

Deutsche Kälte- und Klimatagung 2017

Bremen

22. – 24. November 2017

Kurzfassungen

Veranstalter:

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

Striehlstraße 11
30159 Hannover
T. +49 (0) 511 897 0814
F. +49 (0) 511 897 0815
E. info@dkv.org
H. www.dkv.org

Maritim Hotel Bremen

Hollerallee 99
28215 Bremen
T. +49 (0)421 3789-0
F. +49 (0)421 3789-646
E. info.bre@maritim.de
H. www.maritim.de

Inhaltsverzeichnis

Arbeitsabteilung I.....	4
Kryotechnik	
Arbeitsabteilung II.1.....	16
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung II.2.....	31
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung III.....	46
Kälteanwendung	
Arbeitsabteilung IV.....	60
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	
Studentenvorträge	76
Sonderthema: "Energieeffizientes Rechenzentrum".....	84

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

I.01

Axiales Schwappen kryogener Flüssigkeiten unter Mikrogravitation

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael E. Dreyer^{1*}

¹ Fachgebiet Strömungsmechanik, Fachbereich Produktionstechnik – Maschinenbau und Verfahrenstechnik,
ZARM, Am Fallturm 2, 28359 Bremen, Deutschland
dreyer@zarm.uni-bremen.de

In der Raumfahrt werden kryogene Flüssigkeiten als Treibstoffe verwendet und in Tanks mitgeführt. Sie weisen aufgrund ihrer geringen Oberflächenenergie einen Randwinkel von $\gamma_s = 0^\circ$ auf. Dies führt bei Kompensation der Gravitation zu einem schnellen Anstieg des Flüssigkeitsmeniskus an der Tankwand. Eine Kapillarwelle bewegt sich so ins Zentrum des Gefäßes und löst eine axiale Schwappbewegung aus, deren Frequenz vom Randwinkel abhängig ist.

In einem Glaszyylinder innerhalb eines LN2- bzw. LHe-Badkryostaten wurden verschiedene kryogene Flüssigkeiten, darunter Argon (LAr), Methan (LCH4) und Wasserstoff (LH2) aus reinen Dampf kondensiert. Zum Teil wurden die Wände des Zylinders gegenüber der Sättigungstemperatur beim vorherrschenden Druck überhitzt und das Gesamtsystem anschließend im Fallturm der Universität Bremen für 4.74 s kompensierter Gravitation ausgesetzt.

Während die axiale Schwappfrequenz bei isothermen Experimenten Übereinstimmung mit Literaturdaten für das axiale Schwappen mit niedrigem Randwinkel zeigt, führt eine Überhitzung der Wand zum Verdampfen von Flüssigkeit am Meniskus. Zudem verlangsamt der Rückstoß der Verdampfung den Anstieg an der Wand. Diese beiden Effekte führen zu einer Erhöhung der Schwappfrequenz bei zunehmender Überhitzung der Behälterwand. Zudem steigt der Druck während der Experimente mit zunehmender Überhitzung an, da die verdampfende Masse zunimmt.

Stichwörter:

Wasserstoff, Mikrogravitation, axiales Schwappen

I.02

Entwicklung einer neuartigen kryogenen PU-Isolation für die Arianne 6-Treibstofftanks

W. P. P. Fischer

Arianne Group GmbH, Bremen
wolfgang.wo.fischer@ariane.group

In den letzten Jahren hat Arianne Group GmbH in Bremen verschiedene Entwicklungen auf dem Gebiet von kryogenen Isolationen für die Treibstofftanks von Startraketten ausgeführt. Eigene sowie Untersuchungsprogramme verschiedener Institutionen von auf dem Markt erhältlichen thermischen Schutzsystemen führten zu der Erkenntnis, dass die besonderen Anforderungen von Startraketten entweder gar nicht oder nur sehr ungenügend von diesen Systemen erfüllt werden können. Das führte dazu, dass AG eine eigene Entwicklung startete und in den letzten Jahren zur Produktreife gebracht hat. Die vorliegende Abhandlung beschreibt die Hauptanforderungen sowie den Entwicklungsprozess der vergangenen Jahre einschließlich der korrespondierenden Prüfmethoden. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf die Entwicklung der Externen Thermischen Isolation (ETI) wie sie nun auf der neuen ARIANE 6 Startrakete zum Einsatz kommen wird.

Es werden ebenfalls einige Charakteristika aufgeführt, die die Besonderheit dieses thermischen Schutzsystems ausmachen.

Stichwörter:

Isolation, kryogen, PU

I.03

Hochflexible kryogene Transferleitungen für Wasserstoff

H. Schulz, J. Essler

Nexans Deutschland GmbH, Hannover

juergen.essler@nexans.com

I.04

LH2 und LOX – Versorgung für den Ariane 6 Oberstufenteststand beim DLR

Bernd Gottschlich*

Cryoetherm GmbH & Co. KG., Euteneuen 4, 57548 Kirchen, Deutschland

bernd.gottschlich@cryoetherm.de

Gerhard Krühsel, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. (DLR), Institute of Space Propulsion,
Im Langen Grund, 74239 Hardhausen, Deutschland

gerhard.kruehsel@dlr.de

Die zukünftige europäische Trägerrakete Ariane 6 soll im Jahr 2020 zum ersten Mal ins All starten. Damit sie alle Nutzlasten sicher auf ihre Umlaufbahnen bringen kann, müssen auch die Triebwerke für den neuen Träger zuvor ausführlich getestet werden.

Dafür entwickelt und baut das DLR den neuen Prüfstand P 5.2, auf dem gesamte Oberstufen getestet werden können – ein Alleinstellungsmerkmal in Europa.

Am P5.2 sollen Versuche zur Be- und Enttankung mit LH2 und LOX sowie komplette Oberstufentests, bei der die Oberstufe mit laufendem Triebwerk betrieben wird, durchgeführt werden.

Für die Ariane 6 ist das wiederzündbare Vinci-Triebwerk vorgesehen, das durch die flexible An- und Abschaltung vielfältige Missionen ermöglicht. Der Betrieb erfolgt mit kryogenem Wasserstoff und Sauerstoff.

Cryoetherm baut und installiert die LH2- und LOX Versorgung, mit der in Zukunft kryogene Stufen mit bis zu 32 Tonnen Treibstoffmasse getestet werden können. Bei einem Heißlauf von 900 Sekunden verbrennt das Vinci Triebwerk Sauerstoff und Wasserstoff mit einer maximalen Feuerungsleistung von 800 MW.

Zur Betankung der Oberstufe hat Cryoetherm vakuumsuperisolierte Versorgungsleitungen von der beim DLR vorhandenen LH2/LOX Infrastruktur zum neuen Prüfstand P5.2 gelegt. Innerhalb des Prüfstandes geht es zu zwei Interface Panels, von denen die kryogenen Treibstoffe über Schläuche zur Oberstufe geleitet werden.

Die superisolierten Ventile und Messstellen wurden von Cryoetherm in insgesamt 6 Panels zusammengefasst, die als separate Einheiten im Werk fertiggestellt, getestet und danach auf die Baustelle transportiert werden konnten.

Hier sind Messeinrichtungen für Temperatur, Druck, Differenzdruck, Durchfluss, Analyse, sowie Absperrventile, Schnellschlussarmaturen; Regelventile, Sicherheitsventile, Berstscheiben, Filter, Spül-, Inertisierungs- Warm- und Kaltfahreinrichtungen integriert.

Kritisch waren neben dem zu realisierenden geringem Wärmeeinfall und Druckverlust die hohen Reinheitsanforderungen, deren Einhaltung mit Partikelmessungen erfolgreich nachgewiesen wurde.

Die anspruchsvollen Anforderungen und der enge Zeitplan wurden durch ein intensives Projektmanagement überwacht und seitens Cryotherm eingehalten.

Stichwörter:

LH2, LOX, Raumfahrt, Ariane 6, Oberstufe

I.05

Erste Betriebserfahrungen mit der Heliumkälteversorgung des supraleitenden XFEL-Linearbeschleunigers

Y. Bozhko, K. Escherich, K. Jensch, B. Petersen, T. Schnautz, D. Sellmann

Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg

In Hamburg wurde das Europäische XFEL-Projekt fertiggestellt. Der supraleitende XFEL-Linearbeschleuniger wurde im Laufe des Jahres 2017 in Betrieb genommen. Der Linearbeschleuniger liefert Elektronenpakete mit einer Energie von bis zu 17,5 GeV und dient als Quelle eines Freien-Elektronen-Lasers (XFEL), der Licht mit extremer Intensität und Brillanz mit Wellenlängen im Röntgenbereich (0,2 – 0,05 nm) bereitstellt. Der aktive Teil des Linearbeschleunigers besteht aus 96 Kryomodulen mit jeweils 8 Hochfrequenzresonatoren (Kavitäten) und einem supraleitenden Magnetpaket. Die ca. 800 Kavitäten aus hochreinem Niob werden bei 1,3 GHz betrieben und in einem Helium-II-Bad bei einer Temperatur von 2,0 K gekühlt. Die Kavitäten sind von zwei thermischen Schilden umgeben, die sich auf Temperaturen von 5-8 K und 40-80 K befinden. Parallel zum Hauptbeschleuniger wird ein Injektor mit zwei Kryomodulen versorgt. Eine Heliumkälteanlage mit Auslegungskapazitäten von 2 kW bei 2 K, 4 kW bei 5/8 K und 24 kW bei 40/80 K, verschiedene Heliumtransferleitung, ein verzweigtes Verteilungssystem und Verbindungsboxen zwischen den Modulketten im Beschleunigertunnel gehören zur Kryogenik des XFEL Linearbeschleunigers.

Es wird über die Inbetriebnahme der Komponenten und erste Betriebserfahrungen berichtet.

I.06

Heliumkryosystem für den Röntgenlaser LCLS-II

Dirk Pflückhahn, SLAC National Accelerator Laboratory, California

Das Linac Coherent Light Source-II Projekt stellt die Erweiterung des seit 2009 erfolgreich betriebenen freien Elektronenlasers LCLS am SLAC National Accelerator Laboratory in Kalifornien dar. In Kollaboration mit mehreren nationalen Instituten werden in einem 700 m langen Teilstück des bereits bestehenden Tunnels 37 Kryomodule mit supraleitenden Beschleunigerkavitäten installiert. Das Upgrade auf supraleitende Beschleunigertechnologie wird eine Teilchenenergie von bis zu 4 GeV im CW (continous wave) - Betrieb ermöglichen.

Zwei identische Kryoanlagen mit einer äquivalenten Leistung von je 18 kW bei 4.5 K werden im Folgenden beschrieben. Die Anlagen versorgen den Linearbeschleuniger mit Helium auf mehreren Temperaturniveaus. Superfluides Helium II gewährleistet die notwenige Kühlung zur Aufrechterhaltung der Supraleitung in den Kavitäten. Die Arbeitstemperatur der 1.3 GHz - Kavitäten wurde auf 2 K festgelegt. Zwei weitere Heliumkreisläufe werden für die Schildkühlung bei 55 K und die Kühlung von Wärmelasten auf 5 K - Niveau genutzt.

Als eine technische Besonderheit der hier beschriebenen Anlagen ist die rein dynamische Kompression des kalten Heliumdampfes hervorzuheben. Es wird hierzu in einer fünfstufigen Kette von kalten Kompressoren von

32 mbar an den Kavitäten bis auf den Ansaugdruck der Kreislaufkompressoren bei ca. 1 bar absolut verdichtet.
Heliumkryosystem für den Röntgenlaser LCLS-II

I.07

Air Liquide Turbo-Brayton Systeme - Technologie und realisierte Anwendungen

Golo ZICK^{1*}, Cécile GONDRAND¹, Fabien DURAND²

¹ Air Liquide Advanced Technologies, 2, rue de Clémencière, 38360 Sassenage, Frankreich
golo.zick@airliquide.com
cecile.gondrand@airliquide.com
fabien.durand@airliquide.com

Air Liquide Advanced Technologies (ALAT) hat sich bei der Entwicklung der Turbo-Brayton-Kälteanlage die Zielsetzung eines verlässlichen, wartungsfreien und hocheffizienten „Plug&Play“-Systems gesetzt und damit auch ölfreie Radialverdichter und die vollständige Integration des Systems in die Kryotechnik hoher Leistung eingeführt.

Die Turbo-Brayton - Kälteanlagen sind in der Lage, in einem weiten Tieftemperaturbereich zwischen 35 K und 150 K betrieben zu werden. Sie sind damit besonders geeignet für die Hochtemperatursupraleitungskühlung zwischen 65 K und 70 K. Die fortschreitende Entwicklung und Anwendung der Hochtemperatursupraleitungstechnik mit längeren Kabeln bringt eine ebenso gesteigerte Kühlleistungsnachfrage mit sich. Deshalb wurde die Turbo-Brayton - Produktpalette erweitert und deckt jetzt den Bereich zwischen 7 und 150 kW @ 77 K ab. Als Beispielanwendung sei ein HTS-Project in Chicago genannt, sowie die Boiloff-Rückverflüssigung an Bord eines LNG-Tankers, für die jeweils ein TBF-350 installiert worden ist.

Der Vortrag geht auf den prinzipiellen Aufbau sowie die Erkenntnisse der ersten Inbetriebnahmen ein.

I.08

Kryogene Infrastruktur bei BESSY II - Bestand und Ausblick

Svenja Heling^{1*}, Dr. Wolfgang Anders, Jochen Heinrich, Axel Hellwig, Karsten Janke, Benjamin Molder, Stefan Rotterdam

¹ Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, FG-ISRF, Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland
svenja.heling@helmholtz-berlin.de

Das Helmholtz-Zentrum Berlin betreibt am Standort Adlershof u.a. den Elektronenspeicherring BESSY II. Für die Versorgung der im Speicherring installierten supraleitenden Wellenlängenschieber mit Flüssighelium ist ein Heliumverflüssiger installiert. Ein weiterer Verflüssiger, inklusive umfassender kryogener Infrastruktur, versorgt mehrere Teststände, vor allem für supraleitende Hohlraumresonatoren, mit Helium bei 1,8 K.

Neben dem Betrieb der existierenden Anlagen wird derzeit ein neuartiger Beschleunigertyp im Rahmen des Projektes bERLinPro aufgebaut. Um die hierfür benötigte Versorgung mit Flüssighelium zu gewährleisten, wird einer der bestehenden Heliumverflüssiger umgezogen sowie die Anlage um u.a. einen 10.000 l Dewar, drei Ventilboxen, eine Kaltkompressorbox, einen warmen Pumpstand und ein 80 K Helium-System erweitert.

Außerdem ist für das Zukunftsprojekt BESSY VSR, einer Weiterentwicklung des Speicherrings BESSY II, die Beschaffung einer dritten Kälteanlage geplant. Eine Herausforderung hierbei wird der ganzjährig durchgängige Betrieb sein.

In diesem Papier wird der Aufbau der oben beschriebenen Anlagen detaillierter erläutert und ein Einblick in die Herausforderungen beim Betrieb gegeben. Abschließend werden die geplanten zukünftigen Erweiterungen skizziert.

Stichwörter:

Helium, Heliumverflüssiger, Kaltkompressor, Ventilbox, Helium-Transferleitungen

I.09

80 K - Helium-Kreis mit innovativem, gasgelagertem, ölfreiem Turbokompressor

**Konzeption, Realisierung, Inbetriebnahme und Test der 80 K - Kälteversorgung für die
supraleitenden Elektronenquelle am HZB**

Felix Glöckner

Helmholtz Zentrum Berlin, Elektronenspeicherring Bessy II, FG-ISRF, Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin,
Deutschland
felix.gloeckner@helmholtz-berlin.de

Die in diesem Paper vorgestellte Anlage versorgt das Testmodul (GunLab) für die supraleitende Elektronenquelle am HZB mit 500 W Kühlleistung bei 80 K.

Da eine Direktverdampfung von Flüssigstickstoff im Modul aus Sicherheitsgründen nicht erwünscht ist, arbeitet die Anlage mit einem Heliumzwischenkreis. Um nicht nur die latente Kälte des flüssigen Stickstoffs, sondern auch den sensiblen Anteil zu nutzen, wird ein neues Konzept, bestehend aus einem Dualwärmeübertrager und einem Badkryostaten verwendet. Die Coldbox enthält für Testzwecke darüber hinaus einen regelbaren Bypass mit integriertem elektrischem Heizer.

Für die Umwälzung des Heliums kommt eine neue Art eines warmen Kompressors zum Einsatz. Der Turbokompressor ist ölfrei, gasgelagert und in heliumdichter halb-hermetischer Bauweise ausgeführt. Um dessen, in dieser Leistungsklasse einzigartigen Eigenschaften zu nutzen, wurde der Turbokompressor von der Fischer Engineering AG für Helium-Anwendungen angepasst.

Das Paper schließt mit dem Test der Anlage und einem Einblick auf die aktuellen Betriebserfahrungen, sowie einem Ausblick auf das nächste, größere Version für BerlinPro.

Stichwörter:

80 K, Helium, ölfrei, gasgelagert, Turbokompressor, Dualwärmeübertrager, LN2

I.10

Cryopreserved erythrocyte concentrate in treatment of babesiosis in dogs

Denys Pogozhykh^{1,2}, Olga Pervushina³, Olga Denisova³, Birgit Glasmacher², Gennadiy Zhegunov^{3*}

¹Institute for Transfusion Medicine, Hannover Medical School, Carl-Neuberg-Strasse 1,
30625 Hannover, Germany

²Institute for Multiphase Processes, Leibniz Universitaet Hannover,
Callinstrasse 36, 30167 Hannover, Germany

³Kharkiv State Zooveterinary Academy, Akademichna str. 1,
62341 Mala Danylivka, Kharkiv Region, Ukraine
zhegunov@mail.ru

Babesiosis is a quickly progressing parasitic disease of dogs associated with the rapid destruction of red blood cells, requiring specific and immediate therapy. This study presents development of the novel approach in the complex treatment of babesiosis. Results of evaluation of transfusion efficiency of cryopreserved red blood cell concentrate (CRBC) to infected dogs with acute and chronic forms of babesiosis are presented. The obtained data shows that blood transfusion of CRBC in combination with specific and symptomatic therapy gives positive results in correction of anemic syndrome caused by Babesia canis infection in dogs. Hemotransfusion of CRBC is highly effective for the treatment of dogs with both acute and chronic course of babesiosis and promotes significant improvement in the number of red blood cells, hemoglobin and hematocrit levels, normalization of biochemical parameters, as well as a more rapid recovery and weight gain of dogs after transfusion in comparison to conventional treatment protocols.

Stichwörter:

Transfusion, cryopreservation, erythrocytes, babesiosis, dogs

I.11

Smart-Systeme zur Kryokonservierung biologischer Objekte

Tim Rittinghaus, Birgit Glasmacher

Leibniz Universität Hannover, Institut für Mehrphasenprozesse, Hannover, Deutschland

Für die Kryokonservierung von Zellen und Geweben ist neben dem Einsatz von Gefrierschutzmitteln auch eine genaue Steuerung der Kühl- und Auftauraten erforderlich. Damit wird eine hohe Ausbeute an lebenden Zellen gewährleistet. Zum Erzielen hoher Kühlraten wird oft LN₂ genutzt. Für niedrige Kühlraten werden in der Zellkultur isolierte Probenbehälter, wie z.B. der CoolCell® LX und der Mr. Frosty™, verwendet, welche in einer -80°C Truhe platziert werden. Ist eine genauere Kontrolle der Kühlraten erforderlich, werden programmierbare Einfriergeräte, sogenannte Controlled Rate Freezer, eingesetzt, welche meist mit Stickstoffdampf arbeiten. Unter diese Kategorie fallen z.B. CM-2000®, Planer® Kryo 560-16 und Askion C-line® WB 230. Zudem kommen aber auch Apparate zum Einsatz, welche sich den Stirling-Prozess zu Nutze machen, z.B. Asymptote VIA Freeze™. Ein Vergleich verschiedener kommerzieller Einfriersysteme bezüglich erzielbarer Kühlraten, Genauigkeit, spezieller Funktionen und laufender Kosten zeigt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie mögliche Einsatzbereiche dieser Systeme auf. So eignen sich der CoolCell® LX und der Mr. Frosty™ für Kühlraten um 1 K/min. Der Asymptote VIA Freeze™ Research kann im Bereich von 0,2 bis 2 K/min eingesetzt werden. Er benötigt wie die beiden zuvor genannten Systeme keinen LN₂. Die Controlled Rate Freezer CM-2000® und Planer® Kryo 560-16 zeigen ihre Stärken im Bereich höherer Kühlraten. Die Askion C-line® WB 230 eignet sich besonders für den Dauerbetrieb.

I.12

Effective solutions for cryostorage of specific tissue types

**Vitalii Mutsenko¹, Oleksandr Gryshkov¹,
Birgit Glasmacher¹**

¹Institute for Multiphase Processes, Leibniz Universität Hannover, Callinstrasse 36, 30167, Hannover, Germany

mutsenko@imp.uni-hannover.de

Long-term storage of biological objects such as tissues at low temperatures is necessary to ensure their constant availability at any time for future use in research and/or clinical practice. Inherent structural complexity of biological tissues imposes diverse challenges rendering them technically very difficult to cryopreserve and provide high-quality final product. The most crucial is the increased sensitivity towards inhomogeneous temperature gradients resulting from ice nucleation, propagation, melting and recrystallization within 3D environment. This leads to irreversible changes in mechanical properties of cell-supporting matrix and impairment of functional ability of tissue-specific cells. Tissue-engineered 3D scaffolds with defined composition and shape could serve as a relevant model to study underlying mechanisms of tissue damage upon freezing and thawing. In this work, using stem-cell seeded scaffolds we address the question how their properties change depending on cooling/thawing rate and nature/behavior of cryoprotective agents being used to protect them from the cryoinjury.

Key words:

Cryopreservation, scaffolds, stem cells

I.13

Elektronische Multifunktionsmodule für kryogene Anwendungen

N. Gust et al.

ILK Dresden gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

Juergen.Klier@ilkdresden.de

I.14

Bau und Test einer LHe-Förderpumpe

Steffen Klöppel^{1*}, Thomas Funke¹, Christoph Haberstroh¹,
Christoph Mühsig², Dirk Lindackers², Stefan Zielke³, Paul Saß³, Robert Schöndube³

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

steffen.kloeppel@tu-dresden.de

² Leibniz-Institut für Festkörper und Werkstoffforschung Dresden, Helmholtzstr. 20, 01069 Dresden

³ Scientific Instruments Dresden GmbH, www.scidre.de

Bei dem Transfer von Flüssighelium (LHe) bei ca. 4 K – etwa von einem stationären Speicherewar in mobile Labordeewarkannen – wird gemeinhin mit Druckbeaufschlagung als Antriebskraft gearbeitet. Ein Differenzdruck von typischerweise 200 ... 500 mbar bewirkt den gewünschten Transfer in Richtung der Zielkanne. Nachteilig an dieser Methode sind erhöhte Verdampfungsverluste und ein hohes Flashgasaufkommen.

Bereits Ende der 80er Jahre wurde zur Lösung dieses Problems am WMI Garching eine Flüssighelium-Förderpumpe entwickelt. In Kombination mit einem zweiflutigen Heber erlaubt diese extrem hohe Transferraten bei gleichzeitig minimalem Verdampfungs- und Abgasverlust.

Dieses damals in Einzelstücken gebaute LHe-Abfüllsystem ist faktisch nicht mehr verfügbar. In Abstimmung mit dem WMI Garching wurde daher in Dresden ein Projekt zur Neuaufnahme bzw. Weiterführung dieser Entwicklung gestartet. Ziel hierbei ist es, eine kalte LHe-Tauchpumpe zu entwickeln, welche problemlos in heutige Verflüssiger- und Abfüllanlagen integriert werden kann. Anstelle der damaligen aktiven Magnetlager

kommen supraleitende magnetostatische Lager zum Einsatz, Lauf- und Leitrad werden gemäß heutigen Auslegungs- und Fertigungsmöglichkeiten realisiert, ebenso alle übrigen Antriebs- und Pumpenkomponenten. Das Projekt ordnet sich ein in eine vorausgegangene Optimierung entsprechender LHe-Transferleitungen.

Vorgestellt werden Einzelheiten und Probleme bei der Entwicklung der derzeitigen LHe-Förderpumpe sowie bislang vorliegende Ergebnisse.

I.15

entfällt

I.16

Wirkmechanismen kryogener Entschichtungsverfahren

Grundlagenuntersuchungen zur Eignung eines Verfahrens mit tiefkalten Wassereispartikeln und kryogenen Treibmittel

Dipl.-Ing. Sebastian Oehler

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Festkörperphysik, AG Tieftemperaturphysik,
Helmholtzweg 5, D-07743 Jena
Sebastian.Oehler@uni-jena.de

Das Entschichten von Oberflächen dient verschiedenen Zwecken, der Entfernung von Altbeschichtungen, der Materialtrennung beim Recycling, sowie der Vorbereitung von technischen Oberflächen für Neu- bzw. Reperaturbeschichtungen. Die Auswahl des geeignetsten Verfahrens für eine spezifische Anwendung erfolgt aus der Abwägung einer Vielzahl von Kriterien. Heutzutage spielt neben einer Reihe von rein technischen Kriterien, die Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit eines Verfahrens eine große Rolle. Dies führt zur Entwicklung neuer Verfahren.

In unserem Fall ist es das Ziel die ökologische Substituierung des Strahlmittels „Sand“ sowie das Ersetzen des körperlich extrem belastenden Druckluftnadelns zu erzielen. Dafür müssen vergleichende Festigkeitsuntersuchungen an verschiedenartig hergestellten Wassereispartikeln sowie an konventionellen Strahlmitteln (Hüttensand, Trockeneispellets) durchgeführt werden. Des Weiteren wird der Einfluss des kryogenen Treibmittels (tiefkalte Temperaturen) auf die Haftfestigkeit der Materialpaarung Baustahl/Lack, mit dem Ziel der Minimierung des nötigen Energieeintrags beim Entschichten, untersucht.

Im Rahmen des Vortrages soll eine Übersicht der Untersuchungen dargestellt und die daraus resultierenden Überlegungen für das Strahlverfahren diskutiert werden.

I.17

Frosten und Kühlen von Lebensmitteln mit flüssigem Stickstoff

Dr.-Ing. R. Berghoff

Linde AG, München
rudolf.berghoff@linde.com

Das schonendste Konservieren/Haltbarmachen von Lebensmitteln ist das Tiefgefrieren. Bei diesem physikalischen Prozess werden Lebensmittel auf eine Temperatur von ca. -18°C abgekühlt und das enthaltene Wasser kristallisiert, wodurch sich die Wasseraktivität und damit das Wachstum von Mikroorganismen drastisch reduziert. Obwohl die Gefrierguttemperatur nur bei moderat kalten Temperaturen liegt, kommt häufig flüssiger Stickstoff mit -196°C als Kühlmittel im Gefrierprozess zum Einsatz. Die Präsentation beleuchtet die Gründe, warum tiefkalter flüssiger Stickstoff zum Kühlen & Frosten von Lebensmitteln genutzt wird. Neben der Erläuterung unterschiedlicher Anwendungen und verschiedener Frostgeräte wird auch der Weg des Kühlmittels vom Luftzerleger zurück in die Atmosphäre verfolgt.

I.18

Kryogene Biogasaufbereitung und Verflüssigung von Biomethan

Christian Schmidt

Cryotec Anlagenbau GmbH, Dresdener Straße 76, 04808 Wurzen, Deutschland
christian.schmidt@cryotec.de

Die Cryotec Anlagenbau GmbH entwickelt, plant und baut Sonderanlagen für Kälte- und Kryogene Anwendungen, unter anderem Luftzerlegungsanlagen zur Erzeugung von Stickstoff, Sauerstoff und Argon, flüssig und/oder gasförmig, CO₂-Rückgewinnungsanlagen und Erdgasverflüssigungsanlagen. Des Weiteren entwickelt Cryotec Verfahrens- und Anlagenkonzepte zur energetischen Optimierung von Biogasanlagen, Aufbereitung von Biogas und Verflüssigung von Biomethan.

Aktuell werden in Deutschland ca. 8700 Biogasanlagen verschiedener Größe betrieben. Der überwiegende Teil dieser Anlagen wurde ab dem Jahr 2000 nach Einführung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes errichtet. Die damit verbundene Vergütung für die Erzeugung und Verstromung, bzw. Aufbereitung und Einspeisung von Biomethan in das Erdgasnetz läuft nach spätestens 20 Jahren nach Inbetriebnahme der jeweiligen Biogasanlage aus. Dies wird ab 2020 zunehmend der Fall sein. Die Anlagenbetreiber müssen bis zum Ablauf der Förderung über ein technisch und wirtschaftlich tragfähiges Nachnutzungskonzept für Ihre Anlagen entscheiden.

Dabei sind technische Weiterentwicklungen zur Erhöhung der Ausbeute bzw. des Anlagenwirkungsgrades ebenso wie die Produktion höherwertiger Produkte, wie z.B. Verflüssigtes Biomethan (LBG) in die Betrachtung einzubeziehen. Cryotec entwickelt zusammen mit Partnern aus Forschung und Industrie maßgeschneiderte Verfahren, die diesen Ansprüchen gerecht werden.

Im Vortrag werden mögliche Anlagenkonzepte vorgestellt und verglichen, die Synergien mit CO₂ – Rückgewinnungsanlagen beschrieben und ein Ausblick für eine Pilotanlage vorgestellt.

I.19

Ventile mit elektrischem Schrittmotorantrieb

Fridolin Holdener a), Andres Hegglin a)

a) shirokuma GmbH, CH-8620 Wetzikon, Schweiz

Ventile in kryogenen Anlagen werden heutzutage mit pneumatischen Hubantrieben betätigt. PLS generierte analog oder digital sowie teilweise auch schon digitale Bus Signale steuern die Hubstellung von Regelventilen über einen elektropneumatischen Stellungsregler oder von Absperrventile über eine elektromagnetisches Pneumatikventil. Die Montage der Druckluftleitungen, pneumatischen Wartungs- und Steuereinheiten sowie der weiteren Signalsensoren und der Signalkabel ist aufwändig. Die Komplexität steigt mit der Anzahl der

Ventile und der geographischen Ausdehnung der Anlage. Zudem ist die Energieeffizienz eines elektropneumatischen Antriebssystems tief, benötigt viel Platz und eine kontinuierliche Wartung. CAPEX und OPEX für ein elektropneumatisches Ventil-Antriebssystem sind hoch.

In Anlagen der Kälte-, Erdgas- oder Energietechnik werden heutzutage darum immer mehr Ventile mit pneumatikfreien, elektrischen Regel- oder Stellantrieben eingesetzt.

Basierend auf den positiven Betriebserfahrungen, wurden innovative kryogene und warme Ventile entwickelt, die von einem elektrischen Schrittmotor angetrieben werden. Über eine integrierte, hochpräzise Lineareinheit wird der Ventilhub gesteuert. Mit dazu gehört auch ein Antriebs-Steuerungsmodul, das mit den ventilspezifischen Steuerungsalgorithmen eine volle Ventilfunktionalität, inklusive der wählbaren Notstellfunktionen «Offen» / «Zu» / «Verblocken» bei Ausfall der Versorgungsenergie sowie weitere Ansteuerungs-Optionen bietet.

Die Verwendung von Ventilen mit elektrischem Schrittmotorantrieb ermöglichen eine stark vereinfachte Installation sowie einen energieeffizienten Betrieb und eröffnen so ein Potenzial CAPEX und OPEX deutlich zu reduzieren.

Aktuell sind Ventile, bis zur Grösse DN40, abhängig von den Betriebsdaten, erhältlich. Für grössere Ventile und höhere Betriebsdrücke stehen neben dem Antrieb mit einem elektrischen Schrittmotor weitere innovative Stellantriebe mit einem elektrohydraulischen Antriebssystem zur Verfügung.

Ventile mit elektrischem Schrittmotorantrieb eröffnen weitere Möglichkeiten wie z. B. eine Ventil-integrale Durchflussmessung, einen Ventileinbau innerhalb der Vakuumisolation oder in Umgebungen mit Röntgenstrahlung oder Magnetfeld.

Beispiele für Ventile mit elektrischem Schrittmotorantrieb werden gezeigt und beschrieben. Entwicklungsperspektiven werden diskutiert.

I.20

Thermo-mechanisches Design eines kryogenfreien, rotierenden supraleitenden Magneten für die Protonentherapie

Carolin Heidt*, Ciro Calzolaio

Paul Scherrer Institut (PSI), CH-5232 Villigen PSI, Schweiz

carolin.heidt@psi.ch

ciro.calzolaio@psi.ch

Bei der Protonentherapie werden Protonenstrahlen zielgenau auf einen Tumor im Inneren eines Patienten gerichtet, wobei das umliegende Gewebe geschont wird. Um den Tumor von allen Seiten zu bestimmen, rotieren Magnete zur Umlenkung und Fokussierung der Protonen auf beweglichen Geräten, den Ganties, 360° um den Patienten. Ganties mit normalleitenden Magneten wiegen etwa 100-200 t. Durch die Verwendung supraleitender Magnete sind stärkere Magnetfelder und höhere Feldgradienten möglich, wodurch sich neben neuen Therapiemöglichkeiten auch eine deutliche Reduzierung des Platzbedarfs sowie des Gewichts eines Ganties auf etwa 20-50 t ergibt.

Am Paul Scherrer Institut (PSI) werden derzeit drei supraleitende Magnete aus Nb₃Sn mit kombinierter Ablenk- und Fokussierungsfunktion für eine neue Generation von Ganties entwickelt. Aufgrund der Rotation des Systems ist die Verwendung von flüssigem oder überkritischem Helium zur Kühlung der Magnete sicherheitstechnisch problematisch. Eine Alternative ist die kryogenfreie Kühlung mit Kryokühlern, welche einfach implementiert und auch in Kliniken betrieben werden können. Allerdings ist die Kühlleistung von Kryokühlern typischerweise auf 1.5 W bei 4.2 K limitiert und die Wärme wird über eine kleine Fläche abgeführt, was besondere Ansprüche an die thermo-mechanische Auslegung der Stützstruktur zur Folge hat.

In diesem Beitrag wird das Kühlkonzept eines supraleitenden Magneten für die Protonentherapie basierend auf der Verwendung von Kryokühlern vorgestellt.

Stichwörter:

Protonentherapie, Gantry, supraleitender Magnet, Kryokühler

I.21

Europäisches Normungsprojekt zum Schutz von Flüssighelium-Kryostaten gegen Drucküberschreitung

C. Weber^{1,2*}, S. Grohmann^{1,2}

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

¹Institut für Technische Physik (ITEP),

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Christina.Weber@kit.edu

²Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Die Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen für Flüssighelium-Kryostate stellt unter anderem aufgrund der niedrigen Betriebstemperaturen und der geringen Verdampfungsenthalpie von Helium eine besondere Herausforderung dar. Bisherige Regelwerke (z.B. ISO, DIN) decken den Schutz von Flüssighelium-Kryostaten gegen Drucküberschreitung in vielen Fällen nicht ausreichend ab. Aus diesem Grund wurde im April 2015 die technische Richtlinie DIN SPEC 4683 veröffentlicht, welche die spezifischen Bedingungen für solche Kryostate betrachtet. Im Gegensatz zu reinen Lagerbehältern für kryogene Flüssigkeiten enthalten diese aktive Komponenten wie supraleitende Magnete und Kavitäten, Heizer, Pumpen und Armaturen, deren Betrieb wesentliche Sicherheitsaspekte impliziert. Dabei sind Unterschiede in den Designpraktiken, im Risikoverständnis und in technischen Lösungen heute die Ursache vieler Schwierigkeiten, sowohl innerhalb internationaler Kollaborationen, als auch zwischen Forschungseinrichtungen und der Industrie.

