

**Deutsche Kälte-
und Klimatagung**



Deutsche Kälte- und Klimatagung 2018

Aachen

21. – 23. November 2018

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

Eurogress Aachen

Monheimsallee 48
52062 Aachen
T. +49 (0)241 9131-0
F. +49 (0)241 9131-200
E. info@eurogress-aachen.de
H. www.eurogress-aachen.de



Inhaltsverzeichnis

Arbeitsabteilung I.....	5
Kryotechnik	
Arbeitsabteilung II.1.....	20
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung II.2.....	34
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung III.....	49
Kälteanwendung	
Arbeitsabteilung IV.....	64
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	
Studentenvorträge	80

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

I.01

Erfahrungsbericht Zentrale Heliumanlage FZ Jülich

Herbert Kohnen

Forschungszentrum Jülich, Abteilung Maschinen- und Versorgungstechnik (G-MV), Jülich
h.kohnen@fz-juelich.de

Am FZ Jülich wird eine zentrale Heliumanlage betrieben. Flüssigheliumverbraucher sind die Fusionsforschung, ein Synchrotron, Kernspintomographen sowie diverse NMR-Geräte und LHe-Kryostate. Das bei den jeweiligen Nutzern anfallende Helium wird über ein weitgestrecktes Rückleitungssystem (ca. 5 km) eingespeist, in Gasometern (30 + 50 m³) aufgefangen und in vorhandene 65 bar-Hochdrucktanks komprimiert. Ein externer Ausfrierreiniger ist vorgeschaltet. Ein früherer PSI-Verflüssiger (50 l/h inkl. LN₂-Vorkühlung) wurde 2012 durch eine moderne Turbinenanlage ersetzt (Modell L140, 133 l/h).

Berichtet wird über den Umbau und die bisherigen Betriebserfahrungen, über Verflüssigungsmengen und Rückgewinnungsquoten sowie über die erwartete weitere Entwicklung.

I.02

Industriell gefertigte Heliumanlagen

Wilhelm Vorbuchner jun.; Wilhelm Vorbuchner sen.

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

Die Vorbuchner Cryogenics and gas applications ist ein aufstrebender, international agierender Hersteller von Gasverflüssigungsanlagen und Anlagen zur Rückgewinnung von Gas. Das Kerngeschäft sind Helium-Rückgewinnungsanlagen sowie die neu im Portfolio befindlichen kryotechnischen Anlagen mit einem Temperaturbereich auf -269 °C (4,4 K) hinab. Diese Hightech-Anlagen werden in unserem familiengeführten Unternehmen ausgelegt, konstruiert, gefertigt und in Betrieb genommen.

Der Beitrag handelt von der Auslegung des optimalen Prozesses eines Heliumverflüssigers, sowie der Auswahl der Kernkomponenten. Dazu zählen unter anderem Kreislaufkompressoren, dynamisch gasgelagerte Expansionsturbinen, Aluminium-Plattenwärmeübertrager und der Ausfrier-Reiniger.

Neben den Heliumverflüssigungsanlagen werden auch die Helium-Rückgewinnungsanlagen hervorgehoben. Die Auswahl von Analytik, automatische Verteilerpanels und die Rückgewinnungs-Kompressoren sollen die Kernpunkte in unserem Beitrag darstellen.

Der Vortrag erläutert den vollständigen Heliumkreislauf innerhalb einer Forschungseinrichtung/Universität und stellt den Stand der Technik dar. Besonderes Augenmerk gilt den Komponenten und deren Vor- bzw. Nachteilen.

Was ist technisch sinnvoll und worauf sollte bei der Konzeption einer solchen Anlage geachtet werden – diese Punkte möchten wir mit unserem Beitrag näher erläutern.

Stichwörter:

Heliumverflüssiger, Heliumrefrigerator, Schraubenkompressor, dynamisch gasgelagerte Expansionsturbinen, Aluminium-Plattenwärmeübertrager, Helium-Rückgewinnungsanlagen

Die Weiterentwicklung der Heliumkleinverflüssiger im Labormaßstab

Dr. T. Adler, LOT-QuantumDesign GmbH Darmstadt

adler@lot-gd.de

Heliumkleinverflüssiger basieren auf der sogenannten „Kaltkopf“-Technologie. Diese Kaltköpfe sind entweder als „Pulse Tube“ (PT) oder „Gifford-McMahon“ (GM) bekannt und liefern ca. 1,5 W Kühlleistung bei 4,2 K. Montiert auf einem Transportdewar und versehen mit einer intelligenten Drucksteuerung entsteht hieraus ein Heliumkleinverflüssiger (stark vereinfacht gesprochen). Dieser verfügt über Verflüssigungsraten von ca. 20 bis 30 Litern flüssigen Heliums pro Tag. Jedoch wird das flüssige Helium bei erhöhtem Druck hergestellt, der erst wieder auf Atmosphärendruck reduziert werden muss um das flüssige Helium transferieren zu können. Dies kostet Zeit und reduziert die effektive Verflüssigungsrate. Die Weiterentwicklung des „Advanced Technology Liquefier“ (ATL) von Quantum Design, der ATL160+, umgeht dieses Problem elegant.

In dieser Präsentation wird auf die Technik und die physikalischen Grundlagen hinter dem „Advanced Technology Liquefier“ (ATL) von Quantum Design sowie dessen Weiterentwicklung, dem ATL160+, eingegangen. Die Realisierungen mehrerer Rückgewinnungen werden am Beispiel von bestehenden Installationen aufgezeigt.

Wasserstoffkontaminationen in Flüssighelium – neue Ergebnisse

Julian Will, Christoph Haberstroh

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

julian.will@tu-dresden.de; christoph.haberstroh@tu-dresden.de

Seit einigen Jahren treten massiv Probleme bei der Nutzung von Flüssighelium in Erscheinung. Es liegt eine große Anzahl von Berichten vor, welche Blockadeprobleme in Durchflussskryostaten beschreiben. Messinstrumente zur Untersuchung von physikalischen Eigenschaften sind massiv betroffen und teilweise nur noch eingeschränkt einsetzbar.

Wie schon auf der DKV-Tagung 2014 in Düsseldorf berichtet, ist die Ursache in der Kontamination des Heliums mit Wasserstoff zu suchen. In den geräteinternen Kapillaren und in Einlassventilen, welche den Druck des Flüssigheliums reduzieren, kommt es entsprechend zur Temperaturreduzierung und damit einhergehend zur Ausfällung und Akkumulation des Wasserstoffs. Äußerst geringe Konzentrationen sind ausreichend, um nach kurzer Zeit eine Blockade zu bewirken.

Der vorliegende Beitrag enthält erste Quantifizierungen der Kontaminationen. Sowohl eine semi-quantitative Messmethode mittels Kapillar-Analysestrecke, als auch gaschromatographische Untersuchungen führten zu neuen Erkenntnissen. Effekte innerhalb der Flüssigheliumbereitstellung, welche das Problem aufkommen lassen, wurden erörtert. Möglichkeiten der Abhilfe werden diskutiert. Die gesammelten Ergebnisse sollen zum Verständnis und zu einer zukünftigen effektiven Lösung des Problems führen.

Stichwörter:

Flüssighelium, Wasserstoffkontamination, Durchflussskryostate, Kapillarblockade, Ventilblockade

Kryostate für die Infrarot-Astronomie

Werner Laun

Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg
laun@mpia.de

Die Astronomie beobachtet Objekte am Himmel nicht nur im sichtbaren Bereich des Lichtes, sondern auch in anderen Wellenlängen. Das Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) in Heidelberg engagiert sich schon lange in der Infrarot-Astronomie. Für bodengebundene Observatorien wurden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Instrumente für den Wellenlängenbereich vom sichtbaren Licht bis zu 20 μm Wellenlänge gebaut. Um diese Wellenlängen mit hoher Empfindlichkeit detektieren zu können, müssen diese Instrumente kalt sein. Je länger die Wellenlänge ist, die man beobachten will, umso kälter muss das Instrument sein.

Neben der speziellen Anforderung an Kryostate, die an Teleskopen eingesetzt werden, stellt der Vortrag verschiedene angewendete Kühlsysteme vor. Exemplarisch werden hierbei auch die Kryostate einiger Instrumente vorgestellt. Ein Ausblick auf die geplanten Großinstrumente für das ELT in Chile an denen auch das MPIA beteiligt ist schließt den Vortrag ab.

Stichwörter:

Astronomie, Infrarot, Kryostate, Max-Planck-Institut für Astronomie

HZB-Hybridmagnetsystem: Neutronenstreuung bei höchsten Magnetfeldern

Probenkühlung und Kühlung der Magnetspulen

**Peter Smeibidl^{1*}, Bella Lake¹, Oleksandr Prokhnenko¹, Hartmut Ehmler¹, Sebastian Gerischer¹,
Jochen Heinrich¹, Peter Heller¹, Stephan Kempfer¹, Robert Wahle¹
Mark Bird², Iain Dixon², Matthias Hoffmann³**

¹ Helmholtz-Zentrum Berlin, Hahn-Meitner Pl. 1, 14109 Berlin, Germany
peter.smeibidl@helmholtz-berlin.de

² National High Magnetic Field Laboratory, 1800 E Paul Dirac Dr, Tallahassee, FL 32310, USA
bird@magnet.fsu.edu

³ High Field Magnet Laboratory, Toernooiveld 7, 6525 ED Nijmegen, Niederlande
m.hoffmann@science.ru.nl

* Korrespondenzautor

Als eines von 18 Zentren der Helmholtz-Gemeinschaft betreibt das Helmholtz Zentrum Berlin (HZB) zur physikalischen Grundlagenforschung die Neutronenquelle BER II und die Photonenquelle BESSY II zur Untersuchung von Materialstrukturen und internen Abläufen komplexer Systeme. Rund 3.000 externe Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzen jährlich die HZB-Forschungsinfrastrukturen. Wichtige Schwerpunkte am HZB sind die Beschleuniger-, Material- und Energieforschung.

In der HFM-Projektgruppe des HZB wurde in den Jahren 2007 bis 2014 eines der anspruchsvollsten und herausforderndsten Projekte des HZB, der Bau eines Hochfeld-Hybridmagneten (HFM) und dessen Installation am Neutroneninstrument „Extreme Environment Diffractometer (EXED)“ betrieben.

Zur Erreichung höchster Magnetfelder in einer sehr offenen Geometrie zur Durchführung von Strukturuntersuchungen mit Hilfe von Neutronenstreuung wurden normalleitende und supraleitende Spulen in einem System kombiniert. In der momentanen Ausführung sind Experimente bis zu Feldern von 26 Tesla möglich. Zur Kühlung der normalleitenden Spule wird entionisiertes Wasser verwendet. Für die supraleitende Spule kommt statt eines konventionellen Badkryostaten ein speziell zu diesem Zweck entwickelter Cable-in-Conduit - Supraleiter zur Anwendung, der mit überkritischem Helium gekühlt wird. Zur Kälteerzeugung wird ein Helium-Refrigerator mit zwei Kühlkreisen zur Kühlung der Spule sowie der Strahlungsschilde und Stromzuführungen verwendet.

Die zu untersuchenden Proben müssen bei den oben genannten Magnetfeldern je nach Experiment auf Temperaturen zwischen 100 K und 0.1 K gekühlt werden. Hierzu werden mehrstufige Pumpkryostate mit ^4He und ^3He sowie ein $^3\text{He}^4\text{He}$ -Mischungskryostat verwendet.

Die wissenschaftlichen Ziele fokussieren auf Untersuchungen in den Bereichen Supraleitung, Quantenmagnetismus, frustrierte Magnete und multifunktionale Materialien.

Stichwörter:

Neutronenstreuung, Cable-in-Conduit Supraleiter, überkritisches Helium, ^4He -Kryostat, Mischungskryostat

I.07

Supraleitende Stromschienen für die Hochstrom-Elektrolyse

Claus Hanebeck^{1*}, Stefan Huwer¹, Carsten Räch¹, Wolfgang Reiser¹

¹Vision Electric Super Conductors GmbH, Morlauerer Str. 21, 67657 Kaiserslautern, Deutschland
hanebeck@vesc-superbar.de

Der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL) bietet große Vorteile insbesondere in Hochstrom-Gleichstrom-Anwendungen. Hier sind Elektrolysen, Aluminiumhütten oder die Stromversorgung großer Rechenzentren zu nennen mit Strömen von bis zu 200 kA und sogar darüber auf Entfernungen von 100 m oder mehr. Verglichen mit herkömmlichen Leitern kann der erforderliche Querschnitt auch unter Berücksichtigung des Kryostaten massiv reduziert werden. Vorteile zeigen sich nicht nur im Verschwinden der ohmschen Verluste sondern auch hinsichtlich Platzbedarf, Gewicht und Montage.

Im Rahmen des öffentlich geförderten 3S-Projekts haben wir eine supraleitende Stromschiene für 20 kA basierend auf YBCO-Bändern entwickelt. Das System ist modular aufgebaut und besteht aus geraden und abgewinkelten supraleitenden Elementen, die in einem festen Rohr-Kryostaten werksseitig vorgefertigt und geprüft werden. Diese Elemente können leicht transportiert werden, sind robust und werden vor Ort auf einfache und sichere Weise mit einer extrem niederohmigen Kupplung miteinander verbunden.

Die Stromschiene wird mit unterkühltem flüssigem Stickstoff zwischen 65 und 70 K gekühlt, der von einer Kryoflüssigkeitspumpe zirkuliert wird. Die Unterkühlung verhindert zum einen die Gasbildung in der Schiene und reduziert zum anderen den Bedarf an Hochtemperatur-Supraleitern. Die benötigte Menge an Supraleitern wird durch eine Abstandserhöhung zwischen den einzelnen Supraleiterbändern noch weiter verringert.

Die Stromeinkopplung erfolgt über zwei neuartige mehrstufig gekühlte Stromzuführungen an den Enden. Gekühlt wird das komplette System in einem geschlossenen Kreislauf ohne abdampfendes Kryogen nach dem initialen Einkühlen. Das ist besonders im industriellen Bereich ein großer Vorteil.

Ein 25 m langer Demonstrator wurde in einer Chlorfabrik bei BASF in Ludwigshafen im realen industriellen Umfeld installiert. Aktuelle Messdaten dieses Systems werden präsentiert.

Stichwörter:

Kryotechnik, Hochtemperatur-Supraleitung, Stromzuführung, Stromschiene

Status einer Europäischen Norm für den Schutz von Heliumkryostaten gegen Drucküberschreitung

Steffen Grohmann^{1,2,*}, Hervé Barthélémy³, Ugur Bozkas⁴, Philippe Bredy⁵, Richard Down⁶, Eric Ercolani⁷, Arnaud Fauchon⁸, Jean-Luc Fournel⁸, Andre Henriques⁹, Laurie Jardel³, Martin Krichler¹⁰, Wolfgang Otte¹¹, Vittorio Parma⁹, Ruggero Pengo¹², Jean-Marc Poncet⁷, Matthias Reinhardt¹³, Rainer Soika¹⁴, Roser Vallcorba-Carbonell⁵, Christina Weber¹, Lutz Wrede⁴, Golo Zick⁸, Carolin Zoller¹⁵

¹ KIT, Institut für Technische Physik, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen (D)

² KIT, Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe (D)

³ Air Liquide Head Office, 75 Quai d'Orsay, 75321 Paris Cedex 07 (F)

⁴ DIN e.V., Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin (D)

⁵ CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette (F)

⁶ STFC, Rutherford Appleton Laboratory, Didcot OX11 0QX (UK)

⁷ Univ. Grenoble Alpes, CEA, INAC-SBT, 38000 Grenoble (F)

⁸ Air Liquide Advanced Technologies, 2 Rue de Clémenceire-B.P. 15, 38360 Sassenage (F)

⁹ CERN, CH-1211 Geneva 23 (CH)

¹⁰ Bilfinger Noell GmbH, Alfred-Nobel-Str. 20, 97080 Würzburg (D)

¹¹ Air Liquide Deutschland GmbH, Füttingsweg 34, 47805 Krefeld (D)

¹² INFN, Legnaro National Laboratories, Viale dell'Università 2, 35020 Legnaro (PD) (I)

¹³ Herose GmbH, Elly-Heuss-Knapp-Str. 12, 23843 Bad Oldesloe (D)

¹⁴ Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen (CH)

¹⁵ PSI, 5232 Villigen (CH)

steffen.grohmann@kit.edu

Der Schutz von verschiedenen Arten kryogener Lager- und Transportbehälter gegen Drucküberschreitung ist in einer Reihe von internationalen Standards geregelt. In Abgrenzung dazu beinhalten Heliumkryostate zusätzliche Komponenten wie z.B. supraleitende Magnetspulen, supraleitende Beschleunigerkavitäten, elektrische Heizer und Regelventile einschließlich Verrohrung, die das Risikopotential signifikant beeinflussen. Deshalb wurde beim Europäischen Komitee für Normung CEN die neue Arbeitsgruppe CEN/TC 268/WG6 gegründet, die sich speziell mit Anwendungen der Heliumtechnologie beschäftigt. Ihr Ziel ist es, eine Europäische Norm für den Schutz von Heliumkryostaten gegen Drucküberschreitung zu entwickeln, die mit der Druckgeräterichtlinie harmonisiert ist. Die Norm wird typische Bedingungen von Störungsszenarien in Heliumkryostaten behandeln, um sowohl die Risikobewertung als auch die Auslegung und Ausführung von Druckentlastungseinrichtungen zu harmonisieren. Der Beitrag informiert über das Konzept der neuen Norm, ihre Struktur und ihren Inhalt sowie den aktuellen Stand des Projekts.

Untersuchungen zur Wärmeübertragung in Helium-Kryostaten nach Bruch des Isolationsvakuums

Christina Weber^{1,2*}, Steffen Grohmann^{1,2}

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland

² KIT, Institut für Technische Physik (ITEP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

christina.weber@kit.edu

Die Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen für Helium-Kryostate erfordert unter anderem eine detaillierte Kenntnis über die Entwicklung des Druckanstiegs infolge von Störungen. Beim Bruch des Isolationsvakuums wird dieser durch Wärmeeintrag aufgrund der Abscheidung von atmosphärischer Luft auf der Oberfläche des Heliumbehälters ausgelöst. Nach aktuellem Stand der Technik basiert die Dimensionierung von Druckentlastungseinrichtungen auf konstanten Wärmestromdichten. Die Vernachlässigung der Prozessdynamik führt dabei häufig zu einer Überdimensionierung, aus der sich instabiles Verhalten sowie Leckagen ergeben können. Der übertragene Wärmestrom ist jedoch abhängig von der Luftmenge, die die kalte Oberfläche erreicht, der Wärmekapazität des Heliums und des kryogenen Behälters sowie dem Wärmeübergangskoeffizienten innerhalb des Heliums. All diese Größen sind sowohl temperatur- als auch zeitabhängig.

Dieser Beitrag stellt den aktuellen Stand eines eindimensionalen Wärmeübertragungsmodells zur Berechnung der transienten Wärmestromdichte basierend auf treibenden physikalischen Mechanismen vor. Die Ergebnisse werden mit experimentellen Daten des kryogenen Sicherheitsversuchsstands PICARD verglichen.

I.10

Erhöhung der Funktionssicherheit durch permanentes Monitoring von Prozessventilen

Anwendung der Valve Monitoring Application von Siemens in einer kryotechnischen Anlage

**Herr Dr. Thomas Müller-Heinzerling*, Frau Pia Schulz*,
Herr Steffen Bobien**

Siemens AG – Process Industries and Drives Division, Process Automation
Siemensallee 84, 76187 Karlsruhe, Deutschland
Thomas.Mueller-Heinzerling@siemens.com

KIT Campus Nord - Institut für Technische Physik – Abteilung Kryoinfrastruktur
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
Pia.Schulz@partner.kit.edu

KIT Campus Nord - Institut für Technische Physik – Abteilung Kryoinfrastruktur
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
Steffen.Bobien@kit.edu

Eine der vielen Aufgaben des Instituts für Technische Physik am KIT Campus Nord ist die Entwicklung und Produktion von leistungsstarken Hochtemperatursupraleitern (HTS). Um eine schnelle und flexible Prüfung durchführen zu können, wurde die **Current Lead Test Facility Karlsruhe (CuLTKa)** konzipiert. Die Anlage besteht aus fünf Kryostaten mit zwei unabhängigen Test- und Ventilboxen, welche durch die bereits vorhandene Infrastruktur mit überkritischem Helium versorgt werden.

Das automatische Monitoring von Prozessventilen in diesen Anlagen ist ein wichtiges Mittel zur Sicherstellung der erforderlichen hohen Betriebssicherheit. Im Prozessanlagenmanagement integrierte Diagnosesysteme helfen, die Funktionsfähigkeit von Stellgliedern zu verlängern. Durch die permanente Datenabfrage der Stellungsregler und deren Auswertung können vorausschauende Wartungsempfehlungen abgegeben und Ausfälle vermieden werden.

Durch Tieftemperaturanwendungen ergeben sich hinsichtlich der Materialeigenschaften andere Anwendungsprobleme und Herausforderungen als im Normalbetrieb. Mit der Valve Monitoring Application von Siemens werden Daten aus den vorhandenen Stellungsreglern (Siemens SIPART PS2 und ARCA Pro) gesammelt und hinsichtlich Auffälligkeiten und Verschleißgrenzen analysiert. Die Applikation kann mit den Siemenseigenen Stellungsreglern, aber auch mit anderen Stellungsreglern eingesetzt werden. Voraussetzung ist eine digitale Kommunikation zum Stellungsregler, wie sie üblicherweise in modernen Leitsystemen gegeben ist – dies kann über HART-Kommunikation oder über Feldbussysteme wie PROFIBUS PA erfolgen.

Aus den erfassten Daten werden verschiedene Kennzahlen gebildet, z.B. Beanspruchung des Ventils durch häufige Hübe oder Richtungswechsel, Erkennung von ansteigender Reibung, Verschiebung von Endlagen, Erkennung von internen Undichtigkeiten des Antriebs und weitere.

Anhand der Analyse des zeitlichen Verlaufs können plötzliche und schleichende Verschlechterungen erkannt werden. Eine Extrapolation von Verschleißkennzahlen in die Zukunft erlaubt die Vorhersage von sinnvollen Wartungszeitpunkten; insofern bildet dies eine Basis für vorausschauende Wartungsstrategien (Predictive Maintenance).

Stichwörter:

Helium-Verflüssigung, Fehleranalyse, Prozessventil, Funktionssicherheit, Monitoring, Predictive Maintenance, Condition Monitoring

I.11

1.8 K Helium-Kälteanlage für Test und Betrieb eines supraleitenden Beschleunigermoduls am Elektronenspeicherring BESSY II

P. Treite¹, E. Adler¹, W. Anders², J.Heinrich², S. Heling², S.Rotterdam²

¹ Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz
nikolay.kolev@linde-kryotechnik.ch, philipp.treite@linde-kryotechnik.ch,
ernst.adler@linde-kryotechnik.ch

² Helmholtz-Zentrum Berlin, BESSY II, Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland
wolfgang.anders@helmholtz-berlin.de, jochen.heinrich@helmholtz-berlin.de, svenja.heling@helmholtz-berlin.de,
stefan.rotterdam@helmholtz-berlin.de

SupraLab@HZB ist die zentrale Testinfrastruktur zur Entwicklung von Dauerstrich CW betriebenen supraleitenden Hochfrequenzsystemen für verschiedene Beschleunigeranwendungen. Dazu wird u.a. der Speicherring BESSY II am HZB durch Einbau eines Kryomoduls zum Speicherring mit variabler Pulslänge – BESSY VSR – aufgerüstet. Linde Kryotechnik wird zur Kühlung dieses Moduls eine maßgeschneiderte Helium-Kälteanlage auslegen und bauen.

Die Betriebsweise der Kälteanlage ist gekennzeichnet durch unterschiedliche Anforderungen der Kühlkreise im Verbraucher bei Temperaturen im Bereich von 1.8 K bis 60 K und Drücken von 16 mbar bis 13 bar. Weiterhin ist die Anlage in der Lage gleichzeitig als Heliumverflüssiger betrieben zu werden. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, verfügt die Anlage über fünf gasgelagerte Turbinen (in drei Turbinensträngen), einen dreistufigen Kaltverdichterstrang, warme Vakuumpumpen sowie ein warmes Kreislaufverdichtersystem. Der Betrieb des Speicherrings BESSY II stellt hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit der Kälteanlage.

Dieser Vortrag gibt einen Überblick über den Kühlbedarf, den Prozess und die Auslegung der beim Helmholtz-Zentrum Berlin zu installierenden Helium-Kälteanlage.

