92 % und der Primärenergieverbrauch um bis zu ca. 57 % zu verringern.

Stichwörter

Propan-Butan-Kaskade, NH₃, Hybrid, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Eiswasser, Heißwasser, Industriell, Natürliche Kältemittel

IV.20

Wärmepumpen im Fernwärmenetz

Potenziale und Kältemittelbetrachtung im Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele

Simon Keller*, Thomas Lergenmüller

GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Straße 165, 13509 Berlin, Deutschland

Simon.Keller@gea.com

Die Erreichung der Klimaschutzziele 2050 in Deutschland setzt flächendeckende Maßnahmen in den einzelnen Sektoren in Deutschland voraus. Im Bereich der Wärmeerzeugung können neben der dezentralen Wärmeerzeugung auch Wärmenetze als zentrales Instrument künftig einen großen Beitrag für die Einsparung von CO₂-Emissionen leisten, indem fossil befeuerte Systeme durch elektrisch betriebene Wärmepumpen ersetzt werden.

Die Entwicklung der Fernwärme und deren Abhängigkeiten von unterschiedlichen Bereichen wird erläutert und vor allem der Einfluss sinkender Netztemperaturen deutlich gemacht. Damit die Wärmepumpe den Anforderungen der Wärmeverbraucherseite gerecht werden kann, werden Möglichkeiten der Quellennutzung mit den zugehörigen Potenzialen gegenübergestellt.

Aus dieser Gesamtbetrachtung heraus werden die spezifischen Temperaturanforderungen der Wärmequelle und des Wärmenetzes aufgezeigt und der Einsatz natürlicher und synthetischer Kältemittel diskutiert. Die Gegenüberstellung der spezifischen Kältemittelleigenschaften ermöglicht theoretisch die Bestimmung eines für den spezifischen Anwendungsfall optimalen Kältemittels, um den Anforderungen einer Wärmepumpenanlage im Wärmenetz gerecht zu werden.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Fernwärme, Potenziale, natürliche Kältemittel

IV.21

Vergleich der Rotationswärmepumpe mit Hochtemperatur-Kompressionswärmepumpen in industriellen Prozessen

Andreas Längauer^{1*}, Bernhard Adler¹, Cordin Arpagaus², Frédéric Bless², Stefan Bertsch²

¹ ecop Technologies GmbH, Forschung & Entwicklung, Perfektastraße 73, A-1230 Wien, Österreich

andreas.laengauer@ecop.at

² OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme,

Werdenbergstrasse 4, CH-9471 Buchs, Schweiz

Die auf dem Joule-Prozess basierende Rotationswärmepumpe (RHP) verfolgt das Prinzip der Rotationsverdichtung durch Zentrifugalkräfte. Das Arbeitsmittel ist immer gasförmig, daraus resultiert eine sensible Wärmeübertragung der thermischen Leistung sowohl von Quelle als auch Senke. Im Vergleich zu konventionellen Kompressionswärmepumpen ergibt sich dadurch eine wesentlich größere Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt der Prozessmedien. Das erlaubt speziell in industriellen Prozessen mit geringen Massenströmen große thermische Leistungen zu übertragen und eine Quelle verhältnismäßig stark abzukühlen. Gleichzeitig ist die RHP variabel in der Leistungsregelung und der Einstellung des Temperaturhubs. Diese Eigenschaften sind wesentliche Unterscheidungsmerkmale und verlangen auch hinsichtlich des Vergleiches mit idealisierten Prozessen neue Herangehensweisen. Wird für Kompressionswärmepumpen hierzu der Carnot-Prozess herangezogen, ist für eine RHP der Lorenz-Prozess möglicherweise besser geeignet. Basierend auf diesen Betrachtungen werden wesentliche Unterscheidungsmerkmale dieser Technologien für verschiedene industrielle Anwendungen ausgearbeitet und zusammengefasst. Als konkretes Beispiel wird die Verwendung verschiedener Wärmepumpensysteme in einem Destillationsprozess herangezogen und vorgestellt. Wesentlich und essenziell für viele Anwendungen ist auch die Eigenschaft, dass der Joule-Prozess bei hohen Temperaturen umgesetzt werden kann. Abschließend werden im Ausblick weitere mögliche Anwendungen und deren Vor- und Nachteile durch sensible Wärmeübertragung vorgestellt.