Mit Bezug auf die DIN SPEC 4683 und entsprechende Dokumente des CERN und des CEA wurde im April 2017 eine neue Arbeitsgruppe im CEN/TC 268 gegründet, die sich die Erarbeitung einer Europäischen Norm für den Schutz von Flüssighelium-Kryostaten gegen Drucküberschreitung zum Ziel gesetzt hat. Der neue Standard soll durch das Zusammenführen, Strukturieren und Harmonisieren existierender Lösungen einen umfassenden Überblick über alle relevanten Aspekte der sicheren Auslegung und des sicheren Betriebs von Flüssighelium-Kryostaten liefern. An dem Projekt sind Experten aus 7 Ländern beteiligt.

Dieser Beitrag stellt die Herausforderungen bei der Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen für Flüssighelium-Kryostate dar und gibt einen Überblick über die Arbeit des Europäischen Normungsausschusses.

Stichwörter:

Helium, Kryostat, Sicherheit, Normung

I.22

Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen bei Vakuumverlust in kryotechnischen Anlagen in Anlehnung an DIN EN ISO 21013-3

Georg Ebner^{*}, Rainer Soika

Linde Kryotechnik AG, Deattlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Switzerland
georg.ebner@linde-kryotechnik.ch, rainer.soika@linde-kryotechnik.ch

In kryotechnischen Anlagen müssen Volumen, die abgesperrt werden können, gegen Überdruck aufgrund von Wärmeeinfällen abgesichert werden. Bei vakuumisierten Bauteilen ist ein Standardszenario für die Auslegung der Druckentlastungseinrichtung der Verlust des Isolationsvakums. An Oberflächen unterhalb von 75K kommt es dabei zur Kondensation der einfallenden Luft, was zu sehr hohen Wärmeeinfällen in die entsprechende Bauteile und die sich darin befindende Fluide führt.

Rechenvorschriften für die Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen werden hierfür seit Dezember 2016 in der DIN EN ISO 21013-3 gegeben, welche die DIN EN 13648-3 ersetzt hat. Die Rechenvorschriften der DIN EN ISO 21013-3 korrelieren mit experimentellen Daten, die für Flüssigheliumbehälter mit einer Medientemperatur von 4,2K gewonnen wurden.

Die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen in kryotechnischen Anlagen ist gemäss der DIN EN ISO 21013-3 nicht möglich, da die abzusichernden Volumina deutlich vom Basisfall der Norm abweichen. Unteranderem beinhaltet dies Wärmetauscher und komplexe Rohrleitungssysteme, die einen breiten Temperaturbereich abdecken. Anhand von Beispielen zeigen wir die Auslegung von Druckentlastungseinrichtungen zur Absicherung solcher Systeme. Ausgehend von den Rechenvorschriften der DIN EN ISO 21013-3 werden hierbei Skalierungen und Erweiterungen entwickelt, um diese auch bei der Absicherung kryotechnischer Anlagen anwenden zu können.

Stichwörter:

Druckentlastung, Sicherheitsventil, Berstscheibe, kryotechnische Anlage, Vakuumverlust

II.1.01

Zum Wärmeübergang beim Behältersieden an Rippenrohren – eine Übersicht

Patrick Bujok, Joseph Addy, Björn C.F. Müller, Andrea Luke

Universität Kassel, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Deutschland

Prozessintegrierte Energieeffizienz in energie- und verfahrenstechnischen Anlagen wird nur mit neuen innovativen Apparatekonzepten gelingen. Vielerlei Methoden zur Erhöhung der Energieeffizienz werden in der Literatur und in der Praxis diskutiert und eingesetzt, allerdings liegen für diese zumeist noch keine hinreichenden Referenzanwendungen und Daten für die Auslegung und keine Nachweise zur Betriebssicherheit vor. Daher werden diese Methoden trotz großer energetischer Vorteile nicht über einen begrenzten Bereich angewandt. Es ist seit einigen Jahrzehnten bekannt, dass mit der Strukturierung von Oberflächen eine der effizientesten Methoden zur Erhöhung des Wärmeübergangs bei der Verdampfung vorliegt und diese in Wärmeübertragern in der Kälte- und Klimatechnik bereits vielfach eingesetzt werden. Trotzdem sind Glattrohre immer noch technischer Standard in der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie und die Auslegung von solchen Apparaten mit strukturierten Oberflächen ist bisher unbefriedigend.

Daher wird in diesem Beitrag Makro- und Mikrostrukturen aufgezeigt, die besonders effizient hinsichtlich des Wärmeübergangs und mit relativ geringem Aufwand und in großer Stückzahl mit gleich-bleibender Struktur zu fertigen sind. Ferner soll eine belastbare Datenbasis für die Auslegung von Verdampfern mit solchen Oberflächenstrukturen aufgebaut werden. Daher werden die Daten zu verschiedenen strukturierten Verdampferrohre aus der Literatur vorgestellt und bewertet. Empirische Berechnungsmethoden werden diskutiert und aufgezeigt in welche Richtung diese optimiert werden sollten.

Hierbei wird der Einfluß von berippten Rohren auf den Wärmeübergang beim Sieden in freier Konvektion in weiten Druckbereich vom beginnenden bis zum vollausgebildeten Blasensieden für verschiedene Kältemittel und Kohlenwasserstoffe sowie deren Gemische behandelt. Erste Ergebnisse zu Gemischen zeigen den bekannten Gemischeffekt der Verschlechterung des Wärmeübergangs bereits bei geringfügiger Zugabe der schwerer siedenden Komponente.

Stichwörter:

Wärmeübergang, Berechnungsmethoden, Verdampfer, Rippenstrukturen

II.1.02

Hocheffektive Verdampferstrukturen auf Basis von Aluminium-Komposit Schwämmen

Joachim Baumeister¹, Jörg Weise¹, Rahel Volmer^{2*}, Lena Schnabel²

¹ Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM,
Abteilung Pulvertechnologie, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Deutschland
joachim.baumeister@ifam.fraunhofer.de, joerg.weise@ifam.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Abteilung Wärme- und Kältetechnik,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
rahel.volmer@ise.fraunhofer.de, lena.schnabel@ise.fraunhofer.de

Bei Adsorptionswärmepumpen/-kältemaschinen spielen Verdampfer- und Kondensatorelemente eine wichtige Rolle. Die Erhöhung des Wärmeübergangs in der Verdampfung erlaubt die Umsetzung kompakterer Bauformen sowie die Reduzierung der treibenden Temperaturdifferenzen, was eine Steigerung der Leistungsdichte und Prozesseffizienz bewirkt. In geschlossenen Adsorptionsprozessen wird überwiegend Wasser als Arbeitsmittel

verwendet. In bisherigen Untersuchungen hat sich bei kleinen treibenden Temperaturdifferenzen hauptsächlich stilles Sieden aus dünnen Filmen als vielversprechendes Siederegime gezeigt. Dennoch sind auch Strukturen, die Blasensieden bei kleinen treibenden Temperaturdifferenzen erlauben, weiterhin in der Entwicklung.

Im Rahmen des Beitrags wird die Herstellung und experimentelle Charakterisierung eines vom Fraunhofer IFAM in Bremen entwickelten Verdampfer- und/oder Kondensatorelements vorgestellt. Dieses besteht aus einem offenporigen Aluminiumschwamm hoher Wärmeleitfähigkeit, in dessen Oberfläche eine Vielzahl poröser Partikel so eingebettet ist, dass sie zum Teil aus dieser Oberfläche herausragen. Das Herstellverfahren für die Verdampferstrukturen wird erläutert und die Ergebnisse von metallographischen Untersuchungen werden dargestellt.

Zur Analyse des thermischen Verhaltens wurden am Fraunhofer ISE Siedekennlinien an einer Kompositprobe mit Wasser im Reinstoffsystem bei niedrigen Drücken gemessen und mit anderen Siedestrukturen verglichen. Im Ergebnis zeigte sich, dass unter den gegebenen Messbedingungen und einem Siededruck von 13 mbar bei der Kompositprobe bereits bei treibenden Temperaturdifferenzen $< 5 \text{ K}$ Blasensieden mit vergleichsweise hoher Blasenfrequenz auftritt. Dies bewirkt eine deutliche Steigerung der übertragbaren Wärmestromdichte im Vergleich zu Referenzproben ohne poröse Partikel. So konnte bei einer treibenden Temperaturdifferenz von 3 K beispielsweise eine Steigerung der Wärmestromdichte um rund 50% beobachtet werden.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die porösen Partikel als eine Art Siedesteine für die Verdampfung wirken, also Blasenkeimstellen bereitstellen. Sie dienen dabei als Reservoir für Dampfreste, welche bevorzugte Keime für neue Blasen darstellen. Neben der Erleichterung des Blasensiedens können die eingebetteten Partikel auch derart gestaltet werden, dass sie als lokale Flüssigkeitsreservoirs dienen und ein Abtropfen der Flüssigkeit verhindern, was in einer kapillarstützten Betriebsweise nützlich sein kann.

Stichwörter:

Metallschwamm, Kompositwerkstoff, Verdampfung bei niedrigen Drücken, Blasensieden, Blasenkeimstellen, Adsorptionskältemaschine

II.1.03

Erhöhung der Effizienz von Verdampfern durch Verschiebung des „Onset of Nucleate Boiling“ zu kleineren Überhitzungen

Joseph Addy, Niklas Buchholz, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel

Verdampfer werden zahlreich in verfahrens- und energietechnischen Anlagen in verschiedenen Apparatetypen eingesetzt. Besonders der Bereich des Blasensiedens ist durch hohe Effizienz gekennzeichnet, da hier hohe Wärmestromdichten bei geringen Überhitzungen übertragen werden können. Dazu muß jedoch der Bereich der Hysterese beim Übergang vom konvektiven oder auch stillen Sieden überwunden werden. Die Berechnung dieses Bereiches ist aufgrund des vorliegenden metastabilen Zustandes bisher kaum möglich, obwohl es für die Apparateauslegung entscheidend ist.

Daher wird in dieser Arbeit experimentell das beginnende Blasensieden zunächst in freier Konvektion an unterschiedlich strukturierten Heizflächen mit verschiedenen Kohlenwasserstoffen untersucht, die in technischen Anwendungen für die Industrie relevant sind. Dabei werden die Wärmeübergangsmessungen sowohl mit ansteigender als auch mit abnehmender Überhitzung in weiten Bereichen des Sättigungsdruckes von beginnenden bis zum intensiven Blasensieden durchgeführt, um den Einfluß der Oberflächenstruktur auf die heterogene Keimbildung und damit auf die Hysterese zu verdeutlichen. Die wesentlichen Parameter die den „Onset of Nucleate Boiling“ beeinflussen, wie die Stoffeigenschaften des siedenden Fluides, die Betriebsparameter Sättigungsdruck und Wärmestromdichte, die Oberflächenstruktur (Makro- und Mikrostrukturen) der Heizfläche und das Material, werden berücksichtigt. Zusätzlich werden mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsvideos die Keimstellendichte und Hystereseffekte analysiert. Abschließend werden die

experimentellen Ergebnisse mit den empirischen Gleichungen und Modellen aus der Literatur zur Berechnung des „Onset of Nucleate Boiling“ verglichen.

Stichwörter:

Siedekurve, Blasensieden, Makro- und Mikrostrukturen, beginnende Blasensieden, heterogene Keimbildung

II.1.04

Apparatur zur Messung von flüssig-gas Grenzflächenspannungen bei niedrigen Temperaturen und erhöhten Drücken

Sandra Knauer*, Philip Jaeger

Eurotechnica GmbH, An den Stücken 55, 22941, Bargteheide
knauer@eurotechnica.de

Die Grenzflächenspannung beschreibt eine thermophysikalische Größe, die an ein breites Anwendungsfeld anknüpft, z.B. die Erdöl- und Erdgasindustrie, wo Grenzflächen unter erhöhtem Druck sowohl bei hohen (enhanced oil recovery), als auch bei niedrigen (Gasauf trennung) Temperaturen auftreten. Des Weiteren spielen Grenzflächenphänomene bei der Minimierung des CO₂ Ausstoßes eine wichtige Rolle in Hinblick auf die physikalische Abscheidung des CO₂, um in der Folge das CO₂-reiche Gas zu einer Lagerstätte zu transportieren und dort zu injizieren. Für die Auslegung dieser Prozesse sind thermophysikalische Eigenschaften wie das Grenzflächenverhalten oder die Grenzflächenphänomene der Mischungen relevant.

Eine neue Apparatur wurde erfolgreich für die Bestimmung der Grenzflächenspannung von Gas-Flüssig-Systemen mit der Methode des hängenden Tropfens eingesetzt. Mit der beschriebenen Apparatur wird die Grenzflächenspannung zwischen der flüssigen und der gasförmigen Phase bis 300 bar in einem Temperaturbereich von 0 °C bis -80 °C messtechnisch erfasst. Es werden beispielhaft bei niedrigen Temperaturen und hohen Drücken erzielte Ergebnisse präsentiert. Neben Werten von reinem CO₂ zwischen 3 °C und -54° C, die gut mit der Literatur übereinstimmen, werden Messungen an Gasmischungen gezeigt.

Stichwörter:

Grenzflächenspannung, Apparatur, Gas-Flüssig-System, reines CO₂

II.1.05

Strömungssieden von CO₂ in porösen Systemen

Sonja Weise*, Benjamin Dietrich, Thomas Wetzel

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Thermische Verfahrenstechnik, 76131 Karlsruhe,
sonja.weise@kit.edu

Die Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten beim Strömungssieden in horizontalen Rohren bei gleichzeitig nur moderat erhöhtem Druckverlust ist gerade für Anwendungen mit guter wärmetechnischer Anbindung des Rohrs an das zu kühlende Medium interessant. Beispiele für solche Anwendungen sind die Kühlung von Leistungselektronik, Solaranlagen und Mikrochips. Metallschwämme (bi-kontinuierliche poröse Strukturen) bieten durch ihr großes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis, die unregelmäßige Struktur, die gute Wärmeleitfähigkeit und die große Anzahl an hinterschnittenen Keimstellen Eigenschaften, die zu einer derartigen Effizienzsteigerung führen könnten. Um das Potential solcher Strukturen zu bewerten und die zugrunde liegenden physikalischen Phänomene zu verstehen, wurde die Strömungsform, der Wärmeübergangskoeffizient sowie der Druckverlust in horizontalen Verdampferrohren mit integrierten Schwämmen bestimmt.

Untersucht wurden die Siedecharakteristika im horizontalen Rohr mit integrierten Schwämmen sowohl unter adiabaten als auch unter diabaten Bedingungen (Wärmestromdichte 0 - 120 kW m⁻²). Der Einfluss des Sättigungsdruck (12 – 26,5 bar), des Strömungsdampfgehalts (0.1 – 0.9) und der Massenstromdichte (25 - 150 kg m⁻²s⁻¹) wurde betrachtet. Ebenso wurde der Einfluss der physikalischen Eigenschaften des Schwammes berücksichtigt. Hervorzuheben ist die Vergleichbarkeit der Messdaten mit Daten eines Glattrohres, welches in der gleichen Versuchsanlage charakterisiert wurde. Auf Basis dieser Daten können Aussagen über das Potential und die Optimierung bi-kontinuierlicher poröser Strukturen für den Einsatz in Verdampferrohren getroffen werden. Durch den Einsatz der porösen Strukturen konnte der Wärmeübergangskoeffizient gesteigert und der Übergang zur Ringströmung bereits bei niedrigeren Massenstromdichten und Strömungsdampfgehalten erzielt werden.

Stichwörter:

Strömungssieden, poröse Medien, Schwamm, Kohlendioxid, natürliche Kältemittel

II.1.06

Untersuchung des Druckverlusts von Rohrleitungen einer CO₂ Fahrzeugkälteanlage

Christoph Subei*, Gerhard Schmitz

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Thermodynamik
Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland
christoph.subei@tuhh.de, schmitz@tuhh.de

Die Auslegung und Berechnung von Kältekreisen wird in der Automobilindustrie in der Regel mit einer eindimensionalen Systemsimulation durchgeführt. Durch die Auflösung nur einer geometrischen Dimension können durch Geometrieeinflüsse hervorgerufene lokale Strömungsvorgänge nicht erfasst werden. In diesem Forschungsprojekt liegt der Fokus auf den Rohrleitungen zwischen den Komponenten einer Fahrzeugkälteanlage, welche in der Systemsimulation derzeit vereinfachend als gerade Rohrverbindungen abgebildet oder vernachlässigt werden. Bedingt durch die verschiedenen Einbausituationen im Fahrzeug weisen Kältemittelleitungen jedoch zahlreiche Krümmungen, Bögen und Querschnittsänderungen auf. Daraus resultiert ein signifikant höherer Druckverlust als bei einer geraden Rohrleitung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden Rohrleitungen für das Kältemittel CO₂ aus verschiedenen Fahrzeug-typen numerisch und experimentell untersucht. Dazu wird der Druckverlust unter Verwendung des CFD-Programms STAR-CCM+ numerisch mit einem höheren Detailierungsgrad berechnet. Des Weiteren wurde im Rahmen des Projekts eine Hochdruckversuchsanlage geplant und aufgebaut, die eine experimentelle Untersu-chung der Rohrleitungen über den gesamten für eine Fahrzeugkälteanlage relevanten Druck- und Temperatur-bereich ermöglicht. Der Systemdruck kann zwischen 30bar und 130bar eingestellt werden. Die Temperatur des CO₂ kann zwischen -20°C und 130°C eingestellt werden. Der umlaufende Massenstrom beträgt zwischen 30kg/h und 250kg/h. Zunächst wurden Messungen an einer geraden Rohrleitung durchgeführt. Ein Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit Druckverlustkorrelationen aus der Literatur liefert eine gute Übereinstimmung.

Im weiteren Projektverlauf sollen nun die Messungen an den Fahrzeugkältemittelleitungen durchgeführt und die Ergebnisse mit denen aus der Simulation verglichen werden. Abschließend sollen auf Basis der detaillierten Berechnungen und der experimentell ermittelten Daten verbesserte Modelle für die Systemsimulation bereitgestellt werden.

II.1.07

Berechnungsmodell für Spot-Verdampfer beim Einsatz in Zerspanungswerzeugen

Tobias Knipping^{1*}, Michael Arnemann², Ullrich Hesse³

¹ Hochschule Karlsruhe, Institute of Materials and Processes (IMP),
76133 Karlsruhe, tobias.knipping@hs-karlsruhe.de

² Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),
76133 Karlsruhe, michael.arnemann@hs-karlsruhe.de

³ TU Dresden, BITZER-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
01069 Dresden, ullrich.hesse@tu-dresden.de

Die Miniaturisierung fertigungstechnischer Prozesse bei konstantem oder gestiegenem Energieumsatz führt zu einer steigenden Wärmestromdichte. Gleichzeitig erfordern moderne Fertigungsprozesse eine hohe thermische Stabilität, um eine anspruchsgerechte Bauteilqualität zu bewerkstelligen. Insbesondere bei Zerspanprozessen von Werkstoffen mit geringer Wärmeleitfähigkeit ($\lambda \leq 12 \text{ W/(m K)}$) ist eine effiziente Wärmeabführung nur mit hohem Aufwand möglich. Bei diesen Werkstoffen (z. B. Inconel 718) wird die Wärme aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit nicht über die Späne, sondern über die Werkzeugschneide abgeführt. Dies führt zu einem hohen thermischen Verschleiß an der Schneide und somit zu einem unwirtschaftlichen Zerspanprozess.

Am Institute of Materials and Processes (IMP) wird an neuartigen Kühlkonzepten für die Zerspanung geforscht. Hierzu wurde ein Spot-Verdampfer in den Halter eines mit einer CBN-Schneide besetzten Drehmeisels eingebracht. Spot-Verdampfer sind kleine Hochleistungsverdampfer zur Kühlung von Wärmestromdichten bis 107 W m^{-2} .

Basierend auf den Modellen von Garcia et al., Chang et al. und Gnielinski wurde ein Berechnungsmodell aufgestellt, um den Massenstrom und die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten im Spot-Verdampfer abzubilden. Darüber hinaus wurden in dieses Berechnungsmodell verschiedene Viskositätsmodelle implementiert, um deren Einfluss auf den Massenstrom an Kältemittel im Spot-Verdampfer zu untersuchen.

Die Validierung des Berechnungsmodells erfolgt an einem hierfür entwickelten Versuchsträger. Die Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten. Es kann gezeigt werden, dass die Reynolds-Zahlen im Spot-Verdampfer und damit die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten höher sind, als in durchströmten Rohren. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass vor allem der Verdampferdurchmesser, der Kondensationsdruck sowie der Abstand des Kapillarendes zur Wärmeübertrageroberfläche einen signifikanten Einfluss auf die erzielbare kritische Wärmestromdichte besitzen.

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

Stichwörter:

Zerspanung, hohe Wärmestromdichten, Spot-Verdampfer, R32

II.1.08

CFD-Simulation der Kondensation von Reinstoffen am horizontalen Einzelrohr

Thomas Kleiner*, Sebastian Rehfeldt, Harald Klein

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Boltzmannstraße 15
85748 Garching, Thomas.Kleiner@tum.de

Für eine Steigerung der Energieeffizienz bei der Kondensation von Reinstoffen an horizontalen Rohren wurden innerhalb des Verbundprojektes InnovA² Messungen an der Technischen Universität München durchgeführt. Diese Messungen zeigen, dass sich bei der Kondensation von Reinstoffen an horizontalen Rohren mit innovativer Oberflächenstruktur ein deutlich höherer Wärmeübergangskoeffizient im Vergleich zum Glattrohr einstellt. Der erhöhte Wärmeübergangskoeffizient ist auf einen Unterschied im Kondensatabfließverhalten zurück zu führen. Bislang wurden nieder und eng berippte Rohre der Firma Wieland betrachtet, welche in Kältemittelverflüssigern und Kältemittelverdampfern eingesetzt werden [1]. Bei dessen Oberflächenstruktur sorgen Kapillarkräfte im Rippental für ein verändertes Kondensatabfließverhalten [2]. Untersuchungen der Kondensation der Kältemittel Propan und 1,1,1,2-Tetrafluorethan zeigen einen größeren äußeren Wärmeübergangskoeffizienten bei oberflächenstrukturierten Rohren im Vergleich zu Glattrohren [3].

Für eine weiterführende Untersuchung und Entwicklung neuer Oberflächenstrukturen wird die Reinstoffkondensation mittels numerischer Strömungsmechanik in OpenFOAM® untersucht. Hierfür wird zunächst ein Solver in OpenFOAM® implementiert, welcher die Kondensation mit Hilfe der Volume of Fluid Methode simuliert. Für den entwickelten Solver wird der Simulationsraum in Regionen flüssiger und fester Phasen aufgeteilt, welche in thermischem Kontakt stehen. Des Weiteren wird ein neues Modell zur Beschreibung des Phasenübergangs bei der Kondensation entwickelt und im Solver implementiert.

Erste Simulationsergebnisse zeigen ein plausibles fluidodynamisches Verhalten der Kondensatphase. Zusätzlich ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den aus der Simulation bestimmten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten und der Nußelt'schen Wasserhauttheorie [4] bei Glattrohren und den Messungen nach A. Reif [2] bei Rippenrohren. Weiterführend kann der entwickelte Solver zur Identifizierung sinnvoller innovativer Oberflächenstrukturen zur Steigerung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden. Außerdem bietet der Solver eine solide Basis für eine Erweiterung zur Beschreibung der Gemischkondensation, da zur Beschreibung der Reinstoffkondensation keine Fitparameter benötigt werden.

Stichwörter:

CFD, Kondensation, OpenFOAM®, Wärmeübertrager

II.1.10

Lokaler Wärmeübergang bei der Resorption von NH₃ in NH₃/H₂O-Plattenwärmeübertragern - Experiment und Theorie-

Benjamin Markmann*, Taylan Tokan, Stephan Kabelac

Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 36, 30167 Hannover
markmann@ift.uni-hannover.de

Eine Möglichkeit zur weiteren effizienten Nutzung von Prozesswärme ist der Einsatz von Wärmetransformatoren oder Wärmepumpen, die das Temperaturniveau eines Abwärmestromes anheben und somit für industrielle Anwendungen wieder nutzbar machen. Als gängiges Kältemittel hat die Kombination aus NH₃ und H₂O im Einsatz bei Hochtemperaturanwendungen um etwa 90°C das Potenzial, Leistungszahlen zwischen drei und vier zu erreichen. Mit diesem Ziel wurde am Institut für Thermodynamik in Hannover eine Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf als Technikumsanlage aufgebaut.

Im Resorber dieser Anlage, der als Plattenwärmeübertrager ausgeführt ist, wird in den komprimierten ammoniakreichen Dampf ammoniakarme Lösung eingespritzt, deren Rieselfilm den Dampf absorbiert. Bei gleichzeitiger Wärmeabgabe wird im folgenden weiteres Gas kondensiert. Die hierbei erreichten Prozesstemperaturen liegen im Bereich von 90°C bei Verdampfungsdrücken unterhalb von 20 bar. Dadurch können neben einem gängigen Schraubenverdichter auch Standard-Armaturen genutzt werden, um die Anlagenkosten niedrig zu halten.

Die Plattenwärmeübertrager dieser Anlage wurden mit Thermoelementen versehen, die es ermöglichen, an verschiedenen Stellen lokale Wärmeübergangskoeffizienten bei der Rieselfilmabsorption des NH₃-reichen Dampfes durch eine wässrige Lösung zu messen. Diese Messwerte werden mit unterschiedlichen Ansätzen modellierten Werten gegenübergestellt und die Ergebnisse interpretiert. Geeignete Korrelationen zur Berech-

Arbeitsabteilung II.1

nung des Wärme- und Stofftransports bei der Rieselfilmabsorption zu ermitteln oder zu entwickeln, ist das abschließende Ziel dieses Beitrages.

II.1.11

Förderverhalten eines Plattenaustrreibers mit nachgeschaltetem Förderrohr für thermisch angetriebene Kälteanlagen

B. Bierling, F. Schmid, K. Spindler

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik,
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
bierling@itw.uni-stuttgart.de

Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) werden durch Wärme angetrieben, die am Austreiber bzw. an der Thermosiphonpumpe zugeführt wird. Die Wärmezufuhr führt zur partiellen Verdampfung von flüssigem Kältemittel und zur Entstehung von Dampfblasen. Diese schließen sich zu Kolben zusammen und fördern die Lösung in der Thermosiphonpumpe mit sich nach oben. Neben der Förderung sorgt die partielle Verdampfung dafür, dass das Kältemittel aus der Lösung ausgetrieben wird.

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) werden Untersuchungen zur Beheizung einer DAKM über einen Austreiber in Form eines Plattenwärmeübertragers mit nachgeschaltetem vertikalem Förderrohr durchgeführt. Die Beheizung des Plattenaustrreibers am Fußpunkt der Thermosiphonpumpe ermöglicht ein gutes Förderverhalten und eine kompakte Bauweise der DAKM. Über einen externen Heizkreislauf erfolgt die Beheizung. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Förderung der Lösung bereits ab einer Temperaturdifferenz von ca. 5 K zwischen externer Antriebstemperatur und Siedetemperatur des Arbeitsmediums auftritt.

Im Vortrag wird das Förderverhalten von verschiedenen Plattenaustribern mit nachgeschaltetem Förderrohr mit dem Zweistoffgemisch Ethanol-Wasser als Arbeitsmedium dargestellt. Das Förderverhalten der Thermosiphonpumpe wird unter der Variation der Antriebstemperatur sowie des Volumenstroms des Heizkreislaufs, der Plattenstruktur sowie der Strömungsführung des Plattenaustrreibers und der Zulauftemperatur des Arbeitsmediums analysiert. Zusammenhänge der Zweiphasenströmung im Plattenaustrieber und im Förderrohr unter Verwendung eines Zweistoffgemisches werden erläutert.

II.1.12

Dynamik einer thermisch angetriebenen Lösungsmittelpumpe für eine $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionskältemaschine

Alexander Arnitz*, René Rieberer

Institut für Wärmetechnik - Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
alexander.arnitz@tugraz.at

Bei Absorptionskältemaschinen mit elektrisch angetriebener Lösungsmittelpumpe ist eine Anpassung der Fördermenge durch Änderung der Pumpenfrequenz von untergeordneter Bedeutung, die Regelung der Kälteleistung erfolgt meist durch Veränderung der externen Temperaturen (Heiß- und Kühlwasser). Wird jedoch eine thermisch angetriebene Lösungsmittelpumpe nach dem Verdrängerprinzip verwendet, so ist zur Sicherstellung eines effizienten Betriebes eine Anpassung der Fördermenge an den jeweiligen Betriebspunkt erforderlich.

In dieser Arbeit wird der Betrieb einer Kältemaschine mit elektrisch und thermisch angetriebener Lösungsmittelpumpe experimentell untersucht und das dynamische Verhalten verglichen. Die Zeitdauer bis zum Erreichen eines stationären Zustandes nach Veränderung der Fördermenge ist mit der thermisch angetriebenen Pumpe in etwa doppelt so lang. Bei Analyse der Auswirkungen von Kühl- und Heißwassertemperaturschwankungen auf die Kaltwasseraustrittstemperatur zeigt sich, dass diese durch Veränderung der Fördermenge, in vom Betriebspunkt abhängigem Ausmaß, kompensiert werden können. Dazu

wird die Regelstruktur beschrieben, die erforderlichen Parameter bestimmt sowie die Funktionsweise anhand eines experimentellen Testfalls demonstriert.

Stichwörter:

Doppelhubkolbenpumpe, Parameteridentifikation, Sprungantwort, Regelung

II.1.13

Neuer umweltfreundlicher Korrosionsinhibitor für H₂O/LiBr - Absorptionskälteanlagen

Steffen Feja*, Franziska Krahlf

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20,
01309 Dresden, steffen.feja@ilkdresden.de

Industrieanlagen und Kraftwerke produzieren in der Regel größere Mengen von Prozesswärme, die als Abwärme an die Umgebung verloren geht. Eine Möglichkeit diese Prozesswärme effektiv zu nutzen, ist der Einsatz von Absorptionskälteanlagen. Die momentan eingesetzten Absorptionskälteanlagen werden mit den Stoffpaaren Wasser/LiBr oder Wasser/NH₃ betrieben.

Diese Nutzung von Salz und Wasser lässt die Komponenten einer Absorptionskälteanlage enormen korrosiven Belastungen unterliegen, die mittels Inhibitoren auf ein Minimum reduziert werden müssen. Die am häufigsten in solchen Anlagen genutzten Inhibitoren sind Chromate und Molybdate. Chromate besitzen jedoch kanzerogene Eigenschaften, sind giftig und dürfen ab September 2017 nicht mehr für LiBr-Lösungen eingesetzt werden.

Aufgrund dieser Einschränkungen besteht die dringende Notwendigkeit, neue Korrosionsinhibitoren als Ersatz für Chromate zu finden. Neben Nitraten, Phosphaten und anderen anorganischen und organischen Verbindungen wurden insbesondere Inhibitoren auf Basis von Molybdaten als wirksamer Ersatz vorgeschlagen. Derzeit gelten die molybdatbasierten Inhibitorsysteme innerhalb dieser neuen Systeme als effektivster Korrosionsschutz für die Anlagen. In den üblichen Anwendungskonzentrationen sind Molybdat- im Gegensatz zu Chromat-Inhibitoren ökologisch unbedenklich. Im Ergebnis eines vorangegangenen Projektes ist in neueren Anlagen bei Projektpartnern des ILK Dresden die Korrosionsinhibition von Lithiumchromat auf Lithium- bzw. Natriummolybdat umgestellt worden. Auch andere Firmen haben molybdatbasierte Inhibitorsysteme eingeführt. Die Inhibition mit Molybdaten ist jedoch eine Entwicklung, deren Optimierung noch keineswegs abgeschlossen ist. So sind Molybdate zwar hochwirksame anodische Inhibitoren gegen Stahlkorrosion, sie sind jedoch nur wenig geeignet zum Schutz des auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit oft in den Anlagen verbauten Kupfers. Für die Inhibition von Kupferkorrosion bieten sich mehrere Lösungen an, welche jedoch entweder patentrechtlich geschützt oder bisher nicht ausreichend untersucht sind.

In einem im Jahr 2015 gestarteten Projekt wurde am ILK Dresden ein neuer Korrosionsinhibitor für H₂O/LiBr – Absorptionskälteanlagen entwickelt und getestet. Dieser Inhibitor weist gegenüber alleiniger Zugabe von Molybdaten deutlich bessere Korrosionsschutzeigenschaften vor allem für Kupfer auf. Die korrosionsinhibierende Wirkung wurde elektrochemisch sowie durch Korrosionstest bestätigt. Außerdem wird der neue Inhibitor bereits erfolgreich in einigen Anlagen eingesetzt.

In der Präsentation werden die Ergebnisse der Labor- und Feldtests im Vergleich zu den derzeit verwendeten Inhibitorsystemen dargestellt und bewertet.

Stichwörter:

Absorptionskälteanlagen, LiBr, Korrosion, Inhibitoren

II.1.14

Untersuchung einer neuartigen Abgaswärmeübertragereinbindung für gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen

Philipp Wagner*, René Rieberer

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

Gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen (GAWP) können einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der Treibhausemissionen beitragen. In den letzten Jahren wurde allerdings nur eine geringe Steigerung des Coefficient of Performance (COP) erzielt. Eine wesentliche Verbesserung der Effizienz kann bei 1-stufigen Prozessen nur über eine Modifikation des Kreislaufes erfolgen.

Heute eingesetzte Abgaskondensatoren (zur Abkühlung des Rauchgases unter den Taupunkt) werden üblicherweise durch den Heizungsrücklauf gekühlt. Vor allem im Retrofitbereich (Nachrüstmarkt) treten aufgrund alter Heizungssysteme Rücklauftemperaturen auf, bei denen es zu keiner Rauchgaskondensation kommt und latente Abgaswärme ungenutzt in die Umgebung emittiert wird. Um das Abgas auf eine möglichst niedrige Temperatur abkühlen zu können, wird ein kältemittelgekühlter Abgaswärmeübertrager, welcher in den Kältekreislauf (nach dem Verdampfer) integriert ist, untersucht.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches einen Effizienzvergleich von unterschiedlichen Einbaukonfigurationen des Abgaswärmeübertragers ermöglicht. Die Simulationsergebnisse wurden an einer realen Kleinanlage mit einer maximalen Heizleistung von 3 kW überprüft. Ebenso wurde der Einfluss der höheren Temperatur des Kältemitteldampfes am Absorbereintritt auf den Absorptionsvorgang näher untersucht.

Stichwörter: Ammoniak/Wasser, Absorption, Energieeffizienz

II.1.15

Präzisierungen zur Methode der charakteristischen Gleichungen

Jan Albers

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin,
jan.albers@tu-berlin.de

Die Methode der charakteristischen Gleichungen hat zum Ziel das Teillastverhalten von Sorptionswärmewandlern (d.h. Ab- und Adsorptionskälteanlagen /-wärmepumpen und -transformatoren) möglichst einfach aber dennoch präzise zu beschreiben. Auf Basis eines Ansatzes von [Furukawa, 1983] für Wärmetransformatoren wurde die Methode von [Ziegler, 1998] und [Schweigler et al., 1999] für Absorptionswärmepumpen weiterentwickelt und zur Anwendung in mehrstufigen Prozessen verallgemeinert. Dabei wurden geschickte Vereinfachungen und Näherungen vorgenommen, so dass z.B. die Kälteleistung \dot{Q}_E einer Absorptionskälteanlage als einfache lineare Gleichung einer charakteristischen Temperaturdifferenz darstellbar ist.

$$\dot{Q}_E = s_E \cdot (\Delta\Delta t - \Delta\Delta t_{min,E}) \quad (1)$$

In der charakteristischen Temperaturdifferenz $\Delta\Delta t$ sind die mittleren Heiß-, Kühl- und Kaltwassertemperaturen zusammengefasst und die Steigungs- und Verlustparameter s_E und $\Delta\Delta t_{min,E}$ können näherungsweise als konstant betrachtet werden.