Stichwörter:

Helium, Kälteanlage, Kaltverdichter

I.12

Entwicklung und Test einer Johnston-Kupplung für ITER

Johannes Drache*, Michael Börsch¹, Pascal Erni¹, Guido Consogno¹, Daniel Oertig¹

¹WEKA-AG, Schürlistrasse 8, CH-8344 Bäretswil, Schweiz
info@weka-ag.ch

Johnston-Kupplungen sind lösbare Verbindungen zwischen flexiblen kryogenen Transferleitungen zu stationären Anlagenkomponenten.

Für MITICA, einem Vorexperiment von ITER, hat WEKA eine kompakte Johnstonkupplung entwickelt, welche unabhängig von der Einbaulage kryogene Fluide transportieren kann. Die Kupplung kann manuell gekuppelt werden, ist aber auch für eine Bedienung durch ein Remote-Handling-System konzipiert.

Die Kupplungen wurden entsprechend hoher Anforderungen designt, gefertigt und in verschiedenen Orientierungen unter kryogenen Bedingungen getestet.

Stichwörter: Johnstonkupplung, MITICA, ITER

I.13

Druckverlustbetrachtung in kryogenen Leitungen – Ein Vergleich starrer mit flexiblen Rohrsystemen

Dr. Beate West¹, Dr. Jürgen Essler^{1*}

¹Nexans Deutschland GmbH, Cryogenic and Superconducting Systems, Kabelkamp 20,
30179 Hannover, Deutschland
Beate.West@nexans.com, Juergen.Essler@nexans.com

Die wesentlichen zu beachtenden Parameter bei der Auswahl kryogener Transfersysteme bzw. kryogener Prozessleitungen sind der Wärmeeinfall, der Druckverlust und die räumliche Realisierbarkeit der Installation. In dieser Arbeit wird insbesondere der Aspekt des Druckverlusts genauer betrachtet.

Es wird der Druckverlust in glatten starren Rohrleitungssystemen mit denen flexibler Rohrleitungssysteme verglichen. Bei den flexiblen Rohrleitungssystemen wird zusätzlich der Aufbau der verwendeten Wellrohrleitungen unterschieden. Zu unterscheiden ist hier der Aufbau aus parallelgewellten Wellrohren und schraubengewellten Wellrohren. Der Aufbau des Wellrohres hat einen signifikanten Einfluss auf die Biegebarkeit und den Druckverlust der Leitungen.

Anhand der Darstellung der Druckverluste der verschiedenen Lösungen werden die Vor- und Nachteile von starren und flexiblen kryogenen Rohrleitungssystemen diskutiert.

Stichwörter: Flexible Transferleitungen, Druckverlust

I.14

Entwicklungen in der kryogenen Luftzerlegung

Dr. Joachim Krey

Air Liquide Deutschland GmbH, Industrial, Luise-Rainer-Straße 5, Düsseldorf
joachim.krey@airliquide.com

Die Luft setzt sich aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammen, die fast alle in Industrie, Handwerk oder Medizin genutzt werden. Neben den Hauptkomponenten Stickstoff und Sauerstoff gehören dazu auch verschiedene Edelgase, wie Argon, Neon, Krypton oder Xenon.

Die Erzeugung dieser Gase in ihrer reinen Form oder bestimmter Mischungen ist Aufgabe der Luftzerlegung. Das wichtigste Verfahren zur Luftzerlegung ist die kryogene Auftrennung, das heißt die Rektifikation bei tiefen Temperaturen.

Hier wird die Entwicklung der kryogenen Luftzerlegung von ihren Anfängen bis heute beschrieben. Dabei werden sowohl unterschiedliche Technologien, als auch sich ändernde Anforderungen an die Produkte dargestellt.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Entwicklung der Effizienz dieser Technologie, aber auch Fortschritte hinsichtlich der Anlagensicherheit.

I.15

Konzeption von Luftzerlegungsanlagen für ausgewählte Anwendungsfälle

Dr. Dimitri Golubev

Linde AG, Geschäftsbereich Linde Engineering, Dr.-Carl-v.-Linde-Str. 6-14, 82049 Pullach bei München
Dimitri.Golubev@linde.com

Die Anforderungen an Produkte kryogener Luftzerlegungsanlagen sowie an Luftzerlegungsprozess selbst können je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich sein. Das Ziel der Anlagenkonzeption besteht in Auswahl bzw. Entwicklung eines Verfahrens, das neben Erfüllung von Kundenanforderungen auch wirtschaftliche Vorteile anbieten kann.

Der Vortrag geht am Beispiel von zwei ausgewählten Anwendungsfällen auf den Entwicklungsprozess sowie auf die Optimierung von entsprechenden Luftzerlegungsverfahren ein.

Stichwörter: Kryogene Luftzerlegung

I.16

Kryogene Entschichtung - eine Verfahrensanalyse

F. Ritschel, H. Nowak, M. Thürk

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Festkörperphysik, Helmholtzweg 5, 07745 Jena
matthias.thuerk@uni-jena.de

Kryogene Entschichtungsverfahren versprechen durch den Ersatz von üblichen silikatischen Strahlmitteln wesentliche Umweltentlastungen. Sie kombinieren klassische mechanische Wirkungen mit zusätzlichen thermischen Abtragemechanismen. Im Beitrag wird ein Verfahren auf der Basis von kryogenen Wassereispartikeln vorgestellt. Eine Apparatur zur Partikelerzeugung und Lösungen für die Applikation der Strahlpartikel werden präsentiert. Abschließend wird zur Wirkmächtigkeit des Abtrages und der Anteil seiner Einzelmechanismen berichtet.

Stichwörter: Entschichtung, Wassereis, kryogen

I.17

Design eines LH2-Kryostaten zur Validierung der CFX-Simulation für den ESS-Moderator mittels Particle Image Velocimetry

Yannick Beßler*, Ghaleb Natour

Forschungszentrum Jülich GmbH, Engineering und Technologie (ZEA-1), Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Deutschland

y.bessler@fz-juelich.de

Die europäische Spallationsneutronenquelle (ESS) soll mit einer mittleren Strahlleistung von 5 MW die weltweit leistungsstärkste Neutronenquelle werden. Eine Schlüsselkomponente dieser Forschungseinrichtung ist der kalte Moderator, mit dem die hochenergetischen Spallations-Neutronen abgebremst (moderiert) werden, bevor diese für Messzwecke verwendet werden können. Dieser Moderator ist ein mit flüssigem para-Wasserstoff gefüllter, aus einer hochfesten Aluminiumlegierung hergestellter Druckbehälter. Die enorme Energie, die durch die Teilchenwechselwirkungen im Moderator freigesetzt wird, sowie die strahlungsbedingte Veränderung des Strukturmaterials erschwert die Auslegung eines solchen Druckbehälters. Rein theoretische Analysen sind aufgrund der Komplexität der Last- und Randbedingungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Um sicherzustellen, dass die strukturelle und strömungsmechanische Simulation ausreichend dem realen Betriebsverhalten entsprechen, wurden ergänzende experimentelle Untersuchungen notwendig.

Der Beitrag beschreibt die Konzeptentwicklung für die experimentelle Validierung der strömungsmechanischen Simulation des ESS-Moderators mittels Particle Image Velocimetry. Hierzu wurden ein Kryostat zur Verflüssigung von Wasserstoff und ein Quarzglas-Moderator entworfen sowie die Tracer zur Visualisierung des Geschwindigkeitsfeldes ausgewählt.

Stichwörter:

Kryotechnik, Spallationsneutronenquellen, kalte Moderatoren

I.18

In-situ-Messung der ortho-para-Konzentration in LH2 mittels Ramanspektroskopie

Max Hannot*, Yannick Beßler, Ghaleb Natour

Forschungszentrum Jülich GmbH, Engineering und Technologie (ZEA-1), Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich

m.hannot@fz-juelich.de

Mit Hilfe der Neutronenstreuung kann die innere Struktur und die Dynamik verschiedenster Materialien, ohne diese zu beschädigen, auf atomarer Ebene untersucht werden. Die hierzu notwendigen Neutronen können z.B.

durch den Spallationsprozess erzeugt werden. Den Spallationsneutronen, bevor sie messtechnisch erfasst werden können, muss Energie entzogen werden, wozu ein sogenannter Moderator eingesetzt wird. Dieser besteht aus einem mit flüssigem Wasserstoff gefüllten Druckbehälter. Darüber hinaus beeinflusst das ortho-para-Konzentrationsverhältnis die Qualität der Moderation. Es wird daher ein Katalysator eingesetzt, um möglichst konstante Verhältnisse zu gewährleisten. Zur Überwachung des Konzentrationsverhältnisses soll erstmals eine in-situ-Messung mittels Ramanspektroskopie direkt im Flüssigkeitsstrom durchgeführt werden. Um die Ramanspektroskopie zu ermöglichen, muss ein optischer Kanal in den Wasserstoffkreislauf integriert werden. Da es keine Werkstoffe gibt, die für diesen Temperatur- und Druckbereich zugelassen sind und gleichzeitig die notwendigen Eigenschaften aufweisen, ist die Auswahl und Qualifizierung der hierfür erforderlichen Einrichtung Kernbestandteil dieser Arbeit.

Stichwörter:

Kryotechnik, in-situ o-p-Konzentrationsmessung, Ramanspektroskopie

I.19

Kryogener Wasserstoff als Moderatorfluid für kalte Neutronen

Marcel Klaus^{1,*}, Hans Quack¹, Christoph Haberstroh¹, Yannick Beßler², Tobias Cronert³, Johannes Baggemann³

¹ TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden
marcel.klaus@tu-dresden.de

² Forschungszentrum Jülich GmbH, Engineering und Technologie (ZEA-1), Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich

³ Forschungszentrum Jülich, Jülich Centre for Neutron Science (JCNS), 52425 Jülich

Die Neutronenmikroskopie bietet im Vergleich zu anderen Methoden enorme Vorteile, wie unter anderem die zerstörungsfreie Durchdringung von Materialien mit Charakterisierung der inneren Bewegungen bzw. des Strukturaufbaus. Hierfür bedarf es geeigneter Neutronenquellen sowie wasserstoffreicher tiefkalter Moderatoren zur Anpassung der Neutronenenergie.

Zwei Moderatorsysteme werden hier vorgestellt: Die im Bau befindliche Hochflussquelle *European Spallation Source, ESS*, mit erstmalig 5 MW Strahlleistung; diese ist für flüssigen Parawasserstoff optimiert. Gezeigt wird der dafür an der TUD entwickelte Kühlkreislauf, das *Cryogenic Moderator System (CMS)*.

Tendenziell sinkt die Zahl vorhandener Hochfluss-Neutronenquellen weltweit, bei stetig wachsender Anwenderzahl. Deshalb ist es das Ziel bei der *Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS)*, eine kompakte, preiswerte, stringent auf Effizienz und die Experimente optimierte Alternative auf Basis von Niedrig-/Mittelflussquellen zu entwickeln. Idealerweise ermöglicht dies neben Forschungszentren selbst Universitäten bzw. der Industrie Zugang zur benötigten Neutronenstreuung. Der im Rahmen einer Vorstudie entstandene o-p-LH₂-Mischkryostat erlaubt eine erste Erprobung eines innovativen Moderators mit einstellbarer o/p-Zusammensetzung. Untersuchungen zu bekannten und neuen o-p-H₂-Katalysatoren sowie zur messtechnischen Bestimmung des o-p-Verhältnisses unterstützen die Anwendung in Neutronenquellen, sind aber auch auf dem Gebiet der Wasserstoffverflüssigung hilfreich.

Stichwörter:

Flüssigwasserstoff, Neutronenquelle, Ortho-Para-Katalysator, Ortho-Para-Mischkryostat

Wasserstoff-Mischkryostat als Neutronenmoderator

(Entwicklung eines Wasserstoff-Mischkryostaten als anwendungsoptimierbarer Neutronenmoderator über freie Einstellung des H₂ – ortho/para-Verhältnisses)

Johannes Baggemann^{1*}, Tobias Cronert¹, Ulrich Rücker¹, Paul Zakalek¹, Paul-Emmanuel Doege¹, Marcel Klaus², Sarah Boehm¹, Eric Mauerhofer¹, Thomas Gutberlet¹, Thomas Brückel¹

¹ Forschungszentrum Jülich, Jülich Centre for Neutron Science (JCNS), 52425 Jülich
j.baggemann@fz-juelich.de

² TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden

Die Neutronenstreuung als komplementäre Methode zur Röntgenstreuung bietet insbesondere im Bereich Materialanalysen einzigartige Möglichkeiten für einen breiten Anwender- und Anwendungsbereich. Ein derzeit in Jülich laufendes Projekt verfolgt das Ziel, durch die Entwicklung einer neuen, kompakten Neutronenquelle den Zugang zu dieser Streumethode im Hinblick auf Kosten, Vorlaufzeiten und Beschränkungen zu senken und die derzeit sinkende Verfügbarkeit von Neutronenquellen in der Zukunft abzuwenden. Eine wesentliche Komponente dieses Vorhabens ist die Entwicklung eines neuartigen Flüssigwasserstoff-Moderators mit einem regelbaren H₂ ortho/para-Verhältnis. Durch die Einstellung des H₂ ortho/para-Verhältnisses soll ein Neutronen-Energiespektrum erzeugt werden, das die Anforderungen der jeweiligen Anwendungen optimal erfüllt. Nach einer kurzen Einführung des Projekts und einer Übersicht über das Potential der Neutronenstreuung wird der gegenwärtige technische Ist-Zustand des Moderators sowie die geplanten Weiterentwicklungen vorgestellt.

Stichwörter: Neutronen, Moderator, o/p-Wasserstoff

Verflüssigter Wasserstoff – alternativer LKW-Kraftstoff der Zukunft?

Bernd Gottschlich, Peter Siara

Cryotherm GmbH & Co. KG, Euteneuen 4, 57548 Kirchen (Sieg)
bernd.gottschlich@cryotherm.de; peter.siara@cryotherm.de

Feinstaubbelastungen, Treibhausgasemissionen und Stickoxide durch Verbrennungsantriebe haben zu einem Umdenken bei Verbrauchern, Industrie und Politik geführt um zukünftige Gesundheitsbelastungen verstärkt zu vermeiden. Die Automobilindustrie, die Politik und Forschung sind gefordert und bemüht, emissionsmindernde alternative Antriebe voranzutreiben.

Batterieelektrische Antriebe tragen in einem ersten Schritt im PKW-Bereich zum Fahren ohne lokale Emissionen bei, jedoch mit verbleibenden Herausforderungen. Im LKW-Sektor hingegen sind Verbrennungsmotoren mit Dieselantrieb bisher aufgrund des hohen Energiebedarfs weitestgehend alternativlos und batterie-elektrische Fernlastzüge nur sehr bedingt realisierbar.

Im Vergleich dazu ist die vorteilhafte Energiedichte von verflüssigtem Wasserstoff als alternativer LKW-Kraftstoff aufgrund des geringen Gewichts und Volumens vielversprechend.

Seit mehreren Jahrzehnten gibt es in Wellenbewegungen Bestrebungen, gasförmigen Wasserstoff unter Hochdruck als Kraftstoff zu verwenden, allerdings gestützt durch staatliche Förderprogramme und ohne größere kommerzielle Erfolge in Europa. Für LKW stößt gasförmiger Wasserstoff zurzeit technisch in Bezug auf Tankvolumen, Tankdruck und Reichweiten an seine Grenzen.

Cryotherm hat in einer Eigenentwicklung einen kryogenen Tank für tiefkalt-verflüssigten Wasserstoff entworfen, der emissionsfreies Fahren im Schwerlastbereich mit einer Brennstoffzelle mit Reichweiten deutlich jenseits der 1000 km möglich macht.

In den achtziger Jahren fertigte Cryotherm bereits erfolgreich Flüssigwasserstofftanks für den Verbrennungsmotor des 7er BMWs.

Stichwörter:

Alternative Antriebe, Brennstoffzelle, flüssiger Wasserstoff, LH2, LKW, LKW-Kraftstoff, Zero-Emission

I.22

Aufbau des Cryogenic Phase Equilibria Test Stand CryOPHAEQTS

**Jens Tamson^{1*}, Michael Stamm²,
Steffen Grohmann^{1,2}**

¹ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland

² KIT, Institut für Technische Physik (ITEP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen,
Deutschland

jens.tamson@kit.edu

Kühlungsanwendungen in der Kryotechnik, wie die Kühlung von Hochtemperatursupraleitern oder die Verflüssigung von Wasserstoff können effizient mit kryogenen Gemischkältekreisläufen (*engl. cryogenic mixed refrigerant cycles, CMRC*) realisiert werden. Die für die Auslegung dieser Prozesse benötigten Stoffdaten kryogener Fluidgemische sind für eine Vielzahl ternärer Systeme noch nicht untersucht.

Mit dem im Aufbau befindlichen Prüfstand CryOPHAEQTS können Fluidgemische bei Temperaturen zwischen 15 und 300 K und bei Drücken bis zu 15 MPa untersucht werden. Der Prüfstand erfüllt die sicherheitstechnischen Anforderungen für Wasserstoff- oder Sauerstoffbetrieb. Die über Kapillaren direkt aus einer Messzelle entnommenen Proben können in einem Gaschromatographen analysiert werden, woraus sich pTxy-Datensätze ergeben, mit denen vapour-liquid-equilibria (VLE) oder vapour-liquid-liquid-equilibria (VLLE) charakterisiert werden können. Durch Kombination zweier verschiedener Messprinzipien zur Massenstrommessung wird die Wärmekapazität der zirkulierenden Gasphase bestimmt.

CryOPHAEQTS bietet sechs optische Zugänge, mit denen zukünftig Experimente der dynamischen und der Oberflächenlichtstreuung durchgeführt werden können. Diese optischen Messverfahren ermöglichen die Bestimmung der Transportgrößen sowie der Schallgeschwindigkeit und der Oberflächenspannung im Gleichgewicht.

Alternativen zu R23 zur Temperierung von Messsensoren in der Stratosphäre

Tobias Göpfert^{1*}, Ruud Dirksen², Tatjana Naebert², Ullrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden,
Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
01062 Dresden, Deutschland

² Deutscher Wetterdienst,
Meteorologisches Observatorium Lindenberg ,
Richard-Aßmann Observatorium, Am Observatorium 12,
15848 Tauche/Lindenberg, Deutschland

Ruud.Dirksen@dwd.de

* Korrespondenzautor

tobias.goepfert@tu-dresden.de

Zur Weiterentwicklung und Überprüfung von Klimamodellen werden sog. wesentliche Klimavariablen (ECV) benötigt. Eine dieser ECV's ist der Wasserdampfgehalt in der Stratosphäre der Erde. Dieser wird im Wesentlichen mittels sog. Taupunktspiegel-Hygrometer bestimmt bei denen Wasserdampf an einer speziell behandelten Oberfläche kondensiert wird. Aufgrund des sehr geringen Wasserdampfgehaltes werden hierbei teilweise Temperaturen deutlich kleiner – 100 °C benötigt. Derzeit wird die Kühlung primär mittels offener Badthermostate und dem Kältemittel R23 realisiert. Aufgrund zu erwartender Schwierigkeiten bei Beschaffung, Kostenentwicklung und der Umweltbelastung durch R23 werden neue alternative Kühlkonzepte gesucht.

Hierbei ergibt sich das Problem, dass alternative Kältemittel einen Tripeldruck kleiner 5 mbar aufweisen müssen, um in der Stratosphäre noch verdampfen und die benötigte Kälteleistung bereitzustellen zu können. Basierend auf den technisch-physikalischen und sicherheitstechnischen Randbedingungen wurden systematisch alternative Arbeitsstoffen und Kühlkonzepte zur Kältebereitstellung untersucht. Dies umfasst auch die Möglichkeit der Nutzung von Festkörpern in Form von Sublimations- und fühlbarer Wärme.

Stichwörter:

R23-Ersatzstoffe, Taupunktspiegel-Hygrometer, Stratosphäre, offene Badthermostate, Sublimationskühlung

II.1.01

Fest-Flüssig-Gleichgewichte des ternären Stoffgemisches Kohlenstoffdioxid-Ethan-Ethylen

Tobias Göpfert^{1*}, Ullrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden,
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
01062 Dresden, Deutschland
tobias.goepfert@tu-dresden.de

Die Verwendung von Kohlenstoffdioxid als Kältemittel erscheint durch steigende Klimaschutz- und Effizianzforderungen aktuell als eine sinnvolle technische Lösung. Nachteilig an Kohlenstoffdioxid ist jedoch die hohe Tripeltemperatur von etwa -56,6 °C, weshalb es in klassischen Kaldampfprozessen unterhalb von – 50 °C nicht verwendet werden kann. Ein Lösungsansatz hierfür ist die gezielte Beimischung anderer Fluide und Nutzung der daraus resultierenden reduzierten Gefriertemperatur. Je nach Gemischpartner und Zusammensetzung des Gemisches ergeben sich hierbei unterschiedliche Gefriertemperaturen.

Diese Veröffentlichung zeigt die Messergebnisse der Fest-Flüssig-Gleichgewichtsmessung der Stoffpaare Kohlenstoffdioxid-Ethan und Kohlenstoffdioxid-Ethylen. Es wird die Messapparatur und die Bestimmung der Gefriertemperatur Anhand der Vermessung der metastabilen Flüssigkeitsunterkühlung dargestellt. Basierend auf den Messdaten und zusätzlichen Literaturwerten wurde eine Berechnungsgleichung zur Berechnung der Gefriertemperatur des ternären Stoffsystems Kohlenstoffdioxid-Ethan-Ethylen abgeleitet. Die Messergebnisse zeigen weiterhin Abhängigkeiten des Nukleations/Gefrierhaltens von unterschiedlichen Einflussgrößen.

Stichwörter:

Kohlenstoffdioxid, ternäres Stoffsystem, Gefrierpunktmessungen, Stoffdatenberechnung

II.1.02

Experimentelle Untersuchung der Unterkühlbarkeit von Fluiden in nicht-metallischen Wärmeübertragern

Sebastian Gund^{1*}, Michael Kauffeld¹

¹ Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
sebastian.gund@hs-karlsruhe.de

Eine der größten Herausforderungen bei der Anwendung von Eisbrei ist die Produktion. Forschung mit Fokus auf eine energieeffiziente Herstellung von Eisbrei legt die Nutzung des Unterkühlungs-Phänomens nahe. Dabei wird eine Flüssigkeit, in einem Wärmeübertrager unter ihren Gefrierpunkt gekühlt, ohne zu kristallisieren. Danach kann die Kristallisation gezielt angeregt werden und es entsteht Eisbrei. Der Schlüsselparameter, der für eine hohe Anwendbarkeit dieser Technologie für die Eisbrei-Erzeugung verbessert werden muss, ist der Grad der Unterkühlung. Die Kristallisationstheorie besagt, dass die Grenzfläche zwischen der kristallisierenden Flüssigkeit und dem Substrat großen Einfluss auf die erreichbare Unterkühlung hat. Siliziumcarbid scheint ideale Eigenschaften als Wandmaterial zu haben. Reines Wasser wird in einem Gefäß aus Siliziumcarbid eingeschlossen und bis zur Kristallisation abgekühlt. Als Referenz wird das gleiche Experiment gleichzeitig in einem Glas- und einem Kupfergefäß durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen den Einfluss des Oberflächenmaterials auf den Grad der Unterkühlung.

Stichwörter:

Eisbrei, Unterkühlung, Supercooled-Brine-Method

II.1.03

Zusammenstellung CFD-basierter numerischer Untersuchungen zu partikelbeladenen Strömungen in Wärmeübertragern

Shaimaa Hefny*, Robin Langebach, Thomas Tannert, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden,
Institut für Energietechnik,
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
01062 Dresden, Deutschland,
Shaimaa.Hefny@tu-dresden.de

Im Vorliegenden Beitrag werden wesentliche Ergebnisse aus mehr als 30 Veröffentlichungen zu numerischen Untersuchungen partikelbeladener Fluide und Strömungen zusammengetragen. Die hierin betrachteten Literaturquellen umfassen eine Zeitspanne der Jahre 2004 bis 2018 hin zu gegenwärtigen Forschungsarbeiten. Aus der Literatur wird ersichtlich, dass der bisherige Kenntnisstand zur numerischen Simulation partikelbeladener Strömungen (insbesondere von Eisbrei) in Wärmeübertragern unvollständig zu sein scheint. Die in diesem Beitrag zusammengestellten Ergebnisse sollen einen Überblick über geeignete numerische Methoden für die Nutzung von CFD-Anwendungen in diesem Gebiet vermitteln. Die einzelnen Studien zeigen eine große Vielfalt an unterschiedlichen Phasenwechselmaterialien (PCM's), die für den technischen Einsatz betrachtet werden können. Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht sind in Bezug auf Eisbreiströmungen verschiedene Aspekte zu betrachten: Zunächst stellt Eisbrei einen mehrphasigen Zustand dar, im Speziellen ein strömendes Phasengemisch aus Flüssig- und Feststoffphase. Für die numerische Simulation derartiger Strömungen innerhalb einer CFD-Umgebung ist die Anwendbarkeit geeigneter Mehrphasen-Gemisch-Modelle (Euler-Euler und Euler-Lagrange) hinsichtlich einer korrekten Beschreibung der Impulsübertragung im Bereich laminarer und turbulenter Strömungen zu bewerten. Weiterführend sind die Betriebsbedingungen (Volumenkonzentration, Partikelgröße, Mischungsgeschwindigkeiten) sowie die Phasenwechselwirkungen zwischen Partikeln und Fluid (Widerstands- und Auftriebskraftkoeffizienten, Oberflächenspannung und Wandreibung) zu betrachten. Eine kurze Zusammenfassung der Arbeiten wird im Anschluss präsentiert. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, einen Überblick relevanter Referenzquellen in der Literatur bezüglich aktueller Forschungsergebnisse und experimenteller Versuchsdaten zur Validierung numerischer Simulationsergebnisse für Eisbreiströmungen zu geben.