Stichwörter

Rotationswärmepumpe, Hochtemperatur, Joule-Prozess, Lorenz-Prozess

IV.22

Hochtemperaturwärmepumpe

Add-on NH₃-Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Abwärmenutzung einer bestehenden Kälteanlage

Philipp Wagner^{1*}, Manuel Verdnik¹, René Rieberer¹, Thomas Demmerer², Mathias Blaser²

¹Institut für Wärmetechnik - Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
philipp.wagner@tugraz.at

²ENGIE Kältetechnik GmbH, Langegasse 19, 6923 Lauterach, Österreich
mathias.blaser@engie.com

Industrielle Prozesse weisen ein deutliches Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie des Energieverbrauchs auf. Hochtemperatur-Wärmepumpen können dabei vor allem für die Bereitstellung von Prozesswärme bei höheren Temperaturen eingesetzt werden, welche vorzugsweise durch Anhebung des Temperaturniveaus vorhandener Abwärme erzeugt wird. Die Erweiterung bereits in Betrieb befindlicher Kältesysteme um Hochtemperatur-Wärmepumpen bietet dabei die Möglichkeit, die Gesamteffizienz bestehender industrieller Prozesse zu verbessern.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Aufrüstung einer bestehenden Ammoniak (NH₃)-Kälteanlage um eine NH₃-Hochtemperatur-Wärmepumpe betrachtet. Die Abwärme der Kälteanlage wird dabei auf eine Temperatur von ca. 90 °C angehoben und für ein Cleaning-in-Place (CIP)-System einer Molkerei genutzt. Die Nennkälteleistung der Kälteanlage beträgt 900 kW, die Nennheizleistung der Hochtemperatur-Wärmepumpe 550 kW.

Erste Messungen während der Inbetriebnahmephase wurden unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Darüber hinaus wurde das dynamische Verhalten der Kälteanlage, der Hochtemperatur-Wärmepumpe und des CIP-Systems untersucht. Die bei den experimentellen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse liefern Informationen zur Festlegung des notwendigen Detaillierungsgrades für ein dynamisches Simulationsmodell des Gesamtsystems.

Stichwörter

Ammoniak, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Abwärmenutzung, CIP, Molkerei

IV.23

Entwicklung, Aufbau und Simulation einer Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme und -kälte

Steffen Klöppel^{1*}, Enrico Jende², Göksel Özüylasi¹

¹ Institut für CO₂-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Schwenninger Weg 1, 02763 Zittau
steffen.kloeppe@dlr.de

² Institut für CO₂-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Walther-Pauer-Straße 5, 03046 Cottbus

Die Vermeidung der Emissionen klimaschädlicher Gase stellt eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. Während die Erzeugung elektrischer Energie die entsprechende öffentliche Diskussion dominiert, haben sowohl die Stoffumwandlung als auch die Prozesswärme in der Industrie einen hohen Anteil an den Gesamtemissionen.

Um die Industrie bei dem Erreichen ihrer Dekarbonisierungsziele zu unterstützen, wurde das Institut für CO₂-arme Industrieprozesse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt mit den Standorten Cottbus und Zittau gegründet.

Ein Schwerpunkt des Institutes ist die Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen mit Wärmesenktemperaturen deutlich oberhalb von 150 °C, welche bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom die klimaneutrale Wärmebereitstellung ermöglichen. Darüber hinaus spielen diese Systeme eine zentrale Rolle bei der Primärenergieeinsparung in der Industrie, besonders durch die Aufwertung von Abwärme.