Bei der praktischen bzw. quantitativen Anwendung dieser Methode kommt es jedoch zu Unstimmigkeiten bzw. Ungenauigkeiten. Hierzu zählt z. B., dass die analytisch berechneten Steigungsparameter s_E nicht mit der ablesbaren Steigung bei Auftragung von simulierten oder gemessenen Kälteleistungen \dot{Q}_E gegen die

charakteristische Temperaturdifferenz $\Delta\Delta t$ übereinstimmen. Darüber hinaus ist der Verlustparamater $\Delta\Delta t_{min,E}$ tatsächlich nicht konstant.

Durch eine Präzisierung der Methode mit Berücksichtigung der i.A. überhitzt oder unterkühlt eintretenden Lösung in den Ab- und Desorber über eine bereichsweisen Wärmeübertragungsrechnung können diese Effekte erklärt und berechnet werden. Damit sind auch die Auswirkungen von unterschiedlichen Wärmeübertragerbauformen (z.B. berieselte oder überflutete Desorber) und Kühlwasserführungen (seriell/parallel) explizit ermittelbar.

Darüber hinaus kann durch die Erweiterung der Berechnungsmethode zu einem Zwei-Schrittverfahren eine noch höhere Genauigkeit erreicht werden, indem die sog. Geometrie-Parameter (zu denen auch der Dühring-Paramater B gehört) nicht mehr konstant gehalten werden. Hierzu ist lediglich eine erneute Berechnung der explizit formulierten Gleichungen notwendig, so dass weiterhin keine Iterationen erforderlich sind und das Verfahren gut zur Regelung von Absorptionskälteanlagen in Industrie-Controller implementiert werden kann.

In dem Beitrag sollen vorrangig die methodischen Präzisierungen bei Herleitung der charakteristischen Gleichungen dargestellt werden. In geringerem Umfang wird auf die Anwendung der präzisierten Methode zur realen Regelung von Absorptionskälteanlagen eingegangen, da diese u.a. in [Albers et al., 2013] und [Albers & Ziegler, 2016] beschrieben sind.

Stichwörter:

Absorptionskälteanlage, charakteristische Gleichung, Regelung, Industrie-Controller

II.1.16

Experimentelle und simulationsgestützte Analyse einer Absorptionskältemaschine für KWKK-Anlagen

Johannes Albert*, René Rieberer

Institut für Wärmetechnik - Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
johannes.albert@tugraz.at

Brennstoffzellen, bedingt durch die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie, bieten gegenüber dem konventionellen Wärmekraftprozess den Vorteil einer Stromerzeugung mit hohem Wirkungsgrad. Zusätzlich kann das heiße Abgas der Brennstoffzelle für Heizzwecke genutzt werden, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad der Anlage erhöht (KWK, Kraft-Wärme-Kopplung). Kann in den Sommermonaten das Abgas nicht oder nur in geringem Maße für Heizzwecke genutzt werden, sinkt die Effizienz der KWK-Anlage bzw. die Jahresnutzungsdauer. Wird das heiße Abgas stattdessen genutzt, um eine Absorptionskältemaschine (AKM) anzutreiben, kann auch Kälte bereitgestellt werden (KWKK; Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung), wodurch sich neue Anwendungsfelder ergeben. Zusätzlich erhöht sich die jährliche Anlagennutzungsdauer.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prototyp einer mit Ammoniak/Wasser betriebenen AKM für die Nutzung des heißen Abgases einer Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) aufgebaut. Ähnlich wie bei gasbefeuerten Absorptionswärmepumpen lassen sich hohe Generatortaustrittstemperaturen (lösungsseitig) erreichen, weshalb eine Rektifikationskolonne und ein Dephlegmator in den AKM-Kreislauf integriert wurden. Mittels Messdaten wurde ein Simulationsmodell validiert und der Einfluss des Dephlegmators auf den Kreislauf untersucht. Dabei zeigt sich, dass durch Zulauf von unterkühlter reicher Lösung in die Rektifikationskolonne hohe Ammoniakkonzentrationen im Dampf am Kolonnenaustritt erzielt werden können. Der Einfluss des Dephlegmators auf die Ammoniakkonzentration ist dadurch gering, jedoch ist eine geringe Effizienzsteigerung möglich. Des Weiteren wurde die Niederdruckregelung analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Lage des Niederdrucks entscheidenden Einfluss auf die Effizienz hat. Basierend auf den Messdaten wurde mit einem Simulationsmodell eine Korrelation erstellt, mit der der optimale Niederdruck für die Anlage bestimmt werden kann. Diese Ergebnisse werden mit Untersuchungen aus der Literatur verglichen.

Stichwörter:

Ammoniak/Wasser, KWKK, Dephlegmator, Niederdruck

II.1.17

Einfluss von Schüttungsparametern auf das Verhalten luftgekühlter Plattenadsorber

Mike Jäger^{*}, Felix Ziegler, Julia Römer, Kristian Hurtig, Roland Kühn

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin,
mike.jaeger@tu-berlin.de

Um die Wärmenutzung insbesondere aus Fernwärmesetzten im Sommer zu erhöhen, werden heute zunehmend thermisch betriebene Kälteanlagen eingesetzt. Die Verwendung fester Adsorbentien hat den Vorteil, dass diese typischerweise nicht korrosiv sind und wie das häufig verwendete Kältemittel Wasser ungiftig und umweltverträglich. Für passiv gekühlte Kleinstkälteanlagen bieten sich feste Adsorbentien besonders an.

In der Veröffentlichung wird eine Sorbensschüttung in einem mit Umgebungsluft gekühlten Plattenadsorber für eine Kleinstadsorptionskälteanlage theoretisch betrachtet. Hierfür wird, ausgehend von der gekoppelten Massen- und Energiebilanz der Einzelpartikel, eine Kopplung der Massen-, Energie- und Impulsbilanz der Gesamtschüttung und der Umgebung vorgenommen. Hiermit lassen sich die Einflüsse von Schüttungsparametern, wie Schüttungsdicke und -tiefe sowie Partikeldurchmesser, auf Effizienz und Kälteleistung analysieren. Die direkte Kühlung der Adsorptionskammer mit Umgebungsluft spielt hierbei eine besondere Rolle.

Es zeigt sich, in Abhängigkeit von einer definierten Zyklenzzeit, sowohl eine kritische Schüttungsdicke als auch Schüttungstiefe, ab welcher sich die Kälteleistung nicht mehr vergrößern lässt und die Effizienz bei weiterer Vergrößerung deutlich herabgesetzt wird. Außerdem zeigt der Partikeldurchmesser merklichen Einfluss auf die Dynamik der Adsorptionskammer, besonders bei großen Schütttiefen. Der Einfluss der vorgenannten Größen auf den zeitlichen Verlauf der Kälteleistung wird ebenfalls diskutiert.

Stichwörter:

thermische Kälteanlage, Adsorptionskälteanlage, Simulation, Adsorption, passive Kühlung

II.1.18

Beschichtete Adsorber für thermisch betriebene Kälteanlagen: Vermessung und Analyse leistungsoptimierter Adsorptionsmodule

Harry Kummer^{1*}, Alexander Warlo¹, Eric Weisheit², Phillip Bendix¹,
Gerrit Füldner¹, Roger Gläser³, Stefan Henninger¹

1 Fraunhofer, Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstraße 2, 79110
Freiburg, harry.kummer@ise.fraunhofer.de

2 InvenSor GmbH, Niederlassung Berlin, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin,
eric.weisheit@invensor.de

3 Institut für Technische Chemie, Universität Leipzig, Linnéstr. 3, 04103 Leipzig,
roger.glaeser@uni-leipzig.de

Die Nutzung von Wärme zur Erzeugung von Kälte über thermisch angetriebene Adsorptionskälteanlagen bietet eine ressourcenschonende Alternative zur Kompressionskälte, die inzwischen in vielen Bereichen, beispielsweise bei Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, kurze Amortisationszeiten aufweisen.

Die Limitierung durch Wärme- und Stofftransport ist eine Herausforderung für den Betrieb solcher Anlagen. Eine effiziente Wärmeankopplung durch eine Beschichtung auf einem Wärmeübertrager (WÜ) erlaubt kurze Zyklenzeiten und damit einhergehend hohe Leistungen und Leistungsdichten [1].

Konventionelle Alu-Lamellen-Kupferrohr – Wärmeübertrager (Abmessungen ca. 400 x 210 x 70 mm³) wurden mit einem kommerziell erhältlichen Titano-Silicoalumophosphat (TiAPSO) (SCT323, Clariant Produkte GmbH, Bitterfeld) beschichtet. Dieser weist eine hohe Langzeitstabilität auf und ist für Kühlanwendungen bei Antriebstemperaturen ab 85°C geeignet. Als Binder wurde ein Silikonharz verwendet, der die Wasseraufnahmekapazität nicht beeinflusst, gegenüber bisher gebräuchlichen organischen und anorganischen Bindern eine erhöhte Lebensdauer aufweist und kompatibel zu einer Vielzahl an Adsorbentien ist [2]. Die Beschichtung erfolgte paarweise: eine dünne Beschichtung (Schichtdicke ca. 150 µm) für kurze Zyklenzeiten und eine Volumenfüllung für hohe COP-Werte.

Die Vermessung der Kinetik und Leistung erfolgte zuerst per Drucksprung-Methode am Fraunhofer ISE [3], anschließend bei InvenSor in einem neu ausgelegten Adsorptionsmodul (2 Adsorber-Kammern, getrennter Verdampfer/Kondensator) mit eigener, geschwindigkeitsoptimierter Hydraulikschaltung, Regelung und Wärmerückgewinnung (WRG). Im Testbetrieb konnten hiermit Halbzyklenzeiten von 20 s und Volumenleistungsdichten des Adsorbers (volume specific cooling power, VCP) von 750 W/L für einen Nenn-Betriebspunkt von 85°C | 27°C | 18°C erreicht werden.

Eine weitergehende Bewertung der Teststand- und Demonstrator-Ergebnisse liefert eine Abschätzung der dominierenden Transportwiderstände. Anhand dessen können Limitierungen des Adsorbers aufgezeigt und zu erwartende Leistungen bei unterschiedlichen Temperaturrandbedingungen und Betriebspunkten vorhergesagt werden [4].

Stichwörter:

Adsorptive Beschichtung, Adsorptionskälte, modifizierter SAPO-34, Treibende Temperaturdifferenzen

II.1.19

Untersuchung eines Latentwärmespeichers mit Naturumlauf für Kälteteillast

Andreas Wagner^{*1}, Robin Langebach¹, Ullrich Hesse¹

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

andreas_wagner@tu-dresden.de

Robin.Langebach@tu-dresden.de

Ullrich.Hesse@tu-dresden.de

Die thermische Konditionierung von Kammern oder Räumen mit betriebsbedingt stark schwankenden Temperatur- und Leistungsanforderungen (z.B. bei der Bauteilprüfung) stellen für typische Kompressionskälteanlagen eine große Herausforderung dar. Diese zeigt sich vorrangig in geforderten schnellen Temperaturwechseln, aber auch im langen Halten von definierten Temperaturen. In der Folge ergibt sich ein außerordentlich weiter Teillastbereich, dessen Effizienz bei Verwendung der üblichen Regelungsmethoden wie die Niederdruck- oder Heißgasbypassreglung im Allgemeinen stark vermindert ist.

Die direkte Einbindung eines Latentwärmespeichers in den Kältekreislauf kann hier eine effiziente Möglichkeit zur Bereitstellung von besonders kleinen Kälteleistungen im Teillastbereich über einen längeren Zeitraum darstellen. Dabei soll der Latentwärmespeicher über einen im Speichermaterial befindlichen Zusatzverdampfer in geeigneten Betriebsphasen beladen werden können. Beim späteren Entladen wird im Zusatzverdampfer nunmehr das Kältemittel kondensiert und dem Hauptverdampfer der Kälteanlage zur Verfügung gestellt. Hierbei bietet sich – bei geeignetem konstruktivem Aufbau der Kälteanlage – zusätzlich die Verwendung des Naturumlaufprinzips an, das vollständig auf weitere Pumpen verzichtet.

Die vorliegenden Untersuchungen erläutern zunächst mit theoretischen Betrachtungen an einem konkreten Beispiel den Einsatzkorridor für die Einbindung eines Latentwärmespeichers mit Naturumlauf. Darüber hinaus werden erste Vorversuche an einem neuen Prüfstand an der TU Dresden präsentiert, mit denen im aktuellen Stadium der Untersuchungen ein grundsätzlicher Funktionsnachweis erbracht werden konnte.

Stichwörter: effizienter Teillastbetrieb, Latentwärmespeicher, Naturumlauf

II.1.20

Techno-ökonomische Analyse eines Verbundsystems aus Photovoltaik-Anlage, R290-Kaltwassersatz und PCM-Kältespeicher

Paul Kohlenbach^{1*}, Mora Fernandez Jurado¹, Victoria Sinner¹, Burkhard Dunst²

¹ Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VIII, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin,
kohlenbach@beuth-hochschule.de

² Frigoteam Handels GmbH, Fritschestraße 68, 10585 Berlin

Unter dem Oberbegriff „Photovoltaische Kühlung“ versteht man Anlagen zur Bereitstellung von Kälte, welche ganz oder teilweise mit Solarstrom betrieben werden. Der Anteil der aus Solarstrom erzeugten Kälte am Gesamtkältebedarf hängt u.a. vom Solarstandort, vom Lastprofil der Kälteanlage und von der Möglichkeit der Stromspeicherung ab. Stand der Technik zur Speicherung von überschüssigem Solarstrom sind Batteriespeichersysteme.

In diesem Artikel wird nun untersucht, unter welchen Randbedingungen der Einsatz einer photovoltaisch-basierten Kälteanlage mit thermischer Speicherung der erzeugten Kälte wirtschaftlich sinnvoll ist. In der vorgestellten Anlagenkonfiguration wird keine Batterie zur Speicherung von elektrischer Energie eingesetzt. Stattdessen wird überschüssiger Solarstrom direkt in Kälte umgewandelt und in einem Speicher mit Phasenwechselmaterial (engl. Phase change material, PCM) gespeichert.

Es wird ein Vergleich der Anlagenkonfiguration inkl. PCM-Speicher mit einer herkömmlichen Batteriespeicheranlage als Referenzsystem gezogen. Als Einflußgröße wird die Levelized Cost of Cooling Energy (LCCE) definiert. Insbesondere wird untersucht wie installierte PV-Leistung und PCM-Speichergröße zusammenhängen.

Es werden Sensitivitätsanalysen der folgenden Parameter auf die LCCE präsentiert:

- Installierte PV-Leistung
- Investitionskosten
- Kosten für Strom- bzw. Kältespeicher.

Stichwörter

Photovoltaik, Solares Kühlen, Kältespeicher, Solare Klimatisierung, Phase Change Material, Phasenwechselmaterial, solar-elektrisches Kühlen, Stromkosten, Stromspeicher, Kompressionskältemaschine, Levelized Cost, Propan, R290

II.1.21

Systematische Suche und Erprobung von Ersatzkältemitteln für Anwendungen in der Klimasimulation bis -40 °C

Andreas Wagner^{*1}, Raimund Kögler², Robin Langebach¹, Ullrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
andreas_wagner@tu-dresden.de, Robin.Langebach@tu-dresden.de, Ullrich.Hesse@tu-dresden.de

² Feutron Klimasimulation GmbH, Am Weberbrunnen 1, 07957
Langenwetzendorf, raimund.koegler@feutron.de

Zur Qualitätssicherung und Qualifizierung von technischen Funktionseinheiten oder Materialien werden diese häufig verschiedenen Prüfprozessen bei wechselnden Umgebungsbedingungen unterworfen. Im Detail werden meist Temperatur und Luftfeuchte sowie zusätzliche weitere Umgebungsbedingungen variiert. Bei der Prüfung

werden individuell abgestimmte, teils genormte Prozeduren zur Umweltsimulation angewendet. Diese können mit speziellen Klimasimulationskammern realisiert werden.

Bei den im Markt üblichen Klimasimulationskammern wird die notwendige Kälteleistung durch den Einsatz einer Kompressionskälteanlage gewährleistet, durch eine elektrische Heizung wird die notwendige Wärme zum Wiederaufheizen bereitgestellt. Die minimalen Temperaturen von Standardkammern liegen je nach Kammertyp bei ca. -40 °C bzw. -75 °C. Zur Bereitstellung dieser Temperaturen sind thermodynamisch geeignete Kältemittel notwendig, welche mit der 2015 in Kraft getretenen EU F-Gase-Verordnung konform sind. Danach dürfen ab dem Jahr 2020 im stationären Bereich Kältemittel mit einem GWP-Wert von über 2500 nicht mehr verwendet werden.

Bei Klimakammern bis -40 °C werden momentan üblicherweise die Kältemittel R404A oder R507 eingesetzt. Diese weisen allerdings einen GWP-Wert von 3922 bzw. 3850 auf und sind somit vom Verbot betroffen.

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst in einer theoretischen Studie geeignete und marktverfügbare Kältemittel anwendungsspezifisch verglichen. Darüber hinaus werden besonders attraktive Ersatzkältemittel in einer Standardtemperaturkammer experimentell untersucht. Die experimentelle Untersuchung der neuen Kältemittel hat gezeigt, dass – nach kleineren Änderungen in der Regelung – gemäß der DIN EN 30038-3-5 teilweise sogar höhere Abkühlgeschwindigkeiten als mit dem ursprünglichen Kältemittel erzielt werden können.

Stichwörter:

Klimasimulation, EU F-Gase-Verordnung, Ersatzkältemittel, Erprobung

II.1.22

Propan/Isobutan Gemisch als alternatives Kältemittel in Kompressionskältemaschinen: Eine experimentelle Untersuchung

V. Venzik^{*}, D. Roskosch, B. Atakan

Thermodynamik, IVG, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen,
Lotharstr. 1, 47048 Duisburg,
valerius.venzik@uni-due.de

Begründet durch politische Vorschriften, müssen die momentan gängigen Kältemittel (z.B. R134a) zukünftig durch umweltfreundlichere Fluide ersetzt werden. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die natürlichen Kältemittel. Isobutan und Propan sind Vertreter dieser Gruppe. Beide Fluide sind umweltfreundlich, kostengünstig, in großen Mengen vorhanden und besitzen gute thermodynamische Eigenschaften. Werden beide Fluide gemischt, resultiert ein zeotropes Gemisch. Basierend auf thermodynamischen Grundüberlegungen, führt der für zeotrope Gemische charakteristische Temperaturlgleit, in den Wärmeübertragern zu verminderter Exnergieverlust und damit zur Erhöhung der Leistungszahl. Neben dem veränderten Prozessverhalten innerhalb der Wärmeübertrager, wird allerdings auch das Prozessverhalten weiterer Komponenten mitbeeinflusst, was in der Fülle rein theoretischer Studien nicht berücksichtigt wird.

Zur Ergänzung und Validierung theoretischer Untersuchungen, wurde ein Wärmepumpenversuchstand im Labormaßstab aufgebaut, in dem unterschiedliche Fluide und Fluidgemische systematisch experimentell untersucht werden können. Die Anlage erlaubt neben der Messung von Massenströmen, Temperaturverläufen und Druckniveaus auch die Untersuchung der Leistungszahl als Funktion der Verdichterleistung sowie die Analyse der Gemischzusammensetzung. Das Betriebsverhalten der Anlage wurde nun sowohl für die Reinstoffe Isobutan und Propan als auch für deren Gemische untersucht. Die erreichten Leistungszahlen, isentropen Wirkungsgrade des Verdichters, Temperaturlgleits und Exnergieverluste in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur (0°C bis 6°C), für eine Kondensationstemperatur von 30°C, bei unterschiedlichen Verdichterleistungen bzw. -drehzahlen (1050 min⁻¹, 1500 min⁻¹ und 2100 min⁻¹) werden vorgestellt und diskutiert.

Im stationären Betrieb wird durch den Einsatz eines zeotropen Gemischs im Vergleich zu den Reinstoffkomponenten eine Effizienzerhöhung erzielt. Die höchsten Leistungszahlen werden bei einer

Gemischzusammensetzung von $xC4H10=0,6$; $xC3H8=0,4$ erreicht und liegen je nach Randbedingung zwischen 3,3 und 5,4. Entgegen theoretischer Vorhersagen, zeigen allerdings die experimentellen Ergebnisse für das Gemisch $xC4H10=0,6$; $xC3H8=0,4$ nur eine leichte Verbesserung der Leistungszahl von 5,2 % im Vergleich zum Reinstoff Propan. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Hauptgründe für die Abweichung zwischen Theorie und Praxis darin begründet sind, dass einerseits der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters von der Zusammensetzung abhängig ist und ferner der Druckverlust in den Wärmeübertragern den tatsächlich nutzbaren Temperaturlgleit mindert. Beide Effekte werden im Allgemeinen in theoretischen Ansätzen nicht berücksichtigt.

Stichwörter:

Kompressionskältemaschine, Wasser/Wasser Wärmepumpe, natürliche Kältemittel, zeotropes Kältemittelgemisch, Temperaturlgleit

II.1.23

Dynamisch validierte Kältekreislaufsimulation eines Haushaltsgefrierschranks mit IPSEpro

Mario Rohrhofer¹, Bernhard Zuber^{1*}, Stefan Posch¹, Johann Hopfgartner¹, Raimund Almbauer¹, Erhard Perz²

¹ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz,
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Österreich

² SimTech GmbH, Riesstraße 120, 8010 Graz, Österreich

Der Entwicklungsprozess von energieeffizienten Haushaltskühl- und Gefriergeräten ist in der Praxis durch aufwendige und teure Experimente gekennzeichnet. Um diesen Entwicklungsprozess selbst effizienter zu gestalten, wurden an der Technischen Universität Graz dynamische (instationäre) Modelle der Einzelkomponenten des Kältekreislaufs von Haushaltskühlgeräten entwickelt. Um die Bedienbarkeit über das Forschungsprojekt hinaus zu gewährleisten und auch die industrielle Anwendung zu ermöglichen, wurden diese Modelle in der kommerziellen Software IPSEpro implementiert. Der Vorteil eines solchen Simulationsprogramms liegt in der Einfachheit Parameterstudien durchzuführen oder Änderungen am Aufbau des Geräts umsetzen. Mittlerweile wurde ein Haushaltsgefrierschrank in IPSEpro abgebildet und dynamisch validiert. Darüber hinaus wurde das Modell bereits verwendet, um Potenziale für die Steigerung der Energieeffizienz aufzuzeigen.

In dieser Arbeit werden die Modelle der Einzelkomponenten vorgestellt und eine semi-automatische Methode für die dynamische Validierung beschrieben. Weiter werden Resultate des validierten Modells und die Möglichkeiten der Anwendung gezeigt.

Stichwörter:

Kältekreislauf, Dynamik, Validierung, R600a, IPSEpro

II.2.01

CO₂Otec Evo: second generation of efficient transcritical CO₂ systems for all climates

Sascha Hellmann^{1*}, Dominique Giraud²

¹ Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH, Mainz-Research & Design Center, Am Mainzer Weg 7,
55246 Mainz-Kostheim, Deutschland
sascha.hellmann@carrier.utc.com,

² Profroid Industries, 178 Rue du Fauge, ZI Les Paluds, 13782 Aubagne-Cedex,
Frankreich dominique.giraud@profroid.com

Durch die neu verabschiedete EU F-GaseVO wird die Nutzung von fluorierten Kohlenwasserstoffen als Kältemittel in den kommenden Jahren zunehmend eingeschränkt und signifikant teurer. Bereits heute sind HFKW-Kälteanlagen in weiten Teilen Europas mit hohen Steuern belegt und nicht zuletzt dadurch ist eine stetig steigende Marktdurchdringung von gewerblichen Kälteanlagen mit dem Arbeitsstoff CO₂ zu beobachten.

Die Effizienz von CO₂ als Arbeitsstoff in kalten und mittleren Klimaten ist bereits in den ersten Systemen transkritischer Kälteanlagen höher, verglichen mit HFC Referenzsystemen.

Allerdings war die Effizienz von CO₂ in warmen und heißen Klimaten in der Jahresbetrachtung geringer. Um diesen „CO₂ Effizienz Äquator“ zu eliminieren hat Carrier Kältetechnik bereits mehrere Lösungen entwickelt und installiert um die Effizienz zu erhöhen. Zum Beispiel mechanische Unterkühler basierend auf Kohlenwasserstoff oder Economizeranlagen (Parallelverdichtung). Die derzeit neueste Entwicklung von Carrier ist der regelbare Ejektor. Er wurde speziell für die wärmeren Regionen entwickelt um auch hier von dem natürlichen Kältemittel CO₂ zu profitieren.

Das Produkt „CO₂OLtec Evo“ spiegelt die derzeit neueste Generation dieser effizienten CO₂ Kälteanlagen wider. Basierend auf dem Carrier regelbaren Ejektor und anderen Baugruppen entsprechend der gewünschten Anwendung.

Das Kernstück der Anlage wurde entwickelt und optimiert für einen ganzjährig überfluteten Betrieb der Kühlstellen mit Hilfe des regelbaren Ejektors unterstützt durch eine subkritische CO₂ Pumpe. Abhängig von Kundenwünschen und Anwendungsschwerpunkten kann aus einer Palette von weiteren Optionen gewählt werden um die Effizienz weiter zu erhöhen und/oder weitere Anforderungen z.B. Warmwasserauskopplung, Kaltwasserauskopplung oder Wärmepumpenbetrieb zu erfüllen.

Unser Fokus lag dabei darauf unser Wissen in ein Systemkonzept zu transferieren das adaptiv / modular aufgebaut ist und bei gesteigerter Effizienz eine reduzierte Komplexität aufweist.

Das System CO₂OLtec EVO ist verfügbar für alle Klimate. Es eliminiert dadurch nicht nur den „CO₂ Effizienz Äquator“ sondern erhöht dadurch auch die Effizienz für Anlagen in kalten und mittleren Klimaten. Das System liefert optimale Ergebnisse mit geringer Komplexität für alle Anwendungen auch unter Teillast. Dieser Artikel zeigt den derzeitigen Entwicklungsstand sowie die Ergebnisse von Feldanlagen.

Stichwörter: CO₂, Effizienz, Ejektor, Supermarktkälteanlage, R744, CO₂ Pumpe

II.2.02

Mechanische, stufenlose Kapazitätsregelung für transkritische CO₂-Anwendungen

Florian Schacherreiter^{1*}, Roland Cesak², Martin Lachmann²

¹ HOERBIGER Ventilwerke GmbH, Seestadtstraße 25, 1220 Wien, Österreich

² HOERBIGER Kompressortechnik GmbH, Im Forchet 5, 86956 Schongau, Deutschland

In Kälte- bzw. Klimaanlagen muss der vom Verdichter geförderte Kältemittel-Massenstrom dem aktuellen Kälteleistungsbedarf angepasst werden. Bei Kolbenverdichtern wird dieser Massenstrom entweder durch Variation der Verdichterdrehzahl mittels Frequenzumrichter geregelt, oder mittels mechanischer Regelungssysteme, die bei konstanter Drehzahl arbeiten. In der Vergangenheit wurden diverse Konzepte solcher mechanischer Kapazitätsregelungen, unterschiedlicher Bauformen und Funktionsweisen, entwickelt. Besonders etabliert hat sich dabei die sogenannte Zylinderbankabschaltung.

Diese Systeme wurden allerdings mit Fokus auf die häufig eingesetzten HFKW-Kältemittel, wie R134a, oder R404A entwickelt und hinsichtlich deren charakteristischer Betriebspunkte ausgelegt. In transkritischen CO₂-Anlagen mit den damit einhergehenden, typischen hohen Drucklagen können sie nicht eingesetzt werden. Gerade diese Anlagen erfahren gegenwärtig aber, vorangetrieben durch verschärfte Umweltauflagen wie der F-Gase Verordnung, ein besonders starkes Wachstum.

In dieser Arbeit wird nun ein neues Konzept einer stufenlosen, mechanischen Zylinderbankabschaltung für transkritische CO₂-Anlagen vorgestellt und dessen Aufbau und Funktionsweise erläutert. Die Effizienz des Regelbetriebs wird mittels 0D/1D-Simulationen untersucht und wesentliche, effizienzbestimmende Einflussparameter identifiziert. Schließlich werden diese Ergebnisse mittels Messungen auf realen Kälteanlagen verifiziert.

II.2.03

Experimental investigation and performance comparison of a transcritical CO₂ unit operating with flash gas by pass und mechanical sub cooler

Quinn, M.V.* , Winandy, E.* , Lenz, M.*

Emerson Commercial & Residential Solutions, Pascalstrasse, 65, 52076 Aachen,
MatthewQuinn@Emerson.com

The Montreal protocol has been effective in phasing down 98% of Ozone-Depleting Substances (ODS) and with the Kigali amendment, a target phase-down to 15% of fluorinated gases (HFCs) by 2035 versus the 2011-2013 base line has been agreed for the main group of non-article 5 countries, including Europe.

With these regulations in place and planned phase-down of fluorinated refrigerants it becomes important to develop high efficient low GWP refrigeration systems to future proof the provision of cooling within the industry. Natural refrigerants including CO₂ are proven, effective replacements to high GWP refrigerants. The use of CO₂ however, brings about further challenges with respect to efficiency, often requiring more complex systems to deliver comparable performance to HFC's; with respect to high system pressures and pressure management; and with respect to transcritical operation at higher ambient temperatures which can have a negative impact on the global/seasonal performance. Within this paper, a transcritical CO₂ unit is numerically and experimentally evaluated operating under three refrigeration circuit layouts; 1) as a basic, standard vapour-compression system, including compressor, electronic expansion valve, evaporators, flash tank, gas-cooler and high pressure electronic valve; operating under this cycle brings about challenges at ambient temperatures exceeding 35°C. 2) as a flash-tank by-pass cycle, with the addition of a by-pass line from the flash-tank through an electronic expansion valve to the compressor suction; utilising this cycle allows the increase of the ambient temperature operating point, in the region of 40°C. 3) as a mechanical sub-cooling cycle, with the addition of a mechanical sub-cooling unit installed at the gas-cooler outlet; operating under this cycle alleviates the challenges at ambient temperatures exceeding 35°C whilst also providing an increase in both cooling capacity and COP. The performance of each system is evaluated in-turn and compared with the baseline.

II.2.04

Regelbaren Ejektoren in transkritischen CO₂-Anlagen

Andres Hegglin

Wurm (Schweiz) AG, Reutlingerstrasse 116, 8404 Reutlingen/Winterthur, Schweiz,
hegglin@wurm.ch

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

II.2.05

Niedrig-GWP-Kältemittel für Wärmepumpen

Tunca Sekban

Honeywell Stationary Refrigerants, Liongate Ladymead, Guildford Surrey, GU1 1AT United Kingdom
tunca.sekban@honeywell.com

Mit der Einführung der F-Gas Regelung und Abkommen von Kigali ist die Wichtigkeit von Kältemittel mit niedrigen GWP (Treibhauspotential) wieder angewachsen.

Das Grundziel dieses Vortrags ist es, die Wärmepumpenhersteller, HVAC-Berater und Auftragnehmer über die letzten Entwicklungen in der Kältemitteltechnologie zu informieren.

Der Schwerpunkt liegt auf der Heizgeräte mit Luftquelle / Bodenquelle und auf den Wäschetrocknern mit Wärmepumpen, wobei neue Kältemittel-Technologien die Gesamtleistung von Wärmepumpen optimieren und die Einhaltung der aktuellen Gesetze sicherstellen können.

II.2.06

R-404A-Ersatz in der Kleinkälte – Leistungstest in einem gewerblichen Tiefkühlschrank

Stephen Spletzer¹, Joachim Gerstel^{2*}

¹The Chemours Company, Wilmington, DE, USA

²Chemours Deutschland GmbH, Neu-Isenburg, joachim.gerstel@chemours.com

R-404A ist ein teilhalogeniertes Fluorkohlenwasserstoff (HFKW)-Kältemittel und war bis vor kurzem der globale Industriestandard für den gewerblichen Einsatz in den meisten Normal- (NK) und Tiefkühl- (TK)Systemen. Angesichts des hohen globalen Treibhauspotenzials (AR4 [ITH=100 Jahre] GWP = 3922) sind Ersatzmittel für R-404A mit geringeren GWP-Werten dringend erforderlich. Insbesondere erfordert die EU F-Gas-Verordnung EG 517/ 2014 die Verwendung von niedrigeren GWP-Alternativen.

Als Antwort auf diese Anforderungen wurden zwei Hydrofluorolefin (HFO) basierende Kältemittelgemische, Opteon™ XL 20 (R-454C) und XL 40 (R-454A) mit GWP<150 bzw. <250 entwickelt. Beide Alternative sind eine Mischung aus HFO-1234yf und HFKW-32. HFO-1234yf als Basis-Komponente führt zu einer starken Verringerung der GWP-Werte. Zur Erhöhung der Kälteleistung wurde HFKW-32 hinzugefügt. Somit sollte die Leistung beider neuen Produkte mit der von R-404A vergleichbar sein.

Der Artikel 11 Absatz 1 der F Gas VO verbietet ab Jan 2022 den Einsatz von Kältemitteln mit einem GWP>150 in hermetisch geschlossene Kühl- und Gefriergeräten. Opteon™ XL20 (R-454C) wurde für diese Systeme entwickelt. Opteon™XL40 (R-454A) bietet eine etwas höhere Kälteleistung mit einem etwas höheren GWP, die hervorragende Lösung für kleinere, jedoch nicht hermetisch geschlossene Systeme. Trotz der schweren Entzündbarkeit (Sicherheitsklasse A2L), kann R-454A bei Einhaltung gültiger Normen und Vorschriften sicher in geschlossenen Systemen eingesetzt werden.

Der vorliegende Beitrag präsentiert Ergebnisse aus experimentellen Tests von XL 20 und XL 40 in einem gewerblichen Tiefkühlschrank, welcher ursprünglich für R-404A ausgelegt und hergestellt wurde. Die Parameter Druck, Temperatur, Massenstrom sowie Energieverbrauch werden gemessen und mit der R-404A-Basis verglichen.

II.2.07

Nicht brennbares, natürliches Kältemittel zur Kühlung unterhalb von -50 °C

Joachim Germanus*, Torsten Burkholz

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
joachim.germanus@ilkdresden.de

Bisher werden R-23 und R-14 als nichtbrennbare Kältemittel zur Kühlung bei Temperaturen unterhalb von -50 °C eingesetzt. Praktisch anwendbare Alternativen stehen bisher kaum zur Verfügung oder können nur mit brennbaren Kältemitteln realisiert werden. In der F-Gase-Verordnung ist aus diesem Grund eine Ausnahmeregelung enthalten, die es gestattet, Kältemittel mit sehr hohen GWP-Werten auch weiterhin zur Produktkühlung bei Temperaturen unterhalb von -50 °C einzusetzen.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit werden Ideen aus der Vergangenheit aufgegriffen und weiterentwickelt, die sich bereits mit Alternativen beschäftigten, jedoch aus verschiedenen Gründen nicht fortgeführt werden konnten.

Experimentelle Untersuchungsergebnisse zur Qualifizierung eines möglichen Alternativkältemittels sollen dessen Vor- und Nachteile aufzeigen. Besonderen Wert wird hierbei auch auf die Einbeziehung eines geeigneten Schmierstoffes gelegt, der für die kältetechnische Umsetzung in einem dafür geeigneten Verdichter unabdingbar ist.

An Hand eines Kleinkälte-Demonstrators sollen erste Ergebnisse vorgestellt werden, wie sich das Kältemittel in Kombination mit dem ausgewählten Schmierstoff bewährt und welche Ergebnisse sich damit erzielen lassen.