Stichwörter:

Partikelbeladener Strömungen, Numerische Methoden, Mehrphasen, CFD

II.1.04

Einfluss einer externen Prozessfluideinspritzung auf die Thermo- und Fluidodynamik in Mehrphasenpumpen

Marian Lottis^{1*}, Stefan Wagner, Andrea Luke

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

Zur Förderung von Gasen und Dämpfen mit hohen Flüssigkeitsanteilen in der Prozesstechnik werden Mehrphasenschraubenspindelpumpen eingesetzt, da diese sowohl für Flüssigkeiten als auch für mehrphasige Gemische mit hohen Gasanteilen geeignet sind. Damit benötigt man z.B. in der Industriekälte keine Totalverdampfung bzw. Kondensation, insbesondere bei Stoffsystemen mit hohen Inertanteilen. Zur Verbesserung des Thermomanagements für den Fall, dass die Mehrphasenpumpe als Kompressor arbeitet, wird ein spezielles Kühlsystem entwickelt, indem das Prozessfluid in der flüssigen Phase eingespritzt wird. Dies ist für die Spaltabdichtung notwendig, so dass der effektiv geförderte Volumenstrom steigt. Zu berücksichtigen sind dabei komplizierte Sorptionseffekte, da das Fluid zumeist gesättigt vorliegt.

Zur Untersuchung der Thermo- und Fluidodynamik einer solchen Mehrphasenpumpe wird neben Versuchen im Technikumsmaßstab ein transparentes Förderkammermodell der Pumpe / des Kompressors mit externer Fluideinspritzung entwickelt. Das Förderkammermodell ermöglicht weitreichende optische Voruntersuchungen hinsichtlich der Fluidodynamik in den Spalten durch Variation verschiedener Parameter (Einspritzrichtung, Anzahl und Art der Einspritzdüsen, Fluideigenschaften des Prozessfluides, Sorptionseffekte etc.). Im vorliegenden Beitrag werden Konstruktion, Peripherie und erste experimentelle Ergebnisse dieses Modells vorgestellt.

Stichwörter:

Fluideinspritzung, Mehrphasenschraubenspindelpumpe, Sorptionseffekte, Förderkammermodell

II.1.05

Numerische Simulationen und Experimente zu Pseudo-Verdampfung und Pseudo-Kondensation von überkritischem CO₂

Jörg Starflinger^{1*}, Eckart Laurien¹

¹ Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE),
Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland
joerg.starflinger@ike.uni-stuttgart.de, eckart.laurien@ike.uni-stuttgart.de

Rechtsläufige Kreisprozesse mit überkritischem Kohlenstoffdioxid (sCO₂) als Arbeitsmittel eignen sich für die flexible Stromerzeugung und die Abfuhr von Wärme aus verschiedenen Prozessen. Dazu wird ein Joule-Kreislauf mit Turbo-Kompressor-System eingesetzt, der flexibel mit hohem Wirkungsgrad Strom erzeugen kann. Die Abwärme wird an die Umgebung abgeführt. Unter Verwendung der besonderen Eigenschaften von sCO₂ nahe dem kritischen Punkt (hohe Wärmekapazität, niedrige Zähigkeit) können die Komponenten des Joule-Kreislaufs sehr kompakt gebaut werden. Diese Kompaktheit erlaubt eine bessere Lastfolgefähigkeit im fluktuierenden Stromnetz.

Kompaktheit bedeutet die Entwicklung von kompakten Wärmeübertragern. Hierbei ist ein hohes Verhältnis von innerer Wärmeübertragungsfläche zu Volumen erwünscht, was zur Forderung von relativ engen Kanälen in den Wärmeübertragern führt. Für solche Wärmeübertrager sind Korrelationen für den Wärmeübergang und für den Druckverlust nahe dem kritischen Punkt von sCO₂ zu validieren.

Am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) werden verschiedene Beiträge zur Überprüfung der Druckverlust- und Wärmeübertragungskorrelationen von sCO₂ geleistet. Hierbei sind sowohl die „Pseudo-Verdampfung“ als auch die „Pseudo-Kondensation“ von Interesse. Mithilfe direkter numerischer Simulation (DNS) werden beispielsweise Effekte wie „Relaminarisierung“, welche bei der Aufheizung von sCO₂ auftreten kann, untersucht. Solche grundlegenden numerischen Untersuchungen dienen als Hinweis für sich verschlechternden Wärmeübergang im Wärmeübertrager.

Experimentelle Untersuchungen werden an einzelnen Platten durchgeführt, die einseitig beheizt oder gekühlt werden. Mit diesen Experimenten werden Druckverlustkorrelationen bei Bedingungen nahe des kritischen Punktes überprüft und ggf. angepasst.

Das Manuskript enthält eine Zusammenfassung ausgewählter numerischer Simulation und Experimente aus verschiedenen Projekten zu diesem Thema.

Stichwörter:

Überkritisches CO₂, kompakte Wärmeübertrager, „Pseudo-Verdampfung“, „Pseudo-Kondensation“

Einfluss der Stoffeigenschaften auf den Wärmeübergang beim Blasensieden

Niklas Buchholz^{1*}, Andrea Luke¹

¹ Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Der Wärmeübergang beim Blasensieden ist besonders in der Kältetechnik von hoher Relevanz, da hohe Wärmestromdichten bei kleinen treibenden Temperaturdifferenzen übertragen werden können. Bisherige Rechenmodelle zur Beschreibung des Wärmeübergangs sind zumeist empirisch und gelten nur für einen eingeschränkten Arbeitsbereich mit ausreichender Genauigkeit. Die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussparametern und deren Einfluss auf den Wärmeübergang sind oft unbekannt. Insbesondere der Einfluss der Oberflächenbearbeitungsmethode und des Oberflächenmaterials sind weiterhin nicht erfasst. Infolge dessen werden Apparate, z.B. überflutete Verdampfer, überdimensioniert. Zur Verbesserung der Genauigkeit der Auslegungsgleichungen ist somit ein besseres Verständnis der Mechanismen, auch im Hinblick auf Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einflussparametern, notwendig.

Deswegen werden zunächst sowohl semi-empirische Modelle zur Beschreibung des Einflusses der Stoffeigenschaften auf den Wärmeübergang aus der Literatur und deren Grenzen sowie experimentelle Daten aus der Literatur kritisch diskutiert. Erste experimentelle Ergebnisse zum Einfluss der Stoffeigenschaften für bereits bekannte und neuartige Kältemittel an verschiedenen bearbeiteten Heizflächen werden vorgestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse gehen später in ein neues Rechenmodell ein.

Stichwörter:

Blasensieden, Wärmeübergang, Stoffeigenschaften, α_0

Kondensation in Multiport-Flachrohren

Paul Knipper^{*}, Dirk Bertsche^{}, Benjamin Dietrich^{*}, Thomas Wetzel^{*}**

^{*} Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Deutschland Institut für Thermische Verfahrenstechnik,
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
paul.knipper@kit.edu

^{**} MAHLE Behr GmbH & Co KG, Stuttgart, Deutschland

Multiport-Flachrohre werden aufgrund ihrer Kombination von hohen Wärmeübertragungsleistungen bei gleichzeitig kompakter Bauform bevorzugt in Verdampfern und Kondensatoren moderner Fahrzeugklimaanlagen eingesetzt. Obwohl diese in Millionenstückzahlen jährlich produziert und eingesetzt werden, sind die physikalischen Grundlagen des Kondensations- und Verdampfungsprozesses noch nicht gänzlich verstanden. Zur effizienten Auslegung der Bauteile sind jedoch fundierte Modellierungsansätze erforderlich, welche es ermöglichen für verschiedenste Randbedingungen eine zuverlässige Vorausberechnung der thermohydraulischen Eigenschaften sicherzustellen. Hierfür gilt es zunächst die relevanten Einflussgrößen zu identifizieren und über geeignete Literaturansätze abzubilden. Aus Literatur bekannte Einflussgrößen sind hierbei neben der Massenstromdichte, dem Dampfgehalt und dem Sättigungsdruck, u.a. auch der hydraulische Durchmesser und die Kanalform. Im Rahmen dieses Beitrages wird der Fokus der experimentellen Untersuchungen auf die Ermittlung des Einflusses des hydraulischen Durchmessers und der Kanalform auf die beiden Größen Wärmeübergang und Druckverlust gelegt. Hierfür wurde der hydraulische Durchmesser von 0,52 bis 0,91 mm, der Sättigungsdampfdruck von 10, 15 und 20 bar, die Massenstromdichte zwischen 400 und 1200 kg m⁻² s⁻¹, sowie der Dampfgehalt zwischen 0,1 und 0,9 variiert. Neben der Ergebnisdarstellung für die

Wärmeübergangs- und Druckverlustwerte, und der damit einhergehenden Gegenüberstellung dieser Werte für die unterschiedlichen Multiportflachrohre, gilt es im Rahmen dieses Beitrages auch im speziellen auf die Anwendbarkeit verschiedener Literaturansätze in Hinblick auf die Variation des hydraulischen Durchmessers wie auch der Kanalform einzugehen.

II.1.08

Simulation magnetokalorischer Kälteprozesse

Aydan Gedik^{1*}, Maximilian Loth¹, Taylan Tokan¹, Stephan Kabelac¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Callinstrasse 36, 30167 Hannover, Deutschland
gedik@ift.uni-hannover.de

In letzter Zeit stehen zunehmend Materialien zur Verfügung, welche einen magnetokalorischen Kreisprozess im Bereich der Raumtemperatur zulassen. Diese thermodynamisch sehr interessanten Kreisprozesse sind in ihrer praktischen Realisierung nicht ganz einfach umzusetzen, die „Ernte“ der theoretisch möglichen Kühlleistung im ‚Aktiven Magnetischen Regenerator (AMR)‘ mit Hilfe eines Wärmeträger-Fluids ist nur effizient möglich, wenn die AMR-Einheit gut im Magnetfeld ausgerichtet und die Wärmeübertragungsmechanismen im AMR gut verstanden sind. Zur Vergrößerung des Temperaturhubes der angestrebten Kälteanlage besteht die AMR-Einheit typischerweise aus einer Schichtung unterschiedlicher Materialien mit jeweils unterschiedlicher Curie-Temperatur. Daher gibt es in der Auslegung des Prozesses weitere Freiheitsgrade, für die noch nicht viele Erfahrungswerte vorliegen. Somit ist eine belastbare Simulation der Vorgänge, gekoppelt mit einer schrittweisen Validierung, ein unverzichtbares Auslegungswerkzeug. Erst durch diese Simulationsprogramme, die sowohl den magnetokalorischen Part wie auch den gekoppelten thermohydraulischen Part belastbar abbilden, können effiziente Anlagen mit Ausblick auf Wirtschaftlichkeit ausgelegt werden. Im Vortrag werden die Bausteine eines Simulationsprogramms zur Auslegung magnetokalorischer Kälteprozesse vorgestellt. Einzelne Programmmodule werden durch experimentelle Daten validiert. Es wird als Beispiel ein Prozess zur Schaltschrankkühlung vorgestellt.

Stichwörter:

Magnetokalorik, Simulation, AMR-Einheit, Schaltschrankkühlung

II.1.09

Modellierung eines PVT-basierten Wärmepumpensystems auf der Basis von CO₂ Direktverdampfung

Johannes Rullof^{1*}, Klaus J. Lambers¹, Ulf Blieske¹

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

Die Systemkombination aus Wärmepumpe und solarthermischen 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 Solar-Hybridmodul, 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.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Modellierung des PVT-basierten CO₂-Wärmepumpensystems, bestehend aus PVT-Modul, Wärmepumpe und thermischen Speicher präsentiert. Das Ziel der Arbeit ist hierbei die Beurteilung des Systemverhaltens unter realitätsnahen thermischen Lastsituationen und klimatischen Randbedingungen. Des Weiteren wird eine Regelungsstrategie entwickelt, die sowohl die äußeren, witterungsbedingten Einflüsse als auch die thermische Last berücksichtigt.

Stichwörter:

R744/CO₂, Wärmepumpe, PVT-Modul, thermischer Speicher, Regelungsstrategie

II.1.10

25 kW NH₃/H₂O-Absorptions-Resorptions-Kälteanlage im Kälte- und Wärmeverbund eines Supermarktes

Oliver ZIEGLER^{1*}, Ullrich HESSE¹, Bastian MILDENBERGER², Darius SCHREY³

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

² Resotec GmbH, Heinzenbergerweg 34, 74343 Sachsenheim, Deutschland
bm@resotecgmbh.com

³ EDEKA Handelsgesellschaft Südwest mbH, Edekastraße 1, 68542 Heddeshheim, Deutschland
darius.schrey@edeka-suedwest.de

Im Zuge eines vom BMWi geförderten Projektes wurde an der TU Dresden eine Resorptionskälteanlage (RKA) zur Bereitstellung von Normal- (-6°C/0°C) und Klimakälte (6°C/12°C) weiterentwickelt und erprobt. Zur Erbringung des Funktionsnachweises der Technologie und zur Demonstration der Vorteile gegenüber herkömmlichen Absorptionskälteanlagen (AKM) konnte mit den Projektpartnern EDEKA und RESOTEC ein Umbau des Anlagenverbunds mit Integration einer RKA zur Versorgung eines Supermarktes realisiert werden.

Der vorliegende Beitrag umfasst zunächst die Konzeptionierung, Inbetriebnahme sowie erste Betriebserfahrungen der RKA im Kälte- und Wärmeverbund eines typischen EDEKA-Supermarktes. Es wird des Weiteren auf das Betriebskennfeld der RKA in Abhängigkeit der jahreszeitlich bedingten Randbedingungen eingegangen.

Stichwörter

Absorption, Resorption, KWKK, Systemverbund, Supermarkt

II.1.11

Experimentelle Untersuchung zur Einbindung einer Ammoniak-Wasser Absorptionswärmepumpe in Fernwärmenetze

N. Mirl*, F. Schmid, K. Spindler

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

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) werden derzeit experimentelle Untersuchungen zur Kopplung einer Ammoniak-Wasser Absorptionswärmepumpe (AWP) mit Fernwärmenetzen durchgeführt. Die im Austreiber benötigte Wärmeleistung soll dabei aus dem Vorlauf des Fernwärmenetzes entnommen werden. Die Wärmeleistung für den Verdampfer wird dem Rücklauf des Fernwärmenetzes entnommen. Die Vorteile dieser Systemkopplung sind unter anderem eine gesteigerte Effizienz des Fernwärmenetzes und eine Erhöhung der Entnahmeleistung. Durch diese Systemkopplung resultiert eine hohe Temperatur der Verdampfung von circa 30 °C. Der einzustellende Tiefdruck der Wärmepumpe kann durch die hohe Verdampfungstemperatur erhöht werden. Dies hat wiederum Auswirkungen auf den Ammoniakmassenanteil der reichen Lösung und damit auf den gesamten Ammoniakmassenanteil bei der AWP-Befüllung.

Das Ziel dieser Untersuchungen ist, die AWP für den Betrieb mit hohen Temperaturen am Verdampfer in Hinblick auf eine gesteigerte Effizienz zu optimieren. Hierfür muss zunächst der Ammoniakmassenanteil der Befüllung neu ermittelt werden. Anschließend werden verschiedene Verschaltungsvarianten der Wärmeübertrager im Kältekreis untersucht und auch die Aufteilung des Heizungswassers auf den Kondensator und Absorber variiert. Durch eine Bilanzierung der einzelnen Wärmeübertrager bzw. der Ermittlung derer Effektivität, werden Optimierungspotentiale aufgezeigt. Insbesondere die Komponenten in denen ein Stoffübergang bzw. ein stofflicher Ausgleich erfolgt werden näher betrachtet. Auf diese Weise soll eine Anpassung der Komponenten für die weitere Anlagenentwicklung ermöglicht werden.

Es wird zunächst der Versuchsaufbau näher erläutert. Anschließend werden die ersten Ergebnisse der Untersuchungen sowie die daraus abgeleiteten Optimierungsvorschläge vorgestellt.

Stichwörter:

Absorptionswärmepumpen, Ammoniak-Wasser, Komponentenoptimierung, Fernwärme, Systemkopplung

II.1.12

Brennwertnutzung an Biomassekesseln mittels angekoppelter Absorptionswärmepumpe

Tina Hermann*, Julian Geier-Pippig, Christian Schweigler

Hochschule München, Fakultät 05 Versorgungs- und Gebäudetechnik,
CENERGIE Competence Center Energieeffiziente Gebäude und Quartiere
Lothstr. 34, 80335 München, Deutschland
tina.hermann@hm.edu

Die Kühlung und Kondensation des Abgases von Heizkesseln mit Brennwertnutzung durch herkömmliche Abgaswärmetauscher ist durch die Rücklauftemperatur des Heiznetzes auf etwa 50 °C begrenzt. Die Integration einer Absorptionswärmepumpe (AWP) ermöglicht eine Abkühlung des Abgases auf weitaus tiefere Temperaturen und trägt anhand des zusätzlichen Gewinns an Kondensationswärme zu einer erheblichen Effizienzsteigerung des Heizsystems bei. Dazu wird das Abgas durch Wärmeübertrag an den Verdampfer der Wärmepumpe auf etwa 25 °C abgekühlt. Je nach Brennstofffeuchte kann so die Brennstoffausnutzung um etwa 20 % gesteigert werden.

Die Entwicklung zielt auf Biomassekessel mit Wärmeleistungen ab 50 kW. Im Rahmen des Forschungsprojekts soll die Kopplung der AWP mit einem mit Holzhackschnitzel befeuerten Biomassekessel untersucht werden.

Die Forschungsarbeit bezieht sich zunächst schwerpunktmäßig auf die Auslegung der einzelnen Komponenten der AWP unter Berücksichtigung der Kopplung mit dem Biomassekessel und der thermo-hydraulisch optimierten Einbindung in den Heizkreislauf. Um die Bereitstellung der benötigten Antriebswärme von etwa 90 °C für den Austreiber der AWP zu ermöglichen, wird eine modifizierte Wärmeauskopplung aus dem Kessel untersucht. Die Nutzung des Brennerts, beginnend bei einer Abgastemperatur von etwa 55 °C, erfolgt durch direkten Wärmeübertrag vom Abgasstrom an den Verdampfer der Wärmepumpe. Für einen möglichst zuverlässigen Betrieb soll der Sorptionskreislauf mit Naturumlauf der Arbeitsmittellösung zwischen Austreiber und Absorber ausgeführt werden.

Im Beitrag werden die Steigerung der Brennstoffausnutzung, das hydraulische Konzept für die Kopplung des Wärmeerzeugers mit der Sorptionswärmepumpe und die Wärmelieferung an ein Nahwärmenetz sowie die Konzeption der Apparate der Wärmepumpe vorgestellt.

Stichwörter:

Absorption, Wasser/LiBr, Wärmepumpe, Biomassekessel, Abgaskondensation, Energieeffizienz

II.1.13

Absorptionswärmepumpen

Untersuchung der Auswirkungen einer hohen Kältemitteltemperatur auf das Absorptionsverhalten

Philipp Wagner*, René Rieberer

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

philipp.wagner@tugraz.at

Beim Ersatz von herkömmlichen Gas-(Brennwert)-Kesseln können gasbefeuerte Absorptionswärmepumpen (GAHPs) einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung des Energieeinsatzes sowie der CO₂-Emissionen beitragen. Obwohl die Brennstoffausnutzung aktueller am Markt befindlicher GAHPs nahezu ausgereizt ist, gibt es noch Potential zur Effizienzsteigerung. Vor allem bei einer hohen Temperatur des Heizungswasserrücklaufs (ab 50 °C) kann das Potential der Brennwerttechnik nicht ausgenutzt werden, da das Abgas im Abgaswärmeübertrager nicht unter den Taupunkt abgekühlt werden kann und es zu keiner Kondensation des Wasserdampfes im Abgas kommt.

Um auch bei hoher Temperatur des Heizungswasserrücklaufs die Brennwerttechnik nutzen zu können, gibt es bei GAHPs die Möglichkeit einen kältemittelgekühlten Abgaswärmeübertrager in den Kältemittelkreislauf (nach dem Verdampfer) zu integrieren. Dies führt allerdings zu einer wesentlichen Erhöhung der Temperatur des Kältemittels vor dem Eintritt in den Absorber.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Versuche an einer Laboranlage mit einer maximalen Heizleistung von 3 kW durchgeführt. Dabei wurden die Auswirkungen einer erhöhten Kältemitteltemperatur auf das Absorptionsverhalten sowie auf den Wärmepumpenkreislauf untersucht.

Stichwörter:

Ammoniak/Wasser, Absorption, Kältemitteltemperatur

II.1.14

Entwicklung asymmetrischer Plattenwärmeübertrager für die Bedingungen in Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen und deren Anwendung

Lutz Richter¹, Christian Kemmerzell², Mike Otto², Mathias Safarik¹

¹ILK Dresden – Hauptbereich Angewandte Energietechnik, ²EAW Energieanlagenbau GmbH
Westenfeld

lutz.richter@ilkdresden.de

H₂O-LiBr-Absorptionskälteanlagen arbeiten im Grobvakuum. Druckverluste der Arbeitsstoffe müssen daher im Kreisprozess gering sein und infolge des hohen spezifischen Volumens von Wasserdampf sind große

Strömungsquerschnitte notwendig, die einer kompakten Anlagengestaltung entgegenstehen. Die externen Medien benötigen dagegen für gute Wärmeübergänge kleinere Strömungsdimensionen. Konventionelle Plattenwärmeübertrager, die auf beiden Medienseiten die gleichen Kanalhöhen besitzen, sind daher nicht verwendbar und asymmetrische Plattenwärmeübertrager, die den speziellen Anforderungen für den Einsatz in Absorptionskälteanlagen genügen, gab es bisher nicht. Innerhalb eines FuE-Projektes wurden in Kooperation des ILK mit der Fa. EAW in Zusammenarbeit mit einem Wärmeübertragerhersteller asymmetrische Plattenwärmeübertrager entwickelt, die für zwei unterschiedliche Medienströme, Medienseite Flüssigkeit und Produktseite Dampf, verschiedene Kanalhöhen besitzen und hinsichtlich Plattengestaltung an die Bedingungen von Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen Funktionen Absorber, Generator, Verdampfer und Kondensator angepasst sind. Optimale Strömungs- und folglich Wärmeübergangsbedingungen der Medien und günstige Plattenbenutzungen werden in den Apparaten erreicht. Nach der Entwicklung und Herstellung der angepassten asymmetrischen Plattenwärmeübertrager wurden 3 Erstanlagen von Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen gebaut mit bisher 15, 30 und 60 kW Kälteleistung im Nennpunkt. Die Absorptionskälteanlagen verwenden ausschließlich maschinell hergestellte Plattenwärmeübertrager als Wärme- und Stoffübertrager. Damit entstand eine vollkommen neue Generation von Absorptionskälteanlagen, die eine Weltneuheit darstellt. Die Anlagen wurden erfolgreich getestet und vermessen. Sie sind äußerst kompakt gestaltet. Die Baugößenreduzierung beträgt durchschnittlich 40 %. Die Herstellungskosten wurden gesenkt. Mit den neuartigen Plattenwärmeübertrager können Anlagen bis zu einer Kälteleistungsgröße von 400 kW gebaut werden. Die neuen Anlagen sind auch als Absorptionswärmepumpen und Wärmetransformatoren verwendbar.