Im Hinblick auf eine zunehmende Besteuerung der CO₂-Emissionen bei gleichzeitig steigendem Anteil der erneuerbaren Energien an der Elektroenergieerzeugung werden Hochtemperaturwärmepumpen zukünftig auch ökonomisch gegenüber fossilen Feuerungsanlagen an Bedeutung gewinnen.

In diesem Beitrag wird ein erster Versuchskreislauf auf Basis des linksläufigen Brayton-Prozesses mit interner Wärmerückgewinnung vorgestellt. Dieser erlaubt die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme bei bis zu 350 °C und Kälte bis -80 °C. Als eine mögliche Anwendung wird die Gasverflüssigung bei gleichzeitiger Erzeugung von Prozessdampf diskutiert. Insbesondere für Luftzerlegungsanlagen in Chemieparks ergeben sich dabei mögliche Anwendungen.

Um auch bei komplexen Systemen eine hohe Gesamtenergieeffizienz bei der Integration von Wärmepumpen zu erreichen, wird zusätzlich eine flexible Simulationsumgebung erstellt. Diese erlaubt es eine Vielzahl an Energieströmen im zeitlichen Verlauf abzubilden und somit eine optimale Auslegung und Fahrweise der Wärmepumpe zu erreichen.

Stichwörter

Hochtemperaturwärmepumpe, Industrielle Wärme, Brayton-Prozess

Rechenzentrum

RZ 01

**Eröffnung und Einführung
Grundlagen und Rahmenbedingungen
für die richtige RZ-Klimatisierung**

Ulrich Terrahe

dc-ce RZ-Beratung GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main
u.terrahe@dc-ce.de

RZ.02

**Zukunft der Rechenzentren in Frankfurt/Main –
erneuerbar heizen mit Daten**

Paul Fay

Energierreferat, Energiekonzepte Versorgungstechniken Energiestrategie Stadt Frankfurt am Main
paul.fay@stadt-frankfurt.de

ist ausgefallen!

RZ.03

**Effiziente indirekte freie Kühlung – Erfahrung aus 4 Jahren Betrieb –
Anwenderbericht**

Dennis Seliger^{1*}, T. Reyentanz²

¹NTT Data Business Solutions Global Managed Services GmbH
denis.seliger@itelligence.de

²dc-ce RZ Beratung GmbH & Co. KG

ist ausgefallen!

RZ.04

**Forschungsprojekt HotFIAD:
Abwärmenutzung aus Kompakt-Rechenzentren
mit Hot-Fluid-Adsorptionskälte-System**

Nasir Asadov

Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut (HRI), Berlin
nasir.asadov@tu-berlin.de

RZ.05

Digitalisierung der Inbetriebnahme mithilfe von Cloud-Plattformen

Marc Baranski^{1*}, Johannes Fütterer¹, Henrik Ziegeldorf¹, Horst Zacharias²

¹ aedifion GmbH, Hohenzollernring 72, 50672 Köln, Deutschland
mbaranski@aedifion.com

² NEXZA GmbH & Co. KG, Eichhörchenweg 10, 31789 Hameln

ist ausgefallen!

RZ.06

Clean Cooling – Wasser als Kältemittel effizient nutzen

Torben Eismann

Efficient Energy GmbH, Feldkirchen
torben.eismann@efficient-energy.de

RZ.07

Direkte Flüssigkeitskühlung – integrierte Kühllösung auf Datenschrankebene

Steffen Leuschner

DataCenter & Networking Solutions SCHROFF GmbH, Straubenhardt
Steffan.Leuschner@rdm.com

RZ.08

Rechenzentrums-Kühlung mit Warm/Kaltluftseparation

D. Hackenberg

Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechner der TU Dresden

Rechenzentrum

RZ.09

**Besichtigung des Rechenzentrums
der Technischen Universität Dresden / ZIH
(Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechner)**

D. Hackenberg

Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechner der TU Dresden