Stichwörter:

Kältemittel, Tieftemperatur, nicht brennbar

II.2.08

Sicherheitsstandards brennbare Kältemittel, aktuelle Trends

Holger König*

ref-tech engineering, Bechtersweiler 31, 88131 Lindau (Bodensee); Mitautor UNEP TEAP XXVIII/4 TF Report
holger.koenig@ref-tech.de

Im Rahmen der Montreal Protokoll Vertragsstaatenkonferenz wurde in Kigali in 2016 für Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial ein schrittweiser Phase Down mit erheblichen Auswirkungen auf die Kältetechnik beschlossen. Weniger beachtet wurde, dass in Kigali auch andere wegweisende Entscheidungen getroffen wurden, unter anderem die Entscheidung XXVIII.

Der Inhalt dieser Entscheidung fordert UNEP TEAP auf, einen Task Force Bericht zum Thema: SAFETY STANDARDS FOR FLAMMABLE LOW-GLOBAL-WARMING-POTENTIAL (GWP) REFRIGERANTS zu verfassen und den Stand sowie die Trends bei Sicherheitsstandards für die Folgekonferenzen zu dokumentieren. Der Bericht wurde im Mai 2015 fertiggestellt und publiziert (www.ozone.unep.org), er wurde von Mitgliedern des UNEP RTOC (Refrigeration Technical Options Committee) und von Experten erarbeitet, die Sicherheitsstandards für Kältetechnik in Standard - Komitees entwickeln.

Diese Entscheidung basiert auf der Erkenntnis, dass bei einem Ausstieg aus den HFC-Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial als Ersatzstoffe –neben NH₃, CO₂, u.a. – nur brennbare Kältemittel verbleiben. Die Brennbarkeit und deren Berücksichtigung bei Design, Umgang, Produktion, Bau, Betrieb, Außerbetriebnahme, Entsorgung und vor allem im Bereich Service und Wartung sind Fragestellungen, die in der Vergangenheit bei den überwiegenden kältetechnischen Anlagen eher eine untergeordnete Rolle gespielt haben, da unbrennbare Arbeitsstoffe zum Einsatz kamen.

In diesem Vortrag wird die politische Sachlage besprochen, die Ergebnisse des Berichtes skizziert und ein Überblick über die Möglichkeiten zum sicheren Einsatz von brennbaren Kältemittel gegeben.

Als eine wesentliche Erkenntnis hat sich ergeben, dass Risikoanalysen die geeigneten Werkzeuge sind, die die sichere Anwendung von brennbaren Kältemitteln ermöglichen. Diese Methodik wird zunehmend in der Kältetechnik verwendet um tatsächliche Risiken von brennbaren Arbeitsstoffen im Lebenszyklus des Produktes in seiner Anwendung zu bewerten.

Die weltweiten Bemühungen die Risikoanalyse in internationale Sicherheitsstandards der Kältetechnik einfließen zu lassen werden dargelegt. Darüber hinaus werden die Elemente der Risikoanalyse kurz skizziert.

Stichwörter:

Risikoanalyse brennbare Kältemittel, R290, R1270, R1234yf, R32, Kigali 2016, UNEP TEAP

II.2.09

HFKW nach dem Kigali-Beschluss - Weltweite Reduktion erfordert Alternativen

Kristina Warncke, Dr. Felix Heydel*

Öko-Recherche GmbH, Münchener Str. 23, 60329 Frankfurt am Main,
Felix.Heydel@oekorecherche.de

Im Rahmen des Montrealer Protokolls zum Schutz der Ozonschicht wurde im Oktober letzten Jahres der Beschluss von Kigali zur stufenweisen Reduktion des weltweiten HFKW-Verbrauchs gefasst. Dem erwarteten Mengenanstieg – vor allem als Folge des Ausstiegs aus Ozonschicht zerstörenden Stoffen (ODS) in Entwicklungsländern – soll damit Einhalt geboten werden. Der Beschluss soll den Einfluss der HFKW auf die

globale Erwärmung senken und zum allgemeinen Klimaziel beitragen, die globale Erwärmung bis Ende des Jahrhunderts auf unter 2°C zu begrenzen.

Bereits in den letzten Jahren haben einige Länder, unter anderem auch die EU-Staaten, Maßnahmen gegen die Klimawirkung von HFKW ergriffen. So erfüllt die EU F-Gas-Verordnung schon heute die Anforderungen des Kigali-Beschlusses. Im internationalen Vergleich sehen die politischen Maßnahmen recht unterschiedlich aus. In den sogenannten Entwicklungsländern dürfen in vielen Bereichen noch ODS zur Anwendung kommen, allerdings müssen seit 2015 auch diese Länder schrittweise aus den ODS aussteigen. Sie könnten nun, anstatt erst auf HFKW umzusteigen, direkt klimafreundlichere Ersatzstoffe und -verfahren nutzen, die in Industrieländern bereits Trend sind. Natürliche Kältemittel sind in diesem Zusammenhang geeignete Alternativen, auch wenn ihre Einführung mit Herausforderungen konfrontiert ist wie Sicherheitsstandards, Verfügbarkeit geeigneter Komponenten, ausreichendem technischen Know-how für ihre Anwendung, sowie der Ausbildung von technischem Personal.

Der Vortrag wird zunächst den Kigali-Beschluss mit seinen Reduktionsschritten erläutern. Dann werden anhand einiger Beispiele bereits realisierte politische Maßnahmen zur HFKW-Regelung in verschiedenen Ländern vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird auch beleuchtet, inwiefern Alternativen zu HFKW bereits weltweit Anwendung finden.

Experten der Öko-Recherche sind seit 2005 als Berater der EU Kommission zu den internationalen Verhandlungen des Montrealer Protokolls und zur Überarbeitung und Ausführung der EU F-Gase-Verordnung tätig.

II.2.10

Effizienzsteigerung einer CO₂-Kälteanlage mittels Adsorptionsunterkühler

Thomas Tannert^{*}, Robin Langebach, Christoph Lenz, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden,
thomas.tannert@tu-dresden.de, robin.langebach@tu-dresden.de

CO₂-Kälteanlagen werden – nicht zuletzt aufgrund der in Kraft getretenen EU-F-Gase Verordnung – immer beliebter in Supermärkten zur Kälteversorgung. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des CO₂ leidet die Effizienz der Anlagen jedoch bei hohen Außenlufttemperaturen bedingt durch den transkritischen Betrieb. Am Markt haben sich verschiedene Methoden etabliert, diese Effizienznachteile auszugleichen. In Forschung und Entwicklung werden weitere Methoden untersucht, um weitere Effizienzsteigerungen zu erzielen. Eine Möglichkeit besteht in der Einbindung einer Adsorptionskältemaschine zur Unterkühlung des CO₂ nach dem Gaskühler. Die zum Antrieb notwendige Wärmeleistung wird dem Heißgas am Verdichteraustritt entzogen.

Durch eine theoretische Betrachtung wird untersucht, in welchem Umfang und unter welchen Betriebsbedingungen eine Effizienzsteigerung des Verbundes aus CO₂-Kälteanlage und Adsorptionskältemaschine zu erwarten ist. Hierzu erfolgt die Berechnung der Leistungszahlen der CO₂-Kälteanlage mit und ohne angebundenen Adsorptionsunterkühler für stationäre Betriebszustände bei unterschiedlichen Außenluftzuständen. Eine vergleichende Bewertung im Anschluss zeigt das Potential der Effizienzsteigerung und den Einfluss auf die typische Hochdruckregelung im transkritischen Betrieb.

Stichwörter:

CO₂, Effizienzsteigerung, Adsorption, Unterkühlung, Berechnung

II.2.11

Auslegungsrechnungen für eine Kaskadenkälteanlage mit einem CO₂-Sublimationskreislauf in der Unterstufe

Yixia Xu^{*}, Robin Langebach, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden,
yixia.xu@tu-dresden.de, robin.langebach@tu-dresden.de

Für Kälteanwendungen im Temperaturbereich von -50°C bis -80°C stehen kaum Sicherheitskältemittel zur Auswahl. Bisher wird R23 trotz seines enormen Treibhauspotentials (GWP=14800) als Standardkältemittel für diesen Temperaturbereich eingesetzt – bedingt durch die Ausnahmeregelung in der F-Gase-Verordnung. Frühere Studien zeigen bereits die Möglichkeiten und Potenziale für die Verwendung von CO₂ als Kältemittel in einem Sublimationskreislauf unterhalb des Tripelpunktes von ca. -56°C. An der TU Dresden werden dazu aktuelle Untersuchungen durchgeführt, die das natürliche Kältemittel CO₂ zu einer sinnvollen Alternative zu R23 qualifizieren sollen.

In dieser Studie wird eine Kaskaden-Kälteanlage theoretisch untersucht und vorgestellt, welche einen direkten Vergleich einer CO₂- und R23-Unterstufe unter gleichen Betriebsbedingungen ermöglicht. Für die Oberstufe wird R452A eingesetzt. CO₂- und R23-Unterstufe können über ein Dreiegeventil mit derselben Oberstufe betrieben werden, um maximale Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Für den CO₂-Sublimationskreislauf ist eine 2-stufige Verdichtung mit Zwischenkühlung und Einsatz eines inneren Wärmeübertragers vorgesehen.

Es zeigt sich bei den Auslegungsrechnungen, dass in vielen Betriebspunkten eine höhere Leistungszahl bei CO₂ gegenüber R23 erwartet werden kann.

Stichwörter:

R23, CO₂, Sublimation, Kältekaskade

II.2.12

Eisspeicherintegration in einem Mono-Split-Klimagerät Experimentelle und theoretische Untersuchungen

**Myrea Richter¹, Carsten Heinrich^{2*}
Felix Stelzer³**

^{1,2} ILK Dresden, Hauptbereich Angewandte Energietechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
myrea.richter@ilkdresden.de, carsten.heinrich@ilkdresden.de

³ Technische Hochschule Nürnberg, Energie- und Gebäudetechnik, Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg
felix.stelzer@gmx.net

Klimakältebedarf und PV-Energieertrag zeigen eine gute saisonale Synergie. Betrachtet man die Tagesverläufe, wird speziell im Wohnbereich eine unzureichende Überdeckung sichtbar. Die PV-Ertragsspitzen liegen um die Mittagszeit verteilt, dem gegenüber steht der Klimakältebedarf oft in den Nachmittags- und Abendstunden an, wenn die Bewohner heimkehren.

Eine Deckung des Elektroenergiebedarfs zur Klimakälteerzeugung aus dem PV-Eigenenertrag kann durch Speicherung in Form von Elektroenergie oder Kälte erreicht werden. Die Nutzung eines Eisspeichers ermöglicht Kälte mit einer hohen volumetrischen Energiedichte, preiswert und verlustarm zu speichern.

Zur experimentellen Untersuchung von Lade-, Entlade- und direkten Kühlbetrieb für unterschiedliche Integrationsschaltungen wurde am ILK Dresden ein Versuchsstand aufgebaut. Für eine erste Konfiguration wurden zwei Verdampferbauarten vermessen.

Parallel dazu wurden zahlreiche theoretische Untersuchungen mittels dynamischer Simulation zum Speicherverhalten und den erreichbaren Eigenverbrauchssteigerungen durchgeführt.

Der Vortrag stellt die Versuchsergebnisse dar. Diese umfassen insbesondere die maximal erreichbaren Kälte-, Lade- und Endladeleistungen, die erreichbaren maximalen Eisgehalte sowie die damit verbundene Kältezeugungseffizienz in den verschiedenen Betriebsmodi dar. Möglichkeiten und Grenzen des Anlagenbetriebs werden abgeleitet, sowie Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung und den Einsatz aufgezeigt. Weiterhin werden die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen präsentiert.

Stichwörter:

Eisspeicher, Klimakälte, Mono-Split, Experimentelle Untersuchungen

II.2.13

Multiparameteroptimierung von Turbomaschinen mit Hilfe von evolutionären Algorithmen und Integration in eine Prozessberechnung

Steffen Golle*, Enrico Klausner, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Münchner Platz 3, 01062 Dresden
Steffen.Golle@tu-dresden.de

Bei Strömungsmaschinen erfolgt im Gegensatz zu Verdrängermaschinen der Verdichtungs- bzw. Entspannungsprozess in einem offenen Raum durch die kontinuierliche Umwandlung von dynamischen in statischen Druck und umgekehrt. Aufgrund dessen bestimmen die Eingangsbedingungen wesentlich die Leistung und Funktionsfähigkeit der Turbomaschinen. Bei Prozessen mit unterschiedlichen Betriebsfällen, wie bei Flugzeug- und Bahnklimaanlagen, ist die Auswahl geeigneter und realisierbarer Turbomaschinen schwierig. Zur Auslegung dieser Anlagen ist deshalb eine gleichzeitige Berechnung des Prozesses und der Abstimmung der Turbomaschinen über Kennfelder in einem gemeinsamen Modell durchzuführen. Damit können Prozessparameter und Turbomaschinen optimal aufeinander abgestimmt werden.

In dieser Studie wird zuerst ein Modell zur vereinfachten Auslegung von Turbomaschinen präsentiert, mit dem ohne Kenntnis der genauen Geometrie, Kennfelder anhand definierter Parameter generiert werden können. Anschließend wird ein evolutionärer Algorithmus zur Optimierung der Kennfelder für festgelegte Betriebsfälle angewendet. Danach erfolgt die Integration der Kennfelder in die Prozessrechnung, bei der zusätzlich die Drehzahl aller Maschinen auf einer Welle abgestimmt wird. Schließlich wird die Prozedur beispielhaft bei einer Flugzeugklimaanlage durchgeführt und auf die Schwierigkeiten und Vorteile dieser Herangehensweise eingegangen.

Stichwörter:

Turbomaschinen, Optimierung, Prozessberechnung

II.2.14

Kältemaschinenöle für natürliche Kältemittel: Neues aus Entwicklung und Praxis.

Christian Puhl, Wolfgang Bock

FUCHS Schmierstoffe GmbH, Friesenheimer Str. 19, 68169 Mannheim
christian.puhl@fuchs-schmierstoffe.de, wolfgang.bock@fuchs-schmierstoffe.de

Nicht erst seit Inkrafttreten der F-Gase-Verordnung 2014, aber doch verstärkt in den letzten Jahren haben natürliche Kältemittel - neben Kohlendioxid (CO_2) vor allem Kohlenwasserstoffgase wie Isobutan, Propan und Propen - weiter an Bedeutung gewonnen. Ammoniak (NH_3) hat dabei schon seit langen Jahren vor allem in der Industriekälte eine sehr starke Verbreitung. Sowohl in thermodynamischer Hinsicht als auch in ihrer Klimabilanz ($\text{GWP} \leq 3$) zeichnen sich natürliche Kältemittel als langfristige und klimaschonende Arbeitsmedien aus. Diese positiven Eigenschaften haben wie zum Beispiel bei CO_2 (in Fahrzeug-Klimaanlagen) und Propan (in Supermarktkälteanwendungen) zur Verwendung in neuen Einsatzbereichen geführt, in denen zum Teil deutlich gestiegene Anforderungen an das Kältemaschinenöl gestellt werden.

Je nach verwendetem Gas und je nach Anwendungsbereich kommen Schmierstoffe auf Mineralölbasis oder unterschiedliche synthetische Kältemaschinenöle zum Einsatz.

Der Beitrag beschäftigt sich mit neu entwickelten als auch etablierten Schmierstoffen für die unterschiedlichen Kältemittel und zeigt dabei, welche Auswahlkriterien bei der Festlegung des Öles beachtet werden müssen. Dabei fließen neue Erkenntnisse aus Labor- und Praxisbetrieb in die Darstellung ein.

II.2.15

Emeritus: Der neue Verflüssiger/ CO_2 Gaskühler/Trockenkühler, der den Energieverbrauch minimiert

S. Filippini, U. Merlo

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

Bei Kühlprozessen und Kraft-Wärme-Kälte-Prozessen ist die Nutzung von Luft als Wärmesenke zur Kühlung, wenn große Wassermassen nicht vorhanden sind, ein gängiges Verfahren und wird häufig angewandt. Obwohl die Umgebungsluft den großen Vorteil hat, überall und in unbegrenzter Menge vorhanden zu sein, hat sie auch zahlreiche Nachteile: Wechselhafte Temperaturen, geringer Austauschkoeffizient, Bedarf nach großen Wärmeaustauschflächen und Luftpunkten.

Um diese Nachteile zu begrenzen hat LU-VE eine innovative Lösung namens EMERITUS entwickelt. Diese Technologie hat einen luftgekühlten Wärmetauscher, auf dem zwei zusätzliche Verdunstungssysteme nacheinander genutzt werden: aufbereitetes Wasser wird auf den Wärmetauscher gesprührt und das verbleibende, nicht verdampfte Wasser, wird gesammelt und auf Verdunstungsmatten aufgegeben. Die Kombination der beiden Verfahren hat positive Auswirkungen sowohl auf die zur Verfügung stehende Kühlleistung als auch auf die erforderliche Wassermenge.

Der Artikel beschreibt die Funktionsweise des neuen EMERITUS und analysiert eine Fallstudie, in der die Betriebskosten eines Wasserkühlers kombiniert mit EMERITUS verglichen werden mit anderen herkömmlichen Lösungen.

Stichwörter:

Verflüssiger, CO_2 , Flüssigkeitskühler, Wärmeübertrager, Water Spray, Verdunstungsmatten

II.2.16

Vermeidung von Korrosion in hydraulischen Systemen

Mani Zargari^{1*}, Dr. Oliver Opel²

¹SIZenergie+, Energie- und Qualitätsmanagement, Mühlenpfadstr. 23, 38106 Braunschweig,
mani.zargari@stw.de

²Leuphana Universität Lüneburg, Fakultät Nachhaltigkeit, Scharnhorststr. 1, 21335 Lüneburg,
opel@leuphana.de

Wasserführende Kreisläufe zur Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden unterliegen dem Risiko der Korrosion. Es drohen Funktionseinschränkungen und Effizienzverluste bis hin zum Totalausfall.

Im ENOB - Forschungsprojekt „Korrosion in hydraulischen Systemen“ wurden 60 Systeme in 25 Gebäuden hinsichtlich der Korrosion und ihrer Ursachen wasserchemisch untersucht. Außerdem wird ein Sensorsystem entwickelt, das Korrosionsvorgänge anzeigt, bevor Schäden entstehen. Es hat sich gezeigt, dass rund die Hälfte aller untersuchten Systeme von Korrosion betroffen und teilweise auch geschädigt ist. Kühlsysteme sind häufiger betroffen als Heizsysteme. Die Ursachen sind vielfältig: Sauerstoffeinträge, ungeeignete Füllwässer und mikrobiologische Aktivitäten sind die häufigsten Auslöser für Korrosion. Die Ursachen für Sauerstoffeinträge lassen sich häufig auf eine mangelhafte Wartung zurückführen, die zu einem Druckverlust und Fehlfunktionen von Anlagenkomponenten führt. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Chlorid-Gehalt des Umlaufwassers eine maßgebliche Einflussgröße für das Korrosionsrisiko darstellt. Mikrobiologische Aktivitäten können ebenfalls die Korrosion massiv befördern. Auf Basis der Untersuchungen werden neue Erkenntnisse für den korrosionssicheren Betrieb von Kühl- und Heizanlagen sowie kombinierten Systemen (Flächenkühlsysteme) in Gebäuden abgeleitet.

Stichwörter:

Korrosion, Wasserkreisläufe, Hydraulische Systeme, Feldstudie

II.2.17

Cybersecurity in Kälte-/Klima 4.0

Dr. Christian Ellwein^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Heinrich Steinhart²

¹ KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, 74670 Forchtenberg,
Christian.Ellwein@kriwan.de

² Steinbeis Transferzentrum, Elektrische Antriebstechnik und Leistungselektronik, Aalen,
h.steinhart@stz-al.de

Industrie 4.0 ist in aller Munde und auch in der Kälte- und Klimatechnik werden immer mehr Geräte vernetzt und kommunizieren untereinander. Das schafft zum einen große Chancen und Erleichterungen. Vernetzung von Geräten untereinander aber auch von Installationen und Systemen über weite Entfernung hinweg wird für die Energiewende eine zentrale Rolle spielen. Auch im Service und in der Instandhaltung spielen Daten eine zentrale Rolle. Bei allen Vorteilen müssen aber auch die Risiken betrachtet werden: Vernetzte Systeme, ob über LAN, WLAN oder Bluetooth verbunden, sind von außen angreifbarer als ein reiner Modbus oder eine 4-20mA Schnittstelle. Wir erleben in vielen Bereichen der Wirtschaft zunehmend Cyberangriffe und müssen uns gleichzeitig auch damit auseinander setzen, dass es im Bereich der Kälte-/Klimatechnik schwierig ist, regelmäßig Updates auf die Maschinen aufzuspielen (räumliche Verteilung, Zugriffsrechte...). Außerdem sind viele Maschinen und Anlagen über Jahre und teilweise auch Jahrzehnte in Betrieb. Deswegen ist es wichtig, Konzepte für Cybersecurity zu entwickeln, die weitgehend unabhängig von regelmäßigen Updates und Patches sind und die auch mit zukünftigen Generationen von Betriebssystemen sicher funktionieren werden. In diesem Beitrag werden verschiedene Ansätze vorgestellt, die stärker auf der „klassischen Elektrotechnik“ basieren und weniger IT-basierte Ansätze wie sichere Verbindungen (VPN,...), Datenverschlüsselung oder die Analyse von Datenströmen (Firewalls,...) beinhalten. Zu diesen Konzepten gehört zum Beispiel eine schaltbare Internetverbindung, bei der die Internetverbindung über einen Transistor oder Relais (elektrischer Schalter) nur kurzzeitig temporär aufgebaut wird.

II.2.18

Ventilator 4.0 - Mit dem vernetzten Ventilator in die Zukunft

Martin Schulz

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

Ventilatoren mit elektronisch kommutierten Motoren (EC-Ventilatoren) haben in den letzten Jahren auf breiter Front Einzug in die Kältetechnik gehalten. Die wesentlichen Vorteile in Bezug auf Wirkungsgrad und Steuerbarkeit wurden konsequent in den verschiedenen Anwendungen erschlossen. Zusätzlich trieben die nach der ErP-Richtlinie geforderten Mindestwirkungsgrade den Einsatz von EC-Ventilatoren voran.

Nun ist es an der Zeit, die nächsten Schritte zu tun. Die in den Ventilatoren integrierte Elektronik verfügt über wertvolle Informationen, die in übergeordneten Regelungssystemen ganz neue Möglichkeiten aufzeigen. Mit der heutzutage aber noch weit verbreiteten Steuerung der Ventilatoren über 0-10V bleiben diese Informationen in der Elektronik verborgen.

Eine Lösung bietet die Anbindung der EC-Ventilatoren an die übergeordnete Regelung über eine MODBUS-Kommunikation. Dieser Marktstandard lässt zum einen die Sollwertvorgabe zur Regelung der Ventilatoren zu, darüber hinaus öffnet der MODBUS aber auch den Zugang zu allen im Ventilator vorhandenen wichtigen Informationen wie zum Beispiel Temperaturen, Drehzahl, Leistungsaufnahme,

Der Vortrag zeigt auf, welche Möglichkeiten die konsequente Nutzung dieser Informationen heute schon bietet. Damit bleiben Schlagworte wie IoT (Internet of Things) nicht nur reine Worthülsen, sondern werden zum tatsächlichen Nutzen im Kältetechnikalltag.

II.2.19

Gasqualitätsmessung mit kapazitiven Sensoren und bedarfsgerechte Abtauung

Michael Elstrøm, Roland Amelung

HB Products A/S, Hasselager (Aarhus), Dänemark, me@hbproducts.dk, ra@hbproducts.de

Anforderungen zur Reduktion der globalen Erwärmung (GWP) und der CO₂ Emissionen haben dazu geführt, natürliche Kältemittel einzusetzen. Das führte zu zahlreichen neuen Anstrengungen und Entwicklungen weltweit. Die Anwendung neuer Messprinzipien und Planungsverfahren in der Kälteindustrie könnten einen erheblichen Einfluss haben auf den globalen elektrischen Energieverbrauch mit dem Ergebnis einer Reduktion von 20 bis 40 %.

Gleichzeitig kann die Sicherheit erhöht werden indem die Kältemittelmenge reduziert wird: Kostengünstige Systeme mit einem Reduktionsfaktor von 30 bis 50 für NH₃ DX Systeme (Trockenexpansion). Der Wärmeübertragungsfaktor hängt dabei stark ab vom Strömungsverhalten (Flussverhalten), vom Massenstrom und der Gasqualität.

Der Vortrag beschreibt ein neues Sensorsystem zur Optimierung der Verdampferkontrolle. Beschrieben wird das Messprinzip zur „Dampfqualitätssmessung“ mit einem sogenannten „X“-Sensor, der den Trockenheitsgehalt am Verdampferaustritt misst. Weiter wird ein Sensor vorgestellt zur bedarfsgerechten Abtauung, der den Eisgehalt auf der Verdampferoberfläche misst. Schließlich werden Informationen gegeben über den Sensorsaufbau und Labortests, Feldversuche und Anwendungen in der Praxis.

Sensor zur Gas-Qualitätsmessung:

An Stelle der Überhitzungsmessung wird die Gasqualität in der Anlage gemessen, also der Flüssigkeitsanteil im Sauggas. Das EEV öffnet bis erste Flüssigkeitstropfen den Sensor erreichen. Die Effizienz einer überfluteten Anlage wird erreicht.

Der Sensor verwendet ein neues, erweitertes HF dielektrisches Spektroskopie-Prinzip: Gemessen werden die dielektrischen Eigenschaften eines Stoffes an Hand der Wechselwirkung beim Auftreten bei niedrigem Stromwiderstand. Dadurch sind Auslegungen möglich mit sehr geringem Isolationsmaterial (PTFE) im Sensor selbst. Der elektrische Widerstand ändert sich bei Messhäufigkeit. Bei hoher Dichte können verschiedene Stoffe mit hohen oder niedrigen Leiteigenschaften gemessen werden wie z. Bsp. flüssiges NH₃ oder Wasserdampf.

Die Gasqualitätssensoren sind konzipiert als Koaxialsensoren. (mittig, gleichachsig) Damit wird verhindert, dass Störungen durch elektrische Felder auftreten können. Das äußere Rohr ist eine messende Elektrode (Leiter) und hat somit ausreichend Masse.

Abtausensor:

Um dem für die Wärmeübertragung negativen Effekt der Bereifung bzw. Vereisung des Luftkühlers entgegenzuwirken, gibt es verschiedene Methoden der Abtauung. Wie stellt man bei Anlagen mit wechselnden Rahmenbedingungen hinsichtlich des gelagerten Kühlguts oder der Zutrittsfrequenz sicher, optimal abzetauen? Der Abtausensor HBDF leitet den Abtauprozess immer erst dann ein, wenn der aufgelaufene Bereifungsgrad dies auch tatsächlich erfordert: Der Sensor misst kapazitiv und in diesem Fall den Eisansatz auf den Kühlrippen. Die Abtauung erfolgt nicht mehr nach einer einmalig festgelegten Zyklus, sondern in Abhängigkeit des im Betrieb tatsächlichen Bereifungsgrades des Luftkühlers. Der Sensor besteht aus einem mechanischen und einem elektronischen Bauteil und kann ohne Probleme in die Steuerung einer Kälteanlage integriert werden.

Die Verdampferkontrolle und -optimierung unter Einsatz eines Gasqualitätssensors (HBX-DX/ HBX-OVC) auf der Niedrigdruckseite und das bedarfsgerechte Abtauen mittels des Sensors (HBDF) auf der Verdampferoberfläche bilden zusammen einen optimalen Ansatz hinsichtlich eines energieoptimierten Ablaufs im Kälteprozess. Gasqualitätsmessung und bedarfsgerechte Abtauung sorgen zudem dafür, dass die Anlage sicherer gefahren wird: Es wird sichergestellt, dass der Verdampfer frei ist von Flüssigkeit, bevor der Abtuvorgang einsetzt – damit wird auch ein Flüssigkeitsrückschlag in der Saugleitung verhindert.

Stichworte:

Kapazitive Sensoren, Gasqualitätsmessung, bedarfsgerechtes Abtauen, energie-effiziente Kälteanlagen

II.2.20

Simulationsbasierte Regler-Entwicklung und -Test

Rückkühlwerkmodellierung eines Rechenzentrums

Alex Magdanz*, Michael Schiefer

ESI ITI GmbH, Engineering, Schweriner Straße 1, 01067 Dresden,
Alex.Magdanz@esi-group.com, Michael.Schiefer@esi-group.com

Die virtuelle Inbetriebnahme eines neuen Regelungskonzeptes hat den großen Vorteil, dass der laufende Betrieb einer realen Anlage nicht gestört werden muss, um ein neues Regelungskonzept zu testen, und somit potentielle Stillstandszeiten oder Schäden auf Grund von Fehlern in der Regelung vermieden werden können. Gezeigt wird, wie ein physikalisches Simulationsmodell der Anlage genutzt werden kann, um Aussagen sowohl über mögliche Regelungskonzepte als auch über Effizienz und Leistungsaufnahme individueller Komponenten und des Gesamtsystems zu gewinnen.

Simulationsbasierte Reglerentwicklung hat drei Stufen mit jeweils unterschiedlichem Realisierungsaufwand und Aussagensicherheit: Model-in-the-Loop (MiL), Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL). Bei Model-in-the-Loop wird ein Modell der Anlage zusammen mit einem Modell des Reglers simuliert. Bei

Software-in-the-Loop wird der reale Reglercode verwendet, aber erst bei Hardware-in-the-Loop läuft dieser auch auf der realen Hardware. Bei der Realisierung der virtuellen Inbetriebnahme ist es entscheidend geeignete Methoden zu verwenden, damit die Integration von Zeitschrittketten und diskreten Regler mit dem kontinuierlichen Simulationsmodell der Anlage nicht zu Einbrüchen in der Rechenzeit führt. Modelica Synchronous und State Machines sind Beispiele für solche Methoden.

Das Konzept der simulationsbasierten Reglerentwicklung wird anhand eines dynamischen 1D Simulationsmodells eines Rückkühlwerkes mit Bezug zu einem Industrieprojekt erklärt. Das Modell beinhaltet die Kaltwasserveite inklusive Freikühler, Kaltwassersatz, Hybridekturm und deren Regelung. Das Modell bekommt als Eingang ein thermisches Lastprofil eines Rechenzentrums, und rechnet basierend auf den aktuellen Umgebungsbedingungen das Verhalten der Anlage und Regelung über den Zeitraum eines Jahres.

Stichwörter:

Regelung, Simulation, Rechenzentrum, Rückkühlwerk, Model-in-the-Loop

II.2.21

Charakterisierung und Simulation von Leckage mit natürlichen Kältemittel

Christian Sonner*, Ivan Malenkovic

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Department Heating and Cooling Technologies,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg,
christian.sonner@ise.fraunhofer.de, ivan.malenkovic@ise.fraunhofer.de

Hinsichtlich der F-Gasverordnung und dem anstehenden Phasedown der F-Gas-Kältemittel, wie beispielsweise R407C und R410A, besteht derzeit eine große Motivation darin, Anlagen der Kaldampfkompression für Ersatzkältemittel mit geringem GWP anzupassen oder neu zu entwickeln. Insbesondere erhalten hiermit auch natürliche Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe, Ammoniak und Kohlendioxid Raum, um vermehrt in Wärmepumpenheizungsanlagen zum Einsatz zu kommen.

Bei dem Umgang mit diesen natürlichen Kältemitteln geht bei einer Leckage besondere Gefahren für Mensch und Umwelt aus. So kann sich bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen ein explosives Gemisch anreichern, bei Ammoniak eine giftige Atmosphäre entstehen sowie im Extremfall ein explosives Gemisch anreichern oder bei Kohlendioxid es zu gefährlichen Berstprozessen und ebenfalls zur Bildung einer toxischen Atmosphäre kommen. In diesem Zusammenhang erhalten die Entwicklung von Sicherheitskonzepten und die Untersuchung von Leckagen für den Einsatz mit natürlichen Kältemitteln im Bereich Wärmepumpe eine besondere Bedeutung. Dies gilt insbesondere, wenn neben außen auch innen aufgestellte Anlagen berücksichtigt werden.

Um Leckagen zu untersuchen wird ein Teststand in einem Volumen von ca. 0,3 m³ aufgebaut, welcher die relevanten physikalischen Größen untersucht. Durch eine generische Ausströmvorrichtung kann sowohl der Leckage-Durchmesser wie auch der Leckage-Ort im Kältekreis simuliert werden. So können Mikro-, Makro- oder Nanorisse simuliert werden oder auch mechanisch gezielt verursachte Leckagen untersucht werden. Im ersten Schritt werden Blenden mit einem Durchmesser im Bereich von Mikrometer bis Millimeter eingesetzt. Des Weiteren werden sowohl gasförmige als auch flüssige Ausströmungsvorgänge analysiert. Die Ausströmung wird mittels Temperaturfühlern, Laser-Doppler-Anemometrie, einer Waage und IR-Kamera charakterisiert. Es wird dargestellt, wie sich Leckagen bei unterschiedlichen Durchmessern hinsichtlich Geschwindigkeit, Masse, Druck und Temperatur verhalten.

Diese Erkenntnisse können sowohl für Simulationen, für den Upscale auf Wärmepumpen/Kälteanlagen oder als ein alternatives Prüfverfahren herangezogen werden. Abschließend wird ein Vergleich zur EN 30665-2-40 „Simulation von Leckagen“ dargestellt.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Leckage, Sicherheit, natürliche Kältemittel

II.2.22

Simulationsgestützte Analyse der energetischen Flexibilisierbarkeit industrieller Kompressionskälteanlagen

Stefan Eisenhauer *, Markus Reichart, Alexander Sauer

Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Nobelstr. 12,
70569 Stuttgart,
stefan.eisenhauer@eep.uni-stuttgart.de

Ein wesentlicher Pfeiler der Energiewende in Deutschland ist die zukünftige Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien. So nehmen durch den stetigen Ausbau von beispielsweise Windkraft- und Photovoltaikanlagen Fluktuationen der verfügbaren Leistung im elektrischen Stromnetz kontinuierlich zu. Die Herausforderung wird zukünftig darin bestehen, die energetische Erzeugung und den energetischen Verbrauch durch verschiedene Flexibilitätsmaßnahmen zu synchronisieren. Hierbei wird die energetische Flexibilität von Prozessen und Anlagen in der Zukunft zu einem wichtigen Stellhebel und Werkzeug zur Stabilisierung des elektrischen Versorgungsnetzes.

Aufgrund der hohen spezifischen Energiedichten der verwendeten Fluide und der Vorteile bezüglich der thermischen Speichermöglichkeit wird in der Bereitstellung von Kälte, speziell im industriellen Umfeld, ein großes Potenzial zur energetischen Flexibilisierung des Energieverbrauchs gesehen. Energetische Flexibilität durch thermische Speichermöglichkeiten kann in diesem Kontext sowohl durch anlageninterne Speicher, als auch durch Speichermöglichkeiten in Sekundärkreisläufen realisiert werden.

Durch eine simulationsgestützte Analyse der Energieströme und Zustandsgrößen einer industriellen Kälteanlage werden Maßnahmen abgeleitet, um die energetische Flexibilisierbarkeit einer Kompressionskälteanlage bezüglich deren elektrischen Leistungsaufnahme zu erschließen. Vorgegeben ist hierbei stets der Kältebedarf des Endprozesses. Energetische Flexibilitätsmaßnahmen können beispielsweise Veränderungen an der Anlagenverschaltung oder Eingriffe in die Regelstrategie sein. Die Validierung erfolgt anhand einer industriellen Prozesskälteanlage in der Lebensmittelbranche.

Für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden die Erlöse, welche sich durch die Bereitstellung der energetischen Flexibilität ergeben, den Kosten, zur Schaffung und Bereitstellung der Flexibilität, gegenübergestellt. Die Kosten ergeben sich dabei durch die Beeinflussung der Leistungsaufnahme der Anlage und durch die Umlage von Investitionen zur Ermöglichung der energetischen Flexibilität.