II.1.15

Experimental Study on the Adsorption Kinetics of Surfactants in H₂O/LiBr Solutions at Low Pressure

Federico Lonardi*, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34121 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Absorption chillers are able to supply a cooling demand with negligible electrical power consumption compared to vapor compression chillers, being driven by low-temperature waste heat. On the other side, they are still characterized by high costs and sizes and, thus, have to be further optimized. The absorber, which is often designed as a falling film apparatus with a horizontal tube bundle, has been widely recognized as the bounding device of absorption chillers because of its low heat and mass transfer coefficients. The surface tension of the working solution is reduced, if small quantities of alcoholic surfactants are added. This leads in turns to an increased wettability of the tube bundle and to local turbulences in the falling film (so-called Marangoni convection). The coupled heat and mass transfer is enhanced as a consequence. Nevertheless, the influence of several parameters on this enhancement mechanism has yet to be fully understood.

The goal of this work is to investigate experimentally the adsorption mechanisms of several alcoholic surfactants in aqueous lithium bromide solutions. Static and dynamic surface tension of lithium bromide solutions with different additives are measured according to the Pendant Drop method. The surface excess concentration of the additive at the liquid-vapor interface of the drops is then calculated with a Gibbs isotherm. The concentration of the surfactant in the solution is varied in a range between 10 and 1000 ppm. The results are discussed and compared with previous literature. The measurements are carried out in a vacuum cell, which enables to measure the surface tension in a saturated atmosphere at reduced pressure, thus representing the real working conditions of the absorber.

Keywords:

Absorption, surfactant, surface tension, low pressure, wettability

II.1.16

Adsorptionszyklus mit erhöhtem Temperaturhub und seine Realisierung in Kältemaschinen mit nur einem Adsorber

Aditya Desai^{1*}, Ferdinand P. Schmidt¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Strömungsmaschinen, Kaiserstraße 12,
76131 Karlsruhe, Baden-Württemberg
aditya.desai@kit.edu

Der idealisierte Zyklus üblicher Adsorptionskältemaschinen besteht aus zwei Isosteren und zwei Isobaren. Bei einer Erhöhung der Rückkühltemperatur, also einer Vergrößerung des Temperaturhubs ohne zugleich die Antriebstemperatur zu erhöhen, geht der COP dieses Standardzyklus irgendwann gegen Null, weil der realisierbare Beladungsumsatz des Arbeitsmittels gegen Null geht. Hier wird ein modifizierter Adsorptionszyklus untersucht, der bei einem gegenüber dem Standardzyklus erhöhten Temperaturhub noch betrieben werden kann.

Aus der Literatur sind bereits Adsorptionszyklen bekannt, die den Hub über zwei oder mehr Kreise verteilen. Diese sogenannten 'Double-Lift'-Zyklen benötigen aber typischerweise vier Adsorber und mehrere Dampfventile.

Für den hier untersuchten Zyklus wird die Realisierung in einer Kältemaschine mit nur einem Adsorber skizziert. Der Zyklus beinhaltet einen isothermen Desorptionsschritt bei der Antriebstemperatur, eine Zwischenspeicherung der Kondensationswärme bei Temperaturen unterhalb der Mitteltemperatur-Senke und einer Zufuhr dieser Wärme zum Verdampfer während eines isothermen Adsorptionsschrittes. Dieser Beitrag untersucht das thermodynamische Potenzial dieser Zyklen und diskutiert einige Aspekte ihrer technischen Realisierung.

Stichwörter:

Erweiterter Adsorptionszyklus, Enhanced-Lift

II.1.17

Experimentelle Untersuchung eines Adsorptionskühlschranks und Vergleich mit dynamischem Simulationsmodell

Kristian Hurtig*, Mike Jäger, Karsten Düwel, Roland Kühn

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

Thermisch betriebene Kälteanlagen können die Wärmenutzung insbesondere aus Fernwärmenetzen im Sommer erhöhen. Während zunehmend große Sorptionskälteanlagen zur Gebäudeklimatisierung eingesetzt werden, haben auch Kleinstkälteanlage großes Potential zur Einsparung fossiler Energieträger. Eine Möglichkeit ist die Substitution von elektrisch betriebenen Haushaltskühlschränken mit Adsorptionskühlschränken, welche direkt durch warmes Wasser angetrieben werden.

Ein erstes Funktionsmuster für einen Adsorptionskühlschrank für Haushalte wurde auf Basis erster Simulationsergebnisse entwickelt, gebaut und vermessen. In dieser Veröffentlichung werden Messergebnisse von diesem ersten Funktionsmuster vorgestellt und mit den Ergebnissen der dynamischen Simulation verglichen. Die Simulation hilft beim Verständnis der Messergebnisse und kann gleichzeitig anhand der Messungen validiert werden.

Im allgemeinen stimmen die qualitativen zeitlichen Verläufe von Prozesstemperaturen und Drücken recht gut überein. Im genauen Vergleich mit nicht angepassten Simulationsergebnissen ergeben sich allerdings Unterschiede. Diese lassen sich aus Effekten ableiten, welche in der Simulation bisher nicht berücksichtigt sind.

Stichwörter:

thermische Kälteanlage, Adsorptionskühlschrank, Messdaten, Adsorption, dynamische Simulation

II.1.18

Auslegung und Steuerung von Adsorptionskühlsystemen mittels dynamischer Optimierung

Andrej Gibelhaus^{*}, Uwe Bau, Franz Lanzerath, André Bardow

RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
Schinkelstr. 8, 52062 Aachen, Deutschland
andrej.gibelhaus@ltt.rwth-aachen.de

Thermisch angetriebene Adsorptionskältemaschinen bieten eine nachhaltige Alternative zu Kompressionskälteanlagen. Die Nachhaltigkeit von Adsorptionskältemaschinen leidet jedoch oft unter dem hohen elektrischen Energieverbrauch der Peripheriegeräte, welcher auf eine schlechte Systemauslegung und Steuerung zurückzuführen ist. Zur Lösung dieses Problems schlagen wir die gleichzeitige Optimierung der Systemauslegung und Steuerung vor. Dazu haben wir zunächst ein ganzheitliches Systemmodell eines thermisch angetriebenen Adsorptionskühlsystems einschließlich der Peripheriegeräte erstellt. Die anschließende Optimierung des dynamischen Systems erfolgt mittels effizienter Algorithmen (MUSCOD-II) mit dem Ziel den elektrischen Energieverbrauch zu minimieren. Durch die gleichzeitige Optimierung von Steuerung und Systemdesign stellen wir sicher, dass beide Freiheitsgrade optimal auf die Anwendungsanforderungen abgestimmt sind und hierdurch die Wettbewerbsfähigkeit von thermisch angetriebenen Kühlsystemen verbessert wird.

Stichwörter:

Thermische Kühlung, Adsorptionskälteanlage, Systemsimulation, elektrischer Wirkungsgrad

II.1.19

Vorstellung eines neuartigen Adsorptionskühlschranks für die Impfstoffkühlung in netzfernen Regionen: Systemaufbau und erste Ergebnisse

Roland Kühn^{1*}, Kilian Mähne¹, Christoph Göller¹, Julia Römer¹, Arno Zimmermann¹

¹ Coolar UG (haftungsbeschränkt), Wollankstr. 118, 13187 Berlin, Germany
roland@coolar.co

Weltweit haben ca. 1,2 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität [1]. Gleichzeitig gibt es für viele dieser Menschen keine ausreichende medizinische Versorgung, insbesondere durch fehlende Impfstoffkühlung. 2014 waren 90% der existierenden Impfstoffkühlgeräte in Entwicklungsregionen entweder veraltet oder funktionierten nicht ordnungsgemäß, wodurch die Impfstoffe dem Risiko einer nicht ausreichenden oder zu starken Kühlung ausgesetzt werden [2]. Daher wird durch viele NGOs und andere Organisationen viel Geld investiert, um beispielsweise im globalen Süden Impfstoffe auch netzfern zuverlässig zu kühlen. Bei vielen derzeit betriebenen Systemen handelt es sich entweder um strombetriebene Kühlschränke mit Photovoltaik oder Dieselgeneratoren oder direktbefeuerte Sorptionskühlschränke. Bei den letzteren Systemen ist die Treibstoffbeschaffung häufig eine Herausforderung, während die Photovoltaiksysteme mit kurzer Batterielebensdauer und hohen Temperaturen sowie diffuser Sonneneinstrahlung zu kämpfen haben. Heute werden von der WHO daher nur noch Impfstoffkühlschränke ohne elektrische Speicher und ohne Treibstoffnutzung zertifiziert [3].

In den letzten 10 Jahren wurden als weitere Alternative verschiedene Prototypen von solarthermisch angetriebenen Adsorptionskälteeinheiten entwickelt. Fast alle dieser Prototypen produzieren nachts Eis, welches dann vom Nutzer händisch in eine Kühlbox oder ähnliches überführt werden muss. Es ist also immer das Eingreifen des Nutzers erforderlich und es kann keine Temperaturregulierung stattfinden. Die Coolar UG hat verschiedene Prototypen für Impfstoffkühlschränke entwickelt, die direkt einen Kühlraum kühlen und als Antrieb einen solarthermisch beheizten Wasserkreis verwenden. Aufgrund des verwendeten Kältemittels Wasser ist außerdem ein Gefrierschutz für die Impfstoffe gegeben. In dieser Veröffentlichung wird der Aufbau dieses neuartigen Impfstoffkühlschranks vorgestellt und erste Messergebnisse vom Betrieb des neuesten Prototyps präsentiert. Der Fokus liegt dabei auf der Einhaltung der Lagerungstemperatur von 2°C bis 8 °C.

Stichwörter:

Adsorptionskälte, solares Kühlen, stromlos, Impfstoffkühlung, Entwicklungsregionen

II.1.20

Experimentelle Untersuchung von R365mfc und R245fa und deren Gemisch als Arbeitsfluid in einer ORC-Technikumsanlage

Ebrahim Aeini¹, Stephan Kabelac¹

¹ Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Callinstraße 36, 30167 Hannover, Deutschland
aeini@ift.uni-hannover.de

Die Nutzung von Abwärmeströmen durch Wandlung in mechanische oder elektrische Endenergie gelingt u.a. durch einen Clausius-Rankine Dampfkreisprozess, dessen Arbeitsfluid an das niedrige Temperaturniveau der Wärmequelle angepasst ist. Die Suche nach möglichen Arbeitsfluiden, die geeignete thermodynamische Eigenschaften haben und die der Umwelt geschuldeten gesetzlichen Randbedingungen erfüllen, ist seit Jahren eine thermodynamische Herausforderung. Zudem muss der Prozess, der aufgrund des Temperaturniveaus zwangsweise einen niedrigen energetischen Wirkungsgrad hat, zumindest einen guten exergetischen Wirkungsgrad aufweisen, um wirtschaftlich rentabel sein zu können. Deswegen müssen auch, zusätzlich zum Arbeitsfluid, die einzelnen Apparate des Kreisprozesses sehr gut an die jeweiligen Randbedingungen angepasst sein. Die Auslegung insbesondere der Wärmeübertrager (Kondensator, Verdampfer), welche bei ORC-Prozessen besonders große Energieströme schultern, muss belastbar sein.

Am Institut für Thermodynamik der Leibniz Universität Hannover wurden experimentelle Untersuchungen an einer ORC-Versuchsanlage mit unterschiedlichen Arbeitsfluiden durchgeführt. Die Versuchsanlage besteht aus einem geschweißten Plattenwärmeübertrager als Verdampfer (max. 50 kW thermische Leistung, Kreuzgegenstrom, max. Druck 25 bar), einem exzentrischen Drehkolbenexpander, der nach dem Wandel-Motorprinzip arbeitet, einer mehrstufigen Kreiselpumpe und zwei weiteren Plattenwärmeübertragern, die als Rekuperator bzw. als Kondensator verwendet werden. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden die Kältemittel Solkane R365mfc und R245fa jeweils als Reinstoff untersucht. Zusätzlich wurden die Gemische dieser Kältemittel mit unterschiedlichen Zusammensetzung im Kreislauf untersucht, um die eingesetzten Platten-Wärmeüberträger auch für Gemische charakterisieren zu können. Als Wärmequelle für die Verdampfung des Arbeitsfluids wird ein Thermalölkreislauf verwendet, der durch eine elektrische Temperieranlage (max. 60 kW Heizleistung) beheizt wird. Mittels eines Kühlwasserkreislaufs wird thermische Energie aus dem System abgeführt.

Zunächst wurden die stationären Eigenschaften der Hauptkomponenten (Plattenwärmeübertrager, Expander bzw. Pumpe) anhand von Messdaten modelliert. Basierend auf diesen stationären Simulationen, wurden die durchführbaren Betriebszustände, entsprechenden Wirkungsgrade analysiert und diskutiert.

Die Zeitverzögerung der Komponenten und Verbindungsrohre wird in der Modellierung berücksichtigt. Anhand von experimentellen Daten werden die unbekannt Parameter in den Komponentenmodellen bestimmt.

Stichwörter:

ORC-Prozesse, Arbeitsfluid, R365mfc, R245fa, Gemische

Modellrechnung zur Auslegung und Darstellung des Aufbaus einer ORC-Anlage kleiner Leistung

Florian Theede*, Andrea Luke

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

Zur Schonung der Ressourcen und zur Erhöhung der Energieeffizienz ist die Nutzung von Niedertemperaturwärme essentiell. Eine Möglichkeit sind Dampfprozesse, die mit Kältemitteln als Arbeitsfluid arbeiten, sog. ORC-Prozesse (Organic Rankine Cycle). Die großen Herausforderungen für die Etablierung kleiner ORC-Prozesse ist die Auswahl eines geeigneten Arbeitsfluides, die Auslegung und Entwicklung effektiver Komponenten zur Minimierung der Exergieverluste sowie die Einbindung eines funktionstüchtigen und sicheren Regelungskonzeptes. Zur Realisierung der ORC-Anlage müssen die Komponenten der Anlage und ein geeignetes Arbeitsfluid ausgewählt werden. Entscheidende Parameter sind die Temperatur und die Verfügbarkeit der Wärmequelle und der Rückkühlsekte. Durch die stufenweise Begrenzung von Kältemitteln mit hohen GWPs bilden natürliche Kältemittel in ORC-Anlagen eine Alternative.

Am Fachgebiet wird eine Laboranlage ausgelegt und aufgebaut, um experimentelle Untersuchungen an einer ORC-Anlage mit kleinen Leistungen zur Nutzung von Niedertemperaturwärme von Kältemaschinen durchzuführen. Für die Auslegung der Komponenten (u.a. Expansionsmaschine, Wärmeübertrager) und für die Fluidauswahl werden ausführliche Berechnungen mit Hilfe eines Modells durchgeführt. Verschiedene natürliche Kältemittel werden analysiert und hinsichtlich der Einflussparameter der Quellen und Senken auf den Prozess und anderen Komponenten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Isopentan aus den betrachteten Kältemitteln die besten Ergebnisse unter vorher definierten Kriterien erzielt. Als Komponenten für die Laboranlage werden ein Scroll-Expander, eine spezielle Schraubenspindelpumpe und Koaxialwärmeübertrager als Verdampfer und Kondensator ausgewählt. Ein spezielles Messkonzept erlaubt ausführliche, örtlich und zeitlich aufgelöste Untersuchungen des genannten ORC-Prozesses.

Stichwörter:

Organic Rankine Cycle (ORC), experimenteller Aufbau, natürliche Kältemittel

II.2.01

Semi-physikalisches Modell für Hubkolbenkompressoren mit dem Fokus auf Fluidabhängigkeit.

Dennis Roskosch, Valerius Venzik, Burak Atakan

Lehrstuhl Thermodynamik, IVG, Universität-Duisburg-Essen; Duisburg/Deutschland
dennis.roskosch@uni-due.de

Im Bereich der Kompressionskältemaschinen und –wärmepumpen finden Hubkolbenkompressoren eine breite Anwendung und deren fluidabhängige Effizienz beeinflusst maßgeblich die Effizienz der Gesamtanlage sowie die Bewertung unterschiedlicher Fluide. Demnach ist für die Entwicklung effizienter Kompressoren hinsichtlich zukünftiger Fluide sowie für die Bestimmung optimaler Ersatzfluide für bestehende Anlagen im Rahmen einer Retrofit ein zuverlässiges Verdichtermodell unerlässlich. Ein solches Modell sollte isentrope Wirkungsgrade sowie Liefergrade in Abhängigkeit des Betriebspunktes und vor allem als Funktion des Arbeitsfluids berechnen und nur auf wenigen physikalisch fundierten Parametern beruhen.

Ausgehend vom letztjährigen Beitrag zum Thema Fluid Retrofit soll nun das in [1] bereits publizierte Verdichtermodell in detaillierter Form präsentiert werden. Hierbei handelt es sich um ein differentielles Modell, welches neben der reinen Zustandsänderung des Gases im Zylinder auch Reibung, Wärmeübertragung, ein Totvolumen sowie die Ventilströmungen berücksichtigt. Zur fluidabhängigen Charakterisierung der Ventilströmungen wurden auf Basis umfangreicher Messdaten für verschiedene Fluide empirische Korrelationen hergeleitet, welche die Strömungsverluste fluid- und zustandsabhängig bestimmen und auf andere Verdichter übertragbar sind. Schließlich beruht das Modell auf vier Geometrieparametern, die i.A. durch die Hersteller bekannt sind sowie auf nur zwei weiteren Parametern welche auf Messdaten verdichterabhängig angepasst werden müssen. Das Modell wurde an zwei Verdichtern mit umfangreichen Messdaten verschiedener Fluide (Isobutan, Propylen, Propan, R134a, R152a und Dimethylether) unter variablen Betriebsbedingungen validiert. Die Ergebnisse zeigen für den Verdichter, der gleichzeitig Teil der Modellbildung war, mittlere Abweichungen von 3 % für den isentropen Wirkungsgrad sowie 2,3 % für den Liefergrad, wobei die maximalen Abweichungen für beide Fälle unter 6 % sind. Für den zweiten Verdichter wurden die Modellparameter lediglich auf einem Betriebspunkt mit R134a angepasst. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell das Verdichterverhalten gut wiedergibt; die mittleren Fehler betragen 3,5 % für den isentropen Wirkungsgrad und 4,5 % für den Liefergrad.

II.2.02

Effiziente Abwärmenutzung durch Hochtemperaturwärmepumpe und ORC System basierend auf einer neu entwickelten Kolbenmaschine

Dr. Tim Hamacher*, Mattias Nilsson

Viking Heat Engines Germany GmbH, R&D, Walter-Freitag-Straße 1, 42899 Remscheid, Deutschland
tim.hamacher@vikingheatengines.com

Abwärmenutzung ist einer der Schlüssel zu einer erfolgreichen Energiewende. Dieser Beitrag zeigt zwei Möglichkeiten der Abwärmenutzung an Hand von Feld und Laborergebnissen auf Basis einer neu entwickelten Kolbenmaschine. Einerseits dient die Kolbenmaschine als Expander in der speziell für Niedertemperaturnutzung optimierten ORC (Organic Rankine Cycle) Anlage CraftEngine, andererseits zeigt sie ihre flexible Nutzung als Kompressor in der Hochtemperaturwärmepumpe HeatBooster, die in der Lage ist Prozesswärme auf einem bisher kommerziell mit Wärmepumpen nicht realisiertem Level von 160°C zu erzeugen.

Vorgestellt werden Ergebnisse aus dem Entwicklungslabor sowie Felddaten der CraftEngine, welche sich seit einigen Jahren im Markt befindet, die die sehr gute Effizienz bei gleichzeitig hoher Flexibilität bei der Verstromung von Abwärme zeigen. Selbst bei Wärmequellen deutlich unter 95°C werden netto Verstromungswirkungsgrade von >6% im Jahresmittel im Kundeneinsatz erzielt. Bei höheren Eingangstemperaturen sind Wirkungsgrade von bis zu 10% im Jahresmittel realisierbar.

Die Hochtemperaturwärmepumpe steht aktuell an der Schwelle zum Markteintritt und wird im Jahre 2018 in verschiedenen Industrieanwendungen ihr hohes Potential zeigen. Vorgestellt werden hier die umfangreichen Ergebnisse der Entwicklungsarbeit mit verschiedenen Kältemitteln (z.B. R1336mzz-(Z)) und erreichten Temperaturlifts von über 60K und COPs >4 bei 40K Temperaturlift.

Stichwörter:

Abwärmenutzung, ORC, Hochtemperatur Wärmepumpe, Industrie, Kolbenmaschine

II.2.03

Der Einfluss des Temperaturgleits auf die Leistungsdaten von Verflüssigungssätzen

Marcel Knipps^{1*}, Michael Arnemann²

¹Eberspächer Sütrak GmbH & Co. KG, Research & Development, Heinkelstraße 5,
71272 Renningen, Deutschland
marcel.knipps@gmail.com

²Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),
76133 Karlsruhe, Deutschland

Die Leistungsdaten von Verflüssigungssätzen werden für verschiedene Bedingungen angegeben, die in der Norm DIN EN 13215:2016 „Verflüssigungssätze für die Kälteanwendung - Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten des Herstellers“ definiert sind. Unter anderem wird die Verdampfungstemperatur vorgegeben. Als Referenztemperatur für die Verdampfung gilt in der Norm die Taupunkttemperatur. Bei Einstoffkältemitteln wird so die Temperatur über den gesamten isobaren Verdampfungsprozess definiert. Wird allerdings ein nicht-azeotropes Kältemittelgemisch in der Anlage verwendet, so beschreibt die Taupunkttemperatur nur die höchste Temperatur des Verdampfungsprozesses. Die thermodynamische Mitteltemperatur des Prozesses liegt somit unterhalb derjenigen in einer Anlage mit azeotropem Kältemittelgemisch oder Einstoffkältemittel.

Durch Simulationen wird untersucht, wie sich die Wahl der Referenztemperatur auf die Leistungsdaten von Verflüssigungssätzen mit nicht-azeotropen Kältemittelgemischen auswirkt. Aus dem Vergleich der Ergebnisse ergibt sich, dass die Kälteleistung eines Verflüssigungssatzes mit R455A bis zu 9 % und die Kälteleistungszahl bis zu 7 % größer ist, wenn die Verdampfungstemperatur durch die thermodynamische Mitteltemperatur, statt durch die Taupunkttemperatur definiert wird. Außerdem wird gezeigt, warum die arithmetische Mitteltemperatur nicht als Referenztemperatur verwendet werden sollte.

Stichwörter:

Energieeffizienz, Kältemittelgemische, Verflüssigungssatz, thermodynamische Mitteltemperatur

II.2.04

Kennfeld und Leistungsanalyse einer zweistufigen Turbokompressor-Brüdenverdichtung

Michael Bantle^{1*}, Christian Schlemminger¹, Marcel Ahrens¹, Kjetil Evenmo²

¹SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway

²Epcon Evaporation Technology, 7079 Flatåsen, Norwegen

Michael.Bantle@sintef.no

Die mechanische Brüden Verdichtung ist eine Spezialform der Wärmepumpentechnologie in welcher industrielle Prozesse Überschussdampf liefern, welcher dann als Kältemittel (R718) genutzt wird. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Wasserdampfes sind solche Anlage derzeit nur mit relativ großen Kapazitäten von mehrere Megawatt industriell rentabel. Die große Überhitzung des Brüdens während der Verdichtung stelle technisch hohe Herausforderungen an Schmiermittel und Kompressor.

Turbokompressoren sind eine Alternative zu herkömmlichen Stempel- oder Schraubenverdichter und könnten besonders bei kleinen Anlagengrößen (<1000 kW_{thermisch}) zur Brüden Kompression eingesetzt werden. Potentiell kann diese Technologie in Hochtemperatur-Wärmepumpen (über 100°C) zu Einsatz kommen, sowohl in offen als auch in geschlossenen Systemen. Hierbei kann die Energieeffizienz des Kernprozesses deutlich verbessert werden.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein zweistufiges Turbokompressor System zur Brüden Verdichtung basierend auf massenproduzierten Automotive Komponenten gebaut und analysiert. Die genutzten Turbokompressoren waren baugleich und konnten mit einer Drehzahl von bis 80.000 U/min getestet werden. Die erste Stufe erzielte hierbei ein Druckverhältnis von 1,95 und die zweite Stufe erzielte ein Druckverhältnis von 1,7.

Die Kondensationstemperatur des Brüdens nach der zweiten Stufe betrug 133°C was einem Temperatursprung von 33 Kelvin entspricht wenn das System bei atmosphärischen Dampftrockner, Destillations- oder Eindampfungsanlagen zum Einsatz kommt. Der Massenstrom des Brüdens betrug hierbei 500 – 650 kg/h, da das System für eine relative geringe Kapazität ausgelegt wurde. Die isentrope Effektivität der Turbokompressoren war deutlich über 70%, abhängig von den Betriebszuständen der Anlage. Die Kennfelder der zweistufigen Turbokompressoren wurden ermittelt und zeigen auf dass der Betriebszustand der zweiten Stufe mehreren Begrenzungen unterworfen ist.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass schmiermittelfreie Verdichtungsanlagen hohes Potential für Wärmepumpenanwendungen haben. Potentiell können Turbokompressoren damit eine kostengünstige Alternative zur herkömmlichen Brüdenkompression sein, da massenproduzierte und damit kostengünstige Komponenten aus der Fahrzeugindustrie verwendet werden können.

II.2.05

Leistungsüberwachung an Verdunstungskühlanlagen mit geschlossenem Kreislauf zur Detektion von Fouling

Björn Nienborg^{1*}, Subramanian Santhanam¹, Marc Mathieu², Alexander Schwärzler², Katharina Conzelmann², Lena Schnabel¹

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

²Dr. O. Hartmann GmbH & Co. KG, Uhlandstrasse 30, 71665 Vaihingen/Enz

Fouling ist in der Prozesstechnik ein dauerhaftes Problem und verursacht Schätzungen zufolge Kosten von 0.25% des Bruttosozialproduktes [1]. Auch Verdunstungskühlanlagen (VKA), wie sie in Kälteanlagen zum

Abführen der Kondensatorwärme an die Umgebung häufig eingesetzt werden, sind für Fouling anfällig: da sie mit unbehandelter Außenluft arbeiten, sind sie natürlichen (z.B. Pollen) als auch menschgemachten (z.B. Industriestaub) Verschmutzungen ausgesetzt. Für Anlagen mit offener Kreislaufführung gibt es zahlreiche Untersuchungen zu dem Thema und Lösungsansätze (z.B. fouling-reduzierende Füllkörper), um den Einfluss auf die Kühlturmpformance zu minimieren.

Dass Fouling auch bei VKA mit geschlossenem Kühlkreis auftritt ist ebenso bekannt. Jedoch sind hierzu kaum Messergebnisse, die den Einfluss quantifizierbar machen, verfügbar. Daher führt das Fraunhofer ISE eine Versuchsreihe durch, in der der Einfluss von Fouling auf die Übertragungsleistung von geschlossenen VKA bestimmt wird. Hierzu werden diese bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen und in verschiedenen Fouling-Zuständen vermessen.

Erste Erkenntnisse hierzu, sowie eine Bewertung ob und falls ja unter welchen Randbedingungen die Übertragungsleistung eine geeignete Größe zur Überwachung des Verschmutzungszustandes ist, werden in diesem Beitrag vorgestellt.

Stichwörter:

Fouling, Kühlturm, Verdunstungskühlanlage, Übertragungsleistung, Foulingwiderstand

II.2.06

Plattenwärmeübertrager für Flüssigeis

Vermessung und Analyse kommerziell verfügbarer Apparate

Christoph Steffan^{1*}, Johannes Schwarz^{1,2}, Mathias Safarik¹, Marcus Honke¹, Ulrich Hesse²

¹ Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
christoph.steffan@ilkdresden.de

² Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland

Mit zunehmendem Einsatz erneuerbarer Energien rückt im Bereich der Kältetechnik die Frage nach einer effizienten Energiespeicherung in den Vordergrund. Flüssigeis (engl. Ice Slurry) stellt aufgrund der nutzbaren Schmelzenthalpie und der daraus resultierenden, hohen spezifischen Wärmekapazität ein interessantes Speichermedium dar. Die Aufrechterhaltung der Pumpfähigkeit erlaubt gegenüber Blockeis den gleichzeitigen Einsatz als Kälteüberträger und bringt weitere Vorteile besonders im Bereich der Wärmeübertragung mit sich. Im Allgemeinen stellt der Einsatz von effizienten Plattenapparaten den Stand der Technik dar. Auch unter Beaufschlagung mit Flüssigeis wurden durch verschiedene Forschungsgruppen bereits Untersuchungen durchgeführt. Demgegenüber zeigt eine vom ILK Dresden durchgeführte Markt- und Literaturdatenanalyse bei der Auslegung, Gestaltung und insbesondere bei der prozesssicheren Betriebsführung eine Wissenslücke auf. Mit dem Ziel der Weiterentwicklung von Verfahren und Apparaten zur Erzeugung sowie zur Verteilung von Flüssigeis, wurde ein komplexes Versuchsfeld im Modellaßstab aufgebaut. Davon ausgehend wurden kommerziell verfügbare Plattenwärmeübertrager systematisch ausgewählt und experimentell vermessen. Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden mit bisherigen Literaturdaten verglichen und diskutiert.

Stichwörter:

Kälteüberträger, Kälteverteilernetze, Kältespeicherung, Thermische Speicher, Phasenwechselstoffe, Flüssigeis, Eisbrei, Plattenwärmeübertrager

II.2.07

Neue Generation von NH₃ Verdampfern mit niedrigen Kältemittelgehalten

S. FILIPPINI, U. MERLO

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

Industrielle Kältetechnik verwendet Ammoniak-Verdampfer für die wichtigsten Prozesse bei der Konservierung bzw. dem Einfrieren von Lebensmitteln. Dabei handelt es sich um großflächige Systeme, in denen es immer wichtiger wird, ein Produkt zu verwenden, das hohe Effizienz mit geringen Ammoniak Füllmengen kombiniert, um jegliche Risiken zu minimieren, die sich aus der Verwendung dieses Kältemittels ergeben.

Seit mehreren Jahren hat LU-VE seine LSA-Produktlinie für Gerätekühler mit sehr kleinem Rohrdurchmesser (nur 1/2") vorgeschlagen; Dieser Bereich im Vergleich zur herkömmlichen Lösung (Rohrdurchmesser 5/8") hat ungefähr 30% weniger Rohrvolumen.

Die LSA-Produktlinie wurde kürzlich erneuert. Dank neuer Konzepte der Kältemittelverteilung ist es nun möglich, die Stoffmenge noch weiter zu reduzieren. In der Tat, die überarbeitete Schaltung ermöglicht den Betrieb mit einer sehr begrenzten Anzahl von Rezirkulationen, von 3-4 auf Werte so niedrig wie 1,5.

Eine Rezirkulationsrate von 1,5 bedeutet, dass die Kältemittelmenge des Verdampfers nur 1,5 mal größer sein muss als die effektiv verdunstete Menge, mit einer großen Reduzierung des Ammoniak-Volumens im Wärmetauscher und damit innerhalb der gesamten Anlage.

Der Artikel beschreibt die neue Konfiguration des Produkts und die experimentell durchgeführten Aktivitäten, um die Leistung zu optimieren.

Schlüsselwörter: Ammoniak, geringe Kältemittelgehalte, NH₃, Verdampfer, Wärmetauscher

II.2.08

Einsatz von NH₃ DX Systemen für energieeffiziente und zukunftssichere Anlagen

Stefan Jensen*

Scantec Refrigeration Technologies Pty. Ltd.
ssjensen@scantec.com.au

in Zusammenarbeit mit
thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund, Deutschland
eric.gerstenberger@thermofin.de

Der dramatische Preisanstieg von FKW Kältemitteln und die höheren Anforderungen an Energieeffizienz durch den Betreiber stellen die gesamte Kältebranche vor die Herausforderung, Alternativen zu erarbeiten.

Eine bisher eher seltene Lösung stellen dabei Anlagen dar, die mit Ammoniak Trockenexpansion Verdampfern arbeiten und auf eine minimale Füllmenge optimiert sind. Anhand von vierzehn real ausgeführten Anlagen, die im Zeitraum zwischen 2013 und 2018 gebaut wurden, sollen Machbarkeit, sowie Kosten- und gemessene Energieeffizienz dieser Lösung demonstriert werden. Die Regelung der Trockenexpansion wird hier detailliert beschrieben. Des Weiteren wird anhand allgemein gültiger Einflussgrößen eine Optimierung der Anlageneffizienz erläutert. Dabei stehen neben der Komponentenauswahl die Betriebscharakteristika (Regelung, Temperaturen) im Vordergrund. Zur Minimierung der Füllmenge wird neben der Anlagenplanung und Verdampferkonstruktion auf die innovative Abtautechnologie LOGAS eingegangen.

Als Anlagenbeispiele werden Installationen in Australien und China aufgeführt. Dabei handelt es sich um verschiedene Kühlhäuser, mehrere Anlagen für Fertigerichte sowie ein Lebensmittelverteilzentrum mit Gefrier-tunnel, Arbeitsräumen und einer NH₃ Klimaanlage.

Stichwörter: Ammoniak Low Charge, NH₃ DX, Anlagenbau, Energieeffizienz

II.2.09

Reinigung lamellierter Wärmeübertrager - Geeignete Reinigungsmittel und deren richtige Anwendung

Andreas Zürner*

Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Straße 2–6, 82256 Fürstfeldbruck, Deutschland
andreas.zuerner@guentner.com

Den drei großen Problemen, die mit verschmutzten lamellierten Wärmeübertragern einhergehen – Leistungsminderung, Korrosion und Verkeimung – kann nur wirksam mit einer regelmäßigen Reinigung begegnet werden. Die Möglichkeiten reichen dabei von einfachen trockenen Verfahren bis hin zu mehrstufigen nass-chemischen Prozessen und dem Einsatz speziell konstruierter Reinigungssysteme.

Die Verwendung von Reinigungsmitteln steht dabei vor allem bei Luftkühlern im Lebensmittelbereich im Fokus, betrifft aber im Falle besonders hartnäckiger Beläge auch außen-aufgestellte Verflüssiger und Rückkühler. Hersteller und Anlagenbauer sehen sich seitens der Kunden vielfach mit Fragen bzgl. geeigneter Reinigungsmittel konfrontiert. Angesichts der Vielzahl an Produkten am Markt und den meist komplexen chemischen Zusammensetzungen sind sie aber oft nicht in der Lage qualifizierte Auskünfte zu erteilen.

Zunächst lassen sich die verschiedenen Reiniger nach ihren pH-Werten klassifizieren. Es wird gezeigt, wie dies eine erste grobe Abschätzung der Materialverträglichkeit ermöglicht. Weiterhin wird dargelegt, wie aus den Datenblättern der Reiniger genauere Aussagen gewonnen werden können und wie wichtig die Beachtung der Anwendungshinweise des Reinigungsmittelherstellers ist, da die Materialkompatibilität sehr stark von Konzentration, Temperatur und der Einwirkungs-dauer der gebrauchsfertigen Reinigungslösung abhängt. Darüber hinaus werden zwei Faktoren näher beleuchtet, die häufig unterschätzt werden – das Nachspülen nach der eigentlichen Reinigung und die Häufigkeit der Reinigung. Letztendlich gilt es, die Materialien des Wärmeübertragers sowie das Reinigungsmittel und auch den Reinigungsprozess so aufeinander abzustimmen, dass die gewünschte Reinigungswirkung erzielt und der Wärmeübertrager dabei nicht beschädigt wird.

Stichwörter: Lamellierte Wärmeübertrager, Reinigung, Reinigungsmittel, Materialverträglichkeit

II.2.10

Vergrößerung der Speicherkapazität durch den Einsatz von heatStixx

Michael Kaiser, Klaus Rauch

pro KÜHLSOLE GmbH, Am Langen Graben 37, 52353 Düren, kaiser@prokuehlsole.de

klara energy systems gmbh, Riedweg 5, D-88326 Aulendorf, rauch@klaus-rauch.de

heatSixx sind mit Latentmaterial (PCM) gefüllte Kapseln, welche in Speicher eingebracht werden um die Kapazität zu vergrößern. Hierbei nutzt man die enorme Energiemenge die zum Phasenwechsel von fest auf flüssig benötigt wird.

Durch die Modifikation erhöht sich die Kapazität bei Kältespeichern um den Faktor 3-4 im Vergleich zu einem mit Frostschutz gefüllten Behälter. Wie gewohnt arbeitet das Gesamtsystem mit flüssigen Medien zum Energietransport.

Somit können Kältemaschinen effizienter betrieben werden, Wärmepumpen effizienter geführt, die Wärme aus der Abwärme von Kühlprozessen gespeichert und bei Bedarf genutzt und somit die Energiekosten deutlich reduziert werden. Der Platzbedarf für Speicher sinkt.

Michael Kaiser stellt die verschiedenen PCM vor. Unterschieden werden Materialien, Nutzttemperaturen, Materialeigenschaften bis hin zur NSF-Zertifizierung.

Klaus Rauch präsentiert die Anwendung der heatStixx in Kälte und Wärmespeichern und die Auswirkungen auf den Betrieb und die Speicherkapazität.

II.2.11

PCM Speicher in Kühlschränken für Demand Side Management

**Krönauer^{1*}, S. Hiebler¹, S. Pöllinger¹, P. Hoock¹,
F. Bailly², M. Laudahn², C. Weiss², A. Kleiner²**

¹ ZAE Bayern, Bereich Energiespeicherung, Thermische Energiespeicher, Walther Meissner Straße 6, 85748 Garching, Deutschland
andreas.kroenauer@zae-bayern.de

² BSH Hausgeräte GmbH, Produktbereich Kälte, Robert Bosch Straße 100, 89537 Giengen, Deutschland
frank.bailly@bshg.com

In Deutschland benötigen Kühlschränke in ca. 40 Mio. Haushalten etwa 24 GWh an elektrischer Energie pro Jahr. Im Projekt DiTES4Grid (Decentralised intelligent Thermal Energy Storage for Grid) werden Haushaltskältegeräte durch die Integration eines Latentwärmespeichers als elektrisch verschiebbare Last genutzt.

Erste ökonomische Betrachtungen zeigten einen leichten Vorteil gegenüber elektrischen Speichern bei moderaten Strompreisunterschieden zwischen schwacher und hoher Last im Netz.

Es wurden Kühl/Gefrierkombinationen aus der Serie mit Latentwärmespeichern basierend auf kommerziell erhältlichen eutektischen Salz-Wasser-Lösungen ausgerüstet. Der zyklische Speicherbetrieb stellt eine große Herausforderung für alle untersuchten Speichermaterialien (phase change materials; PCM) dar. Es wurden Versuche zur Kristallisationsgeschwindigkeit, zu Verdickungsmitteln, welche die Separation verhindern sollen, und mit unterschiedlichen Wärmeübertragern im Speicher durchgeführt.

Die angestrebte Leistung (150 W) und Speicherkapazität (0,6 kWh) des Latentwärmespeichers konnten erreicht werden. Jedoch gibt es noch Forschungsbedarf zur Separation und notwendigen Unterkühlung für eine ausreichende Kristallisationsgeschwindigkeit der Speichermaterialien.

II.2.12

EC-Ventilatoren im Nasskühlturm - Mit einem maßgeschneiderten Korrosionsschutz zum Erfolg

Martin Schulz

Sales Manager Refrigeration, ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Bachmühle 2, 74673 Mulfingen
info1@de.ebmpapst.com

Bei Rückkühlanwendungen spielen Nasskühltürme (offen oder geschlossen) eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Je nach Standort, Leistungsprofil, Wassertemperatur, ... kann ein Kühlturm die wirtschaftlichste und effizienteste Lösung darstellen. Und das obwohl sehr oft bei Kühltürmen immer noch auf AC-Ventilatoren mit einer in die Jahre gekommenen Strömungstechnik zurückgegriffen wird.

Während bei trockenen, adiabaten und hybriden Kühlern der technische Fortschritt mit EC-Motoren und aerodynamisch optimierten Ventilatoren voll zugeschlagen hat, kommen diese Technologien in Kühltürmen bisher fast nicht zum Einsatz. Dabei sind die Vorteile in Bezug auf Effizienz, Regelbarkeit, Überwachung, Verfügbarkeit, ... 1:1 auf Kühltürme übertragbar.

Einer der Hauptgründe sind die sehr harten Umgebungsbedingungen. 100% Luftfeuchtigkeit bei hohen Temperaturen und die Wasserbehandlung erfordern eine sehr robuste Ausführung.

In dem Vortrag wird aufgezeigt, wie mit entsprechenden Korrosionsschutzmaßnahmen EC-Ventilatoren für den Einsatz im Kühlturm ertüchtigt werden können und welche Vorteile sich daraus für die Anwendung ergeben.

Darüber hinaus wird an konkreten Umrüstungsbeispielen aufgezeigt, welches Energieeinsparpotential im Einsatz von EC-Ventilatoren in Kühltürmen steckt.

II.2.13

Vortex Flow Control for Transcritical R744 Ejector Systems

Jingwei ZHU ^(a), Stefan ELBEL ^(a, b*)

(a) Air Conditioning and Refrigeration Center, Department of Mechanical Science and Engineering,
University of Illinois at Urbana-Champaign, 1206 West Green Street, Urbana, IL 61801, USA

(b) Creative Thermal Solutions, Inc.,
2209 North Willow Road, Urbana, IL 61802, USA
elbel@illinois.edu

Expansion work recovery by two-phase ejector is known to be beneficial to vapor compression cycle performance. However, one of the biggest challenges with ejector systems is that the ejector cycle performance is sensitive to working condition changes which are common in most applications. Different working conditions require different ejector geometries to achieve maximum performance. Slightly different geometries may result in substantially different COPs under the same conditions. The ejector motive nozzle throat diameter (motive nozzle restrictiveness) is one of the key parameters that can significantly affect ejector cycle COP. This paper presents the experimental results of the application of a new two-phase nozzle restrictiveness control mechanism to a transcritical R744 ejector cycle. This new control mechanism, vortex control, utilizes an adjustable vortex at the nozzle inlet to control the nozzle restrictiveness on the two-phase flow without changing the physical dimensions of the nozzle geometry. The test results show that nozzle restrictiveness can be adjusted with this new mechanism. Under common working conditions, with vortex control the ejector motive inlet pressure can be varied from 8609 kPa to 9637 kPa for constant motive inlet temperature and total motive mass flow rate.

II.2.14

Umweltfreundliche, effiziente und sichere Chiller-Technologie

Ulrich Brinkmann

Johnson Controls Systems & Service GmbH, Abteilung HVACR, Westendhof 8, 45143 Essen
Ulrich.Brinkmann@jci.com

Der YORK® YZ Kaltwassersatz, der auf jahrzehntelangem, branchenführenden Know-how aufgebaut ist, stellt alles dar, was herkömmliche wassergekühlte Kaltwassersätze erfordern. Der wassergekühlte Flüssigkeitskühler mit magnetgelagertem Turboverdichter, ist die erste für höchsteffiziente Leistung konzipierte Kältemaschine, die mit R-1233zd(E) betrieben wird – einem nichtbrennbarem Kältemittel der nächsten Generation mit niedrigem globalem Erwärmungspotential (GWP = Global Warming Potential). In der Praxis bietet er überlegene Leistung, niedrigere Betriebskosten und eine neue Definition von Nachhaltigkeit.

II.2.15

Auswirkungen der neuen HFO Kältemittel auf neue Wasserkühlmaschinen im theoretischen und praktischen Vergleich.

Bastian Sauermann

TRANE Deutschland GmbH
Max-Planck-Ring 27
D-46049 Oberhausen
bastian.sauermann@trane.com

In einer kurzen Einleitung wird auf die neusten HFO Kältemittel in Hinsicht auf ihre Vor- und Nachteile hingewiesen. Welche Folgen hat die EU-F-Gas Verordnung die seit dem 01.01.2018 in Kraft getreten ist und wie wirkt sie sich auf die Verfügbarkeit und die Preise der etablierten Kältemittel aus.

Anhand von Beispielen wird untersucht, welche Einflüsse die HFO's auf die thermodynamischen, physikalischen und wirtschaftlichen Eigenschaften einer Kältemaschine im Vergleich zu R134a haben. Es wird erörtert welche sicherheitstechnischen und umweltrelevanten Anforderungen, gemäß DIN EN 378/2017, an Kältemaschinen und Wärmepumpen am Aufstellungsort gestellt werden. Wie sehen Einsatz- und Betriebsmöglichkeiten aus.

Seit nun mehr fast einem Jahr betreiben wir die neuen HFO's in unseren Kältemaschinen und berichten über erste Erfahrungen zum Betriebsverhalten, der Handhabung und der Zuverlässigkeit.

II.2.16

Ecodesign Chillers mit natürlichen Kältemitteln

Ángel Álvarez Pardiñas^{1*}, Armin Hafner¹,
Krzystof Banasiak²

¹Department of Energy and Process Engineering, NTNU, 7491 Trondheim, Norwegen,
angel.a.pardinas@ntnu.no

² SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegen

According to the Regulation implementing the European Directive 2009/125/EC, from the year 2018 chillers with a rated cooling capacity not exceeding 2 MW must fulfill a series of “ecodesign” requirements to be placed on the market and/or put into service. CO₂ as working fluids is, at least initially, not the best solution for air conditioning or chiller units due to its thermophysical properties. However, it is the purpose of this paper to demonstrate that CO₂ could be a suitable refrigerant in chillers when certain design changes are implemented to the system.

Simulations have shown that an improvement on the performance of chillers with CO₂ is obtained if ejectors are introduced in the CO₂ loop. Applying the available expansion work lifts the suction pressure of the compressors significantly. Experimental tests have been performed at operation conditions specified in the aforementioned ‘ecodesign’ regulation to demonstrate that CO₂ chiller systems can actually fulfilling the requirements. The detailed results are shown in the paper.

Stichwörter: R744 / CO₂ chiller, ejector; ecodesign

II.2.17

Perspektiven von HFKW-Alternativen in Europa

Dr. Felix Heydel*, Dr. David Behringer,

Öko-Recherche GmbH, Münchener Str. 23, 60329 Frankfurt am Main, Deutschland

felix.heydel@oekorecherche.de

david.behringer@oekorecherche.de

Vor dem Hintergrund der Zielsetzungen der EU F-Gase Verordnung, der vorgeschriebenen stufenweisen Reduktion des Verbrauchs teilfluorierter Kohlenwasserstoffe (HFKW) und stark steigender Preise für HFKW-Kältemittel, wird der Einsatz von Alternativen (ungesättigte HFKW und natürliche Kältemittel) immer dringender. Mit deren Verwendung sind Herausforderungen, wie hohe Kosten für Neuanschaffung oder Umrüstung von Anlagen, erforderliche Sicherheitsstandards, Verfügbarkeit von technischem Know-how und geeigneten Komponenten verbunden. In diesem Zusammenhang stellt sich die wichtige Frage nach zukünftig zu erwartenden Tendenzen von HFKW-Alternativen auf dem europäischen Kältemittelmarkt.

Mit Hilfe eines Simulationsmodells soll abgeschätzt werden, welche HFKW-Alternativstoffe und -technologien sich in den einzelnen Sektoren durchsetzen werden. Darüber hinaus soll es Abschätzungen über Tendenzen und Verwendungsmengen auf dem Kältemittelmarkt in der EU bis zum Jahre 2030 und 2050 ermöglichen. Ein bereits für die Neuauflage der aktuellen EU F-Gase-Verordnung erstelltes Simulationsmodell wird derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes zum Zweck der Projektion zukünftiger Verwendungsmengen von Ersatzstoffen angepasst und verwendet.

Der Vortrag wird zunächst anhand einer Darstellung der relevanten Sektoren und zukünftiger Marktdurchdringungsraten von Ersatzstoffen die grundlegenden Annahmen des Simulationsmodells erläutern. Im Anschluss sollen die Ergebnisse der Projektionen präsentiert und die zugrundeliegenden Annahmen im Rahmen einer Diskussionsrunde evaluiert werden. Geleitet wird sie von Experten der Öko-Recherche, die über langjährige Erfahrung zur Abschätzung der Verwendung von halogenierten Stoffen verfügen. Bereits in der Vergangenheit wurden entsprechende Analysen im Auftrag der Europäischen Kommission und des Umweltbundesamtes durchgeführt, unter anderem für die Überarbeitung der bestehenden EU F-Gase-Verordnung.

Stichwörter:

HFKW-Alternativen, Marktdurchdringung, Projektionen

II.2.18

Wie brennbare Kältemittel die Kälte- und Klimatechnik verändern – ein Überblick

Stephen Spletzer, Joachim Gerstel

The Chemours Company USA, Wilmington (DE), USA, stephen.spletzer@chemours.com

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

Internationale und regionale Vorschriften, die auf die Bekämpfung des Klimawandels abzielen, treiben den Einsatz von Kältemittellösungen mit verringertem GWP-Wert in der Kälte- und Klimatechnik auch weiterhin voran. Einige dieser alternativen Kältemittel (z. B. HFO) sind jedoch brennbar. Daher hat die Kälte- und Klimatechnik den Markt in den vergangenen Jahren schrittweise auf diesen Wandel vorbereitet. Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick über die Veränderungen bei Vorschriften und gesetzlichen Regelungen sowie ihren Einfluss auf Richtlinien und Normen. Er beleuchtet Parameter zur Brennbarkeit sowie Sicherheitsklassen sowie Kriterien zur Auswahl von Kältemitteln und erforderliche Änderungen bei Wartungstools und -verfahren.