Stichwörter:

Energetische Flexibilität, Speicher, Erneuerbare Energien, Netzstabilisierung, Lastflexibilisierung

II.2.23

Numerische Optimierung der Prozessführung beim Abtauen von Verdampfern

Manuel Gräber, Patrick Schmidt

TLK Energy GmbH, Aachen,
manuel.graeber@tlk-energy.de

Luftfeuchtigkeit führt dazu, dass sich auf Verdampfern von Wärmepumpen oder von Supermarktkühlmöbeln eine Eisschicht bildet, die kontinuierlich wächst. Diese Eisschicht verschlechtert den Wärmeübergang zwischen Luft und Kältemittel und führt zu einem erhöhten elektrischen Energiebedarf der Kälteanlage. Daher werden die Verdampfer regelmäßig abgetaut, indem ihnen Wärme zugeführt wird, bis die Eisschicht schmilzt und flüssig abtropft. Es existieren verschiedene Methoden, dem Verdampfer Wärme zuzuführen: zum Beispiel über

elektrische Heizer oder über eine Umkehr des Kältekreislaufs. Bei allen Methoden ist die Frage nach einer energieoptimalen Prozessführung nicht trivial zu beantworten.

Ein wesentlicher Freiheitsgrad der Prozessführung ist die Dauer und Häufigkeit des Abtausens. Der Abtauvorgang benötigt selbst Energie und führt zu einer unerwünschten Unterbrechung des Normalbetriebs. Daher kann ein zu häufiges Abtauen nicht sinnvoll sein. Ein zu seltenes Abtauen wiederum führt dazu, dass der Verdampfer einen schlechten Wärmeübergang aufweist und der Gesamtkreislauf unnötig viel Energie verbraucht. Dazwischen gibt es ein Effizienzoptimum.

Die Suche nach diesem Effizienzoptimum lässt sich als Optimalsteuerungsproblem formulieren und mit spezialisierten Optimierungsalgorithmen lösen. In diesem Beitrag werden für verschiedene Abtauprozesse exemplarisch Systemmodelle beschrieben, die Formulierung geeigneter Optimierungsprobleme diskutiert und deren Lösungen analysiert. Damit wird eine Werkzeugkette vorgestellt, die es erlaubt für verschiedenste Abtauanwendungen eine optimale Prozessführung zu entwickeln.

III.01

Wärmerückgewinnung – konsequent

Robert Baust

Robert Schiessl GmbH, Kolpingring 14, 82041 Oberhaching
r.baust@schiessl-kaelte.de

Bei vielen gewerblichen Kälteanwendungen (Metzgereien, Hotels etc.) muss neben dem Kältebedarf auch Wärmebedarf gedeckt werden. Wird die Kälteanlage mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) ausgestattet, kann der Wärmebedarf zum Teil oder im Idealfall zu 100% von der WRG gedeckt werden. Leider werden viele Kälteanlagen ohne WRG errichtet oder mit einer WRG ausgestattet, die das Wärmepotenzial nicht optimal ausschöpft.

Eine optimale WRG sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- Keine Wärmeverluste über den außen aufgestellten Verflüssiger
- Die Verflüssigungstemperatur sollte so niedrig wie möglich sein
- Die erzielbare max. Temperatur sollte so hoch sein, dass auf eine Nacherwärmung möglichst verzichtet werden kann

Es werden Konzepte aufgezeigt mit denen die Anforderungen erfüllt werden können und Praxisbeispiele die, die Anforderungen zumindest schon zum Teil erfüllen.

Für den Betreiber ist es sehr wichtig zu wissen, wie hoch die maximal wirtschaftliche sinnvolle Wassertemperatur ist. Diese Temperatur ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der WRG. Leider ist diese Temperatur meistens unbekannt oder wird willkürlich gewählt.

Diese Grenztemperatur wird analytisch ermittelt und mit einer einfachen Formel dargestellt.

III.02

Luftkühlerauswahl unter Aspekten des Korrosionsschutzes – Welche Materialien für welche Anwendung?

Alexander Salm

Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Str. 2 - 6, 82256 Fürstenfeldbruck,
alexander.salm@guentner.com

Der Vortrag beleuchtet zunächst allgemeine Grundlagen zum Thema Korrosion anhand der Einflussfaktoren „Werkstoff“, „Umgebung“ und „Reaktionen“. Diese Faktoren ergeben unterschiedliche Korrosionsmechanismen. Im besonderen Fokus steht die Lochkorrosion und die Kontaktkorrosion, die im Anwendungsbereich der Luftkühler in aggressiver Atmosphäre am häufigsten auftreten. Die Materialien der Luftkühler sind nicht nur der aggressiven Atmosphäre die durch das Kühlgut entsteht ausgesetzt, sondern werden gegebenenfalls zusätzlich durch Reinigungsmittel beansprucht. Somit ergeben sich diverse Anwendungen, die unterschiedliche Korrosionsschutzmaßnahmen fordern. Die Vor- und Nachteile bestimmter Materiakombinationen und Beschichtungen werden anhand praxisnaher Beispiele erläutert. Dies soll verdeutlichen, welche Materialien für welchen Anwendungsfall zum Einsatz kommen können, um ausreichenden Korrosionsschutz langfristig zu erzielen.

III.03

Kältetechnik in der Kunststoffverarbeitung - Spezielle Verfahren und spezielle Kaltwassertechnik

Klaus Reisner

Ingenieurbüro für Kältetechnik, Reisner + Kettler GmbH, Löttringhauser Straße 242
44229 Dortmund, post@reisner-ingbuero.de

In den Formen (auch Werkzeuge genannt) von Kunststoffspritzgießmaschinen wird Kunststoff aufgeschmolzen, in die Form verpresst und dann zur Abhärtung ausgekühl. Bei kleinen Teilen wie z.B. Flaschenverschlüssen geschieht dies in Zyklen von 3 bis 4 Sekunden für 128 Teile. Die im Kunststoff enthaltene Wärme muss also sehr schnell entzogen werden. Die Kälteversorgung von Kunststoffspritzgießmaschinen hat somit aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeit einen ganz wichtigen Stellenwert an solchen Produktionsanlagen. Es haben sich spezielle kältetechnische Verfahren herausgebildet.

Nach kurzer Einführung in die Spritzgießtechnik wird die Wärmeabfuhr aus Spritzgießformen beschrieben. Die Berechnung der nötigen Kälteleistung für diesen besonderen Produktionsprozess wird abgeleitet. Ebenso die Auslegung der Kaltwasserströme, der Rohrleitungen und Pumpen.

Es wird die Reinhaltung des Kaltwassers beschrieben. Die Wärmeabfuhr aus den hydraulischen Antrieben mittels Luft/ Wasserwärmeartauschern wird berechnet. Dazu wird aufgezeigt, wie dies alles energetisch günstig/ optimal erfolgt. Energetische Einsparmaßnahmen wie freie Kühlung und Abwärmenutzung werden aufgezeigt und berechnet. Kennzahlen für wichtige Auslegungsgrößen werden abgeleitet.

Ein komplettes Fließschema für einen solchen Anlagenaufbau wird entwickelt.

III.04

Rückkühleranwendung in einem Windtunnel

Stanislav Perencevic, Research

Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Straße 2 – 6, 82256 Fürstenfeldbruck,
stanislav.perencevic@guentner.com

Eine oft vorkommende und anspruchsvolle Anwendung für Rückkühler sind Windtunnel. Um die Qualität der Messungen in einem Windtunnel zu gewährleisten, darf die Temperaturschwankung über dem Tunnelquerschnitt nicht größer sein als 0,5 K. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen Wärmeaustauscher thermodynamisch sehr präzise berechnet und optimiert werden, was durch die Kombination von numerischen und thermodynamischen Berechnungen ermöglicht wird. Im nachfolgenden Anwendungsfall wird die Wasserseite des Wärmeaustauschers numerisch simuliert um die Wasserverteilung in einzelnen Rohren am Coil-Eintritt zu ermitteln (evtl. und zu optimieren). Mit numerisch berechneten Wassermassenstromwerten einzelner Rohre wird die Lufttemperatur über ein fein aufgelöstes Rechengebiet am Coil-Austritt gerechnet und ausgewertet. Theoretisch gewonnene Ergebnisse werden anschließend mit Messungen verglichen.

III.05

Bewertung der RORO®* - Anlagentechnik auf Basis von Betriebserfahrungen in NH₃-Kälteanlagen

Michael Elsen

Kreutzträger Kältetechnik GmbH & Co.KG, Theodor-Barth-Straße 21, 28307 Bremen
Michael.Elsen@Kreutztraeger.de

Die Anforderungen an industrielle Kälteanlagen mit Blick auf deren Energieeffizienz erfordern die Umsetzung innovativer Ansätze. Lösungen bieten hierbei vor allem Konzepte mit den seit Jahrzehnten bewährten, natürlichen Kältemitteln CO₂ (Kohlendioxid/R744) und NH₃ (Ammoniak/R717).

Die RORO-Anlagentechnik steht in puncto Energieeffizienz, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Wettbewerb mit anderen Anlagenkonzepten, wie z.B.

NH₃ – Kälteträgersysteme

NH₃ – Pumpensysteme

NH₃ – Kaskadensysteme (CO₂ als Kälteträger)

CO₂ – Transkritischen Anlagen

und muss hier über Ihre Vorteile überzeugen. Dabei reicht es nicht alleine, dass die NH₃-Anlagenfüllmenge einer RORO-Anlage um mehr als 1/3 gegenüber üblichen NH₃- (überfluteten) Pumpensystemen reduziert werden kann.

Vielmehr stellt der Betrieb der RORO-Anlage mit einer minimalen Überhitzung von nur ca. 2 K einen effizient optimierten Lösungsansatz dar. Insbesondere bei zweistufigen Kälteanlagen mit Verdampfungstemperaturen im Tiefkühl-Bereich von bis zu -45 °C (TK-Raum und Froster), weist das RORO-System im Hinblick auf den Entfall des Siedeverzugs und die Minimierung des Druckverlustes in den Rückführleitungen zum Abscheider entscheidende Vorteile auf.

Betriebssicherheit, aber auch die Anlagensicherheit im Allgemeinen, wird mit dem RORO-System gewährleistet. Ventilstationen mit ihren lösbarren Verbindungen werden außerhalb der Kühlräume installiert, Leitungen und Verdampfer weitestgehend korrosionsbeständig in Edelstahl ausgeführt.

Auf Basis einer mehr als 4-jährigen Betriebserfahrung mit dem RORO-System wird hierüber im Rahmen der Veranstaltung berichtet und ein Vergleich der Anlagenkonzepte vorgestellt. Zur Bewertung der Energieeffizienz der unterschiedlichen Anlagenkonzepte wird das VDMA Einheitsblatt 24247 und das daraus abgeleitete Energieeffizienztool eingesetzt.

* RORO[®] → Reduced and Optimized Refrigerant Operation = Direct eXpansion → Direktexpansion

Stichwörter:

Industriekälte, Ammoniak, Kältemittelreduktion, Energieeffizienz, RORO

III.06

Analytische Betrachtung des Eisspeicher KALINOR^{®1} in Kombination mit der RORO^{®2} - Anlagentechnik sowie Darstellung der Betriebserfahrungen in einer Molkerei

Tim Ehrenraut*, Michael Elsen

Kreutzträger Kältetechnik GmbH & Co.KG, Theodor-Barth-Straße 21, 28307
Bremen, Michael.Elsen@Kreutztraeger.de

Im Bereich der industriellen Kältetechnik wird dem Eisspeicher aufgrund sich ändernder Rahmenbedingungen zukünftig wieder eine steigende Bedeutung zugewiesen. Die Entwicklungen auf dem Energiesektor, die Verbreitung von Photovoltaik sowie die Aufstellung von BHKWs - ausgeführt auch in Verbindung mit Absorbern – bieten geradezu ideale Voraussetzungen für eine Renaissance der Eisspeicher-Technologie. Dabei ist eine Adaption auf den Stand der Technik Voraussetzung für einen umweltverträglichen, energieeffizienten und wirtschaftlichen Einsatz.

Die seit Jahrzehnten etablierten und im Praxisbetrieb bewährten Eisspeicher zur Eiswasserbereitung wurden nunmehr technologisch weiterentwickelt und bieten Vorteile, die herkömmliche Online-Kühlsysteme in dieser

Form nicht darstellen können. Gepaart mit dem RORO-NH₃-Anlagensystem und einer qualitativ hochwertigen, modularen und transportablen Container-Einheit, bieten sie dem Nutzer eine effiziente, wirtschaftliche und im höchsten Maße betriebssichere Lösung zur zuverlässigen Eiwasserbereitung. Es wird Eiwasser mit Temperaturen unter +1°C bei variablen Volumenströmen und einer weiten Spreizung der Temperaturdifferenz bereitgestellt.

Der umfassend neu entwickelte KALINOR – Eisspeicher wird bereits erfolgreich in einer Molkerei betrieben. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde sein Betrieb wissenschaftlich untersucht. Die Ergebnisse werden im Rahmen des Vortrags aufgezeigt und erläutert sowie weitere Anwendungsmöglichkeiten dargelegt.

*⁽¹⁾ **KALINOR®** → Container-NH₃-Eisspeicher in Kombination mit RORO® - Anlagentechnik

*⁽²⁾ **RORO®** → Reduced and Optimized Refrigerant Operation = Direct eXpansion → Direktexpansion

Stichwörter:

Eisspeicher, Ammoniak, Kältemittelreduktion, KALINOR, RORO

III.07

Erfahrungen mit einer CO₂ Kältanlage in industrieller Anwendung in südlichem Klima

Erik Wiedenmann*, Guillermo Rocha Fraga

Frigo-Consulting, Feldstrasse 30, 3073 Gümligen, Schweiz,
e.wiedenmann@frigoconsulting.ch

Die Vorteile von CO₂ als Kältemittel in nördlichem Klima sind unbestritten. In südlichen Regionen gibt es jedoch, besonders in Bezug auf die Effizienz, einige Hürden zu meistern. Es gibt daher immer mehr Systeme in Betrieb, die mit Parallel-Verdichtung oder Ejektoren ausgestattet und in ihrer Effizienz gesteigert sind. Diese Systeme zeigen auf, dass CO₂ als Kältemittel auch in südlichen Gebieten HFKW-Kühlsystem übertreffen kann.

Im Sommer 2017 wird in Spanien eine transkritische CO₂-Kälteanlage mit Multi-Ejektor in Betrieb genommen. Dieses revolutionäre System zeigt eine einfach umzusetzende und sichere Methode, um den Energieverbrauch eines transkritischen CO₂-System drastisch zu reduzieren. Das System wird in einer Fischverarbeitungsanlage in der Nähe von Valencia installiert. Es ersetzt die bestehende Anlage mit dem Kältemittel R507A. Die Leistung beträgt 1,2 MW und beinhaltet neben herkömmlicher Plus- und Minus-Kühlung auch Verdampfungstemperaturen von -45°C.

Das neue Systemdesign ist in seiner Komplexität, Dimension und in Bezug auf Sicherheit vergleichbar mit einem traditionellen Ammoniaksystem.

Ein Vergleich mit den traditionellen Systemen zeigt, gerade durch die Verringerung der Investitions- und Betriebskosten, dass CO₂ auch in industriellen Kälteanlagen und Wärmepumpen in Zukunft eine wichtige Rolle übernehmen wird. Es ist jedoch nicht einfach, bei den vielen unterschiedlichen Ejektorsystemen den Überblick zu behalten und ihre Vorteile zu werten und richtig zu nutzen.

Mit diesem System wird aufgezeigt, wie CO₂ auch in industriellen Anwendungen und in südlichen Regionen energieeffizient eingesetzt werden kann. In einem weiteren Schritt werden Herausforderungen aber auch Vorteile gegenüber einem anderen System diskutiert. Messergebnisse und deren Auswertung werden 2017 präsentiert.

Stichwörter:

R744 Multi-Ejektor, industrielle Kühlung, transkritischer CO₂-Booster, Parallel-Verdichtung

III.08

Hocheffiziente NH₃ Schraubenverdichter optimiert für Multipacks

D. Oschetzke

GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Str. 165, 13509 Berlin
Dirk.Oschetzke@gea.com

Noch vor einigen Jahren gab es eine eindeutige Trennung zwischen der kommerziellen und der industriellen Kältetechnik. Durch immer schärfere Umweltauflagen und steigende Nachfrage an energieeffizienten Systemen findet NH₃ als Kältemittel vermehrt einen Platz im Bereich der semi-industriellen Kältetechnik. Durch das geringe Treibhauspotential und die verhältnismäßig große Verdampfungs-Enthalpie ist Ammoniak bei vielen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Für den Umstieg auf natürliche Kältemittel benötigen die Aggregate- und Anlagenbauer Komponenten, die durch niedrige Komplexität die Handhabung und deren Implementierung vereinfachen.

Am Beispiel eines Multipacks soll gezeigt werden wie durch ein überarbeitetes Verdichterkonzept die Einbindung industrieller Komponenten in kommerzielle Anwendungen vereinfacht wird. Dazu wurde sich mit folgender Fragestellung auseinander gesetzt: Was sind die Vor- und Nachteile von integrierten Komponenten eines Verdichters und welche Flexibilität erfordern die verschiedenen Aggregatekonzepte der Multi- und Singlepacks? Um die Frage zu beantworten, wurde während der Entwicklung an dem GEA Grasso M Schraubenverdichter zeitgleich an der Entwicklung der gleichnamigen Aggregateserie gearbeitet. Die Antworten zeigten zum einen signifikante Effizienzpotenziale durch etablierte Industrietechnik in kleineren Leistungsbereichen aber auch eine Reduktion der Montage- und Servicezeiten durch eine modulare Konstruktion der Verdichter.

Stichwörter: Schraubenverdichter, Ammoniak, Industrikältetechnik

III.09

Analysis and simulation of a transcritical CO₂ refrigeration system for a warehouse with surplus heat recovery

Ángel Á. Pardiñas^{1*}, David Pérez-Piñeiro², Armin Hafner¹

¹Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, 7491, Norway,
angel.a.pardinas@ntnu.no

²Escola de Enxeñaría de Minas, Universidade de Vigo, Vigo, 36310, Spain

CO₂ systems have been gaining relevance among the refrigeration industry since the 1990s and this refrigerant has been seen as a cost-effective and efficient alternative to other synthetic fluids such as hydrofluorocarbons (HFCs) or hydrofluoroolefins (HFOs).

The electric power demand associated with the conservation and storage of food and other products represents an unnegelectable share of the total of a country. This electric energy is used not only in the supermarkets themselves, but also in the large distribution warehouses used for intermediate storage. It is clear that any reduction in the consumption of the refrigeration systems will have an important environmental and cost impact. Large amounts of surplus heat are also produced in the refrigeration systems of these distribution warehouses but usually remain unutilized. For this reason, surplus heat recovery and storage for further use in space heating or cooling and domestic hot water (DHW) represents an important potential to increase industrial energy efficiency.

A transcritical CO₂ booster system with parallel compression was recently implemented in a distribution warehouse in Norway for the refrigeration of products at different temperatures and for meeting the heating needs of the offices and areas of reception of products in the same warehouse. In this work, the warehouse

was analyzed in order to evaluate its demands for different load scenarios and ambient conditions and the actual potential of satisfying the heating of the building with the surplus heat of the refrigeration system throughout the year. In addition, the transcritical CO₂ system was modelled and simulated using Modelica modeling language in Dymola environment, and a parametric study was carried out in order to determine the optimum working conditions of the cycle. The technical feasibility of storing the surplus heat recovered from the cycle in a ground heat storage system and injecting it into the cycle by a false load evaporator to generate extra heat when the building heating demands are higher was also analyzed.

Keywords:

R744/CO₂, industrial refrigeration, warehouse

III.10

Enteisungsstrategien einer indirekten R744-Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Peter Schrank^{1*}, Michael Haindl¹, Michael Waltenberger¹, René Rieberer²

¹ Virtual Vehicle Research Center, Dep. B: Mobile Air Conditioning, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz

peter.schrank@v2c2.at, michael.haindl@v2c2.at, michael.waltenberger@v2c2.at

² Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25b, 8010 Graz,
rene.rieberer@tugraz.at

Die Klimaanlage zur Kühlung der Fahrzeugcabine ist einer der größten Nebenverbraucher im Pkw und verursacht einen nicht unerheblichen Energieverbrauch. Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen spielt vor allem die Beheizung der Fahrzeugcabine in der kalten Jahreszeit eine wesentliche Rolle, da die beim herkömmlichen Verbrennungsmotor erzeugte Abwärme teilweise oder sogar gänzlich wegfällt. Rein elektrische Heizungen reduzieren die Reichweite der Fahrzeuge drastisch. Zusätzlich besteht speziell bei Elektrofahrzeugen bei hohen Umgebungstemperaturen oft der Bedarf der Traktionsbatteriekühlung. Umgekehrt kann die Abwärme der elektrischen Antriebsstrangkomponenten die Konditionierung der Fahrzeugcabine bei geringen Umgebungstemperaturen unterstützen, wenn das Temperaturniveau mittels Wärmepumpe angehoben wird.

In diesem Manuskript werden Simulations- sowie Messergebnisse einer indirekten Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion vorgestellt, welche den Energiebedarf für die Innenraumkonditionierung deutlich senkt und die einfache Einbindung weiterer Wärmequellen und -senken ermöglicht. Als Kältemittel kommt R744 (CO₂ - Kohlenstoffdioxid) zum Einsatz, welches sich aufgrund seiner thermodynamischen Eigenschaften besonders für den Wärmepumpenbetrieb eignet. Das verwendete System soll vor allem im Entfeuchtungs- und Heizbetrieb eine Effizienzsteigerung ermöglichen sowie im Enteisungsbetrieb des Außenraumwärmeübertragers alternative Wärmequellen nutzen und somit das Energie- und Thermomanagement des gesamten Fahrzeuges optimieren.

Durch die Eisbildung am Außenraumwärmeübertrager und die damit verbundene Enteisung in gewissen Intervallen nehmen Leistungsfähigkeit und Effizienz des Gesamtsystems ab. Allerdings können diese Effizienz- und Komfortprobleme beispielsweise durch die Verwendung einer vorkonditionierten Traktionsbatterie während des Enteisungsmodus minimiert werden.

Dieses System zielt auf höhere Wirkungsgrade im Heiz- und Entfeuchtungsbetrieb im Vergleich zu herkömmlichen Klimaanlagen ab und verbessert das Thermomanagement des gesamten Fahrzeugs.

Stichwörter:

Electric Vehicle (EV), Hybrid Electric Vehicle (HEV), R744 (CO₂ - Kohlenstoffdioxid), HVAC, Wärmepumpe, indirekt, Thermomanagement, Enteisung, Entfeuchtung, Jahresenergieverbrauch

III.11

Massenstrombestimmung eines thermostatischen Expansionsventils in Fahrzeug-Klimaanlagen

Michael Weiß^{1*}, Matthäus Wolffarth¹

¹ Hochschule Karlsruhe-Technik und Wirtschaft, Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, matthaeus.wolfarth@hs-karlsruhe.de

Bei der Entwicklung heutiger Fahrzeuge stehen stets wachsende Komfortansprüche der Kunden und die Etablierung neuer Antriebskonzepte sehr stark im Mittelpunkt der Aktivitäten. Diese beiden Entwicklungstendenzen stellen die akustische Optimierung der Klimaanlagen immer weiter in den Vordergrund, während die Anlagen selbst zunehmend komplexer werden und sich damit auch immer mehr potenzielle Geräuschquellen im Gesamtsystem befinden. Dabei konnten die Geräuschemissionen des Gesamtfahrzeugs in der Vergangenheit sowohl im Fahrbetrieb als auch im Stillstand z.B. an einer Ampel kontinuierlich verringert werden, so dass inzwischen die Geräusche der Nebenaggregate und hier ganz speziell die der Klimaanlage zunehmend in den Vordergrund treten. Diese Tendenz wird durch die Hybridisierung der Fahrzeuge bis hin zur Einführung reiner Elektrofahrzeuge noch weiter verstärkt.

Um zukünftig in der Lage zu sein, das Geräuschverhalten der thermostatischen Expansionsventile besser vorhersagen zu können, soll in einem ersten Schritt ein geeignetes CFD-Berechnungsmodell aufgebaut werden, mit dem der zu erwartende Massenstrom durch ein solches Ventil bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen berechnet werden kann und so die zuverlässige Vorhersage des strömungsmechanischen Verhaltens von thermostatischen Expansionsventilen in Fahrzeug-Klimaanlagen möglich wird. Diese Berechnungen werden zunächst für ein inkompressibles Fluid (Wasser) und für ein kompressibles Fluid (Luft) durchgeführt, wobei jeweils eine erste analytische 1D-Berechnung, eine 2D-CFD-Simulation und eine 3D-CFD-Simulation durchgeführt wird. Die erhaltenen Simulationsergebnisse werden dann für die Luftströmung mit geeigneten Prüfstandsversuchen verifiziert.

Für die Durchströmung des Ventils mit Luft werden sehr gute Simulationsergebnisse für den berechneten Massenstrom erzielt. Die betragsmäßigen Abweichungen des Luftmassenstroms zwischen den erhaltenen Prüfstandsergebnissen und den Simulationsrechnungen betragen sowohl bei der 2D- als auch bei der 3D-Berechnung maximal ca. 4 %. Dabei kann festgestellt werden, dass die größten Abweichungen bei hohen Massenströmen vorliegen. Auf dieser Basis werden auch erste Berechnungen des Massenstroms mit einem Kältemittel durchgeführt, um den Phasenübergang im Ventil berücksichtigen zu können. Die im Vergleich zu den Messungen mit Kältemittel vorhandenen Abweichungen werden dargestellt und es werden Maßnahmen diskutiert, wie die Simulationsergebnisse noch weiter an die gemessenen Werte angehängt werden können.

Stichwörter:

Fahrzeug-Klimaanlagen, thermostatisches Expansionsventil, CFD-Simulation

III.12

Untersuchungen zum akustischen Übertragungsverhalten von Schlauchleitungen in Fahrzeug-Klimaanlagen

Oleg Schulz, Matthäus Wolffarth^{*}

Hochschule Karlsruhe-Technik und Wirtschaft, Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, matthaeus.wolfarth@hs-karlsruhe.de

Akustische Untersuchungen und Schwingungsanalysen haben in der Fahrzeugentwicklung in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Schon in frühen Entwicklungsphasen sollen kritische Geräuschquellen und Übertragungspfade identifiziert, reduziert und nach Möglichkeit komplett beseitigt werden. Eine

wesentliche Geräuschquelle stellt der Verbrennungsmotor mit seinem Antriebsstrang dar, dessen Schwingungen über die Anbindungspunkte im Fahrzeug bis in den Innenraum gelangen können. In diesem Zusammenhang geraten auch die Schlauchleitungen der Fahrzeug-Klimaanlage immer mehr in den Fokus der Untersuchungen, da diese Verbindungselemente einen wesentlichen Beitrag zur Körperschallübertragung vom Verbrennungsmotor in den Fahrgast-Innenraum leisten können und zusätzlich auch noch die vom Klimakompressor verursachten Schwingungen unmittelbar weiterleiten.

Zur Untersuchung des akustischen Übertragungsverhaltens der Schlauchleitungen in Fahrzeug-Klimaanlagen wurde an der Hochschule in Karlsruhe ein Prüfstand konstruiert und aufgebaut, mit dem eine systematische schwingungstechnische Betrachtung dieser Verbindungselemente möglich ist. An diesem Prüfstand können einerseits akustische Grundsatzuntersuchungen durchgeführt werden, es ist aber andererseits auch möglich, das konkrete Übertragungs- und Schwingungsverhalten von in der Praxis ausgeführten Leitungssystemen zu charakterisieren. Dazu werden die zu untersuchenden Leitungen am Prüfstand in ihrer definierten Einbaulage eingesetzt und analysiert. Neben der Betrachtung der eigentlichen Leitungssysteme selbst kann aber auch der Einfluss der Anbindungspunkte z.B. der Schlauchleitung zum Chassis experimentell untersucht werden.

Der Aufbau des Prüfstands wird beschrieben und die für die Versuche eingesetzte Messtechnik wird erläutert. Erste grundsätzliche Untersuchungsergebnisse zum Übertragungs- und Schwingungsverhalten der Schlauchleitungen werden dargestellt und diskutiert.

Stichwörter:

Fahrzeug-Klimaanlagen, Schlauchleitungen, Akustisches Übertragungsverhalten

III.13

Der Einsatz von PCM in Wärmepumpen von Elektrofahrzeugen

Stefan Rusche^{1*}, Daniela Dimova¹, Michael Sonnekalb²

¹ Hochschule RheinMain, INME - Institut für nachhaltige Mobilität und Energie, Am Brückweg 26, 65428 Rüsselsheim, stefan.rusche@hs-rm.de, daniela.dimova@hs-rm.de

² KONVEKTA AG, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, michaelsonnekalb@konvekta.com

Der Einsatz von reversiblen Wärmepumpen gilt als möglicher Weg zur Erweiterung der Reichweite von Elektrofahrzeugen insbesondere bei extremeren Umgebungstemperaturen. Kombiniert man die Wärmepumpentechnik mit thermischen Speichern, so ist eine noch längere Fahrstrecke möglich. Um die sowohl auf die Masse als auch auf das Volumen bezogene Energiedichte thermischer Speicher zu erhöhen, ist die kombinierte Nutzung latenter und sensibler Wärme notwendig. Dieser Beitrag zeigt ein Konzept, bei dem ein Kältemittelkreislauf auf der Basis des Arbeitsfluids Kohlendioxid mit je einem Latentwärmespeicher am Verdampfer und am Kondensator ausgestattet wurde. Herausforderungen bei der Kombination von Latentwärmespeichern mit dem umweltfreundlichen Arbeitsmedium CO₂ bestehen in der Qualifikation geeigneter PCM (Phase Change Material), die den Phasenwechsel dauerhaft reproduzierbar bei den anfallenden Temperaturen vornehmen. Es konnten geeignete Materialien und Konstruktionen gefunden werden, mit denen effiziente Wärmeein- und –ausspeicherungen realisiert wurden. Um die theoretischen Reichweitenverlängerungen im praktischen Einsatz überprüfen zu können, wurde ein geeignetes Anwendungsfeld für ein Funktionsmuster identifiziert. Für diese Anwendung wird das Konzept optimiert werden.

Stichwörter:

Mobile Wärmepumpenanwendung, Reichweitenverlängerung, PCM, Kältemittel CO₂

III.14

Klimatisierung von LKW-Fahrerkabinen bei Motorstillstand durch Adsorptionsprozesse

H. Kerskes

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart,
kerskes@itw.uni-stuttgart.de

Die Kühlung von LKW-Fahrerkabinen bei Motorstillstand verursacht häufig unnötig Kosten, Emissionen und Lärm. Insbesondere im Fernlastverkehr ist es üblich, den Motor über Nacht laufenzulassen um die Klimaanlage anzutreiben.

In einem aktuellen Forschungsvorhaben wird eine neuartige Adsorptionskälteanlage entwickelt, die bei Motorstillstand die Fahrerkabine über einen Zeitraum von mehreren Stunden kühlt.

In einem geschlossenen Adsorptionsprozess mit dem Stoffpaar Zeolith/Wasser wird die benötigte Kälte erzeugt. Die Anlage besteht aus einer Verdampfer/Kondensator-Einheit und einem separatem Zeolithreservoir. Der Desorptionsprozess erfolgt durch Aufheizung des Zeolithmaterials mit Motorabgaswärme während der Fahrt. Ein Prototyp der Anlage wird derzeit auf einem Versuchstand am ITW erprobt.

In umfangreichen experimentellen Untersuchungen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen konnte die Funktionsfähigkeit der Anlage gezeigt werden. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Steuerung des kombinierten Verdampfungs- und Adsorptionsvorgangs zur Erzeugung einer konstanten und gleichzeitig regelbaren Kühlleistung. Aktuell werden experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen zur Optimierung des Wärme- und Stofftransports im Adsorber und des Verdampfungsvorgangs durchgeführt, mit dem Ziel, die Kapazität des Systems weiter zu verbessern.

Der Beitrag stellt das erarbeitete Konzept vor und berichtet über den erreichten Entwicklungsstand. Anhand aktueller Messergebnisse wird die Leistungsfähigkeit des Systems dargestellt und die physikalischen Grenzen diskutiert.

III.15

Wärmerückgewinnung in Schienenfahrzeugen

Steffen Stopper, Ingwer Ebinger¹

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

Moderne Schienenfahrzeuge sind mit Klimaanlagen ausgestattet, um für die Passagiere einen behaglichen Raumluftzustand zu schaffen und aufrecht zu erhalten. Neben den die thermischen Behaglichkeit beeinflussenden Werten (Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte, Raumluftgeschwindigkeit und Temperatur der Umschließungsflächen) ist der CO₂-Gehalt in der Raumluft ein wichtiges Kriterium für die Bewertung der Raumluftqualität. Zur Einhaltung einer gewünschten Raumluftqualität wird der Klimaanlagenzuluft ein hinreichend großer Anteil an Außenluft beigemischt.

Die Dimensionierung der Klimaanlage erfolgt für extreme Lastzuständen (maximale bzw. minimale Außenlufttemperatur, etc.). Die Aufbereitung der zuzuführenden Außenluft vom Außenluft- zum Zuluftzustand ist bei diesen Lastzuständen sehr energieintensiv und stellt einen großen Anteil an dem Gesamtenergiebedarf der Klimaanlage dar.

Im Hinblick auf eine Senkung des Energiebedarfes wird untersucht, in welchem Maße die Energieeffizienz durch die Nutzung eines Systems für die Wärmerückgewinnung (WRG) zur Vorkonditionierung der Außenluft verbessert werden kann. Ausgehend von der Bewertung diverser WRG-Systeme unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen in Schienenfahrzeugen wird auf Basis der aus den geltenden Normen abzuleitenden Außenluftvolumenströme und der verfügbaren Fortluftvolumenströme eine WRG-Anlage dimensioniert. Für unterschiedliche Temperaturszenarien und Besetzungsgrade werden für die gewählte WRG-Anlage die möglichen Energieeinsparungen ermittelt und bezüglich des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses bewertet. Von besonderem Interesse ist dabei der Teillastbetrieb. Darüber hinaus wird geprüft, welcher CO₂-Gehalt in der Raumluft bei unterschiedlichen Besetzungsgraden unter Zugabe der vorgeschriebenen oder zulässigen Mindestaußenluftmenge zu erwarten ist.

Stichwörter:

Wärmerückgewinnung, Energiebedarf, Raumluftqualität, Schienenfahrzeuge

III.16

Kälteanwendung auf Mega-Yachten von über 100 Metern Länge

Philipp Zehentmaier¹, Dr. Carsten Spieker²

¹ Fr. Lürssen Werft GmbH & Co. KG, Bremen

² GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Straße 165, 13509 Berlin

Carsten.Spieker@gea.com

Im Vortrag werden die typischen Einsatzgebiete für Kälteanwendungen an Bord von großen Yachten vorgestellt. Zu diesen Einsatzgebieten zählen neben der Klimatisierung und der Proviantkühlung insbesondere auch die Kühlung elektrischer Anlagen und die Kühlung der Maschinenräume. Darüber hinaus gibt es auf großen Yachten eine Vielzahl von Sondereinrichtungen, von denen einige auch den Kälteeinsatz fordern, wie zum Beispiel Kryo-Saunen. Die typischen Ausführungen dieser Systeme werden vorgestellt, im Wesentlichen am Beispiel einer großen Yacht von 180 Metern Länge. Die Diskussion um die Umweltfreundlichkeit in Bezug auf Energieeffizienz und um das Global-Warming-Potential (GWP) wird selbstverständlich auch bei den großen Yachten geführt. Ansätze für die Reduzierung des Energieverbrauchs und für den Einsatz alternativer Kältemittel werden aufgezeigt.