II.2.19

Potential natürlicher Kältemittel als Ersatzfluid in Wärmepumpen: Eine experimentelle Untersuchung

Valerius Venzik^{1*}, Dennis Roskosch¹ Burak Atakan¹

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

Aus ökonomischen und thermodynamischen Gründen, stehen natürliche Kältemittel und deren Gemische immer stärker im Fokus, um die gängigen Kältemittel (z.B. R134a) langfristig zu ersetzen. Basierend auf dem geringen Effizienzgewinn sowie einiger Nachteile (Wärmeübertragung, Konzentrationsverschiebung) von Fluidgemischen, werden auch in Zukunft Reinstoffe für Neuanlagen sowie für bestehende Anlagen als Ersatzfluide eine große Bedeutung haben. Neben einer Vielzahl von theoretischen Arbeiten, die meist nur auf einfachen thermodynamischen Modellen beruhen, existieren auch zahlreiche experimentelle Studien, die allerdings meist nur ein bis zwei der potentiellen zukünftigen Fluide betrachten. Aufgrund der unterschiedlichen Versuchsanlagen, ist eine direkte Vergleichbarkeit und eine globale Bewertung nur eingeschränkt möglich. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die Fluide Isobutan, Propan, Propen, Dimethylether (DME), 1,1 Difluorethan (R152a) sowie 1,1,1,2 Tetrafluorethan (R134a) als Referenzfluid in einer Wasser/ Wasser Kompressionswärmepumpe untersucht. Die Untersuchung der Fluide erfolgte hierbei unter Einhaltung anwendungsbezogener äußerer Randbedingungen (Temperaturniveaus der Wärmesenke bzw. Wärmequelle), wobei innere Prozessgrößen (Verdampfungstemperatur $T_L = 0-6\text{ °C}$, Verdichterdrehzahl $n = 1050\text{ min}^{-1}-2100\text{ min}^{-1}$) variiert wurden. Die Hauptbewertungskriterien sind die abgeführte Wärme und die Leistungszahl. Zur detaillierten Analyse werden außerdem Exergieverluste einzelner Komponenten sowie der Gütegrad herangezogen und gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die erreichten Leistungszahlen der Fluide stark unterschiedlich sind. Die Effizienz des Verdichters sowie eine möglichst große Kondensationsenthalpie sind maßgebende Faktoren für eine hohe Leistungszahl. Mit dem Hintergrund die Wärmesenke von 25 °C auf 35 °C zu erwärmen, wird die höchste Leistungszahl stets mit Propan erreicht (zwischen 4,5 und 3,22). Im direkten Vergleich mit R134a ist die Leistungszahl von Propan um 24 % höher, gleichzeitig ist die abgeführte Wärme um 40% gesteigert. Die geringsten Leistungszahlen werden mit Isobutan erreicht und variieren zwischen 3,66 und 2,8. Trotz der höheren Kondensationsenthalpie liegt die tatsächlich abgeführte Wärme allerdings unterhalb der von R134a.

Stichwörter:

Kompressionskältemaschine, Wasser/Wasser Wärmepumpe, natürliche Kältemittel

II.2.20

Warum fließen KAA Öle im Verdampfer unterhalb des Pourpoints?

Steffen Feja*, Christian Hanzelmann

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

steffen.feja@ilkdresden.de

Es ist allgemein bekannt, dass durch im Kältemaschinenöl eingelöstes Kältemittel die Viskosität gemindert wird. Dies bedeutet zum einen, dass die Viskosität der Mischung im Kompressor unterhalb einer Minimalviskosität fallen kann, was zu einer Minderschmierung führen würde, zum zweiten aber auch, dass das Öl an den kalten Kältekreislaufkomponenten wie beispielsweise dem Verdampfer fließfähig bleibt und somit zum Kompressor zurückgeführt werden kann. Eine Rückführung des Öles ist notwendig, da das Öl durch Öltropfenwurf, im Gas gelöst, aber auch durch Eigenverdampfung aus dem Kompressor in den Kreislauf gelangt. Sind nun Kältemittel und Kältemaschinenöl in gewissen Grenzen mischbar, dann wird diese Teillöslichkeit des Kältemittels bei der Auslegung des Kreislaufes und Beschreibung der Ölrückführung berücksichtigt und bewusst genutzt. Liegt jedoch ein nicht-mischbares System vor, muss das Öl vor der Verdampfung des Kältemittels in Ölabscheidern separiert werden. Diese Abscheidung ist jedoch nicht 100 %ig und somit gelangt Öl in den Verdampfer und kann dort als Tropfen oder Ölfilm festgestellt werden. Als ein Beispiel für die weit verbreitete Anwendung nicht-mischbarer Systeme gilt Ammoniak (R717) mit Kohlenwasserstoffölen (in DIN 51 503 als KAA Öle bezeichnet), aber auch CO₂ (R744) und einige polare synthetische Kältemittel ((H)FKW & HFO) weisen ausgedehnte Mischungslücken mit den unpolaren Kohlenwasserstoffölen auf, werden jedoch hier nur theoretisch behandelt.

Die spezifische Frage, welcher in der Präsentation nachgegangen wird, ist, wie weit eine Verschiebung des Pourpoints der reinen KAA Öle zu niedrigeren Temperaturen aufgrund von gelöstem Ammoniak bei den verschiedenen gängigen Ölsorten erfolgt. In der Präsentation wird eine These zur Pourpoint-Bestimmung anhand von Viskositätsmessungen erläutert und evaluiert. Die Ergebnisse des Tieftemperaturverhaltens der Ammoniak-Öl-Gemische werden dabei mit dem Tieftemperaturverhalten der reinen Öle verglichen und es wird auf den Pourpoint der Gemische geschlossen. Ausführliche grafische Darstellungen (Abb. 1) und Rechnungen zum Tieftemperaturfließverhalten werden dargestellt. Dadurch können Phänomene, welcher den Öltransport im Verdampfer betreffen, nun besser erklärt werden.

Stichwörter:

Kompressionskälte, Kältemaschinenöl, Kältefließigenschaften, Viskosität, Ammoniak (NH₃/R717), Tieftemperaturfließverhalten, Kohlendioxid (CO₂/R744), (H)FKW, HFO, Pourpoint

II.2.21

Numerische Simulation von Kältemittelleckagen mit OpenFOAM

Simon Braungardt^{1*}, Ahmed Shoeb¹, Christian Sonner¹, Lena Schnabel¹

¹Fraunhofer ISE, Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg, Deutschland

simon.braungardt@ise.fraunhofer.de

Leckagen in Kältekreisen mit der Klassen A2I, A2 und A3 können im Gehäuse einer Wärmepumpe oder Kältemaschine und im Aufstellungsraum des Geräts zur Bildung einer brennbaren Atmosphäre führen. Das Risiko kann durch geeignete Sicherheitsmaßnahmen verringert werden. Wichtig für die korrekte Auslegung der Sicherheitsmaßnahmen ist eine gute Kenntnis der Ausbreitung des ausströmenden Kältemittels. Um den

experimentellen Aufwand für Versuchsreihen zu minimieren kann dies durch eine CFD-Simulation abgebildet werden.

Hier wird ein Modell vorgestellt, mit dem im Open Source CFD Simulationstool OpenFoam die Ausbreitung von ausströmendem Kältemittel im Gehäuse und im umgebenden Raum simuliert wird und der Einfluss verschiedener Sicherheitsmaßnahmen bewertet werden kann. Beim Modell wurde versucht die Rechenzeit kurz zu halten. Dafür wurden ja nach betrachteter Fragestellung unterschiedliche vereinfachende Annahmen getroffen.

Beispielhaft werden Ergebnisse für ausströmendes R290 dargestellt.

Stichwörter: Brennbare Kältemittel, Sicherheitstechnik, CFD

II.2.22

Untersuchung von Kältemittelverdichtern und deren Rohrführung in Wärmepumpen im Sinne des struktur- und thermodynamischen Verhaltens

C. Dankwerth¹, Dr.-Ing. M. Kolouch², T. Oltersdorf^{1*}, C. Scheffler²

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE,
Freiburg, Baden-Württemberg, Deutschland
thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de

² Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,
Chemnitz, Sachsen, Deutschland
christian.scheffler@iwu.fraunhofer.de

Für die Entwicklung neuer Wärmepumpen- und Kälteanlagen ist die schnelle Verfügbarkeit der Charakteristik von Kältemittelverdichtern derzeit aufgrund der F-Gas-Verordnung von großer Bedeutung. Die bald flächendeckende Anwendung von frequenzgeregelten Verdichtern erhöht den Aufwand aber auch den Bedarf nach umfassender Kenntnis über die thermodynamischen und mechanischen Eigenschaften dieses Bauteils. Um diesen Ziel gerecht zu werden wurde ein Prüfstand entwickelt, der die thermodynamische Bewertung des Verdichters koppelt mit der strukturdynamischen Charakterisierung des Verdichters als Erreger selbst sowie der angeschlossenen Rohrführung. Auf diese Weise ist der Übergang von Modalanalyse bzw. Betriebsschwingungsanalyse im Anschluss an die energetische Bewertung fließend und unter realen Betriebsbedingungen mit geringem zeitlichen Aufwand möglich. Der Teststand wurde gemäß Verfahren D der EN 13771 ausgelegt. Eine große Herausforderung ist in diesem Sinne die Miniaturisierung notwendiger Messtechnik für Druck- und Temperaturmessungen, deren Einfluss auf das strukturdynamische Verhalten des Verdichters und der Rohrleitungen minimal ausfallen sollte.

II.2.23

Rechtliches, ökonomisches und technologisches Spannungsfeld der F-Gase Verordnung

Don't worry – be happy? – Chancen und Risiken aus praktischer Sicht der Betreiber und Anlagenbauer

Edgar Timm¹*, Thorsten Lerch²,

¹ ETSuS UG, Obere Stadt 13, 95326 Kulmbach, edgar.timm@etsus.de

² Bundesfachschule Kälte-Klima-Technik, Bruno-Dressler-Straße 14, 63477 Maintal, Lerch@bfs-kaelte-klima.de

Die Umsetzung der F-Gase Verordnung führt vor allem durch den, in der Branche unterschätzten Effekt der Verknappung und Verteuerung, zu erheblichem Handlungsdruck bei allen Stakeholdern in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik.

Es zeichnen sich Tendenzen bei den möglichen Low-GWP-Alternativen zu den herkömmlichen Kältemitteln ab. Ein Großteil dieser Alternativen ist hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften anders zu bewerten, als die etablierten Kältemittel.

Bei der Umsetzung möglicher Alternativlösungen in die Praxis wird deutlich, dass sowohl Anlagenbauer wie auch Betreiber nicht auf ein funktionierendes Geflecht aus Richtlinien und Normen auf der einen Seite und auf verfügbare und freigegebene Komponenten und Arbeitsmittel auf der anderen Seite zurückgreifen können. Dies führt zu einer Verunsicherung aller Beteiligten und einer Situation, in der die Rollen verschiedener Marktteilnehmer hinsichtlich ihrer Verantwortlichkeiten verschoben werden, wenn sie weiterhin den Markt erfolgreich bedienen wollen -rechtlich, technologisch und ökonomisch.

Der Vortrag fasst die aktuelle Situation aus Sicht der Autoren -neutral- zusammen und zeigt auf, welche Lösungsansätze erfolversprechend scheinen und wo noch Handlungsbedarf besteht.

Stichwörter:

F-Gase Verordnung, Alternative Kältemittel, Komponenten, Richtlinien, Anlagenbauer, Betreiber

III.01

Verflüssigungssätze und die Ökodesign-Produktverordnung 2015/1095/EU

Heinz Jürgensen

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen

Die Verordnung 2015/1095/EU gilt für Gewerbekältegeräte, Prozessflüssigkeitskühlsätze und Verflüssigungssätze für Kälteanwendungen. Für die Effizienzbewertung werden für die beiden letzteren eine Methode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl (SEPR) und dafür Mindestwerte eingeführt, deren zweite Stufe ab Juli 2018 gilt. Im Vergleich zu den Flüssigkeitskühlsätzen wird auf die aktuelle Kältemittelproblematik bei den Verflüssigungssätzen eingegangen. Die Überarbeitung der beiden Normen für Verflüssigungssätze für die Messung der Leistungsdaten EN13771-2 und deren Darstellung EN13215 wird beschrieben. Dabei geht es zunächst um Verringerung von Messunsicherheit und Toleranz und dann um die Berücksichtigung von Kältemitteln mit Temperaturleit.

III.02

Propen (R-1270) als Ersatzkältemittel für R-507A in industriellen Kälteanlagen

Anja Winzer*

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

Anja.Winzer@jci.com

Im Zuge des Phase Down Szenarios der europäischen F - Gase Verordnung ist gerade für Betreiber im industriellen Umfeld das Problem der Verfügbarkeit von R-507A mit hohem Ausfallrisiko für die davon abhängenden Produktionsprozesse verbunden. Die Anwendung von Alternativkältemitteln mit geringem Treibhauspotential, mindestens gleichwertiger bzw. verbesserter Energieeffizienz unter den gegebenen baulichen Voraussetzungen stellt Betreiber und Anlagenbauer vor große Herausforderungen. Für die prozesstechnisch erforderliche Kälteleistung von 70 kW bei Verdampfungstemperatur von $t_o = -45^{\circ}\text{C}$ stehen als Ersatzkältemittel für das bisher hier verwendete R-507A nicht viele Alternativkältemittel zur Verfügung, welche Sicherheit für eine langfristige Investition bietet.

So fiel die Entscheidung, unter den gegebenen örtlichen Randbedingungen, R-1270 Propen (Propylen) als Alternativkältemittel einzusetzen. Die bei brennbaren Alternativkältemitteln zu betrachtenden betrieblichen Sicherheitsvorkehrungen wurden vom Betreiber so geplant, dass die komplette Kälteanlage als Baugruppe für den Betrieb in einer Ex- Zone geeignet sein sollte.

Der Hersteller der Kälteanlage muss in diesem Fall für die gesamte Baugruppe die Anforderungen der EU – ATEX Produktrichtlinie erfüllen und hierfür ein spezielles Konformitätsbewertungsverfahren anwenden. So wurden gleichzeitig betriebliche Sicherheitsaspekte berücksichtigt und eine verbesserte Verfügbarkeit der Kälteanlage erreicht. Vorgestellt wird das Anlagenkonzept mit separatem Schraubenverdichter- und Apparatesatz, der zur Minimierung der Kältemittelfüllmenge mit Shell & Plate – Wärmeübertrager ausgestattet ist und die über extrem kurze Kältemittel- Leitungen miteinander verbunden sind. Aufgrund des örtlich beschränkten Platzangebotes wurde ein hoher Vorfertigungsgrad für die werkseitig hergestellten Teilanlagen-Sätze gewählt. Dadurch konnte die Anlage vor Ort in kürzester Zeit eingebracht, installiert und in Betrieb genommen werden.

Der Vortrag zeigt beispielhaft eine Lösung des Verfügbarkeitsproblems für R-507A durch Verwendung von Alternativkältemittel Propen R-1270 für Kälteanlagen im industriellen Umfeld auf.

HFO Refrigerants for Chiller Applications

Dr. Nacer Achaichia^(a), Stefan Schuessler^(b), Ahmed Ali^(c)

Honeywell Belgium N.V., Honeywell Deutschland GmbH, Honeywell International ME Ltd., Dubai

nacer.achaichia@honeywell.com

stefan.schuessler@honeywell.com

ahmed.ali@honeywell.com

Chiller development has undergone significant changes to meet the various regulations. The Montreal protocol calls for the phase out of ozone depleting substances. This resulted in a shift in Chiller refrigerants from CFCs to HCFCs to now HFCs, where currently R134a is the most widely used refrigerant in centrifugal chiller applications. The Kyoto protocol has also highlighted the issue of global warming. Refrigerants like HFCs are once more under scrutiny because of their radiative properties that make them potentially Global Warming agents. The F-gas regulation in Europe is in place, calling for a ban of High GWP refrigerants in certain applications, and a phase down of HFCs consumption based on their CO₂ equivalent.

Three new low GWP refrigerant molecules (R-1234yf, R-1234ze(E) and R-1233zd(E)) have been identified. These molecules are Hydro-Fluoro-Olefins (HFO) that have a very short atmospheric life times and have an extremely low global warming potential (GWP). Their merit as chiller refrigerant will be discussed and example of successful applications will be presented.

Keywords: HFO, Chiller, GWP.

Refrigerant choice for low and medium pressure chillers has been the subject of environmental considerations over the years. The most commonly used refrigerants in the 80s were R-11 and R-12 for Low and medium pressure centrifugal chillers respectively. Both these substances were phased out by the Montreal Protocol because of their ozone depleting characteristics. The 90s has seen an increased number of R-123 and R-134a based chillers. HCFCs like R-123 were seen as transition fluids by the Montreal protocol, while the HFCs were seen as a long-term solution. This resulted in an increased number of R-134a chillers being put on the market. R-134a has become now the most widely used refrigerant in centrifugal chillers. This shift was largely driven by environmental considerations.

HFCs are today under scrutiny by many politicians and regulatory bodies worldwide because of their radiative properties that make them potentially Global Warming agents. The F-gas regulation in Europe is in place since 2015, calling for a ban of High GWP refrigerants in certain applications, and a phase down of HFCs consumption based on their CO₂ equivalent. A reduction of 80% of HFC consumption based on CO₂ equivalent is expected by 2030 in Europe. Across the world similar calls for bans of HFCs in certain applications and a phase down is being heard. The Kigali agreement was signed in 2016 by 197 countries.

In addition to National regulations, Kigali amendment requires global HFC Phase Down.

Minimum Energy Performance Standards (MEPS) are being developed through the Eco-design in Europe. As they stand now, these requirements would ban more than 90% of the chillers from the market.

Recently developed low global warming molecules have been evaluated in low and medium pressure centrifugal chillers. Comparable performance to existing refrigerants can be achieved in applications investigated to date without significant hardware modification.

R-1234ze(E) is a leading alternative to replace R-134a in medium pressure centrifugal chillers, while results with R-1233zd(E) shows encouraging performances in low pressure applications to replace R-123.

Majority of chiller manufacturers have adopted these new fluids and the number of field installations is increasing. It is expected that with increasing pressure from the eco-design, more and more chillers will be offered with HFOs in order not only to use a low GWP fluid but essentially to have better performance and comply with the eco-design directive.

III.04

Neue Kältemittel – neue Möglichkeiten in der gewerblichen Tiefkühlung

Robert Baust

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

In der gewerblichen Tiefkühlung wurden bisher die bewährten und einfach handzuhabenden Kältemittel R404A bzw. R507 eingesetzt. Aufgrund des hohen GWP von fast 4000 sind diese Kältemittel in Zukunft nicht mehr einsetzbar. Möchte man weiterhin ein Kältemittel (KM) aus der Sicherheitsgruppe A1 (nicht brennbar, nicht giftig) einsetzen, stehen eine Reihe von Alternativen zur Verfügung. Neben anderen Nachteilen (Druckgastemperatur, Glide) beträgt der GWP dieser KM aber mindestens 1300.

Mit R513A steht seit einiger Zeit ein Nachfolger für R134a und Normalkühlung zur Verfügung. Ein Einsatz als TK Kältemittel war nicht vorgesehen. Neben der Absenkung des GWP von 1430 auf 631 hat sich eine weitere entscheidende Änderung gegenüber R134a ergeben. Der Verdampfungsdruck bei 0 bar fiel von -26,1 °C auf -29,5 °C.

Damit ist ein grundsätzlicher Einsatz in der TK möglich. Als Nachteil bleibt die gegenüber R404A geringe spezifische Kälteleistung und geringe Dichte des Sauggases. Als Folge muss der Verdichter und die Saugleitung entsprechend groß dimensioniert werden.

Anhand einer ausgeführten Anlage wird gezeigt, wie mit einfachen technischen Maßnahmen die Nachteile eliminiert wurden und der COP weit über das Niveau von R404A Standard-Anlagen gesteigert wurde. Außerdem kann die KM-Füllmenge reduziert werden.

Die Anlage läuft seit März 2018 zur Zufriedenheit des Betreibers und Anlagenbauers.

Mit den gemachten Erfahrungen kann R513A für den Einsatz im TK Bereich unter bestimmten Rahmenbedingungen empfohlen werden.

Mit dem niedrigen GWP von R513A und der reduzierten KM-Füllmenge ist TK jetzt mit einem A1 Kältemittel mit einem stark reduziertem CO₂ Äquivalent möglich.

III.05

Höhenklimakammer Prüfstand – Anforderungen an die Kältetechnik von der Konzeptionierung bis Inbetriebsetzung

Thomas Frank

ENGIE Deutschland GmbH, Mannheim
thomas.frank@de.ENGIE.com

In der Fahrzeugentwicklung werden neue Prototypen reproduzierbar auf viele Parameter wie extreme Temperaturen, Korrosion, Wechselbelastung, Feuchte, usw. getestet. Bei dem Projekt, das vorgestellt wird, handelt es sich um eine Kälteanlage für die Klimatisierung einer Höhenklimakammer mit einer Fahrzeugrolle und Fahrtwindgebläse. Die Leistungsparameter sind Kammertemperaturen von -30 °C bis +50 °, Feuchten von bis zu 70% und Höhen von -200 m (Talfahrt) bis +5000 m (Bergfahrt). Vom Planer war die Anlage mit dem Kältemittel R407F und mehreren unterschiedlichen Schraubenverdichtern für den Klimabetrieb und den Kaltbetrieb geplant. Durch unsere Beratung konnten wir den Kunden von einer wesentlich nachhaltigeren, effizienteren und kostengünstigeren Kälteanlage überzeugen, die im Vortrag im Einzelnen vorgestellt wird.

III.06

„Kriterien zur Auswahl einer Prozesskälteanlage aus Sicht eines Chemieanlagen-Betreibers“

Carsten Möbus, Manuel Budich

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

Bei der BASF SE in Ludwigshafen sind eine Vielzahl von Prozesskälteanlagen im Einsatz und werden neu geplant. Bei der Planung von Neuanlagen sowie bei Erneuerungsmaßnahmen werden durch die projektierenden Fachabteilungen die Anforderungen im Projektteam und mit dem zukünftigen Betreiber festgelegt. Dabei geht es nicht nur um Leistungsstufe, Temperaturniveau und Regelbarkeit. Je nach verfügbaren Energien und Medien und abhängig vom Aufstellungsort ergeben sich anlagenspezifische Vorgaben für die optimale Auslegung. Hierfür wurde ein Werkzeug zur ersten Auswahl und Bewertung von Alternativen erstellt.

Aufgrund von Anforderungen an Bedienbarkeit, Instandhaltung und Verfügbarkeit werden am BASF-Standort Ludwigshafen Festlegungen zu Ausführung und Fertigungsprüfung für bestimmte Komponenten wie Wärmetauscher, Armaturen und Mess- und Regeleinrichtungen getroffen. Bei der Wahl des Kältemittels hat das Kältemittel NH₃ bei BASF bedingt durch die Entwicklungsgeschichte des Unternehmens eine dominierende Rolle. Anhand aktueller Beispiele wird die Vorgehensweise der technischen Spezifikation erläutert.

Eine Zustandsüberwachung und Störungsfrüherkennung ist für Kälteanlagen von zunehmender Bedeutung. Ein globales Monitoring wurde für Großmaschinen bei BASF bereits etabliert und wird zukünftig auch bei anderen zentralen Prozesseinrichtungen eine Rolle spielen. Die Zusammenarbeit zwischen Maschinenherstellern und Betreibern ist eine Voraussetzung für die erfolgreiche Entwicklung der neuen Technologien.

Stichwörter:

Industriekälte, Energieeffizienz, Instandhaltung, natürliche Kältemittel, Zustandsüberwachung, Digitalisierung

III.07

New complete cooling solution for supermarkets

Mauro Segato, Embraco Europe, Turin, Italien

Uwe Semann, Böblingen

Embraco Plug n' Cool is a complete cooling solution focused on reach-ins for supermarkets, convenience stores and professional kitchens. Environmentally friendly using propane refrigerant, Low energy consumption thanks to variable capacity compressors (VCC).

III.08

“Assessment of the seasonal efficiency of different CO₂ booster architectures for different climate”

Eric Winandy*, Markus Lenz, Pascal Padberg, Manuel Gräber

Emerson Climate Technologies GmbH, Pascalstrasse 65, 52076 Aachen

CO₂ systems used in supermarket refrigeration applications have evolved a lot in the last 20 years: Starting from simple cycles, the journey to higher efficiency, lower cost and more reliable systems has come across a variety of different designs such as cascade systems, CO₂ flooded pumping systems eventually converging to booster systems. Within the booster category and in quest of improving system efficiency to be acceptable in warmer climate, some improvements have happened thanks to parallel compression and more recently ejector cycles as the most important ones.

As usual with new technologies, many numbers coming from equipment suppliers, field tests, etc are circulating and can give quite different messages when not conflicting.

In this paper, a simulation of these last two cycle variations, namely parallel compression and ejector, versus basic cycle has been undertaken. The main purpose is to be able to compare the benefits of the different cycles taking into account climate zone, supermarket characteristics like MT and LT loads and ratios, with a certain degree of complexity and accuracy and with clear assumptions.

This paper shows the results of this analysis. The first part of the paper presents the models based on Modelica language and the different working assumptions. The second part shows the results of each cycle and offers a comparison. The benefits of each cycle over the basic CO₂ are presented over climate zones mainly and discussed.

III.09

Untersuchungen zu wassergekühlten Kühlmöbeln in Kombination mit einer Kompressionskälteanlage mit Kältemittel Wasser

Florian Hanslik^{1*}, Jürgen Süß¹, Jürgen Köhler²

¹Efficient Energy GmbH, Hans-Riedl-Straße 5, 85622 Feldkirchen, Deutschland
florian.hanslik@efficient-energy.de

²Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland
juergen.koehler@tu-bs.de

Wassergekühlte Kühlmöbel finden in Supermärkten immer mehr Anwendung. Bei diesem Aufbau ist in jedes Kühlmöbel ein eigener Kältekreislauf integriert, welcher seine Abwärme über einen Wärmeübertrager an einen Wasser- bzw. Solekreislauf abgibt. Mittels eines weiteren Wärmeübertragers wird diese Abwärme an eine geeignete Wärmesenke abgegeben. Das ist im energetisch optimalen Fall die Nutzung als Wärmequelle für einen weiteren Prozess. Ist diese Möglichkeit nicht gegeben, wird die Abwärme über einen Rückkühler an die Umgebung abgegeben. Eine weitere Möglichkeit ist es, anstelle der direkten Abgabe der Abwärme an die Umgebung eine Kompressionskältemaschine zu installieren, welche die Temperatur im Wasserkreislauf auf einem konstanten Temperaturniveau hält.

In diesem Beitrag werden ein System mit direkter Wärmeabgabe an die Umgebung und eines mit zusätzlich installierter Kompressionskältemaschine rechnerisch verglichen und aus Versuchen gewonnene Messdaten gegenübergestellt. Die verwendeten Kältemittel sind Propan in den steckerfertigen Kühlmöbeln und Wasser in der Kompressionskältemaschine. Anhand der zur Verfügung stehenden Daten werden die energetisch sinnvollen Einsatzbereiche dargestellt.

Stichwörter:

Self-Contained-Unit, steckerfertige Kühlmöbel, Wasser als Kältemittel, Waterloop

III.10

Ölauswahl für die Fahrzeug-Klimaanlage – heute und morgen

Puhl, Christian*, Bock, Wolfgang

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

Rund 80 Millionen Neuwagen jährlich werden weltweit verkauft, und in praktisch allen sind Klimaanlage verbaut. In den neuen Aggregaten arbeitet dabei standardmäßig das fluorierte Kältemittel R1234yf. Doch 2017 wurden nach langjähriger Entwicklungsarbeit zum ersten Mal Daimler-Fahrzeuge mit CO₂ als Kältemittel ausgeliefert. Auch andere deutsche Autobauer sind zumindest in Projekten mit CO₂-Klimatechnologie aktiv und prüfen eine Einführung dieser Technik in ihren Fahrzeugen.

Auch die zunehmende Elektrifizierung stellt hohe Zusatz-Anforderungen an den Kühlkreislauf im Fahrzeug. Neben der Temperierung des Fahrgastraumes steht nun die Kühlung bzw. Heizung der Batterie im Vordergrund. Denn nur bei entsprechender Temperatur erzielt das Speichermedium seine höchste Leistungsfähigkeit - oder anders formuliert - bei ungünstigen Temperaturverhältnissen sinkt die Effizienz der Energiespeicherung und damit die Reichweite des Fahrzeugs drastisch.

Auch im Bereich der Schmierstoffe für die Klimaanlage gibt es verschiedene Ansätze. Dabei muss das jeweilige Kältemaschinenöl hohe Qualitätsanforderungen erfüllen. Die Wechselwirkungen zwischen Öl und Kältemittel, insbesondere bei den im Kreislauf herrschenden großen Temperaturunterschieden, sind vielfältig und müssen bei der Schmierstoffauswahl berücksichtigt werden.

Der Vortrag geht auf wichtige Anforderungen an Kältemaschinenöle im Kältekreislauf der Fahrzeugklimaanlage ein. Es werden relevante Auswahlkriterien für geeignete Kältemaschinenöle erläutert – jeweils spezifisch für Kältemittel und Verdichtertyp.

RENISO PAG 1234 und RENISO ACC HV - beides Spezialkältemaschinenöle auf PAG-Basis: das eine für R1234yf, das andere für CO₂ - werden in dem Beitrag vorgestellt. Dabei stehen anwendungstechnisch wichtige Eigenschaften wie z.B. Mischbarkeit mit dem jeweiligen Kältemittel, thermische Stabilität und Isolationseigenschaften im Fokus. Daneben werden mögliche Schmierstoffe für die E-Fahrzeugklimatisierung mit unterschiedlichen Kältemitteln behandelt.

III.11

Modellierung eines Vereisungs- und Abtauprozesses von mobilen Wärmepumpenverdampfern

Jochen Westhäuser^{12*}, Zhengjie You¹, Jan-Christoph Albrecht¹, Nicholas Lemke², Jürgen Köhler²

¹Volkswagen Konzernforschung, Energieeffizienz und Klimatisierung, Berliner Ring 2, 38440 Wolfsburg, Deutschland
jochen.westhaeuser@volkswagen.de

²Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland

In batterieelektrischen Fahrzeugen werden reversible Wärmepumpen zur energieeffizienten Beheizung des Fahrzeuginnenraums eingesetzt. Dabei fungiert der sog. Frontendwärmeübertrager (Mikrokanalwärmeübertrager) als Verdampfer und nimmt Wärme aus der Umgebung auf. Befindet sich die Oberflächentemperatur des Verdampfers unterhalb des Gefrierpunktes und unterschreitet die Außenluft beim Durchströmen des Wärmeübertragers ihren Taupunkt, desublimiert der Wasserdampf aus der Luft an der Oberfläche des Wärmeübertragers. Während des Vereisungsprozesses verringert sich die

Übertragungsfähigkeit und der luftseitige Druckverlust des Wärmeübertragers erhöht sich. Dadurch verringert sich die Gesamteffizienz der Wärmepumpe und für den Fall der zusätzlich benötigte Heizleistung muss ein elektrischer Zusatzheizer zugeschaltet werden. Ist keine ausreichende Wärmeaufnahme durch den Frontendwärmeübertrager mehr gewährleistet, wird dieser durch Prozessumkehr abgetaut, anschließend kann der Wärmepumpenbetrieb erneut beginnen.

Die Entwicklung einer optimierten Regelungsstrategie einer Fahrzeugwärmepumpe bedarf einem Modell der Vereisung und Abtauung eines Wärmeübertrager. In dieser Arbeit wird ein Modell zur Vorhersage des Frostwachstums vorgestellt, dadurch kann die thermische Leistung des Wärmeübertragers berechnet werden. Zudem wurde eine Korrelation zur Berechnung des luftseitigen Druckverlustes während des Vereisungsprozesses entwickelt. Das Modell wurde anhand experimentellen Messungen mit drei unterschiedlichen Wärmeübertragergeometrien (Lamellenabstand 2,0, 2,3 und 2,8 mm) validiert. Bei den Abtauuntersuchungen wurde festgestellt, dass das geschmolzene Wasser aus der Vereisung im Wärmeübertrager verbleibt und nicht aus dem Wärmeübertrager fließt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde das Modell um die Folgevereisung aus experimentellen Daten erweitert.

III.12

Untersuchung eines PCM-Verdampfer-Verbundes für eine Naturumlaufkühlung von Flugzeugsystemen

Björn Albertsen*, Gerhard Schmitz

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Thermodynamik, Denickestraße 17,
21073 Hamburg, Deutschland
bjoern.albertsen@tuhh.de

Im Bereich der zivilen Luftfahrt ist gegenwärtig die Entwicklung eines zunehmenden Anteils elektrischer Verbraucher in der bordinternen Energieversorgung von Flugzeugen zu beobachten. Die damit fortschreitende Reduzierung auf nur eine vom Triebwerk gespeiste Energiequelle hat ein effektiveres Gesamtsystem zum Ziel, wodurch sich schließlich eine Verminderung von Gewicht, Kosten sowie Umweltbelastungen erreichen lässt. Neben der Anpassung des Triebwerks und weiterer mechanischer, pneumatischer und hydraulischer Komponenten nimmt der Einsatz von Leistungselektronik zur Umwandlung und Regelung der elektrischen Energie hierbei eine Schlüsselrolle zur erfolgreichen Umsetzung ein. Die steigende Anzahl und Leistungsdichte der Module macht gleichermaßen eine Weiterentwicklung der Kühlsysteme erforderlich, was sich in zahlreichen Forschungsprojekten widerspiegelt. Auch hier kommt der Gewichtseinsparung eine zentrale Bedeutung zu. Für den Flugzeugbau unkonventionelle Technologien rücken dabei zunehmend in den Vordergrund, um die steigenden Anforderungen an die Kühlung zu erfüllen.

Im Rahmen des Projektes NAKULEK wird der kombinierte Einsatz zweier vielversprechender Technologien zur Kühlung von Leistungselektronik im Flugzeug untersucht. An Stelle eines konventionellen Kühl- oder Kältekreislaufs soll hierbei ein Naturumlaufsystem zum Einsatz kommen, bei dem das Fluid nur durch die auftretenden Dichteunterschiede zirkuliert und eine zusätzliche Pumpe entfällt. Insbesondere im zweiphasigen Betrieb kann so eine effiziente Kühlung bei niedriger Masse erzielt werden. Die grundsätzliche Eignung solcher Systeme für die Luftfahrt konnte bereits nachgewiesen werden. Ergänzend werden Phase Change Materials (PCM) als Latentwärmespeicher eingesetzt, welche die Aufnahme hoher Energiemengen bei geringen Temperaturdifferenzen erlauben. In Kombination mit einer Naturumlaufkühlung ergeben sich Vorteile beim Auftreten dynamischer Lasten oder kurzzeitig reduzierter Kältemittelmassenströme.

Am Institut wurde ein Teststand zur experimentellen Untersuchung eines solchen Systems errichtet. Zum Einsatz kommt hierbei das Niedrig-GWP-Kältemittel R1233zd. Zusätzlich werden Simulationsmodelle zur Abbildung eines PCM-Verdampfer-Verbundes als zentrales Bauteil erstellt.

III.13

Thermomodul - kompakter Kältemittelkreislauf zur Reichweitenverlängerung

Florian Wieschollek, Karl-Heinz Hassel

Rheinmetall Automotive AG, Neuss
Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com

Rheinmetall Automotive AG, Neckarsulm
Karl-Heinz.Hassel@de.rheinmetall.com

Die Aufgaben des Thermomanagements in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen sind komplexer als in herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Neben Heizen und Kühlen der Kabine bei gleichen Kundenanforderungen sind der elektrische Motor, der Hochvoltspeicher und die Leistungselektronik in technisch sinnvollen Temperaturbereichen zu halten.

Diese Heiz- und Kühlaufgaben in unterschiedlichen Temperaturniveaus führen zu komplexen Architekturen, die im Fahrzeugbaureaum untergebracht werden müssen. Gleichzeitig weisen die derzeit eingesetzten Hochvoltspeicher eine begrenzte Reichweite auf, die derzeit noch weit unter der Reichweite von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren liegt. Somit ist es wichtig, die benötigte Energie zum Heizen und Kühlen mit hohem Wirkungsgrad einzusetzen. Neben einem zweckmäßig abgestimmten AC-Kreislauf bietet der Einsatz einer Wärmepumpe die Möglichkeit, das Heizen effizient zu gestalten. Dadurch ist es möglich, bei gleicher Heizleistung mehr elektrische Leistung für den eigentlichen Fahrbetrieb zur Verfügung zu stellen.

Rheinmetall-Automotive ist zur Entwicklung des Kreislaufes für AC- und Wärmepumpenfunktion noch einen Schritt weitergegangen. Sämtliche Komponenten des Kältemittelkreislaufes wurden zu einem Subsystem zusammengefügt: dem Thermomodul. Dieses Modul ist ein mit den Arbeitsmedien vorbefüllter Kältekreislauf, der in den Wärmepumpen- und AC-Modus geschaltet werden kann. Das Modul kann als kompakte Einheit in den Fahrzeugbaureaum integriert werden. Schnittstelle zum Fahrzeug sind zwei Wärmeübertrager als Wärmequelle und -senke. Diese Wärmeübertrager werden fahrzeugseitig in den Glykolkreislauf eingebunden. Somit kann die weit verzweigte Architektur des Thermomanagement bei elektrischen Fahrzeugen auf Basis von Glykoleitungen und -wärmetauscher, Pumpen und Ventilen abgebildet werden.

In diesem Vortrag werden das Thermomodul und dessen Fahrzeugintegration vorgestellt. Leistung und Effizienz auf Basis von Prüfstandsmessungen und im Fahrzeug werden gezeigt.

Stichwörter:

Thermomodul, Thermomanagement, Wärmepumpe

III.14

R744-Ejektor-Wärmepumpe für elektrische Gelenkbusse

Prädiktive Betriebsstrategie und neuartige Wärmepumpen-Topologie für die Klimatisierung eines batterieelektrischen Gelenkbusses

Sebastian Meise, Christian Kaiser, Peter Engel, Nicholas Lemke, Jürgen Köhler

TLK-Thermo GmbH, Braunschweig, Germany,
TU Clausthal/Institut für Informatik, Goslar, Germany
s.meise@tlk-thermo.com

Im innerstädtischen Bereich werden zu Hauptverkehrszeiten vermehrt Gelenkbusse eingesetzt, um die stark erhöhte Personenbeförderungsleistung bewältigen zu können. In Zeiten geringerer Beförderungsleistung führt die stark reduzierte Auslastung zu einer vollständigen Änderung des Bedarfs an die Klimatisierungsleistung (Heizen, Kühlen und Entfeuchten) für den Businnenraum. Klimatisierungssysteme haben aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs einen starken Einfluss auf die Reichweite elektrischer Busse. Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es, für den Kälte- und Wärmepumpenkreislauf die optimale Topologie unter Berücksichtigung der stark wechselnden Bedarfssituationen zu ermitteln. Zusätzlich sollen prädiktive Betriebsstrategien aufgezeigt und hierdurch weitere Energieeinsparpotenziale identifiziert werden.

Es existieren weitere Ansätze, wie z.B. der parallele Einsatz modularer Kälteanlagen auf Basis von Pkw-Komponenten. In der vorliegenden Arbeit werden zwei R744-Wärmepumpenkreislauf-Topologien miteinander verglichen: Das erste System beschreibt eine zentrale Anlage, wie sie derzeit im Serieneinsatz zu finden ist. Dieses wird durch ein validiertes Kreislaufmodell abgebildet. Die zweite Anlage nutzt Ejektoren sowie eine neuartige Kreislauf-topologie, um eine effiziente zonale Klimatisierung zu realisieren. Beide Systeme werden für einen batterieelektrisch angetriebenen Gelenkbus über eine Gesamtsystemsimulation miteinander verglichen. Zudem werden prädiktive Betriebsstrategien beschrieben, um eine energieeffiziente und komfortorientierte Klimatisierung des Innenraums zu realisieren und simultan die temperaturbezogenen Betriebsbedingungen der elektrischen Systemkomponenten zu gewährleisten. Hierfür wird u.a. der Innenraum-CO₂-Wert als Regelgröße eingesetzt sowie ein Algorithmus mit Informationen über die Fluktuation der Beförderungsleistung angelernt und darauf aufbauend eine prädiktive Regelung abgeleitet. Der Topologie-Vergleich soll dabei Vor- und Nachteile beider Wärmepumpensystem sowie energetische Verbrauchseinsparpotenziale der prädiktiv geführten Betriebsstrategie aufzeigen. Weiterhin wird das prädiktiv geregelte R744-Ejektor-Wärmepumpensystem mit dem modularen Ansatz von Peteranderl et al. verglichen.

III.15

Multikriterielle Auslegungsoptimierung eines CO₂-Kältekreislaufs für ein Bahn-HLK-System

Christian Luger^{1*}, René Rieberer²

¹ Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG, Liebherrstraße 1, 2100 Korneuburg, Österreich
christian.luger@liebherr.com

² Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
rene.rieverer@tugraz.at

Im Auslegungsprozess eines Bahn-HLK-Systems ist es die Aufgabe geeignete Komponentenabmessungen und Prozessparameter so zu identifizieren, dass Auslegungsanforderungen (unter anderem eine bestimmte Kälteleistung an einem definierten Auslegungspunkt) erreicht und bestimmte Zielgrößen minimiert werden. Bei einem transkritischen R744 (CO₂)- Kältekreislauf umfassen zentrale Auslegungsparameter (Entscheidungsgrößen) die Größen des Verdichters, Verdampfers, Gaskühlers, Kühlerlüfters und des inneren Wärmeübertragers, sowie das Hochdruckniveau und den Kühlluft-Massenstrom. In Bezug auf Wettbewerbsfähigkeit, Integration und Betrieb stellen Investitionskosten, Masse, Volumen, elektrischer Leistungsbedarf und Geräuschemissionen des HLK-Systems wichtige Minimierungsziele dar.

Auf dieses Auslegungsproblem wird hier eine multikriterielle genetische Optimierung angewendet. Die zugrundeliegende Zielfunktion umfasst ein thermodynamisches Modell des Kältekreislaufs und eine komponentenspezifische Skalierung von Masse, Volumen und Kosten. Um eine ausreichend schnelle Berechnung auf einem Desktop-Computer zu ermöglichen, werden künstliche neuronale Netze (KNN) als Metamodelle eingesetzt. KNN dienen auch als Schnittstelle zwischen verschiedenen Berechnungswerkzeugen. Ergebnis der Optimierung ist eine Liste von Pareto-optimalen R744-Kältekreisläufen. Der HLK-Systemtechniker kann daraus Potentiale und Tendenzen erkennen und, je nach Kundenanforderungen, ein geeignetes Optimum auswählen. Zur Unterstützung des HLK-Systemingenieurs wurde mit „CYCAD“ ein neuartiges Softwarewerkzeug entwickelt, welches thermodynamische Simulation und Komponentenintegration in CAD zusammenführt.

Stichwörter:

Systemauslegung; transkritischer R744 Kreislauf; künstliche neuronale Netze; genetische Optimierung; Pareto Front; Verknüpfung Systemsimulation-CAD

III.16

Größerer Einsatzbereich für H-FKW-134a Alternativen dank vorteilhafter thermodynamischer Eigenschaften

Khaled Gomaa

Chemours Deutschland GmbH, Neu-Isenburg
khaled.gomaa1@chemours.com

H-FKW-134a wurde üblicherweise in Kälteanwendungen im mittleren bis hohen Temperaturbereich eingesetzt, z. B. in Kühlvitrienen, Kfz-Klimaanlagen, in der Gewerbekälte sowie auf der NK-Seite einer Kaskadenanlage in Kombination mit CO₂ für die Tiefkühlung. Neben den thermodynamischen Eigenschaften und dem GWP-Wert eines neuen Produkts muss auch immer der mögliche Einsatzbereich einer Betrachtung unterzogen werden. Opteon™ XP10 (R-513A) und Opteon™ XL10 (HFO-1234yf) wurden als optimale Alternativen zu H-FKW-134a entwickelt, mit der Option auf Erweiterung des Einsatzbereichs von lediglich Normal- auf Normal- bis Tiefkühlanwendungen. Dank der vorteilhaften thermodynamischen Eigenschaften dieser Alternativkältemittel sind neue Anlagendesigns möglich, die die spezifische Kälteleistung bei TK-Anwendungen im Vergleich zu H-FKW-134a verbessern können und einen gegenüber herkömmlichen Anlagendesigns um bis zu 35 % höheren COP ermöglichen.

III.17

Kombinierte Energieversorgung zur Senkung der Betriebskosten speziell für die Kunststoffindustrie

Dipl.-Ing. Sören Paulußen

CEO InvenSor GmbH, Niederlassung Berlin Gustav-Meyer-Allee 25, D-13355 Berlin
soeren.paulussen@invensor.de
karoline.mickan@invensor.de

Unternehmen mit energieintensiven Prozessen wie etwa in der Kunststoffverarbeitung haben nicht nur einen sehr hohen Stromverbrauch zu bewältigen, sondern brauchen für die Produktion auch erhebliche Mengen an Prozesswärme und Kälte. Hierfür bieten sich thermisch angetriebene Kältemaschinen besonders an – auch bekannt als Adsorptionskältemaschinen. Diese Kältemaschinen nutzen die überschüssige Abwärme von z.B. Blockheizkraftwerken (BHKWs), Druckluftkompressoren oder industriellen Prozessen zur Kühlung der Werkzeuge, Hallen und Serverräume. Strom wird dabei nicht benötigt. Gegenüber konventioneller Kälteerzeugung sparen die InvenSor Kältesysteme somit 70% Strom ein und ermöglichen so eine deutliche Reduzierung der Energiekosten und CO₂-Emissionen. Zudem ist das Kältemittel Wasser, was der Umwelt zu Gute kommt. In Kombination mit BHKWs bietet InvenSor komplette Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs(KWKK)-Systeme an, die den Unternehmen Strom, Wärme und Kälte gleichzeitig und ganzjährig zur Verfügung stellen. Bereits ab einer Antriebstemperatur von 65°C erreichen die Kältemaschinen ihre volle Leistung. Im Vortrag werden neben der Funktionsweise der Energielösung insbesondere die Wirtschaftlichkeit dargestellt, sowie Beispiele aus der Praxis anhand von realisierten Anlagen aus der Industrie mit Fokus auf die Kunststoffverarbeitung gezeigt.

Die Adsorptionskältemaschinen sind für einen Leistungsbereich von 30 bis 300 kW Kälte geeignet und verfügen zudem über einen wartungsfreien Kälteerzeuger, wodurch zusätzlich Wartungskosten eingespart werden.

III.18

Aufbau der zentralen Kaltwasserversorgung für eine Produktionsstätte von Kunststoffteilen inklusive der Gebäudeheizung,

praktizierte Ausführung einer Anlage mit grundsätzlicher allgemeiner Gültigkeit

Klaus Reisner

Ingenieurbüro für Kältetechnik, Reisner + Kettler GmbH, Harkortstraße 69 , 44225 Dortmund
post@reisner-ingbuero.de

Vorgetragen wird an einem Beispiel die komplette praktizierte Ausführung einer Anlage von der Leistungsberechnung bis zur fertigen Ausführung. Es ist die praktische Fortsetzung des Vortrages aus dem Vorjahr 2017 in Bremen, als über die Grundlagen dieses Themas gesprochen wurde.

Nun geht es um die praktische Ausführung eines kompletten Systems von der Dimensionierung bis zur Materialauswahl.

Anhand von tragfähigen, berechenbaren Kennzahlen und ausgeführten Fließbildern lässt sich eine zentrale Kaltwasserversorgung für Spritzereien leicht entwerfen, verknüpft mit der Beheizung des Gebäudes.

Mit entsprechendem Erfahrungshintergrund werden anhand eines durchgeführten Beispiels einer solchen Fabrikation, die einzelnen Verfahren beschrieben, ein Verfahrensschema wird entwickelt/ vorgestellt.

Betrachtet werden: Kälteleistung, Wärmeleistung, Kaltwasserkonditionierung, Raumklima, Rohrleitungen, Pumpenanlagen.

Besonders betrachtet wird der wirtschaftliche Betrieb des Systems, verbunden mit der Nutzung der Abwärme.

III.19

Zusammenspiel einer CO₂-Kälteanlage mit Eisspeicher und Photovoltaik

Erik Wiedenmann^{1*}, Jonas Schönenberger¹

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

Erneuerbare Energie kommt in der Regel mit der Begleiterscheinung, dass es Zeiten gibt an denen mehr Energie zur Verfügung steht als Bedarf ansteht und, dass es Zeiten gibt an denen weniger oder gar keine Energie zur Verfügung steht, jedoch Bedarf vorhanden wäre.