III.17

Jahresenergievergleich von Wärmeabfuhrsystemen in Supermärkten und deren Füllmengenbestimmung

Gerhard Frei

SiMREFF GmbH | Trimburgstr. 2 | 81249 München | Deutschland

frei@simreff.com

Der effiziente Betrieb von Kälteanlagen im Lebensmitteleinzelhandel (Supermärkten) ist von der gewählten Technologie, Kühlmöbel, Kältemittelwahl und den Standortbedingungen geprägt. Die Kälteanlagen tragen teilweise mit bis zu 60 % des Energieverbrauchs im Lebensmitteleinzelhandel bei. Die Anzahl der Kühlmöbel pro Filiale ist durch den verändernden Lebensstil der Verbraucher (Convenience Food, Fertigprodukte, Stoßzeiten) stark angestiegen. Die Effizienz von Kühlmöbeln und Kälteanlagen wurde stetig optimiert. Gängige Lösungen mit natürlichen Kältemitteln als auch, Wärmerückgewinnungskonzepte wurden entwickelt, haben sich etabliert oder werden verfeinert. Die verschärfte F-Gas Verordnung fordert den Einsatz von natürlichen oder Low-GWP Kältemitteln. Aufgrund der Brennbarkeit von A3 oder leichten Brennbarkeit von A2L Kältemitteln gewinnt die Füllmengenreduzierung eine neue Bedeutung. Die Risikobeurteilung der Kälteanlage unterliegt dem Hersteller, wobei die Gefährdungsbeurteilung beim Betreiber liegt. Es gilt ein bezahlbares, effizientes und nachhaltiges Kältekonzept für den jeweiligen Standort und Größe der Anlage zu konzipieren. Dementsprechend, sind je nach Wahl des Kältemittels, Aufstellungsort und Zugangsbereich, Grenzen an die Konzeptwahl vorgegeben. Indirekte oder Water-Loop Systeme finden vermehrt den Einsatz. Luftgekühlte Verflüssiger tragen erheblich zur Gesamt-Füllmenge von Kältesystemen bei. Enormes Energieeinsparpotenzial liegt, standortabhängig, in der richtigen Wahl der Wärmeabfuhr und deren Regelkonzept. Durch die Anwendung eines Füllmengentools lassen sich Konzeptwahl und Risikobeurteilung bereits in der Vorplanung bestimmen. Gesamtkonzept- und Jahresenergievergleiche von Wärmeabfuhrsystemen können durch dynamische Simulationen über 8.760 h/a auch bei Teillast aussagekräftig dargestellt und bewertet werden. Der Beitrag gibt einen Überblick über eine standortunabhängige Konzeptfindung in der Planungsphase von Supermarktkälteanlagen.

Stichwörter:

Simulation, Füllmenge, Wärmeabfuhrsystem, Effizienz, Supermarktkälte

III.18

Status und Entwicklungsmöglichkeiten dezentraler Kälteerzeugungssysteme mit Wasser als Rückkühlmedium als integrales Konzept zur Wärmerückgewinnung im Lebensmitteleinzelhandel

Roland Mayer

CAREL Deutschland GmbH, Am Spielacker 34, 63571 Gelnhausen, roland.mayer@carel.com

Die konventionelle Kälteerzeugung im Lebensmitteleinzelhandel mit zentralen Kältemaschinen, ist in den letzten Jahren zunehmend geprägt von immer komplexer werdenden Systemen, welche sowohl die gesellschaftlichen Anforderungen an den Klimaschutz, als auch die Anforderungen vom Kunden selbst, erfüllen müssen. Diese Aufgabe wird unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Flexibilität immer schwieriger.

Eine dezentrale, weniger komplexe und flexiblere Variante der Kälteerzeugung hat durchaus das Potential die Anforderungen an Klimaschutz, Kosteneffizienz, wirtschaftlicher und sicherer Betriebsführung zu erfüllen. Eine erfolgreiche Einführung dieser Systeme erfordert allerdings einen Paradigmenwechsel und eine Kooperation aller Marktteilnehmer.

Der Vortrag beleuchtet den aktuellen Status sowie zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten entsprechender Systeme, unter Verwendung von Ergebnissen aus Studien und Beispielen aus der Praxis. Der Vortrag beinhaltet das Ergebnis einer aus einer Kooperation von Marktteilnehmern entstandenen System-Spezifikation, welche zum Ziel hat, Anforderungen an diese integralen und dezentralen Systeme, unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit, zu definieren und zu standardisieren.

III.19

Ökoeffizienz-Konzept für Supermarktkälteanlagen

Stefan Schuessler

Honeywell Deutschland GmbH, Strahlenbergerstr. 110 – 112, 63067 Offenbach am Main,
stefan.schuessler@honeywell.com

Die Gewerbekälte wird von der Politik und den Behörden aufgrund der Verwendung von Hoch-GWP-Kältemitteln wie R-404A und hoher Leckageraten mit besonderem Augenmerk betrachtet. In Europa gibt es durch die F-Gase-Verordnung ein Verwendungsverbot für bestimmte Kältemittel sowie eine schrittweise Begrenzung der Verkaufsmengen von teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen basierend auf deren CO₂-Äquivalenten. Die rasche Umstellung auf Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotential ist daher in diesem Bereich unabdingbar.

Als Antwort auf die Herausforderungen der F-Gas-Verordnung und zur Reduzierung des Energieverbrauchs im Bereich der Gewerbekälte, sind eine Vielzahl neuer Systemarchitekturen in Entwicklung und Erprobung.

Zurzeit ergeben sich zwei Lösungsansätze, um den Bereich der Gewerbekälte bei der Einhaltung der F-Gase-Verordnung zu unterstützen.

Für existierende Anlagen mit R-404A, ist ein Retrofit mit einem Niedrig-GWP-Kältemittel die schnellste, wirtschaftlichste und umweltfreundlichste Lösung.

Für Neuanlagen werden verschiedene Systemarchitekturen untersucht.

Die Kombination von R-744 mit neu entwickelten HFO und HFO-Blend-Kältemitteln bieten Leistungs- und Sicherheitsvorteile. Anwendungsbeispiele solcher Anlagen und Systemarchitekturen werden untersucht und das Ökoeffizienz-Konzept wird vorgestellt. Dieses dient als Grundlage um die Umwelt- und Kostenaspekte verschiedener Systemarchitekturen miteinander zu vergleichen.

III.20

Energetische Bewertung von Wasserkreislauf-Systemen für Supermärkte

Nicolas Fidorra^{1*}, Jonathan Kistner², Wilhelm Tegethoff³, Jürgen Köhler¹

¹TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer Straße 5, 38106, Braunschweig,
n.fidorra@tu-braunschweig.de

²TU Braunschweig, Institut für Gebäude- und Solartechnik, Mühlenpförtstr. 23, 38106
Braunschweig, igs@igs.tu-bs.de

³TLK-Thermo GmbH, Hans-Sommerstraße 5, 38106 Braunschweig, w.tegethoff@tlk-thermo.de

Supermarktkälteanlagen mit wassergekühlten Kühlmöbeln sind eine Alternative zu zentralen, direktverdampfenden Verbundkälteanlagen. Jedes Kühlmöbel hat hierbei ein eigenes Kälteaggregat, dessen Abwärme an einen Wasserkreislauf abgegeben wird. Dieser kann an zentraler Stelle gegen die Umgebung rückgekühlt werden oder als Wärmequelle für Heizwärmepumpen dienen. Diese Systeme bieten eine größere Flexibilität bei der Neuanordnung der Kühlmöbel im Verkaufsraum.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Wärmeabgabe an die Umgebung, wie beispielsweise Chiller, Luft-Sekundärfluid-Wärmeübertrager, sowie die Aufwertung der Abwärme für Heizzwecke. Neben dieser unmittelbaren Wärmeabgabe und –nutzung kann die Integration von Tankspeichern zur Lastflexibilisierung und zeitversetzten Wärmeabgabe bzw. elektrischen Leistungsaufnahme beitragen.

Je nach Wahl der Rückkühlung an die Umgebung muss anstelle von Wasser ein anderes, frost-sicheres Kühlmittel gewählt werden. Neben dem grundsätzlichen Aufbau dieser Systeme und der Wahl des Kühlmittels, ist die Auswahl geeigneter Kältemittel in den Kühlmöbeln, Chiller und Wärmepumpen von Bedeutung und hat einen Einfluss auf die Gesamteffizienz.

In diese Veröffentlichung werden die verschiedenen Arten von Wasserkreislauf-Systemen vorgestellt und mittels Simulationen hinsichtlich ihrer energetischen Eignung untersucht. Zunächst werden hierzu die möglichen Anlagenvarianten systematisiert dargestellt. Anschließend werden neuartige, auf bereits validierten Teilsystemen basierende Simulationsmodelle vorgestellt. Diese sind geeignet Jahressimulationen von Wasserkreislauf Systemen durchzuführen. Abschließend werden einige Systemvarianten für unterschiedliche klimatische Randbedingungen simuliert, miteinander verglichen und aus energetischer Perspektive bewertet.

Stichwörter:

Supermarkt, Wasserkreislauf, Kühlmöbel

III.21

Erweiterte Exergieanalyse von Kälteanlagen

Marcel Knipps*, Michael Arnemann

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),
76133 Karlsruhe,
marcel.knipps@gmail.com, michael.arnemann@hs-karlsruhe.de

Eine Exergieanalyse für eine Kälteanlage kann wichtige Informationen zur Energieeffizienz der Anlage und den Verlusten in den einzelnen Komponenten im Kältemittelkreislauf liefern. Durch eine erweiterte Exergieanalyse kann ein noch tieferer Einblick in die Zusammensetzung der Exergieverluste in einer Komponente gewonnen werden. Es wird unterschieden zwischen Exergieverlusten, die durch die betrachtete Komponente selbst entstehen und solchen, die durch andere Komponenten im Kreislauf verursacht werden. Außerdem wird der Gesamtverlust einer Komponente in vermeidbare und unvermeidbare Exergieverluste unterteilt.

Anhand von Simulationen mehrerer Anlagenschaltungen mit unterschiedlichen Kältemitteln werden die Ergebnisse der erweiterten Exergieanalyse mit denen einer einfachen Exergieanalyse verglichen. Im Speziellen wird auf die Möglichkeit der Analysen, das Verbesserungspotenzial einer Komponente darzustellen, eingegangen.

Die Durchführung der erweiterten Exergieanalyse erfolgt durch die Definition von mehreren Vergleichsprozessen, wie von Morosuk und Tsatsaronis in einer Veröffentlichung 2009 beschrieben.

Der Vergleich beider Methoden zeigt, dass die einfache Exergieanalyse abhängig von Anlagenschaltung und Kältemittel nicht immer ausreicht, um richtige Annahmen bezüglich der Verbesserungspotenziale der Komponenten im Kältemittelkreislauf zu machen.

Stichwörter:

Energieeffizienz, Kälteanlagen, erweiterte Exergieanalyse

III.22

Messdatengestützte Untersuchung der Energieoptimierungspotenziale im Shopping-Center mit hoher Energiebedarfsdichte

Mu Huang*, Leon Engelmeyer, Florian Hintz, Dirk Bohne

Leibniz Universität Hannover, Abteilung Gebäudetechnik, Herrenhäuser Straße 8, 30419 Hannover
mu.huang@iek.uni-hannover.de

Rund 40 % des Energieverbrauchs in Deutschland entfallen auf den Gebäudebereich. Die Optimierung der Energieeffizienz im Gebäudebereich kann demnach wesentlich zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Reduktion des Energieverbrauchs von Shopping-Centern. Shopping-Center weisen durch den notwendigen Luftaustausch mittels raumluftechnischer Anlagen und der damit verbundenen thermischen Behandlungsfunktionen einen hohen Energiebedarf auf. Aufgrund des hohen Energiebedarfs sowie der zunehmenden Verbreitung von Shopping-Centern ist es zwingend erforderlich, nachhaltige Energiekonzepte für diesen Gebäudetypus zu entwickeln.

Wesentliches Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „EffShop“ ist die Schließung der Wissenslücken auf dem Gebiet energieeffizienter Shopping-Center. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde als Teilprojekt das Energie- und Betriebsmonitoring in zwei vorhandenen Shopping-Centern aus dem Raum München durchgeführt. Beide Shopping-Center verfügen über ein innovatives Energiekonzept mit der Nutzung regenerativer Energiequellen wie eine freie Kühlung oder eine oberflächennahe Geothermie. Auf Basis der erhobenen Messdaten wurden die Energieverbrauchsstruktur sowie das Energieoptimierungspotenzial der gebäudetechnischen Anlagen in den zu untersuchenden Shopping-Centern ermittelt.

Der Vortrag stellt dieses Projekt und die Ergebnisse des Monitorings vor. Zudem werden im Schwerpunkt das Energiekonzept unter Einbindung der oberflächennahen Geothermie mit reversibler Wärmepumpen und die Einsparungsmöglichkeiten bei der Kälteerzeugung vorgestellt.

Stichwörter:

Shopping-Center, Monitoring, Geothermie, Wärmepumpen, Optimierung

III.23

Vereinfachte Methode zur Abschätzung des Kältebedarfs eines Quartiers mit unterschiedlichen Kälteerzeugern am Beispiel des Hochschulcampus der Technischen Universität Berlin

Nikolai Kononenko^{1*}, Barbara Münch², Diana-Iulia Stanica², Felix Ziegler¹, Martin Kriegel²

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

²Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Fachgebiet Gebäudeenergiesysteme,
Marchstraße 4, 10587 Berlin

Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „Energieeffizienter Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg, EnEff: HCBC“ (BMWI-FKZ: 03ET-1354A) ist es, einen Energie-Masterplan für den Campus zu entwickeln, der erlaubt, die Klimaschutzziele, die sich die Bundesregierung für 2050 gesteckt hat bereits 2025 zu erreichen. Der Fokus des Projekts liegt dabei auf der Optimierung des Wärme- und Kälte-managements; entscheidendes Merkmal ist die Verschiebung der Wärmeenergiebilanzgrenze vom Haus weg, hin zum Quartier.

Gegenstand der Forschung ist es, die in der Ist-Analyse ermittelten, zeitlich und örtlich aufgelösten Energieverbräuche des Campus dem ebenfalls zeitlich und örtlich aufgelösten Potential aus alternativen und regenerativen Energien (Biomasse, Solarstrahlung, geothermales Potential und Abwärme) gegenüberzustellen, Energieeinsparpotentiale zu identifizieren und ein energetisches und ökonomisches Gesamtkonzept, bestehend aus Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung, zu erstellen.

Grundlage der Analyse ist die Erfassung des Ist-Zustands, d.h. in Bezug auf Kältebedarf, die momentane Kälteversorgung des Campus. Gegenwärtig werden 48 Gebäudekomplexe mit etwa 550 000 qm Nettogrundfläche von etwa 160 Kompressions- und 4 Absorptionskälteanlagen mit Kälte versorgt. Mit 12,5 MW installierter Leistung (Abb. 1) werden etwa 18 GWh jährlicher Kältebedarf, bestehend aus Prozess- und Klimakälte, gedeckt. Zwar liegen gebäudescharfe Daten für die monatlichen Wärme- und Stromverbräuche vor, allerdings ist nicht bekannt, welcher Anteil davon auf die Kälteerzeugung entfällt.

Die installierte Kälteleistung wird Jahr für Jahr nach Bedarf erweitert, aber es besteht kein übergeordnetes Konzept, das erlaubt, die installierte Kälte effizient zu nutzen. Deshalb sind gegenwärtig mehrere neue Kälteverbundsysteme in der Konzeption.

In dieser Veröffentlichung soll nun eine Methode vorgestellt werden, wie schnell räumlich und zeitlich aufgelöste Lastprofile für ein so großes heterogenes Areal gewonnen werden können, die eine Einbindung regenerativer Energien sowie eine Optimierung der Kälteversorgung ermöglichen.

Stichwörter:

Wärmewende, Quartiersmodellierung, energieeffiziente Kältenetze, Energiemanagement, regenerative Energien

IV.01

Heizung, Lüftung, weiße Ware – ein integriertes Systemkonzept für das Haus der Zukunft

Lena Frank*, Maximilian Rödder, Matthias Neef, Mario Adam

Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Hochschule Düsseldorf, Münsterstr. 156, 40476 Düsseldorf

lena.frank@hs-duesseldorf.de

Aufgrund der EU-Gebäuderichtlinie 2010 für energieeffiziente Gebäude (EPBD) werden ab 2020 für Neubauten im Bereich der Heizung, Lüftung und Klimatechnik neue innovative Konzepte und Produkte benötigt, die den Bedürfnissen von Niedrigstenergiegebäuden gerecht werden. In solch energieeffizienten Gebäuden spielt der Bedarf an Energie für die Raumheizung gegenüber der benötigten Energie für Warmwasser und zum Antrieb elektrischer Geräte eine zusehends untergeordnete Rolle. Die thermische Energie für die elektrischen Haushaltsgeräte, wie Waschmaschine, Spülmaschine, Wäschetrockner, Kühlschrank und Gefrierschrank wird für gewöhnlich dezentral im Gerät erzeugt.

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel dieses Forschungsprojektes der Bau und der Test eines Funktionsmusters zur funktionalen und energetischen Kopplung der Haushaltsgeräte und der Heizungs- und Lüftungstechnik des Gebäudes. Grundgedanke dabei ist die Nutzung von Synergien bei Komponenten und Wärmeströmen, wie der Wärmepumpe als Kälteaggregat für den Kühlschrank und die effiziente Nutzung von Abwärme der Haushaltsgeräte für die Warmwasserebereitung und Raumheizung. Die elektrischen Haushaltsgeräte sind dabei über einen Energiebus aus Wärme- und Kälte-Sammelleitungen und einen Wärme-/Kälte-Speicher mit einer Wärmepumpe hydraulisch gekoppelt.

Theoretische Analysen und praktische Untersuchungen sollen die Fragen nach dem Betriebsverhalten, dem Leistungsvermögen und den erzielbaren Synergieeffekten und Energieeinsparungen beantworten, so dass eine ganzheitliche Bewertung zur möglichen Markteinführung eines solchen integrierten Technikkonzeptes für den Einsatz in Niedrigstenergiegebäuden erstellt werden kann. Im vorliegenden Beitrag sollen die hydraulischen Verschaltungen, die Energieflüsse und die Anschlussmöglichkeiten der Haushaltsgeräte und deren Einsparpotentiale aufgezeigt werden.

Dieses Projekt ist gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Förderkennzeichen: 03FH007PX5.

Stichwörter:

Regenerative Energie, Niedrigstenergiegebäude, Wärmepumpe, Smart Home, Haushaltsgeräte

IV.02

Einsatz innovativer Gebäudetechnik zur Lastverschiebung: Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und den Komfort in Bestandsgebäuden

Henryk Wolisz*, Tanja Osterhage, Dirk Müller

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

Die Überführung der Energiebereitstellung von überwiegend fossilen hin zu regenerativen und fluktuiierenden Energiequellen im Rahmen der Energiewende stellt die Energieversorger und das elektrische Verteilnetz vor neue Herausforderungen. Die Stromerzeugung kann nur noch begrenzt gesteuert werden, daher wird zur

Sicherstellung einer stabilen und kosteneffizienten Stromversorgung in Zukunft verstärkt die Nutzung flexibler Stromverbraucher und Stromspeicher notwendig.

In Deutschland entfallen ca. 18 % des gesamten Endenergieverbrauchs auf die Beheizung von Wohngebäuden. Der Bedarf an Heizenergie in Gebäuden sinkt zwar momentan stetig, jedoch verringert sich der tatsächliche Verbrauch - aufgrund von steigendem Komfort - nur marginal. Zudem führt die immer stärkere Dämmung der Außenhülle zu aufkommenden Kühlbedarfen, welche in Zukunft an Bedeutung gewinnen werden. Daher wird immer öfter vorgeschlagen Wohngebäude mit innovativen elektrischen Heiz- und ggf. auch Kühlsystemen auf Basis von Wärmepumpen auszustatten, um mithilfe von variablen Strompreisen diese Gebäudetechnik zur Lastverschiebung zu nutzen. Werden dabei zusätzlich thermische Speicher eingesetzt oder die thermische Trägheit der Gebäudemasse aktiv genutzt, ergibt sich ein signifikantes Flexibilitätspotential, welches die Einbindung größerer Mengen erneuerbarer Energien in der Stromversorgung erleichtern könnte. Allerdings, wird es bei der aktuellen Neubaurate von ca. 1 % nicht möglich sein diese Lastverschiebungspotentiale nur mit Hilfe von modernen Gebäuden zu heben. Somit ergibt sich die Frage, ob auch der nachträgliche Einbau intelligenter elektrischer Heizsysteme in Bestandsgebäuden vorteilhaft ist.

Im Rahmen der Forschung werden daher die wirtschaftlichen Potentiale der Nutzung von innovativen Heizungsanlagen in Wohngebäuden zum Zweck der Lastverschiebung diskutiert. Dabei wird insbesondere auf den gezielten Einsatz von bestehenden thermischen Speichern, auf die Nachrüstung von thermischen Speichern sowie auf die aktive Nutzung der Gebäudemasse eingegangen. Letztere Option ist vielversprechend, da sie mit nur sehr geringen Investitionen ein großes Speicherpotential bereitstellt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ggf. hervorgerufene Temperaturschwankungen das Behaglichkeitsempfinden der Bewohner nicht beeinträchtigen. Dementsprechend wird das Augenmerk ebenfalls auf die Auswirkungen solcher Lastverschiebungsmaßnahmen auf die Behaglichkeit sowie die Nutzerzufriedenheit in Wohngebäuden untersucht.

Stichwörter:

Lastverschiebung, Wärmepumpen, Thermische Speicher, Wirtschaftlichkeit, Komfort

IV.03

Angewandte Flexibilität in Nicht-Wohngebäuden

Gerrit Bode^{*}, Sascha Behrendt, Johannes Fütterer, Dirk Müller

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustraße 10, 52072 Aachen, Deutschland

gkode@eonerc.rwth-aachen.de

Der zunehmende Beitrag volatiler Energieerzeuger zum Strommix ist eine Herausforderung für den stabilen und ausgeglichenen Betrieb des Versorgungsnetzes. Demand-Side-Management d.h. die Anpassung des Stromverbrauchs an die momentane Erzeugung, ist eine vielversprechende Möglichkeit, den Betrieb zu stabilisieren. Verschiedene Technologien bieten sich für den Einsatz an, jedoch verhindert die fehlende Förderung und fehlende DSM-Programme Investitionen in neue Technologien oder hohen Personaleinsatz.

In diesem Beitrag untersuchen wir den Vorschlag, die bereits in Gebäudesystemen vorhandene Flexibilität von energietechnischen Systemen wie Wärmepumpen oder Raumlufttechnischen Anlagen zu nutzen. Wir diskutieren eine Methode zur Identifizierung und Quantifizierung der Flexibilität und wenden sie auf das Hauptgebäude des E.ON Energieforschungszentrum der RWTH Aachen an. Das Gebäude verfügt über ein komplexes Energieversorgungs- und -verteilsystem. Wir haben eine Reihe von Komponenten als mögliche Quellen von Flexibilität identifiziert und das Verhalten anhand von Experimenten validiert. Wir zeigen damit den Einsatz von gebäudetechnischer Flexibilität ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Investitionen.

Stichwörter:

Flexibilität, Nichtwohngebäude, Simulationslücke

IV.04

Experimentelle Untersuchung eines Latentwärmespeichers für den Einsatz in Wärmepumpensystemen

Timo Korth^{*}, Felix Loistl, Christian Schweigler

Hochschule München, Fakultät 05 Versorgungs- und Gebäudetechnik, Lothstr. 34, 80335 München

timo.korth@hm.edu, felix.loistl@hm.edu, christian.schweigler@hm.edu

Eine für die zukünftige Wärmeversorgung als essentiell angesehene Technologie ist die der Wärmepumpe. In vielen Studien zur nachhaltigen Energieversorgung wird - auch in Deutschland für die Energiewende - auf diese Systeme gebaut und ein steigender Absatz prognostiziert. Um die Wärmepumpen auch bei fluktuerendem Angebot von Strom aus erneuerbaren Energiequellen effizient und vor allem flexibel zu betreiben, ist die Nutzung von Speichertechnologien unerlässlich. Im Bereich der Luft/Luft-Klimatisierungssysteme ist jedoch eine thermische Energiespeicherung aufgrund der für diesen Anwendungsfall schlechten thermodynamischen Eigenschaften des Mediums Luft nicht ohne weiteres möglich.

Latentwärmespeicher können hier eine Lösung sein – und dies mit wenig gerätetechnischem Aufwand. Durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (PCM, engl. Phase Change Materials) kann für die Speicherung die hohe Phasenwechselenergie ausgewählter Stoffe genutzt werden. Der Energieein- und austrag erfolgt direkt über das Kältemittel. Aufbauend auf vorangehende, überwiegend theoretische Untersuchungen werden die experimentellen Untersuchungen eines ersten Prototypen eines Latentwärmespeichers vorgestellt. Der Speicher mit dem Phasenwechselmaterial Paraffin RC28HC kann in einer Laboranlage in verschiedenen Betriebsweisen erprobt werden. Die zu untersuchenden Eigenschaften von Latentwärmespeichern sind der Energieein- und Austrag, die Leistungscharakteristik sowie die Dynamik des Speichers und das Verhalten des Speichermaterials in Wechselwirkung mit dem Kältemittel. Die experimentellen Untersuchungen zielen darauf ab, Erkenntnisse zu diesen Punkten zu gewinnen und rechnerisch nachzubilden, um diese bei der Planung einer Pilotanlage einzusetzen. In der Pilotanlage soll die Kopplung des Speichers mit den Inneneinheiten eines Klimatisierungssystems umgesetzt werden, um die gespeicherte Energie in Form von Wärme oder Kälte direkt für die Klimatisierung zu nutzen. Für einen effizienten Einsatz des Speichers muss die Temperaturdifferenz zwischen der durch den Phasenwechsel bestimmten Speichertemperatur und der Verdampfung/Kondensation klein gehalten werden, um eine Verschlechterung der Betriebsbedingungen für die Wärmepumpe zu vermeiden. Der Energieein- und -austrag, die Leistungscharakteristik des Latentwärmespeichers unter diesen Bedingungen sowie die kältetechnische Umsetzung liegen im Fokus der Untersuchungen.

Stichwörter:

Klimageräte, Wärmepumpen, Latentwärmespeicher, PCM

IV.05

Hochtemperatur Wärmepumpen – Marktübersicht und Stand der Forschung

Cordin Arpagaus^{1*}, Frédéric Bless¹, Jürg Schiffmann², Stefan S. Bertsch¹

¹ NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Institut für Energiesysteme IES,
Werdenbergstrasse 4, CH-9471 Buchs, Schweiz
cordin.arpagaus@ntb.ch

² Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratory for Applied Mechanical Design (LAMD),

Rue de la Maladière 71b, CH-2002, Neuchâtel, Schweiz

Der aktuelle Stand der Technik und die aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für Hochtemperatur Wärmepumpen (HTWP) mit Vorlauftemperaturen von 120°C und höher werden präsentiert. Mehr als 20 kommerzielle HTWP Modelle von über 10 Herstellern wurden identifiziert. Die Heizleistung reicht von etwa 20 kW bis zu 20 MW. Einige Wärmepumpen liefern bereits 120°C Wärme.

Großes Marktpotenzial wird in der Lebensmittel-, Papier-, Metall- und chemischen Industrie, insbesondere bei Wasch-, Verdampfungs- und Trocknungsprozessen erkannt. Die meisten Wärmepumpen Kreisläufe sind 1-stufig und unterscheiden sich im verwendeten Kältemittel und Kompressortyp. Interne Wärmeübertrager werden eingesetzt, um eine ausreichende Überhitzung zu gewährleisten. Optimierungen werden mit Economiser-Zyklen, Turboverdichtern mit Zwischeneinspritzung und 2-stufigen Kaskadenzyklen erreicht. COP-Werte von 2.4 bis 5.8 werden für einen Temperaturanstieg von 95 bis 40 K erzielt.

Verschiedene HTWP im Labormaßstab demonstrieren bereits die technische Machbarkeit von Senkentemperaturen höher als 120°C. R1336mzz(Z), R718, R245fa, R1234ze(Z) und R601 sind die am häufigsten untersuchten Kältemittel. Mit dem HFO R1336mzz(Z) werden hohe Temperaturen von bis zu 160°C erreicht. Die experimentell erhaltenen COPs der verschiedenen Forschungsstudien bei 120°C Senktemperatur liegen zwischen 5.7 und 6.5 bei 30 K Temperaturhub und zwischen 2.2 und 2.8 bei 70 K Anhebung.

Die hohe Forschungsaktivität und eine beträchtliche Anzahl von laufenden Demonstrationsprojekten zeigen, dass HTWP in den nächsten Jahren Marktreife mit Senktemperaturen von 120 bis 150° C erreichen werden.

Doch trotz des großen Potenzials gibt es nach wie vor Marktbarrieren für die breitere Verbreitung von HTWP. Dies sind insbesondere der Mangel an Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial, konkurrierende wärmeproduzierende Technologien und niedrige fossile Energiepreise.

Stichwörter:

Hochtemperatur Wärmepumpe, Marktübersicht, Forschung, COP, Kältemittel

IV.06

Hardware in the Loop Test eines optimierten Winter- und Sommerbetriebs einer Abwasser-Gaswärmepumpe/-Kältemaschine

M.Sc. Johannes Goebel*, M.Sc. Marek Kowalski, M.Sc. Lena Frank, Prof. Dr. Mario Adam

Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Hochschule Düsseldorf
Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf
johannes.goebel@hs-duesseldorf.de

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

In diesem Beitrag wird ein optimiertes Gesamtsystem zur Nutzung von Abwasser als Wärmequelle und Wärmesenke für Kühl- und Heizzwecke mit einer Buderus GWPW41 Gas-Sorptionswärmepumpe inklusive Abwasserwärmeübertrager, Wärmespeicher, Gebäude mit Wärme-Kälteverteilung/-übergabe sowie Zusatzheiz-/Kälteaggregaten vorgestellt. Auf Grundlage dieser Optimierung wird die Sorptionswärmepumpe/-kältemaschine an einem Hardware in the Loop (HiL) Prüfstand unter Verwendung von typischen Tagen dynamisch getestet. Die Ergebnisse der Optimierung werden einleitend, darauf aufbauend die Ergebnisse der

HiL-Tests vorgestellt. Die verwendete Simulationsumgebung ist MAT-LAB/Simulink und die Komponenten-Toolbox CARNOT.

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

Stichwörter:

Abwasser, Kühlung, Gaswärmepumpe, Design of Experiments, Simulation, Hardware in the Loop Test

IV.07

Geothermienutzung in innerstädtischen Tunneln – Ergebnisse der Messungen im Fasanenhoftunnel in Stuttgart

Anders Berg^{*}, Konstantinos Stergiopoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
anders.berg@ige.uni-stuttgart.de, konstantinos.stergiopoulos@ige.uni-stuttgart.de

Es ist nur ein geringer technischer Aufwand nötig, um Tunnelbauwerke als geothermische Quelle oder Senke für Heiz- und Kühlzwecke zu nutzen. In Tunneln ist aufgrund der großen erdberührten Fläche ein hohes geothermisches Potential vorhanden. Diese Idee wurde im Rahmen der Messkampagne im Fasanenhoftunnel in Stuttgart umgesetzt. Dabei wurden zwei jeweils etwa 10 Meter lange Tunnelabschnitte mit Absorberrohren ausgestattet und mit einer Wärmepumpe gekoppelt. Um den Temperaturverlauf im Erdreich, der Tunnelschale und in der Tunnelluft zu erfassen, wurde der Tunnel mit Messtechnik ausgerüstet.

Während der Messungen wurden zwischen 2011 und 2017 Langzeitlastprofile mit konstanter Vorlauftemperatur sowie Wärme- und Kältebedarfsprofile entsprechend eines zuvor simulierten Gebäudebedarfs auf die Anlage des Tunnels aufgeprägt, um das Potenzial der geothermischen Nutzung von Tunneln zu bestimmen. Mittels der Langzeitlastprofile mit konstanter Vorlauftemperatur wurde die mittlere Entzugsleistung der Tunnelabsorber zum Heizen und Kühlen ermittelt. Die Versuche mit den Bedarfsprofilen simulieren, wie das gesamte tunnelgeothermische System mit einem Endverbraucher interagiert und wie viel Kühl- und Heizenergie letztendlich von einem solchen System bereitgestellt werden kann.

Im folgenden Beitrag wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Messungen im Fasanenhoftunnel Stuttgart vorgestellt. Anhand der Ergebnisse wird über das Potential tunnelgeothermischer Nutzung im innerstädtischen Bereich diskutiert. Als Ergebnis lässt sich insgesamt feststellen, dass die Geothermienutzung in innerstädtischen Tunneln in Zukunft eine zunehmende Rolle spielen kann.

Stichwörter:

Geothermie, Tunnel, Wärmepumpe, Heizung, Kühlung, Gebäude

IV.08

Entwicklung einer R600-Hochtemperatur-Wärmepumpe - Simulation und erste Messungen

Heinz Moisi^{*}, Renè Rieberer

Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
heinz.moisi@tugraz.at

Im Zuge der Entwicklung einer Hochtemperatur-Kompressionswärmepumpe (Nutztemperaturen bis ca. 110 °C) mit dem Kältemittel n-Butan (R600) sind unterschiedliche Kreislaufvarianten simulationstechnisch betrachtet

worden. Aufgrund des überhängenden Nassdampfgebiets von R600 ist dabei besonderes Augenmerk auf die Bereitstellung einer ausreichenden Kältemittel-Überhitzung am Kompressoreintritt gelegt worden, um eine sogenannte „nasse“ Kompression zu vermeiden. Je nach Kältemittel und Betriebspunkt kann die erforderliche Überhitzung hohe Werte annehmen und eine ausschließliche Überhitzung im Verdampfer die Verdampfungstemperatur und daher die Effizienz senken. Um das Betriebsverhalten des Funktionsmusters im Vorfeld abzuschätzen sind drei einstufige Kreisläufe mit unterschiedlicher Überhitzungsbereitsstellung betrachtet worden. Die erste Variante entspricht dabei dem konventionellen Wärmepumpenkreislauf. Für die zweite Variante wird ein interner Wärmeübertrager für die Überhitzung verwendet. In der dritten Variante wird die Überhitzung durch einen sauggasgekühlten Kompressor bereitgestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen den Vorteil hinsichtlich Effizienz durch die Entkopplung der Überhitzung von der Wärmequelle, für die unkonventionellen Varianten. Basierend auf den untersuchten Kreisläufen ist ein Funktionsmuster entwickelt und aufgebaut worden, welches eine experimentelle Untersuchung der drei Varianten ermöglicht. Erste Messergebnisse und Betriebserfahrungen konnten gesammelt werden.

Stichwörter:

Hochtemperaturanwendung, n-Butan, Kompressionswärmepumpe

IV.09

Industrieller Einsatz einer Rotationswärmepumpe

Bernhard Adler*, Rainer Mauthner, Andreas Längauer

ecop Technologies GmbH, Geschäftsführer, Perfektastraße 73/Top A1, 1230 Wien, Austria
bernhard.adler@ecop.at, rainer.mauthner@ecop.at, andreas.laengauer@ecop.at

Die strenger werdenden Richtlinien hinsichtlich CO₂-Emissionen und das Ziel ein Unternehmen möglichst umweltfreundlich zu betreiben, machen den Einsatz von Wärmepumpen auch in der Industrie immer attraktiver. Als Herausforderung für diese Anlagen ist speziell der Einsatz bei unterschiedlichen und schwankenden Betriebsbedingungen zu nennen. Genau hier liegen die Vorteile der von ecop Technologies entwickelten Rotation Heat Pump (RHP).

Das Arbeitsmedium, ein umweltfreundliches, nicht brennbares Gasgemisch, wird nicht verdampft und kondensiert, sondern bleibt immer im gasförmigen Zustand. Thermodynamisch vergleichbar mit dem Joule-Prozess, bei dem der Wärmetausch vollständig sensibel erfolgt.

Dadurch ist es möglich, den Temperaturbereich der Wärmequelle und Wärmesenke zu variieren, ohne nennenswerte Einbußen hinsichtlich des Coefficient of Performance (COP) in Kauf nehmen zu müssen. Ermöglicht wird dies durch die effiziente Verdichtung des Gases, die nicht wie bei herkömmlichen Wärmepumpen über einen Kompressor erfolgt, sondern auf den durch die Rotation hervorgerufenen Zentrifugalkräften basiert. Der isentrope Wirkungsgrad der Verdichtung und Expansion liegt jeweils bei über 99%, woraus sich auch die vergleichsweise sehr hohen COP-Werte ergeben.

Die oben genannte Flexibilität sowie die Tatsache, dass ein umweltfreundliches Arbeitsmittel eingesetzt werden kann, eröffnen eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. Sowohl im Bereich der Restwärmennutzung von Abgasen im Kraftwerksbereich (z.B.: Rauchgaskondensation in Heizkraftwerken) als auch in unterschiedlichsten Industrieprozessen (z.B.: Trocknungsprozesse) besteht großes Potential für diese Wärmepumpen-Technologie, welche bereits in Form einer 700kW Pilotanlage, Bild 1, bei einem Kunden getestet wird.

Stichwörter:

Rotation Heat Pump, Industriewärmepumpe, ecop, flexibel, DKV

IV.10

Modellgestützte Regelung von Anlagen der Gebäudeklimatechnik

Marc Baranski*, Johannes Füller, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, mbaranski@eonerc.rwth-aachen.de

Gebäudeenergiesysteme werden in der heutigen Zeit aus sehr effizienten Komponenten aufgebaut, mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Erzeugung ausgestattet und aufgrund der Interaktion vieler unterschiedlicher Erzeuger und Verbraucher immer komplexer. Mit diesem Artikel soll ein Beitrag dazu geleistet werden, eine der Komplexität dieser Systeme angemessene, hocheffiziente Regelungsstrategie zu entwerfen, zu implementieren und zu demonstrieren.

Dazu wird ein Ansatz zur modellgestützten Regelung entwickelt, in einem Algorithmus implementiert und auf ein Zentralklimagerät angewendet. Der Algorithmus arbeitet in zwei verschiedenen Modi: einem Identifikations- und einem Regelungsmodus. Im Identifikationsmodus regt der Algorithmus Teilsysteme, beispielsweise den Erhitzer des Klimagerätes, durch Öffnung des Ventils nach einem bestimmten Muster an. Mit dem gemessenen Temperaturverlauf wird dann ein dynamisches Simulationsmodell automatisiert kalibriert. Aufbauend auf den kalibrierten Modellen führt der Algorithmus im Regelungsmodus in regelmäßigen Abständen Optimierungen durch, um die für den aktuellen Betriebspunkt effizientesten Stellsignale zu finden. Diese werden dann über BACnet an die reale Anlage gesendet.

In verschiedenen Simulationen und Experimenten mit der realen Anlage wird die Funktionalität des Algorithmus nachgewiesen und mit anderen Regelungsansätzen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Algorithmus in der Lage ist, die Anlage effizient und stabil zu regeln. Er stellt damit eine mögliche Lösung für ein modernes Automationssystem für effiziente Gebäudeenergiesysteme dar.

Stichwörter:

Klimatechnik, Wärmepumpenanwendung, Modelica, Regelung

IV.11

Modellierung dynamischer Prozesse mit Deep Neural Networks am Beispiel einer Gas-Sorptionswärmepumpe

Jens Lippel*, Lena Frank, Martin Becker, Johannes Goebel, Thomas Zielke

Hochschule Düsseldorf, Zentrum für Innovative Energiesysteme (ZIES), Lehr- und Forschungsgebiet Informatik, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf
jens.lippel@hs-duesseldorf.de

Die Erstellung mathematischer Computermodelle zur Simulation dynamischer Prozesse ist aufwendig und zeitintensiv. Um diesen Vorgang zu beschleunigen und zu vereinfachen werden im vorliegenden Beitrag die Möglichkeiten selbstlernender Verfahren aufgezeigt vergleichbare Modelle zu erstellen. Eingesetzt werden künstliche neuronale Netze, die in der jüngeren Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen haben und auf Grund zunehmend schnellerer Hardware zur umfassenden Datenanalyse und Mustererkennung eingesetzt werden. Anders als bei der mathematischen Modellierung bedarf das Lernen eines künstlichen neuronalen Netzes keiner Informationen über die zugrundeliegenden Prozesse. Bei Vorgabe einer ausreichend großen Datenstichprobe werden selbstständig komplexe, nichtlineare Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen modelliert. Ein aufwendiges Ableiten mathematischer Modelle kann damit entfallen; dies spart Zeit und ist vor allem dann interessant, wenn keinerlei Ansätze für das gewünschte mathematische Modell vorliegen.

Zur Validierung des Modellierungsansatzes über künstliche neuronale Netze bietet sich ein Vergleich gelernter Modelle mit einem bereits erprobten, mathematischen Referenzmodell an. Eine ausreichend große

Datenstichprobe als Lerngrundlage sowie ein Referenzmodell liegen für die Buderus GWPW41 Gas-Sorptionswärmepumpe vor. Anhand dieses Anwendungsbeispiels konnte gezeigt werden, dass Modelle der Wärmepumpe mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze erlernt werden können, die in ihrer Güte dem Referenzmodell entsprechen. Die vorgestellte Methodik umfasst die Datenaufbereitung, das Erlernen des Modells sowie seine Validierung und kann ohne größeren Aufwand auch auf komplexere Anwendungsszenarien übertragen werden.

Stichwörter:

Künstliche neuronale Netze, Gas-Sorptionswärmepumpe, Simulation, Modellbildung

IV.12

Dynamische Modellierung einer Kältemittel-Luft-Wärmepumpe

Analyse des Einflusses der Drosselmodellierung auf die Betriebspunktsimulation

Xenia Gabrisch¹, Tommy Grunert², Jens-Uwe Repke¹

¹TU Berlin, Sekr. KWT 9, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
xenia.gabrisch@tu-berlin.de, j.repke@tu-berlin.de

²BSH Hausgeräte GmbH, Wohlrabedamm 15, 13629 Berlin
tommy.grunert@bshg.com

Im Rahmen dieses Beitrages soll ein prädiktives, dynamisches Modell einer Kältemittel-Luft-Wärmepumpe, welche im Haushaltswäschetrockner verwendet wird, vorgestellt werden. Die Wärmeübertrager (s. Bild 1) sind sowohl durch den Kältemittel- als auch durch den Luftstrom miteinander gekoppelt – eine Besonderheit der Wärmepumpen-Anwendung, die das Konvergenzverhalten des Simulationsmodells erschwert. Es wurde eine

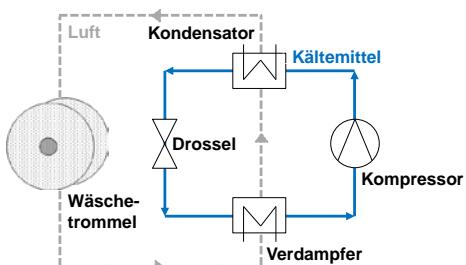


Bild 1: Kältemittel-Luft-Wärmepumpe im Haushaltswäschetrockner

Methode für die automatische Initialisierung des Modells entwickelt, die für die Konvergenz der Wärmepumpensimulation sorgt. Die Methode berücksichtigt neben der Energie-, Massen- und Druckerhaltung auch die Mach-Zahl am Drosselaustritt als Bedingung für einen zulässigen Betriebspunkt.

Als Drosselorgan werden bei der Anwendung der Wärmepumpe im Haushaltswäschetrockner häufig Kapillaren verbaut. Die Modellierung des Phasenwechsels und die zweiphasige Strömung des Kältemittels durch die Kapillare sind sehr komplex. Eine Schwierigkeit bei der Simulation besteht u.a. bei der Wahl der

geeigneten Viskositätskorrelation im Zweiphasengebiet, die das Drosselverhalten der Kapillare maßgeblich beeinflusst und für die es in der Literatur keinen allgemeingültigen Ansatz gibt. Die Sensitivität der Viskosität des Kältemittels im Zweiphasengebiet sowie die Betrachtung eines nicht-isenthalpen Drosselvorgangs auf den Betriebspunkt der Wärmepumpe werden im Beitrag diskutiert. Die Simulationsergebnisse der Wärmepumpe werden mit realen Messwerten verglichen. Es wird die Notwendigkeit eines Kapillarprüfstandes zur Bestimmung der geeigneten Viskositätskorrelation abgeleitet und der Aufbau dessen vorgestellt. Eine Herausforderung besteht darin, neben dem Druck auch den Dampfgehalt des Kältemittels am Kapillaraustritt messtechnisch präzise zu erfassen.

IV.13

Lüftungseffektivität von Wohnungslüftungsanlagen – Beurteilung des Potentials zur Energieeinsparung

Mohammad Reza Adili*, Michael Schmidt

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart
reza.adili@ige.uni-stuttgart.de, michael.schmidt@ige.uni-stuttgart.de

Zur Minimierung der ungewollten Lüftungswärmeverluste durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle fordert die Energieeinsparverordnung (EnEV) eine zunehmend dichtere Bauweise. Daher können Schadstoff- und Feuchtelasten aus den Gebäuden nicht mehr allein mittels freier Lüftung abgeführt werden. Zur Erfüllung der hygienischen und bauphysikalischen Anforderungen kommen so immer häufiger Wohnungslüftungsanlagen (WLA) zum Einsatz. Bei der Auslegung dieser Systeme wird die Lüftungseffektivität nicht betrachtet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf verschiedene Luftführungssysteme mit unterschiedlichen Luftdurchlässen und Positionen im Raum eingegangen. Mithilfe von rechnerischen Strömungssimulationen (Computational Fluid Dynamics - CFD) wird für häufig genutzte Wohnungslüftungssysteme am Beispiel eines typischen Wohnraums die Lüftungseffektivität bestimmt. Mehrere Simulationsvarianten werden mit experimentellen Untersuchungen im Raumluftströmungslabor verglichen, um die rechnerischen Ergebnisse zu validieren.

Der Heizwärme- bzw. Hilfsenergiebedarf unterschiedlicher Varianten wird anhand von dynamischen Jahressimulationen ermittelt und das Energieeinsparpotential durch Optimierung der Lüftungseffektivität sowie durch Anwendung von Wärmerückgewinnung in WLA wird aufgezeigt.

Stichwörter:

Lüftungseffektivität, Wohnungslüftungsanlagen, CFD, Luftdurchlässe, Laboruntersuchungen

IV.14

Entwicklung einer Regelungsstrategie eines PVT-basierten Wärmepumpensystems auf der Basis von CO₂ Direktverdampfung

Johannes Rullof^{1*}, Klaus Lambers¹, Ulf Blieske¹, Tom Arndt¹, Jean-Régis Hadji-Minaglou², Frank Scholzen²

¹ TH Köln, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE), Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln, Deutschland
johannes.rullof@th-koeln.de

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

Bereits Ende der 1970'iger Jahren wurden Wärmepumpen in Kombination mit glykolbasierten großflächigen Absorbern entwickelt, welche sich die Umgebungsenergie und Solarenergie als Energiequelle zu Nutze machen. Aufgrund der nach der Ölkrise fallenden Ölpreise, der meist noch nicht wirtschaftlichen Anlagentechnik und den benötigten großen Absorberflächen, konnten sich diese Anlagen nicht durchsetzen. Durch die starke Reduzierung des Heizwärmebedarfs eines heutigen Neubaus werden heutzutage deutlich kleinere Absorberflächen in Kombination mit einer Wärmepumpe benötigt, was die Systemkombination aus Wärmepumpe und Absorber aktuell wieder interessant werden lässt. Vor allem die Kombination aus thermischen Absorber, basierend auf freier Konvektion und Strahlung, und Photovoltaik (PV) in einem Modul (PVT-Modul) kann aufgrund der Reduzierung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden und des verstärkten Betriebs von Wärmepumpen während der Niedrigstrompreiszeiten am Tage und dem damit verbundenen höheren Strahlungsanteil der Umweltwärme zukünftig eine Alternative zu zwangskonvektions-basierten Luft-Wärmepumpen sein.

Der Beitrag beschäftigt sich mit einem CO₂-Wärmepumpensystem, bestehend aus einem neuartigen PVT-Modul, welches einen mikrokanal-basierten Verdampfer einer CO₂-Wärmepumpe mit einem PV-Modul vereint (PVT-direkt). Um die Machbarkeit des neuartigen PVT-direkt-Wärmepumpensystems zu demonstrieren, wird im Rahmen eines Forschungsprojekts ein funktionsfähiges PVT-direkt-Modul konstruiert und schließlich als Teil eines CO₂-Wärmepumpensystems getestet und modelliert.

Die Leistung eines PVT-basierten Wärmepumpensystems ist stark von klimatischen Randbedingungen abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Entwicklung einer Regelungsstrategie eines PVT-basierten Wärmepumpensystems präsentiert, welche die Solarstrahlung, Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit,

Verdampfungstemperatur und Verdichterleistung berücksichtigt. Um die Aussagekraft der Ergebnisse der Regelungsstrategie zu verstärken, werden die reale Antriebsleistung und der optimale Betriebspunkt des Verdichters einschl. des optimalen Hochdruckes berücksichtigt. Die entwickelte Regelungsstrategie der PVT-basierten Wärmepumpe sieht verschiedene Betriebsmodi in Abhängigkeit von dem Solarstrahlungsangebot sowie der Umgebungstemperatur vor. Der Betrieb der Wärmepumpe erfolgt zwischen Deckung des Heizbedarfs in der Heizperiode und möglichst hoher Effizienz in Zeiten hoher Einstrahlungswerte und hoher Umgebungstemperaturen.

Stichwörter:

R744/CO₂, Wärmepumpe, PVT-Modul, Regelungsstrategie

IV.15

Integrierte Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch umschaltbare Stirling-Vuilleumier-Hybrid-Maschinen

Hans-Detlev Kühl

Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Thermodynamik, Emil-Figge-Str. 70, 44227 Dortmund
hans-detlev.kuehl@tu-dortmund.de

Ein Stirlingmotor besteht in seiner sog. Gamma-Bauart zum einen aus einem thermischen Verdichter, in dem ein doppelseitig wirkender Verdrängerkolben das Arbeitsgas zwischen einem „heißen“ und einem „warmen“ (d. h. auf dem Wärmenutzungstemperaturniveau der KWK-Anwendung befindlichen) Zylinderraum isochor über einen Regenerator periodisch hin- und herschiebt, und zum anderen aus einem hiervon räumlich getrennten, einseitig wirkenden Arbeitskolben-Zylinder-System, das mit der „warmen“ Seite des thermischen Verdichters durch einen Überströmkanal verbunden ist und sich somit auf ähnlichem Temperaturniveau befindet.

Fügt man jedoch in diesen Überströmkanal einen zusätzlichen Regenerator ein, so kommt es zu einer Trennung der Temperaturniveaus, da die Wärmeabgabe des Prozesses primär über den warmen Zylinderraum des Verdrängersystems erfolgt, während der des Arbeitskolbens eine Wärmesenke darstellt. Dieser so entstandene „Hybrid“-Prozess zeichnet sich nach wie vor durch eine – lediglich leicht gegenüber dem Stirling-Modus verringerte – mechanische Leistungsabgabe aus, zusätzlich jedoch auch durch eine theoretisch gleich große, über den Arbeitszylinder bei „kalter“ Temperatur aufgenommene Kälteleistung. Er stellt somit ein integriertes System zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung dar, das durch einen einzigen thermodynamischen Prozess realisierbar ist.

Schaltet man diesem Prozess im warmen Temperaturbereich zusätzlich einen weiteren, auf der Rückseite des Arbeitskolbens liegenden Zylinderraum zu, so dass ersterer zu einem zweiten, doppelseitig wirkenden Verdrängerkolben wird, so erhält man schließlich den als thermisch angetriebene Wärmepumpe bzw. Kältemaschine bekannten Vuilleumier-Prozess, der im Idealfall keine mechanische Leistung abgibt oder aufnimmt.

Am Lehrstuhl für Thermodynamik der TU Dortmund wurde in einem mittlerweile abgeschlossenen, von der DFG geförderten Forschungsprojekt eine Versuchsmaschine entwickelt und vermessen, die sich zwischen den drei beschriebenen Prozessen umschalten und so wechselnden Strom-, Wärme- und Kältebedarfssituationen anpassen lässt. Dabei wurde zur Reduktion des experimentellen Aufwandes eine Ähnlichkeitstheoretische Skalierung unter Konstanthaltung aller für den internen Gaskreisprozess relevanten dimensionslosen Kennzahlen durchgeführt. Die in diesem Beitrag vorgestellten experimentellen Ergebnisse bedürfen deshalb zwar einer Korrektur wegen einiger externer, nicht korrekt skalierbarer Reibungs- und Isolationsverluste, belegen aber dennoch auf schlüssige Weise, dass die Realisierung derart umschaltbarer Systeme zur dezentralen, bedarfsoorientierten Energieversorgung von Gebäuden in einer praxisgerechten Baugröße und Leistungsklasse möglich ist. Bei koordiniertem Betrieb einer größeren Zahl solcher Systeme – z. B. über Rundsteuerungen oder netzlastabhängige Stromverbrauchs- und –einspeisetarife – kann durch entsprechende

Umschaltung zwischen den Betriebszuständen auch auf Lastschwankungen im öffentlichen Stromnetz reagiert und so wertvolle, kurzfristig abrufbare Regelenergie bereitgestellt werden. Weiterhin sind auch Anwendungen im Bereich der antriebsunabhängigen Klimatisierung, Beheizung und Stromversorgung von Fahrzeugen denkbar.

Stichwörter:

Stirling-Prozess, Vuilleumier-Prozess, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Regelenergie, Standklimatisierung

IV.16

Ein Zukunftskonzept für Bildungsbauten – erstes Jahr Betriebserfahrung und -optimierung des Willibald-Gluck- Gymnasiums

Christian Kley*, Franziska Bockelmann, M. Norbert Fisch

Technische Universität Braunschweig IGS – Institut für Gebäude- und Solartechnik, Mühlenpförtstraße 23,
38106 Braunschweig,
kley@igs.tu-bs.de

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

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

Aus den bisherigen Auswertungen und Analysen ergeben sich folgende Erkenntnisse: Es wird ein guter bis akzeptabler Raumkomfort erreicht. Der CO₂-Gehalt weist eine hohe bis mittlere Raumluftqualität auf. Die solare Eigenstromnutzung liegt zwischen 30 und 50 %. Mit dem Energiekonzept kann der EnergiePLUS Standard erreicht werden, es bedarf jedoch der Erweiterung der PV-Anlage. Es fehlen rund 80.000 bis 100.000 kWh/a PV-Ertrag (rund 85 bis 110 kWp). Die VRF-Batterie hat eine hohe Erhaltungsladung und einen geringen Wirkungsgrad. Der Gesamtwirkungsgrad (AC) beträgt lediglich rund 50 %.

Bei dem letztjährigen Vortrag auf der DKV-Tagung 2016 wurde das Energiekonzept und erste Monitoringergebnisse zur VRF-Batterie vorgestellt. Der Fokus des diesjährigen Vortrags liegt auf den Energiebilanzen und der Einbindung der Wärmepumpe unter Beachtung der Kopplung mit zwei Wärmequellen (Agrothermie und Energiepfläne). Neben den Ergebnissen aus dem Monitoring über das erste aufgezeichnete Betriebsjahr werden zudem bereits umgesetzte Betriebsoptimierungen vorgestellt.

Stichwörter:

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

IV.17

Energetische Bewertung von Wärmepumpen- und Mikro-KWK- Systemen – Entwicklung von Hil-Versuchsständen

**Phillip Mehrfeld¹, Markus Nürenberg¹, Krisitian Huchtemann¹, Dirk Müller¹, Martin Knorr², Lars Schinke²,
Maximilian Beyer², Joachim Seifert², Manuel Grimm^{3*}, Konstantinos Stergiopoulos³**

¹RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumlufttechnik, Mathieustraße 10, 52074 Aachen
pmehrfeld@eonerc.rwth-aachen.de, mnuerenberg@eonerc.rwth-aachen.de

Technische Universität Dresden, Professur für Gebäudeenergetik und Wärmeversorgung, Helmholtzstr. 14,
01069 Dresden,
martin.knorr@tu-dresden.de, lars.schinke@tu-dresden.de

³ Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
manuel.grimmm@ige.uni-stuttgart.de, konstantinos.stergiopoulos@ige.uni-stuttgart.de

Energetische Bewertungsverfahren für Wärmepumpen und Mikro-KWK-Systeme basieren auf statischen Verfahren und vereinfachten dynamischen Messungen. In Feldmessungen nachgewiesene Jahreseffizienzwerte weichen dabei teilweise deutlich von den berechneten Werten ab. Eine Ursache hierfür ist die unzureichende Abbildung realer Randbedingungen (Dynamik) in den Bewertungs- und Berechnungsverfahren. Um zu praxisgerechten Werten zu gelangen, wird in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben der TU Dresden, der RWTH Aachen und der Universität Stuttgart ein praxisnahes, dynamisches Bewertungsverfahren auf Basis der Hardware-in-the-Loop-Methodik (HiL) für Wärmepumpen- und Mikro-KWK-Systeme entwickelt.

Der Beitrag wird die Konzeption der HiL-Versuchsstände vorstellen sowie ein Typtagverfahren präsentieren, mit dem auf Jahreswerte des Nutzungsgrades bzw. der Arbeitszahl extrapoliert werden kann. Die geeignete Festlegung von Schnittstellen zwischen Simulation und Experiment stellt einen weiteren Schwerpunkt der Veröffentlichung dar. Zur Validierung der Ergebnisse hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Anwendbarkeit der Methodik wird ein Ringtausch zwischen den drei Hochschulen vorgenommen. Dieses Vorgehen wird dokumentiert sowie die Ergebnisse der verschiedenen Wärmeerzeuger diskutiert. Abschließend wird aus den gewonnenen Erkenntnissen ein erster Entwurf für ein Bewertungsverfahren abgeleitet und vorgestellt, bei dem dynamische Effekte im Gegensatz zu bisherigen Verfahren realitätsnäher abgebildet werden.

Stichwörter:

Wärmepumpe, KWK-Systeme, Heizung, Gebäude, Bewertungsverfahren

IV.18

Leistungsfähigkeit von Wärmeübertragern für Wärmepumpen - Planung und Praxis

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

Technische Universität Braunschweig – Institut für Gebäude- und Solartechnik (IGS), Mühlenpfordtstraße 23,
38106 Braunschweig,
bockelmann@igs.tu-bs.de

Die Wärmepumpentechnologie wird bei der zukünftigen Wärme- und Kälteversorgung in vielen Bereichen eine wesentliche Rolle spielen. Um das Potential dieser Möglichkeit zur Energiebereitstellung möglichst effizient ausschöpfen zu können, kommt der Wahl der Niedertemperaturwärmekquelle und des für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeigneten Wärmeübertragers eine entscheidende Bedeutung zu.

In dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt "future:heatpump - Energetische und wirtschaftliche Bewertung von Wärmequellen für Wärmepumpen" wird das Zusammenspiel zwischen Wärmepumpen und unterschiedlichen Niedertemperaturwärmeketten sowie dazu angebotenen Wärmeübertragern analysiert. Dabei geht es grundsätzlich um die Frage, welche der zur Verfügung stehenden Wärmequellen und Wärmeübertragertechnologien unter welchen Umständen energetisch und wirtschaftlich sinnvoll genutzt werden können.

Im Rahmen eines Monitorings werden im Bereich von Wohngebäuden Systeme für Ein- und Mehrfamilienhäuser zur Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung untersucht. Bei Nichtwohngebäuden, z.

B. Büros, erfolgt die Systembetrachtung sowohl für die Wärmeversorgung als auch für die Bereitstellung von Kälte zur Gebäudekühlung. Das Monitoring erstreckt sich über zwei Jahre, so dass zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Ableitung systemspezifischer Kennwerte zwei Heiz- und Kühlperioden zur Verfügung stehen. Den Schwerpunkt der Untersuchung bilden dabei die Niedertemperaturwärmequellen, die zugehörigen Wärmeübertrager und Wärmepumpen.

Auch nach über 10 Jahren verstärktem Einsatz der Wärmepumpentechnologie sowie der geothermischen Kopplung des Erdreichs als Niedertemperaturwärmequelle, ist noch immer festzustellen, dass bei weitem nicht alle Wärmepumpenanlagen energetisch und wirtschaftlich zufriedenstellend arbeiten. So ist z. B. an Systemjahresarbeitszahlen unter 3,0 zu erkennen, dass die betreffenden Anlagen zumindest energetisch fragwürdig sind und/oder in den meisten Fällen nicht optimal laufen. Hier ist verstärkter Analyse- und Handlungsbedarf vorhanden.

Der Schwerpunkt des Vortrages soll auf den Ergebnissen des Monitorings liegen. Es soll ein Vergleich der Planungs- und Herstellerangaben mit der in der Realität ermittelten Leistungsfähigkeit der Niedertemperaturwärmeübertrager und der Gesamtanlage erfolgen. Anhand von 13 untersuchten Wärmeübertragern und zugehörigen Anlagen soll ein Vergleich unterschiedlicher Technologien in Bezug auf Planung und Ausführung erfolgen.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Niedertemperaturwärmequelle, Wärmeübertrager, Monitoring

IV.19

Effizienz und Betriebsverhalten von Elektro-Wärmepumpen in EFH-Bestandsgebäuden auf Basis von Feldmessdaten

Danny Günther^{*}, Jeannette Wapler, Robert Langner, Sebastian Helmling, Marek Miara

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg,
danny.guenther@ise.fhg.de

U.a. [Henning 2013] zeigt die Bedeutung einer massiven Marktdurchdringung von Wärmepumpen für ein Gelingen der Wärmewende. Bezogen auf den Wohnbereich sind Wärmepumpen beim EFH-Neubau bereits eine feste Größe. Die Anteile im Sanierungsbereich sind jedoch noch gering, was mit den speziellen Herausforderungen, wie den erforderlichen Temperaturen zur Raumheizung oder der Erschließung geeigneter Wärmequellen, zusammenhängt. Darüber hinaus fehlt es an entsprechenden Demonstratoren.

Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „WPsmart im Bestand“ (FKZ: 03ET1272A; Projekthomepage: <http://wp-smart-im-bestand.de/>) sollen bis zu 100 Elektro-Wärmepumpen im EFH-Bestandsbereich messtechnisch untersucht und hinsichtlich Effizienz und Betriebsverhalten bewertet werden. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen werden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und befinden sich in Gebäuden von vor 1995, wobei diese unterschiedliche Sanierungsstandards aufweisen sollen. Aufgrund der Gegebenheiten im adressierten Anwendungsbereich werden, neben monoenergetisch betriebenen Wärmepumpen, auch bivalente Heizsysteme untersucht. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe, Ventilator oder Brunnenpumpe) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. Bei den hybriden Systemen werden zusätzlich der Gas- bzw. der Ölverbrauch gemessen. In den Hydraulikkreisen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet. Darüber hinaus widmet sich das Projekt der Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen mittels Simulation und Feldmessung, worauf in diesem Beitrag nicht eingegangen wird.

Der Konferenzbeitrag besteht in der Vorstellung von Ergebnissen der messtechnischen Untersuchung von ca. 35 Wärmepumpenanlagen für den Messzeitraum Juli 2016 bis Juni 2017. Im Fokus stehen dabei die Effizienzwerte und die Bewertung der direkt quantifizierbaren Einflüsse auf die Effizienz. Dazu zählen u.a. die

Systemtemperaturen, die notwendigen Hilfsenergien oder die Anschalthäufigkeiten. Darüber hinaus sollen Aussagen zu den Einflüssen der vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen an Gebäude und Heizwärmeverteilsystem auf die Betriebsbedingungen der Wärmepumpe gemacht werden.

IV.20

Verifizierung von Labor COP-Werten durch Datenanalyse aus Wärmepumpenfeldtests

Dipl.-Ing (FH) Robert Langner*, Dr.-Ing. Marek Miara

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, robert.langner@ise.fraunhofer.de

Seit 2005 führt das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE großangelegte Feldstudien über elektrisch angetriebene Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Einfamilienhäusern durch. Die Auswahl der Messpunkte sowie des Messwerterfassungssystems erlaubt die Aufnahme und Auswertung zeitlich hochauflöster Daten. Anhand dieses Datensatzes kann, neben der Gesamteffizienz, das spezifische Verhalten des Systems oder das seiner Einzelkomponenten bestimmt werden.

Ein spezielles Ergebnis dieser Betrachtungen war die Entwicklung einer Methode zur Gegenüberstellung von COP-Werten (Coefficient of Performance), die unter Laborbedingungen bestimmt wurden, mit so genannten quasi-stationären COP_{qs}, die aus Feldmessdaten ermittelt wurden. Das erzielte Ergebnis erlaubte eine Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Laborwerte nach DIN EN 14511 unter realen Feldbedingungen. Der Vergleich zeigte eine deutliche Übereinstimmung zwischen COP und COP_{qs} bei der Mehrheit der Anlagen. Verglichen wurden sowohl Einzelanlagen als auch Luft- und Erdreich-Wärmepumpen als Gruppe. Bei 25 Wärmepumpen-systemen konnten die vom Hersteller angegebenen COP-Werte mit den im Feld bestimmten Werten bestätigt werden.

Die weiterführenden Arbeiten haben zum Ziel, die Anwendung dieser Methode zu automatisieren und so die standardisierte Auswertung einer größeren Anzahl von Wärmepumpensystemen bereits während der Datenaufnahme zu ermöglichen.

Der Konferenzbeitrag soll zunächst die Vorstellung der angewandten Methodik sowie das Gesamtergebnis des Vergleiches umfassen. Auch die quasi-stationäre Betrachtung für einzelne Wärmepumpen soll vorgestellt werden. So können einzelne Aspekte aufgezeigt werden, wie beispielsweise die Abweichung zwischen den im Feld angetroffenen Temperaturbedingungen zu den Betriebspunkten, welche nach DIN EN 14511 definiert sind.

IV.21

Technologietrends in der Energieforschung – Wärmepumpe, quo vadis?

Sarah Henn*, Tanja Osterhage, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
shenn@eonerc.rwth-aachen.de

Die Transformation der Energieversorgung im Rahmen der Energiewende bedingt die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien. Wie forschungsrelevant bestimmte Technologien in Deutschland derzeit sind, wird im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung, unter Leitung des Lehrstuhls für Gebäude- und Raumklimatechnik, anhand von Projekten aus dem Forschungsbereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“ tiefgreifend analysiert. Dabei werden Technologietrends aufgedeckt sowie Technikscouting betrieben.

Um die Vielzahl an über 600 laufenden Forschungsvorhaben analysieren zu können, entwickelt die Wissenschaftliche Begleitforschung ein umfassendes dynamisches Abfragetool. Mittels dieses Tools werden Projekte gemäß ihrem Forschungsfokus geclustert, Energiekennwerte aufgenommen und die in den Vorhaben theoretisch untersuchten sowie praktisch eingesetzten Technologien werden eruiert. Die erhobenen Daten bilden die Grundlage für die interaktive „Landkarte der Projekte“ - ein Werkzeug, durch welches die Forschungslandschaft im genannten Bereich illustriert und für die Öffentlichkeit transparent und zugänglich gemacht wird.

Über diese Funktion hinaus ermöglichen die gewonnenen Daten der Wissenschaftlichen Begleitforschung eine Querauswertung zu aktuellen Themen der Energieforschung. In diesem Sinne wird für alle BMWi-Projekte, deren Forschungsschwerpunkt auf der Wärmepumpentechnologie liegt, eine Querschnittsanalyse durchgeführt. Dabei werden momentane wissenschaftliche Fragestellungen herausgearbeitet und vom Stand der Technik abgegrenzt. Neuartige Anwendungsmöglichkeiten werden identifiziert sowie Hemmnisse in Demonstrationsvorhaben beleuchtet.

Die Ergebnisse der Querauswertung zeigen ein Gesamtbild der deutschen Forschungslandschaft zur Wärmepumpentechnologie in Gebäuden und Quartieren. Die Wärmeversorgung durch den strombasierten Erzeuger gewinnt in diversen Projektkategorien an Forschungsrelevanz. Aus dem Technologie-Review können Entwicklungsfelder für zukünftige Wärmepumpensysteme abgeleitet und weiterer Forschungsbedarf systematisch erschlossen werden.

Stichwörter:

Energieforschung, Technologietrends, Wärmepumpe

IV.22

Fairer Vergleich von Kältemitteln für den Einsatz in Kompressionswärmepumpen

Christian Vering^{1*}, Kristian Huchtemann¹, Dirk Müller¹

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
cvering@eonerc.rwth-aachen.de

Politisch motiviert reguliert die F-Gas-Verordnung zum Schutz der Erdatmosphäre die Verkaufsmenge halogenierter Kältemittel, wodurch zukünftig ein Preisanstieg dieser erwartet wird. Um Wärmepumpen wirtschaftlich gegenüber anderen Wärmeerzeugern konkurrenzfähig zu halten und die Effizienz der Anlagen durch den Austausch des Kältemittels beizubehalten oder darüber hinaus zu erhöhen, ist die Erforschung der Anwendung alternativer Kältemittel erforderlich.

Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik werden Wärmepumpen mit alternativen Kältemitteln hinsichtlich ihrer Regelstrategien sowie Interaktion mit Gebäuden experimentell und simulativ erforscht. Verschiedene Kältemittel fair miteinander zu vergleichen gestaltet sich häufig schwierig, weil deren Stoffwerte zum Teil stark voneinander abweichen. Zur Durchführung und Auswertung fairer Vergleiche wird deshalb eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um charakteristische Stoffeigenschaften thermodynamisch zu quantifizieren, was am Beispiel von Wärmeübergang und Kompression von Kältemitteln gezeigt wird.

Hierbei findet insbesondere die Ähnlichkeitstheorie Berücksichtigung, um eine fundierte Interpretation unterschiedlicher Kältemittel unter gegebenen Randbedingungen sicherzustellen. Die Modellierung der

Kältemittel erfolgt dabei mittels Stoffmodellen des NIST, wobei zunächst Reinstoffe fokussiert werden. Eine Reduktion der Rechenzeiten wird dabei mit Hilfe von Curve-Fitting Algorithmen erlaubt.

Die Simulationsstudie zeigt, dass für unterschiedliche Anforderungen an das Kältemittel nicht ein alleiniger Stoff gefunden werden kann, der gegenüber sämtlichen Vergleichspartnern dominant ist. Vielmehr wird ein Anforderungskatalog in Form einer Matrix entwickelt, der je nach Randbedingungen unterschiedliche Lösungen für den Einsatz von Kältemitteln liefert, um deren Auswahl zu vereinfachen. Es wird dabei deutlich, dass nicht halogenierte Kältemittel einen sehr großen Anwendungsbereich abdecken und somit eine wirtschaftliche Alternative darstellen können.

Stichwörter:

Natürliche Kältemittel, Wärmepumpen, F-Gas Verordnung

IV.23

Verfahren zur Bestimmung optimaler Ersatzfluide für bestehende Kompressionskälteanlagen und Wärmepumpen

Dennis Roskosch, Valerius Venzik, Burak Atakan

Lehrstuhl Thermodynamik, IVG, Universität-Duisburg-Essen; Duisburg, Deutschland

dennis.roskosch@uni-due.de

Basierend auf dem z.T. hohen Treibhauspotential der heute eingesetzten Kältemittel aus der Gruppe der Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) müssen in naher Zukunft neue effiziente Fluide gefunden werden. Dies trifft auf neu geplante als auch auf die Vielzahl bestehender Kompressionskältemaschinen und –wärmepumpen zu. Für bestehende, vor allem großtechnische Anlagen ist es aus wirtschaftlicher Sicht hierbei eminent wichtig, dass Fluide gefunden werden, die möglichst ohne den Austausch großer Anlagenkomponenten die bisherigen Fluide ersetzen können und dabei möglichst Effizient sind. Mit Hilfe der heutigen Modellierungsmethoden lässt sich dieses Ziel verfolgen, jedoch ist die zentrale Frage hierbei, wie detailliert die entsprechende Anlage im Modell abgebildet werden muss, um eine verlässliche und individuelle Fluidbewertung zu erhalten. Hierzu wird eine experimentell mit unterschiedlichen Fluiden untersuchte Wärmepumpen-Versuchsanlage modelliert und die Komplexität des Modells ausgehend von einfachen thermodynamischen Bilanzierungen sukzessive gesteigert. Es zeigt sich, dass einfache thermodynamische Kreisprozessrechnungen zu deutlichen Fehleinschätzungen bzgl. der Effizienz der Fluide führen. Die Implementierung eines Verdichtermodells verbessert das Gesamtmodell deutlich und führt zu verlässlichen Fluidrankings bzgl. der Effizienz. Eine Aussage darüber, ob die Wärmeübertrager ausreichend dimensioniert sind und demnach ob das betreffende Fluid überhaupt für die Anlage geeignet ist, kann schließlich nur mit Hilfe der höchsten Modellstufe, die ausführliche Modelle für den Wärmeübergang beinhaltet, erreicht werden.

S.01

„Weißbier- Weißwurst Wärme Pumpe“

Dennis Lerch

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, lerhd@web.de

Im Rahmen der Projektarbeit „Bayrischer-Frühstücks Bereiter Green Line“ einem Wagen, welcher Bier kühlt und Weißwürste erwärmt, wurde die „Weißbier- Weißwurst Wärme Pumpe“ entwickelt. Diese entzieht dem Bier die Energie und erhitzt mit der Abwärme Weißwürste. Auf der Verdampfer Seite wird bis zu 4 °C erreicht und beim Verflüssiger werden Temperaturen von bis zu 82 °C gefahren. Das spannende an diesem Projekt ist das die Wärmepumpe als Kältemittel Isobutan besitzt, der Kältekreis selbst ausgelegt und die passenden Komponenten organisiert wurden. Der Verdampfer und die Wärmepumpe wurden selbst zusammengebaut und in Betrieb genommen.

Es wurde die Abkühlkurve ermittelt und die Energie Effizienz errechnet.

Das Projekt belegte beim Natural Refrigeration Award von Eurammon am 22.06.2017 den 2. Platz.

S.02

Entwicklung eines Verfahrens zur Modifizierung von Agglomeraten in Eisbreigemischen

Rouven Otto

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, rouven.otto@hs-karlsruhe.de

NEU ins Programm genommen!

S.03

Improvement of energy efficiency in a brewery

Lukas Böhly^{1*}, Armin Hafner²

¹ Hochschule Karlsruhe – University of applied sciences, Karlsruhe, lukas@boehly.de

² NTNU, Trondheim, Norway, armin.hafner@ntnu.no

Beer brewing is an energy intensive process. On one hand, malt and water need to be heated up and boiled to extract the nutrients, on the other hand while fermenting and maturation refrigeration is necessary to guarantee a constant temperature level. Due to the high hygiene requirements, cleaning of the facilities with hot water consumes a significant amount of energy, too.

Due to the high energy flows, there are many possibilities to improve the processes and recover heat instead of losing it to the environment. In literature sources, common improvements are described, where the biggest potential can be found in heat recovery and storage systems.

In the performed study, the explicit potential for energy improvements at EC Dahls brewery in Trondheim is investigated. It produces a relative small amount of craft beer per year, i.e. around 50000 hl.

For the investigation, the processes are analyzed and the data for mass flows, temperatures, gas consumption and beer production are collected and implemented as input to a spreadsheet calculation tool. Sources of energy loss are documented. To estimate the efficiency of the brewery, a benchmark for the energy

consumption related to the produced beer is calculated and compared with common benchmarks from literature sources.

Alternative energy systems are described to improve the use of waste heat from the system. One method is to use hot water instead of steam to heat up wort, for what hot water storage on different temperature levels would be necessary. This technique cause a lower consumption of water and primary energy.

Another investigated system is the utilisation of waste heat from the refrigeration plant and from warm greywater as heat source for a high temperature heat pump producing steam. Such a heat pump system could replace the current fossil fuel burners making steam. The performed calculations show a high potential on savings for both energy costs and CO₂ emission, especially by using renewable energy, what makes it to a sustainable technique worth to investigate in detail in the near future.

Stichwörter:

Heat recovery, Industrial refrigeration, high temperature heat pumps

S.04

Kryokonservierung von in Alginat eingekapseltem Stammzellen

Benjamin Kranz, Oleksandr Gryshkov, Birgit Glasmacher

Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

Die Kryokonservierung besitzt aufgrund einer möglichen Langzeitlagerung klinisch relevanter Zellen und Gewebe sowie der täglichen Verfügbarkeit genetisch gleicher Zellen ein enormes Potential in der modernen Zelltherapie. Die Kryokonservierung von in Alginat eingekapselten Zellen ist aufgrund der permanent schützenden Funktion der Kapseln gegenüber auftretenden Schädigungen (beispielsweise Eiskristallisation, Rekristallisation) vielversprechend für die klinische Anwendung. Zum jetzigen Zeitpunkt sind keine optimalen Protokolle zur Kryokonservierung von Zellen, eingekapselt in mechanisch stabilen und intakten Alginat-Mikrosphären bekannt. In dieser Studie konnte unter Einsatz eines Mikroskops (inklusive Linkam Kryotisch) eine Optimierung der Kryokonservierung 300 µm großer Alginat-Kapseln mit Erhalt der Integrität nach dem Auftauen erzielt werden. Im Zuge einer Parameterstudie wurden die Parameter der Gefrierprotokolle (Gelierungszeit, DMSO – Konzentration in der Gefrierschutzlösung, Inkubationszeit und Kühlrate) variiert sowie die entsprechenden Auswirkungen auf die Integrität der Kapseln nach dem Auftauen untersucht. Auf diese Weise konnten die optimalen Protokolle zur Kryokonservierung 300 µm großer intakter Alginat-Kapseln bestimmt werden. Die als optimal klassifizierten Protokolle wurden weiterhin an in Alginat eingekapselten mesenchymalen Stammzellen (MSCs), vom herkömmlichen Weissbüschelaffen (*Callithrix jacchus*) abstammend angewendet und anschließend die Vitalität sowie die Rekultivierungsrate der Zellen nach dem Auftauen und 24 stündiger Kultivierung analysiert. Für das Einfrieren und Auftauen der Proben wurde ein Planer Kryo 560-16 verwendet. Für die Analyse der Vitalität nach dem Auftauen wurden die Zellen einer Lebend-Tod-Färbung (CalceinAM / Ethidium Homodymer) unterzogen und anschließend die mittels Fluoreszenzmikroskop aufgenommenen Bilder mithilfe der Bildverarbeitungsprogramme ImageJ sowie Microvision analysiert. Das optimale Protokoll, bei dessen Anwendung 60% der Zellen metabolische Aktivität zeigten, umfasste eine Gelierungszeit von 15 Minuten, eine Verwendung von 10% Dimethylsulfoxide, eine Inkubation bei 4°C über 45 Minuten sowie der Anwendung einer Kühlrate von 2,5 K/min. Zeigten vor der Kryokonservierung 75% der eingekapselten Zellen metabolische Aktivität, waren nach Anwendung des Protokolls 83% der eingefrorenen Zellen vital. Die Ergebnisse dieser Studie sind ein erster Report über die erfolgreiche Kryokonservierung in Alginat eingekapselter Zellen mit intakter Struktur nach dem Auftauen. Mechanisch stabile Alginat-Kapseln bieten somit ein hohes Potential in der klinischen Anwendung und der effizienten Behandlung seltener Krankheiten.

S.05

Betrachtung von Sicherheitsventilen/ Druckentlastungseinrichtungen in Ammoniakanlagen in Bezug auf die freigesetzte Menge in die Atmosphäre durch Flüssigkeitsausdehnung

Niklas Hengefeld

Westfälische Hochschule Gelsenkirchen, Bocholt, Recklinghausen,
Neidenburgerstraße 43, 45897 Gelsenkirchen, niklas.hengefeld@jci.com

Gemäß des BlmSchG fordert die Genehmigungsbehörde im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens für die Errichtung von Ammoniakkälteanlagen eine Ausbreitungsberechnung nach VDI 3783. Im Rahmen der Projekt- und Masterarbeit soll ein Berechnungsprogramm entwickelt werden, dass den freigesetzten Massenstrom unter Berücksichtigung der realistischen Randbedingungen sowie der gesetzlichen Vorschriften berechnet.

Die Norm DIN EN 13136 – Kälteanlagen und Wärmepumpen – Druckentlastungseinrichtungen und zugehörige Leitungen – Berechnungsverfahren beschreibt in den Kapiteln 6.2 – 6.4 die möglichen Szenarien der Entstehung von unzulässigem Druck. Im Rahmen dieses Projekts wird das Szenario „Durch Flüssigkeitsausdehnung verursachter unzulässiger Druck“ genauer betrachtet. Die Norm gibt keinen Verweis auf den anzusetzenden Quellterm von mit Flüssigkeit vollgefüllten Abscheidebehältern in Ammoniakkälteanlagen. In diesem Zuge muss auch das Abblasverhalten der Sicherheitsventile praktisch getestet werden. Denn erst dann kann eine genaue Aussage über den tatsächlich in die Atmosphäre freigesetzten Massenstrom getroffen werden, der dann in der Ausbreitungsberechnung nach VDI 3783 angesetzt werden kann. Im Rahmen des Vortrags soll die Aufgabe und Fragestellung der Projekt- und Masterarbeit genauer vorgestellt und auf die gesetzlichen und normativen Vorgaben eingegangen werden.

S.06

Auslegung und Konstruktion eines Helium-Wasserbadanwärmers für kryogene Experimente

Matthias Kluge

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) , Institut für Technische Physik (ITEP) , Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, matthias.kluge@kit.edu

Gegenstand des Vortrags ist die Konstruktion und Auslegung eines Wärmeübertragers zur Anwärmung von gasförmigen Kryogenen auf Raumtemperatur. Dies dient der Vermeidung der Ausfrierung von Außenluftbestandteilen Verunreinigungen außen am Rohr beim Rücktransport des Gases vom Versuch zur Reinigungs- und Verflüssigungsanlage. Dabei wird das Kryogen in einer geschlossenen Rohrleitung durch ein Wasserbad geleitet und durch das Wasser erwärmt, das wiederum über Heizstäbe auf Solltemperatur gehalten wird. Der Wärmeübergang zwischen dem Wasserbad und dem Kryogen muss dabei gut genug sein, um über der vorhandenen Kontaktfläche die notwendige Wärmemenge zuführen zu können. Dabei muss die Wassertemperatur geregelt werden, um eine zuverlässige Funktion des Wärmeübertragers zu gewährleisten. Die Gestaltung des Wärmeübertragers ist dabei hinsichtlich der Kryogene Stickstoff und Helium bei definierten Höchstmassenströmen optimiert. Rohrlänge und somit Gesamtgröße des Wärmeübertragers sowie die Druckdifferenz im Gas zwischen Ein- und Ausgang sind nach Möglichkeit gering gehalten. Der Wärmeübertrager wird dabei mit Rollen und Kranösen transportabel gestaltet. Dafür ist der Behälter des Wärmeübertragers unter Berücksichtigung aller auftretenden Belastungsfälle, Stehen, Schieben und Anheben mit einem Kran, ausgelegt. Die Gestaltung des Wärmeübertragers sowie die Wahl der Materialien wird so vorgenommen, dass eine Fertigung am KIT möglich ist.

Kondensationsseitige Wärmeübergangskoeffizienten von R134a an glatten, berippten und strukturierten Einzelrohren und Rohrreihen

Roberto Nicolas Schiffer, Ruben Steinhoff, Stephan Kabelac

Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Callinstraße 36, 30167 Hannover

Im Rahmen des Klimawandels und der Ressourcenverknappung steigt die Bedeutung von effizienzsteigernden Maßnahmen an kälte- und klimatechnischen sowie verfahrenstechnischen Anlagen. Die Steigerung der kondensationsseitigen Wärmeübergangskoeffizienten in derartigen Anlagen ist hierbei eine geeignete Maßnahme, um hohe Grädigkeiten gegenüber dem Kühlmedium zu vermeiden und die Effizienz der Gesamtanlage zu erhöhen. Für Auslegungszwecke von Kondensatoren sind jedoch verlässliche Vorhersagemodelle notwendig, um die Steigerung des Wärmeübergangs sowohl in ökonomischer als auch ökologischer Hinsicht zu nutzen.

Um vorhandene Vorhersagemodelle zu prüfen, wurden experimentelle Untersuchungen zur Kondensation von R134a an horizontalen Einzelrohren und Rohrreihen durchgeführt. Variiert wurden hierbei sowohl die Sättigungstemperatur als auch die Wärmestromdichte bzw. die Unterkühlung der Rohrwand durch indirektes Kühlen mittels Wasser. Zur Validierung der verwendeten Versuchsanlage wurden Glattrohre untersucht und ein Vergleich mit Literaturangaben vorgenommen. Tests mit berippten und dreidimensional strukturierten Einzelrohren zeigten eine deutliche Steigerung des kondensationsseitigen Wärmeübergangs. In Rohrreihen-Konfiguration konnten unterschiedliche Tendenzen hinsichtlich des Verhaltens des Wärmeübergangs bei steigender Rohrzahl und damit steigender Film-Reynolds-Zahl beobachtet werden. Zur Überprüfung der Güte der zahlreichen Vorhersagemodelle aus der Literatur, wurde eine Auswahl dieser getroffen und ein Vergleich mit den gewonnenen experimentellen Daten durchgeführt.

Stichwörter:

Wärmeübergang, Kondensation, R134a, Einzelrohr, Rohrreihe

S.08

Untersuchungen der Druckverluste eines ORC-Prozesses

Fatih Meral, Florian Theede, Andrea Luke

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

In Zuge der Reduzierung der Klimaerwärmung ist eine energieeffiziente Auslegung von Prozessen ein wesentliches Ziel. Eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung ist die Nutzung von Abwärmeströmen z.B. im Organic Rankine Cycle (ORC). Bei der Verwendung von Niedertemperaturwärme, verbunden mit relativ niedrigen Wirkungsgraden, sind die Optimierung der Komponenten und die Auswahl des Arbeitsfluides für die Effizienz des gesamten Prozesses entscheidend. Ebenfalls können hohe Druckverluste zu einer niedrigeren Leistung an der Turbine führen. Im Zuge der Auslegung für eine am Fachgebiet geplante 2,5 Kilowatt Versuchsanlage unter Verwendung von natürlichen Arbeitsfluiden wird der Einfluss der Druckverluste untersucht. Dafür wird der eigentliche ORC-Prozess auf Basis der Zustandsänderungen zunächst ohne und im Anschluss mit sämtlichen Druckverlusten, unter Berücksichtigung verschiedener Arbeitsfluide, simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Druckverluste einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz und damit auf die angestrebte Wirtschaftlichkeit haben können.

Stichwörter: Organic Rankine Cycle (ORC), Simulationsmodel, Druckverluste

S.09

Analysis and assess of the strength of brazed joints and definition of resulting values for the strength of adhesive joints in HVAC&R systems

Andreas Höß

Europäische Studienakademie ESaK, Senefelder Straße 3, 63477 Maintal
Purdue University, West Lafayette, IN47907, USA
Hans GÜNTNER GmbH & Co. KG, Hans-GÜNTNER-Straße 2 – 6, 82256 Fürstenfeldbruck
andreashoess@guentner.com

The bonding of adhesives to air-to-refrigerant heat exchangers would remove the need for high-temperature controlled-atmosphere brazing furnaces, which consume significant amounts of power. In addition, galvanic corrosion that is typically occurring in aluminium microchannel heat exchangers would no longer be an issue because the adhesive bond insulates the aluminium from the copper. Furthermore, traditional fin-and-tube copper heat exchangers could be more cost effective because the joining of fins and tubing is cheaper. Finally, heat exchangers may be redesigned because of the freedom that adhesive joints offer, which potentially leads to more compact refrigeration, air conditioning, and heat pumping units using less refrigerant charge. This enabling technology reduces the payback time for future high-efficiency HVAC&R equipment.

S.10

Vergleich homogener Kondensationstheorien für die Auslegung von Ejektoren in einem Rezirkulationssystem einer Brennstoffzelle

Zlatan Arnautovic, Jannis Müller-Ebhardt, Stephan Kabelac

Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Callinstraße 36, 30167 Hannover

Die derzeit für mobile Anwendungen diskutierten PEM-Brennstoffzellen wandeln chemische Energie des zugeführten Wasserstoffs direkt in elektrische Energie um. Die Gesamteffizienz des Systems wird nicht nur von der Brennstoffzelle selbst, sondern auch durch deren Systemarchitektur bestimmt. Eine effiziente Möglichkeit ist es, ein Abgasrezirkulationssystem mit einem Ejektor für Anode und Kathode der Brennstoffzelle vorzusehen, wenn Wasserstoff und Sauerstoff aus Hochdruckflaschen bereitgestellt werden. Die diffizile Auslegung dieses Ejektors wird insbesondere kathodenseitig erschwert, da durch die Drosselung wegen des Joule-Thomson-Koeffizienten des Sauerstoffs und durch die weitere Beschleunigung im Ejektor sehr niedrige Temperaturen erreicht werden. Das beschleunigte Brennstoffzellenabgas mit hohem Wasseranteil wird somit stark übersättigt. Entstandene Wassertropfen vermindern die Effizienz durch die Behinderung der Diffusionswege in der Brennstoffzelle und könnten zu einem Systemausfall führen.

Für die Berechnung einer möglichen Kondensation werden homogene Kondensationstheorien auf die entsprechenden Stoffströme angewendet. Um die homogene Kondensation für die vorliegenden Gemische zu untersuchen, wird ein flexibles Berechnungsprogramm vorgestellt. Aus den Berechnungen, im relevanten Druck- und Temperaturbereich, für Stoffpaarungen aus Wasserstoff und Sauerstoff mit jeweils Wasser resultiert, dass das Trägergas keinen Einfluss auf die homogene Kondensation hat. Mit der klassischen Keimbildungstheorie werden vergleichsweise geringe Sättigungsgrade im Vergleich zu Messdaten aus der Literatur berechnet. Mit der Theorie nach Lothe/Pound wird eine große Abweichung und nach Dillmann/Meier sowie nach Kalikmanov/Dongen eine gute Übereinstimmungen zu den Messdaten berechnet.

Stichwörter:

Brennstoffzelle, Joule-Thomson-Effekt, Kondensation, Ejektoren

S.11

Zukunftsprognose für VRF Klimatechnik und Vergleich mit Kaltwassersystemen unter Beachtung wirtschaftlicher, rechtlicher und technischer Aspekte.

Frank Kugelstadt

Küstermann GmbH Kälte- und Klimatechnik, Erich-Ollenhauer-Str. 239, 65199 Wiesbaden
Europäische Studienakademie ESaK, Senefelder Straße 3, 63477 Maintal, Kugelstadt@kk-kuestermann.de

Es wird für ein Referenzgebäude mit 2 Büroetagen mit einer durchschnittlichen VRF-Anlage hinsichtlich Anzahl der Innengeräte und mittlere Kälteleistung eine Jahressimulation durchgeführt. Das Ergebnis ist die Heiz- und Kühllast je Raum für jede Stunde. Für dieses Gebäude werden zwei Anlagenvarianten für die gleichzeitige Kühlung und Heizung projektiert. Variante 1 ist eine VRF-Anlage (3-Leiter-System) und Variante 2 ist ein Kaltwassersatz der auf der kalten Seite Klimakaltwasser für die Kühlung liefert und auf der warmen Seite Heizungswasser für die Beheizung zur Verfügung stellen kann (4-Leiter-System). Bei dem Kaltwassersatz handelt es sich somit um eine Sonderlösung, bei dem gleichzeitiges Heizen und Kühlen möglich ist. Dieser kann im Winter auch ausschließlich als Wärmepumpe (Wärmequelle Außenluft) und im Sommer ausschließlich als Kältemaschine mit Wärmeabgabe an die Außenluft betrieben werden.

Für beide Varianten werden die Investitionskosten, Energiekosten und TEWI Werte berechnet. Für diese drei Kriterien ist die VRF-Anlage zurzeit die günstigste Lösung. Die Preisentwicklung verzeichnet für das bei VRF-Kälteanlagen üblichen Kältemittels R410A auf Grund des Phase-down einen starken Preisanstieg, speziell in 2017. Dieser Preisanstieg könnte dazu führen, dass die Anzahl von realisierten Anlagen mit R410A in den nächsten Jahren stark zurückgeht. Es bleibt abzuwarten, ob VRF-Anlagen in Zukunft mit einem anderen Kältemittel angeboten werden, dessen Preis nicht so stark steigt. Sonst wird sich wahrscheinlich der Marktanteil von Anlagen mit Kaltwassersatz und Sekundärnetz erhöhen.

Es wird auch nachgewiesen, dass es bezüglich der geltenden Normen nicht möglich ist, in VRF-Anlagen giftige oder brennbare Kältemittel einzusetzen.

Wärmepumpe als Heiz- und Kälteaggregat in Verbindung mit Solarthermie

Christoffer Schöttge

Europäische Studienakademie ESaK, Senefelder Straße 3, 63477 Maintal
Dresdner Kühlanlagenbau GmbH, Geltestraße 11, 68184 Kabelsketal OT Doelbau, C.Schoettge@dka-dd.de

Es wird ein übliches Einfamilienhaus als Referenzanlage gewählt und dafür die Heiz- und Kühllast berechnet. Dann erfolgt die Projektierung einer Wärmepumpenanlage, deren Wärmequelle bei Außentemperaturen über 0°C die Außenluft ist. Bei tieferen Temperaturen ist die Wärmequelle ein Eisspeicher. Bei intensiver Sonnenstrahlung und entsprechend hohen Vorlauftemperaturen der Solarthermieanlage wird deren Wärme direkt in den Trinkwasserspeicher geleitet. Bei nicht ausreichend hohen Vorlauftemperaturen der Solarthermieanlage für die Trinkwasserbereitung wird der Pufferspeicher für die Fußbodenheizung geladen. Wenn die Vorlauftemperatur der Solarthermie auch für die Fußbodenheizung nicht ausreicht, wird die Wärme in den Eisspeicher eingelagert.

Die Kühlung erfolgt mit Klimakassetten, die direkt an das verbleibende Wasser im Eisspeicher angeschlossen sind. Somit ist gleichzeitiges Heizen und Kühlen mit zwischengeschaltetem Eisspeicher möglich.

Es wird untersucht, wie viele Stunden im Jahr die Wärmepumpe mit dem Eisspeicher als Wärmequelle betrieben werden kann und wie viele Stunden die Außenluft als Wärmequelle dienen muss. Weiterhin wird anhand des Referenzgebäudes diese innovative Anlagenschaltung mit zwei Standard-Wärmepumpenlösungen verglichen. Diese zwei Standardlösungen sind einerseits eine Luft/Wasser-Wärmepumpe und andererseits eine Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Flächenkollektor als Wärmequelle. Für die insgesamt drei Varianten werden die Investitions- und Energiekosten berechnet.

Auslegung, Konstruktion und Bau einer Anlage zur Untersuchung von Blasensieden an vertikalen Flächen (Elektronikkühlung)

William Cawley

Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim, Fakultät Technik,
william.cawley@web.de

Immer höhere Rechenleistungen auf immer kleineren Raum und die Miniaturisierung in der Elektronik allgemein führen dazu, dass die abzuführenden Wärmestromdichten stetig ansteigen. Dabei stößt die Luftkühlung insbesondere bei Hochleistungscomputern an ihre Grenzen, so dass eine Überhitzung der Mikroprozessoren nicht ausgeschlossen werden kann. Eine Möglichkeit ist es, die Bauteile in ein Kältemittel einzutauchen und die Wärme direkt über Siedekühlung abzuführen. Erste Untersuchungen habe gezeigt, dass dies prinzipiell funktioniert. Da aber die Bedingungen in dem einfachen Aufbau nicht konstant gehalten werden konnten, wurde in dieser Arbeit eine Apparatur aufgebaut, die eine reproduzierbare und kontrollierbare Umgebung schafft. Der Auslegungsbereich liegt bei Betriebstemperaturen bis 120°C und max. 5 bar Überdruck, da die Elektronikkühlung in der Regel ohne Überdruck betrieben wird. Außerdem wurde der Ex-Schutz beachtet und eine gute optische Zugänglichkeit für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geschaffen. Als Ergebnis dieser Arbeit wird die Anlage vorgestellt.

Vergleich und Parameterstudien zu Stickstoff-Methan Trennverfahren

D. Groß^{1*}, H. Bauer², A. Bub², S. Grohmann^{1,3}

¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe,
uidqd@student.kit.edu

²Linde AG, Engineering Division, Natural Gas Plants, Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14, 82049 Pullach

³Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Technische Physik (ITEP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Erdgas als Energieträger und Rohstoff für Petrochemikalien ist für die Industrie von großer Bedeutung, daher werden zukünftig Ressourcen erschlossen, deren Förderung bisher nicht wirtschaftlich war. Die so gewonnenen Erdgase weisen allerdings häufig einen erhöhten Stickstoffgehalt auf. Soll eine bestimmte Pipelinespezifikation oder die geforderte Brenngasqualität für Gasturbinen erreicht werden, ist eine spezielle Aufbereitung des Erdgases notwendig. Zur Stickstoffabtrennung werden grundsätzlich zwei verschiedene Technologien unterschieden, zum einen nicht-kryogene Verfahren wie Permeation, Adsorption und Absorption. Zum anderen die kryogene Rektifikation, die sich ihrerseits aufteilt in Einkolonnen- und Doppelkolonnen-Verfahren. Aufgrund wirtschaftlicher Aspekte wird die kryogene Separation für großtechnische Anwendungen bevorzugt eingesetzt.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, für verschiedene Randbedingungen der Erdgasaufbereitung die jeweils optimale Verfahrensführung zu definieren. Dazu werden vier konkurrierende kryogene Rektifikationsverfahren unter Variation der Feedgaszusammensetzung, der gewünschten Reinheit, des Rohgas- und Produktdruckes verglichen.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Prozesssimulation vorgestellt und unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs diskutiert.

Stichwörter:

Erdgas, Aufbereitung, Rektifikation

RZ 01

Eröffnung und Einführung

Dr. Bertold Mengede

LS Engineering GmbH, Wilhelm-Haas-Straße 6 , 70771 Leinfelden-Echterdingen, mengede@lse-gmbh.de

RZ.02

Rechenzentren in Deutschland – Ein Leitmarkt für Energieeffizienz?

Ralph Hintemann

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Clayallee 323, 14169 Berlin
Tel. 030/30645-1005, E-Mail: hintemann@borderstep.de

RZ.03

Vergleich der Luft- und Wasserkühlung für Rechenzentren auf der Basis einer Simulationsstudie

Prof. Dr. Thorsten Urbaneck

Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik
09107 Chemnitz, Germany
Tel: +49 371 531-32463
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

RZ.04

Energieeffiziente Kühlung von Rechenzentren

Markus Betz

T. P. I, Trippe und Partner Ingenieurgesellschaft mbH, Fritz-Erler-Str. 1-3, 76133 Karlsruhe,
Markus.Betz@tpi-online.de

RZ.05

Energieeffiziente Rückkühlung in Rechenzentren

Marco Baumann

JAEGGI Hybridtechnologie AG, Hirschgässlein 11 4051 Basel
marco.baumann@jaeggi-hybrid.ch,

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

Jedes Kelvin an niedrigeren Kühlwassertemperaturen erspart einer möglichen Kältemaschine 3 % an el. Verbrauch. Eine energieeffiziente Rückkühlung kann grundsätzlich in vier mögliche Bereiche für den Jahresverlauf unterteilt werden: 1. Trockene freie Kühlung zur Entlastung einer Kälteerzeugung ohne Wasserverbrauch; 2. Benetzte freie Kühlung, die die trockene freie Kühlung um mehrere Kelvin verlängert; 3. Trockene Rückkühlung für eine vorgeschaltete Kältemaschine sowie 4. Benetzte Rückkühlung zur ganzjährig effizienten Kühlwasserversorgung.

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

Keywords: Datencenter, Rechencenter, PUE - Power Usage Effectiveness, Freie Kühlung, Kühlwasserversorgung

RZ.06

entfällt

RZ.07

Indirekte adiabate Freikühlung ohne mechanische Kälteerzeugung

Christian Richter

Hoval Aktiengesellschaft, LI-9490 Vaduz, Liechtenstein
Christian.Richter@Hoval.com

Durch konsequente Nutzung der von der ASHRAE empfohlenen Server-Zuluftkonditionen kann ein System mit indirekter freier.- und adiabater Kühlung die Konditionierung von Rechenzentren komplett übernehmen. Das bedeutet, dass auf mechanische Kälteerzeugung verzichtet werden kann.

Die dabei eingesetzten Hochleistungs-Plattenwärmetauscher, mit ca. 80% Tauscherwirkungsgrad, erreichen durch den Twin Aufbau bei extrem niedrigem Platzbedarf, eine Tauscheroberfläche von ca. 1200m² (Oberfläche eines Heissluftballons). Durch diesen hohen Tauscherwirkungsgrad liegt die Freikühlgrenztemperatur ca. 3K unter der definierten Zulufttemperatur in den Serverraum. Daraus resultiert eine Konditionierung der Rechenzentrumsluft durch indirekte Freikühlung von ca. 90% pro Jahr ohne Zusatz von Adiabatik oder mechanischer Kälte.

Die effiziente Nutzung der freien Kühlung über das gesamte Jahr setzt im Winter die Reduktion der Umluftkondensation voraus. Um die Entfeuchtung zu unterbinden setzt Hoval mit dem neuartigen

Condensation Prevention System (CPS) die Temperatur des Aussenluft immer über die Taupunkttemperatur der RZ-Umluft. Die aufwendige Nachbefeuchtung der Umluft entfällt oder wird deutlich minimiert, die Kosten für die Nachbefeuchtung der Umluft durch Kondensation entfallen somit komplett.

RZ.08

Nutzung und Speicherung von Regenwasser in Rechenzentren

S. Prakesch

Aris GmbH, Wernau

RZ.09

Ein klimaschonendes Konzept zur Kühlung von Serverräumen

Dipl.-Ing. (FH) Florian Hanslik und Dr.-Ing. Jürgen Süß

Efficient Energy GmbH | Hans-Riedl-Str. 5 | 85622 Feldkirchen | Deutschland
florian.hanslik@efficient-energy.de, juergen.suess@efficient-energy.de

In dem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, mit dem sich aus Serverräumen die entstehende Abwärme mit geringem Energieaufwand an die Umgebung abführen lässt. Die vorgeschlagene Lösung bietet das maximale Potential, wenn die zu kühlende Anwendung einen konstanten Kältebedarf hat, der zu 70 – 80 % der Zeit eines Jahres oberhalb der Umgebungstemperatur liegt und ansonsten darunter. Dieses Kriterium ist bei Serverräumen in der Regel erfüllt. In der Zeit, wo das Wärmequellenniveau unterhalb demjenigen der Umgebung liegt, wird es von der Maschine stets nur so weit angehoben, wie dies erforderlich ist, um die Abwärme beispielsweise über einen Trockenkühler abzuführen. Im anderen Fall wird die Abwärme mit minimalem Energieaufwand lediglich durch die Gesamtanlage transportiert. In diversen Tests wurden unter realen Betriebsbedingungen bis zu 80 % der Energiekosten für die Kälteerzeugung eingespart und auch diese Ergebnisse werden im Vortrag vorgestellt und erläutert. Neben dem erheblichen Energieeinsparpotential ist ein weiterer Vorteil, dass die Kälteerzeugung, beziehungsweise der Transport der Abwärme der Server durch die Kältemaschine ausschließlich mit reinem Wasser, also R718 erfolgt.

Stichwörter: Abwärme, Effizienz, Wasser als Kältemittel, Serverraumkühlung

RZ.10

Rechenzentren kühlen sich selbst - Potenziale kompakter Adsorptionskälteanlagen

Matthias Hoene *, Steffen Kühnert, Walter Mittelbach

Fahrenheit AG, Siegfriedstraße 19, 80803 München, Deutschland
matthias.hoene@fahrenheit.cool

Weltweit werden bereits 3 % des elektrischen Stroms für den Betrieb von Rechenzentren benötigt. Auch in Deutschland ist dieser stark wachsende Trend zu beobachten: 12,4 Mrd. kWh [1] (> 2 % des Nettostromverbrauchs) wurden im Jahr 2016 für den Betrieb von Rechenzentren verbraucht. Diese elektrische Energie wird komplett in Wärme umgewandelt, die bislang meist ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden muss.

Adsorptionskältemaschinen können hier vorteilhaft eingesetzt werden: sie nutzen Abwärme für die Erzeugung von Kälte. Eine Herausforderung stellt hier das vergleichsweise niedrige Temperaturniveau (unter 50 °C) dar, auf dem die Abwärme zur Verfügung steht.

Im Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (LRZ) erzeugen seit Frühjahr 2016 Sorptionskältemaschinen der Fa. Fahrenheit direkt aus der Abwärme des neuen Rechenclusters „CooLMUC-2“ Kälte. Durch eine Neuentwicklung der Wasserkühlung der CPU von LENOVO können diese Einheiten mit Eintrittstemperaturen von 50 °C gekühlt werden, was einen effizienten Betrieb der Adsorptionskältemaschinen ermöglicht: Mit nur 6 kW elektrischer Leistung werden 95 kW Wärme aus dem Rechnercluster abgeführt und dabei 50 kW Kaltwasser für weitere Kühlzwecke produziert [2].

Das patentierte Produktionsverfahren der Fahrenheit AG für die Aufkristallisation von Zeolithmaterialien auf Wärmeübertrager erlaubt es, die Eigenschaften des Sorptionsmaterials an die Randbedingungen von Rechenzentren anzupassen. Diese Weiterentwicklung mit erhöhter Leistungsdichte führen so zu einer sehr kompakten Bauweise, die neue Perspektiven für die Einbindung der Adsorptionskältemaschinen in Rechenzentren eröffnet. Anhand eines Business Case wird das große Potenzial einer solchen Lösung aufgezeigt, die eine Amortisationszeit von nur einem Jahr erreichen kann.

RZ.11

Intelligente RZ-Kühlung durch Abwärmennutzung und Adsorptionskälte

Sören Paulußen

InvenSor GmbH

Adsorptionskältemaschinen erfreuen sich in Deutschland immer größerer Beliebtheit, da sie als Antriebsenergie überschüssige Abwärme nutzen, anstatt Strom zu verbrauchen. Besonders hohe Einsparungen bieten sich in Serverräumen und Rechenzentren, da hier die konventionelle Kühlung der Server sehr stromintensiv und somit für einen Großteil der Energiekosten verantwortlich ist. Darüber hinaus bieten die mit Wärme angetriebenen Kältemaschinen eine hohe Ausfallsicherheit und sind durch die Wartungsfreiheit der Kälteerzeuger prädestiniert für den 24/7-Betrieb im Rechenzentrum. Sören Paulußen, CEO der InvenSor GmbH, wird Ihnen in seinem Vortrag spannende Informationen über Einsatzmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit und Best Practices der Kältesysteme näherbringen.

Die Adsorptionskältemaschinen von InvenSor sind für einen Kältebedarf bis 300 kW geeignet. Außerdem hat sich InvenSor in den letzten 10 Jahren vom reinen Anlagenhersteller zum Gesamt-Lösungsanbieter entwickelt und realisiert heute sogar schlüsselfertige Gesamtlösungen im Kälte-Bereich.