Eine renommierte Supermarktkette in der Schweiz eröffnet im Herbst 2018 eine neue Verkaufsstelle. In dieser Verkaufsstelle wird auf dem Dach und an der Fassade eine Photovoltaikanlage (PV-Anlage), zur Bewirtschaftung des Gebäudes mit elektrischer Energie, gebaut. Da die Energie aus der PV-Anlage nur tagsüber

und nicht immer in ausreichender Menge zur Verfügung steht, ist zusätzliche Energie aus dem Stromnetz notwendig. Um dennoch auch bei geringer Sonneneinstrahlung den Grossteil des Energiebedarfs durch die PV-Anlage zu decken, ist diese grosszügig dimensioniert. Dies hat zur Folge, dass bei maximaler Sonneneinstrahlung die zur Verfügung stehende Energie den Eigenbedarf des Gebäudes überwiegt. In der Regel wird dieses Mehr an Energie gegen eine Vergütung ins Stromnetz eingespeist. Ziel dieses Projektes ist es, diesen Überschuss aus der PV-Anlage zu speichern. Bei einem Defizit der Energie aus der PV-Anlage und dem Bedarf des Gebäudes kann die gespeicherte Energie genutzt werden um den Energiebezug aus dem Stromnetz so gering wie möglich zu halten.

Aufgrund der Tatsache, dass in einem Supermarkt die Kälteanlage bereits vorhanden ist und einen grossen Anteil des Energiebedarfs ausmacht, wurde der Ansatz gewählt den Überschuss an elektrischer Energie in einem Eisspeicher zu speichern und direkt systemintern in der Kälteanlage wieder zu verwenden. Zu Zeiten in denen die PV-Anlage einen Überschuss liefert, soll daher die CO₂ Kälteanlage genutzt werden um einen Eisspeicher zu kühlen. Zu Zeiten in denen die PV-Anlage zu wenig Energie liefert um den Eigenbedarf im Gebäude zu decken, soll der Speicher systemintern genutzt werden um den Bedarf an elektrischer Energie der Kälteanlage zu reduzieren. Im Gegensatz zu bisherigen Projekten mit Eisspeichern soll der Eisspeicher nicht die Kühlstellen bedienen sondern den Kühlprozess unterstützen.

Mit dem Projekt soll gezeigt werden, wie ein Eisspeicher im Zusammenspiel mit einer PV-Anlage nutzbringend in eine Kälteanlage eingebunden werden können. Erste Erkenntnisse von der Inbetriebnahme werden diskutiert.

III.20

Verdampfungsgekühltes Drehwerkzeug mit einstellbarer Zerspanntemperatur

Tobias KNIPPING^{1*}, Michael ARNEMANN²

¹ MAS GmbH,
71229 Leonberg, Deutschland
to.knipping@mas-tools.de

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

Stand der Technik ist, dass die Temperatur am Zerspanwerkzeug eine abhängige Variable aus den Parametern Werkstoffpaarung Werkstoff – Schneidstoff, Zeitspanvolumen und Kühlmedium ist. Eine Einstellung der Temperatur an der Werkzeugschneide ist nach heutigem Stand nicht möglich.

Bei der MAS GmbH wird an neuartigen Kühlkonzepten für die Zerspannung geforscht. Hierzu wurde ein Spot-Verdampfer in den Halter eines mit einer cBN-Schneide (cBN = kubisches Bohrnitrid) besetzten Drehwerkzeuges eingebracht. Spot-Verdampfer sind kleine Hochleistungsverdampfer zur Kühlung von Wärmestromdichten bis 10^7 W m^{-2} . Über eine elektrische Heizung kann zusätzliche Wärmeenergie in das Drehwerkzeug eingebracht werden, um ein energetisches Gleichgewicht aus Zerspanleistung, Heizleistung und Kühlleistung herzustellen. Dadurch kann die Temperatur an der Schneide beeinflusst werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von energetisch kontrollierten Werkzeugen bei der Zerspanung der Werkstoffe NiCr19NbMo (Inconel 718) und gehärtetem 100Cr6. Es kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz energetisch kontrollierter Werkzeuge die Temperatur an der Schneide konstant gehalten werden kann. Darüber hinaus kann durch den Einsatz der Spot-Verdampfer die Temperatur der Schneide gesenkt und damit der Werkzeugverschleiß um 20 – 30 % reduziert werden.

Stichwörter:

Zerspanung, hohe Wärmestromdichte, Spot-Verdampfer, Verschleiß

III.21

Betriebsführungsstrategien zur Steigerung der elektrischen Energieeffizienz bei der thermischen Kälteerzeugung

Christopher Paitazoglou*, Walther Hüls Guido, Jan Albers, Stefan Petersen

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin

christopher.paitazoglou@tu-berlin.de

Der Einsatz thermisch angetriebener Kälteanlagen moderner Bauart bietet eine technische und wirtschaftliche Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz in Versorgungssystemen mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Das Forschungsprojekt „EnEff:Wärme - Feldtest Absorptionskältetechnik für Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssysteme“, kurz FAKS, umfasst 25 Absorptionskälteanlagen (AKA) in 16 Feldtestinstallationen. Die an der TU Berlin mit Partnern entwickelten Absorptionskälteanlagen werden in diesem Feldtest hinsichtlich des Optimierungspotentials für die Konstruktion, Systemintegration und Regelung untersucht. Das Verbundprojekt aus AGFW, BTGA, ILK, TU Dresden und der TU Berlin wird von Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert. Die Projektlaufzeit endet im August 2018.

Die eingesetzten Absorptionskälteanlagen werden mit einer modellbasierten Mehrgrößenregelung betrieben, bei der die Heiß- und Kühlwassereintrittstemperatur gleichzeitig so geregelt wird, dass nicht nur die geforderte Kälteleistung und die Kaltwassertemperatur eingehalten wird, sondern auch der Sollwert für die Heißwasseraustrittstemperatur. Die Rückwirkungen dieser geregelten Austrittstemperatur auf die KWK-Erzeugereinheiten und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Energieeffizienz im gesamten KWKK-System werden durch die TU Dresden untersucht.

In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Kälteerzeugungsanlage (KEA), zu deren Bilanzkreis sowohl die AKA als auch das Rückkühlwerk (RKW) und die Versorgungspumpen im Heiß-, Kühl- und Kaltwasserkreis zählen. Im Rahmen des Feldtestprojekts werden alle Energieverbräuche dieser Komponenten einzeln erfasst und analysiert. Der Kühlwasserkreis ist dabei von besonderem Interesse, da dieser (ungeregelt) für ca. 60 % bis 90 % des gesamten Elektroenergieverbrauchs der KEA verantwortlich ist. Die Betriebsführungsstrategien, die ab 2017 als Erweiterung der o.g. modellbasierten Regelung in einzelnen AKA des Feldtests eingesetzt wurden, ermöglichen eine dynamische Anpassung des Volumenstroms in den externen Kreisen der KEA und können somit zu einer Steigerung der Energieeffizienz bei der thermischen Kälteerzeugung führen. Erste Ergebnisse zu einer Volumenstromregelung im Kaltwasserkreis der KEA belegen, dass der Elektroenergieverbrauch der Kaltwasserpumpe um bis zu 80 % reduziert werden kann [4]. Das Monitoring der 16 Installationen zeigt aber auch, dass in der Regel mehr als 75 % des Elektroenergiebedarfs durch den Kühlwasserkreis und das RKW verursacht werden. Dieser Beitrag stellt die Einführung von zwei Betriebsführungsstrategien zur Volumenstrom- und/oder Temperaturregelung im Kühlwasserkreis funktionell vor. Hierzu werden erste Betriebsergebnisse zur elektrischen und thermischen Effizienz dargestellt und weitere Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb ausgewertet. Elektroenergieeinsparungen im Kühlwasserkreis in einer Höhe von bis zu 70 % konnten bereits nachgewiesen werden.

Stichwörter:

Absorptionskälteanlage, Wärmepumpe, Regelung, Energieeffizienz, variable Volumenströme

III.22

Optimierte Betriebsführung von Kühlwasserkreisläufen

M.Sc. Sebastian Haußer*, M.Sc. Stephan Volkmer,
Prof. Dr.-Ing Martin Becker, Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach
hausser@hochschule-bc.de

Die Effizienz von Kältemaschinen kann allgemein mit der Leistungszahl (COP-Coefficient of Performance) oder speziell mit der im Betrieb gemessenen Leistungszahl Total Coefficient of Performance (TCOP_I nach VDMA 24247-7 für Bilanzgrenze I) bewertet werden. Diese Effizienzkenngößen setzen die Kälteleistung ins Verhältnis zur von der Kältemaschine (Verdichter) aufgenommenen elektrischen Leistung. Wird die Bilanzgrenze eines wassergekühlten Kältesystems größer gefasst, also auch z.B. die elektrischen Leistungen der Komponenten im Kühlwasserkreis mitberücksichtigt, wird die Effizienzkenngöße auf die Bilanzgrenze II erweitert und als TCOP_{II} bezeichnet. Für einen energieeffizienten Betrieb der Gesamtanlage ist es nicht ausreichend nur einen möglichst hohen TCOP_I (Bilanzgrenze Kältemaschine) anzustreben, sondern es müssen z.B. auch die elektrischen Verbräuche von Rückkühlwerksventilator und Umwälzpumpe mitberücksichtigt werden. Um eine möglichst hohe Energieeffizienz innerhalb der Bilanzgrenze II zu erreichen, werden mit validierten Einzelmodellen Simulationsuntersuchungen zur optimierten gegenseitigen Abstimmung der Einzel-Regelkreise im Kühlwasserkreis (Pumpe, Ventilator, 3-Wege-Mischventil) durchgeführt. Ergänzend werden die Simulationsergebnisse des Systems durch experimentelle Untersuchungen an einer Laborkälteanlage der Hochschule Biberach überprüft. In diesem Beitrag werden auf Basis von Simulationsergebnissen und experimentellen Untersuchungen Ergebnisse für eine optimierte Betriebsführung des Kühlwasserkreislaufes bei Kälteanlagen vorgestellt und erläutert.

Stichwörter:

Energieeffizienz, Optimierung, TCOP, Modellbildung, Simulation, experimentelle Untersuchungen

III.23

Modell basierte Optimierung von Kälteversorgungssystemen

Jörg Bentz^{1*}, Christian Schweigler¹,
Thomas Hamacher²

¹ Hochschule München, Competence Center für effiziente Gebäude und Quartiere, Lothstr. 34, 80335 München
joerg.bentz@hm.edu

² Technische Universität München, Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme, Lichtenbergstr.
4a, 85748 Garching b. München

In Kälteversorgungssystemen werden mehrere komplexe Systemkomponenten im Verbund eingesetzt. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Freiheitsgraden hinsichtlich der Betriebsweise dieser Systeme. Ein typischer Anwendungsfall findet sich z.B. beim Betrieb von Kältemaschinen in Verbindung mit Rückkühlwerken und deren Versorgungspumpen. Für die Betriebsoptimierung dieser Systeme können je nach Komplexität und Art der Zielstellung unterschiedliche Optimierungsprozeduren angewendet werden. Dabei ist die Betriebscharakteristik aller Komponenten in ausreichender Güte modellhaft abzubilden. Insgesamt besteht somit ein erheblicher Aufwand für den Aufbau und die Anwendung einer mathematischen Betriebsoptimierung. Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Methode aufgezeigt, die Anwendung von Optimierungsverfahren auch für kleinere Kälteversorgungssysteme verfügbar zu machen. Es werden Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Modellgenauigkeit für die verschiedenen Systemkomponenten entwickelt. Dabei können eine exakte physikalische Beschreibung oder unterschiedliche vereinfachte empirische Ansätze verwendet oder ggf. kombiniert werden. Durch Anwendung der Komponentenmodelle in Verbindung mit geeigneten Optimierungsalgorithmen soll ermittelt werden, welche Modellgenauigkeit

erforderlich ist, um eine verlässliche Aussage über die optimalen Betriebseinstellungen des Kältesystems treffen zu können. Weiter soll Aufgrund der hohen Variantenvielfalt der Kälteversorgungssysteme ein modularer Aufbau der Modelle entwickelt werden. Hier soll es möglich sein, ein individuelles Systemmodell mit wenig Aufwand zu erstellen und geeignete gemischt-ganzzahlige Optimierungsalgorithmen anzuwenden.

Stichwörter:

Betriebsoptimierung, Modellierung von Kälteversorgungssystemen

IV.01

Anwendungen und Potentiale einer IoT-Cloudintegration von Kälte- und klimatechnischen Anlagen

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Johannes Fütterer, Erik Brümmendorf, M.Sc., Dr. rer. nat. Dipl.-Inf. Jan Henrik Ziegeldorf

aedifion GmbH, Kupferstr. 14, 52070 Aachen
jfuetterer@aedifion.com

Dieser Beitrag diskutiert zunächst auf technischer Ebene Anforderungen und Lösungsansätze zur IoT-Cloudintegration von Kälte- und klimatechnischen Anlagen (kKA). Anschließend erörtert er Potentiale und Anwendungsmöglichkeiten geht auf Datenschutz und in der Datensicherheit im Kontext der DSGVO ein.

Unter einer vollständigen IoT-Cloudintegration versteht der Beitrag zum einen die hoch-performante, skalierbare und vollständige Verfügbarkeit aktueller und historischer Werte und Metainformationen sämtlicher physischer und virtueller Datenpunkte einer kKA. Zum anderen beinhaltet eine vollständige IoT-Cloudintegration die Möglichkeit über eine offene Schnittstelle alle schreibbaren Datenpunkte eines Gebäudeautomationssystems zu beeinflussen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so gilt im Sinne des Beitrags eine kKA als vollständig Cloud-integriert und damit als ein vollständiger Bestandteil des IoTs.

Der Betrieb, die Regelungstechnik, die Integration in das Energiesystem der Zukunft sowie die Nutzung von kKAs wird sich durch die Integration in das Internet der Dinge grundlegend ändern. Der Beitrag diskutiert dies in Bezug auf vier Themenbereiche:

- 1) Energiesystemanalyse, Betriebsoptimierung, und Inbetriebnahmemanagement:** Mächtige Auswertewerkzeuge zur Betriebsoptimierung und Prüfalgorithmen für kKAs werden einfach und skalierend anwendbar sein. Die Funktionsprüfung sowie Inbetriebnahme kann datenbasiert und automatisiert erfolgen.
- 2) Anwendungen rechenintensiver und informationsintensiver Regelungstechnik:** Wettervorhersage- und modellbasierte Regelungsalgorithmen mit hohen Anforderungen können mit vielfältigen zusätzlichen Informationen gespeist werden und in der Cloud unter Nutzung von skalierbaren Ressourcen berechnet werden.
- 3) kKAs als Flexibilität für das Energiesystem der Zukunft:** Durch Lastabwurf und Betriebsmodulation kann cloudbasiert ein aktives Demand-Side-Management erfolgen. Cloudbasiert gesteuerte kKAs können aggregiert werden und im Verbund als virtueller Großspeicher im Energiesystem der Zukunft dienen.
- 4) Zugänglichkeit für Funktionserweiterungen:** Durch standardisierte Lese- und Schreib-APIs kann die Funktionalität und die Wertschöpfungstiefe von kKAs inkrementell erweitert werden.

IV.02

Betriebsoptimierung durch Identifikation mit mobilen Endgeräten

Anders Berg^{1*}, Tobias Henzler², Osman Akyildiz³, Konstantinos Stergiaropoulos⁴

¹ Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
anders.berg@ige.uni-stuttgart.de

Die Raumebelegung in Gebäuden ändert sich ständig. Im Gebäudebetrieb weisen daher die Energieverbrauchswerte oftmals deutliche Unterschiede zu den im Vorfeld bestimmten Energiebedarfswerten auf. Die wachsende Verbreitung von mobilen Endgeräten ermöglicht es, die Anwesenheit in Räumen zu ermitteln. Diese Daten bieten die Möglichkeit einer verbesserten Analyse der Energieverbräuche einzelner Gebäudebereiche im Vergleich zu den Energiebedarfswerten aus der Planung.

Im vorgestellten Forschungsvorhaben wird eine Applikation zur Nutzeridentifikation entwickelt, die den Anforderungen des betrieblichen Datenschutzes entspricht. Dabei ist eine raumweise Identifikation des einzelnen Nutzers vorgesehen, die in Gebäuden mit geringem Aufwand installiert werden kann. Anhand mobiler Endgeräte (Smartphones, Tablets) wird die Belegung in den einzelnen Räumen ermittelt. Dabei wird eine Applikation auf dem mobilen Endgerät des Nutzers installiert. Die Applikation wird für einen Praxistest in einem Bürogebäude in Stuttgart eingebaut und untersucht. Die während des Praxistests aufgenommenen Belegungsprofile werden mit den Messdaten von bereits vorhandenen Präsenzmeldern und Profilen aus der

Literatur gegenübergestellt. Parallel dazu wird anhand gekoppelter Gebäude- und Anlagensimulationen der Einfluss der Belegung auf den Energiebedarf in Gebäuden aufgezeigt.

In diesem Beitrag werden die bisherigen Ergebnisse des Praxistests und der numerischen Untersuchungen vorgestellt. Insbesondere wird dabei auf die Anwendungspotenziale einer Applikation zur raumweisen Nutzeridentifikation für die Betriebsoptimierung in Gebäuden eingegangen.

Stichwörter: Betriebsoptimierung, Nutzeridentifikation, Raumbelegung, Energieeffizienz, TGA

IV.03

Intelligente Regelung von Wärmepumpen mit maschinellen Lernverfahren

O. Akyildiz^{1*}, K. Schmoranzer¹, K. Stergiaropoulos¹,

¹Universität Stuttgart, Institut für GebäudeEnergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart
osman.akyildiz@ige.uni-stuttgart.de

Ein Ziel der Effizienzsteigerung von Wärmepumpen sollte es sein, diese mit einer möglichst hohen Leistungszahl (COP) zu betreiben. Hierfür ist die Kenntnis des COP-Kennfeldes und der Lastanforderung notwendig. Obwohl Kompressionswärmepumpen ähnlichen thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen, ist das COP-Kennfeld einer im Betrieb befindlichen Wärmepumpe meistens nicht bekannt. Die im Prüfverfahren bestimmten COP's weichen im Betrieb von den gemessenen Werten ab, da hier andere Randbedingungen vorherrschen. Weiterhin ist die Vorhersage der Lastanforderung schwierig, da u.a. der Nutzer hier einen großen Einfluss hat. Die Belegung von Räumen ändert sich ständig - so stimmen die in der Planung bestimmten Belegungsprofile nicht mit der tatsächlichen Belegung überein. Würde es gelingen das Nutzer-, Gebäude- und Anlagenverhalten mathematisch-physikalisch zu beschreiben, können die genannten Probleme gelöst und eine vorausschauende effiziente Regelung ermöglicht werden. In diesem Vortrag wird ein Ansatz vorgestellt, der mit Hilfe eines Nutzeridentifikationssystems und maschinellen Lernverfahren, das Nutzer-, Gebäude- und Wärmepumpenverhalten erlernt, welches in einer modellprädiktiven Regelung zum Einsatz kommt. Das Potential der übergeordneten intelligenten Regelung wird am Beispiel eines Wohngebäudes mit einer Abluftwärmepumpe, anhand thermisch-energetischen Simulationen dargelegt. Die übergeordnete Regelung wird in der Art gestaltet, dass diese universell in realen Gebäuden zum Einsatz kommen kann, ohne die interne Regelung der Anlagentechnik zu verändern.

Keywords:

Thermisch-energetische Simulationen, Abluftwärmepumpe, Nutzeridentifikation, modellprädiktive Regelung, maschinelles Lernen

IV.04

Ein flexibles lebendes Labor für die Entwicklung und Erprobung von Cloud-basierten Regelungsalgorithmen für die Gebäudeautomation

Marc Baranski^{1*}, Thomas Schild¹, Markus Schraven¹, Florian Stinner¹, Dirk Müller¹, Johannes Fütterer²

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
mbaranski@eoner.rwth-aachen.de

² aedifion GmbH, Kupferstraße 14, 52070 Aachen

Gebäudeenergiesysteme werden in der heutigen Zeit aus sehr effizienten Komponenten aufgebaut, mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Energieträger ausgestattet und aufgrund der Interaktion vieler unterschiedlicher Erzeuger und Verbraucher immer komplexer. Durch die Verfügbarkeit von Cloud Services ergeben sich

Möglichkeiten, rechen- und speicherintensive Algorithmen zum Heben von Effizienzpotentialen durch modellbasierte und –freie prädiktive Regelungsansätze und automatisierte Fehlererkennung einzusetzen. Doch wie kann der Übergang hin zu einer cloudbasierten Regelung gelingen, wie gelingt der Methoden-Transfer in die Praxis und wie lassen sich unterschiedliche Konzepte vergleichen?

Dieser Beitrag zeigt anhand eines Neubaus die Möglichkeiten für den Einsatz verschiedener innovativer Technologie auf, die die Transformation hin zu einer Cloud-basierten Gebäudeautomation ermöglichen können. Der Neubau besteht aus zentral belüfteten Büros und einer Werkhalle und fungiert als lebendes Labor. Die technische Gebäudeausrüstung des Labors ist einerseits mit einer zentralen PC-basierten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgestattet. Diese repräsentiert eine lokale Lösung. Auf der Steuerung sind Betriebsmodi implementiert, die mithilfe eines strukturierten Verfahrens aus der Systemtopologie abgeleitet und unter Verwendung einer open-source Funktionsblockbibliothek konform zur Norm IEC 61131 programmiert wurden.

Auf der SPS ist auch ein Cloud-Modus implementiert, der zum Einsatz kommt, wenn das System Internetzugriff bekommt und somit eine Verschiebung des Regelalgorithmus in die Cloud möglich wird. Damit ergibt sich beispielsweise für Bestandsgebäude die Möglichkeit, das bestehende Automationssystem mit geringen Investitionen für eine Regelung aus der Cloud zu ertüchtigen.

Die lokale SPS kann jedoch auch durch dezentrale, teils funkbasierte Geräte mit eigenem Internetzugang und Regelung aus der Cloud ersetzt werden, um Anwendungen aus dem Bereich des Internet of Things (IoT) demonstrieren zu können. Um flexibel zwischen den Verfahren wechseln zu können, bleibt die Verkabelung mit der zentralen SPS jedoch bestehen und es geschieht eine dezentrale Umschaltung zwischen den analogen Signalen an jedem Sensor und Aktor: im lokalen Experiment empfängt ein Aktor also beispielsweise ein Spannungssignal von der zentralen SPS, während er im Cloud- bzw. IoT-Experiment dieses vom IoT Gerät erhält.

Im Beitrag werden neben der Präsentation des lebenden Labors und der Erfahrungen aus der Errichtung erste Messergebnisse gezeigt und ein Ausblick auf die Möglichkeiten moderner Verfahren der Regelungs- und der Informationstechnik sowie deren Anforderungen gegeben.

Stichwörter: Klimatechnik, Cloudcomputing, Internet of Things, Gebäudeautomation, Experiment

IV.05

Hochtemperatur Wärmepumpe mit HFO und HCFO Kältemitteln – Systemdesign, Simulation und erste experimentelle Ergebnisse

Cordin Arpagaus^{1*}, Manuel Prinzing¹, Frédéric Bless¹, Michael Uhlmann¹, Elias Büchel¹, Stefan Frei¹, Jürg Schiffmann², Stefan S. Bertsch¹

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

² Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratory for Applied Mechanical Design, Rue de la Maladière 71b, 2002 Neuchâtel, Schweiz

Hochtemperatur Wärmepumpen (HTWP) mit Vorlauftemperaturen im Bereich von 100 bis 160 °C werden in den kommenden Jahren zunehmend kommerzialisiert. Wichtige Anwendungen sind identifiziert, insbesondere in der Lebensmittel-, Papier-, Metall- und Chemieindustrie, speziell für Prozesse wie Trocknung, Sterilisation, und Verdampfung. Mit Verschärfung der F-Gas-Verordnung dürfen in der nächsten Zukunft nur noch Kältemittel mit niedrigem GWP eingesetzt werden. Ersatzkältemittel für die derzeit verwendeten Fluorkohlenwasserstoffe R245fa und R365mfc werden erforscht.

Der Forschungsbedarf auf dem Gebiet der HTWP besteht insbesondere darin, den Wirkungsgrad und die Vorlauftemperatur bei Verwendung von umweltfreundlichen Kältemitteln zu erhöhen. Natürliche Kältemittel wie Wasser (R718) oder Kohlenwasserstoffe (z.B. R601 oder R600) sind vielversprechende Kandidaten. Diese erfordern jedoch spezielle Wärmepumpen-Kreislaufkonzepte mit mehrstufiger Verdichtung oder ausgeklügelte Sicherheitsmaßnahmen aufgrund der Brennbarkeit, was die Kosten erhöhen kann.

Verschiedene Hydrofluorolefine (HFOs) und Hydrochlorfluorolefine (HCFOs) wurden in jüngster Zeit entwickelt, welche sehr niedrige GWPs aufweisen, nicht brennbar sind und ein Potenzial für den Einsatz bei hohen Temperaturen ermöglichen. Die thermodynamischen Eigenschaften dieser synthetischen Kältemittel erlauben einen effizienten unterkritischen Wärmepumpenbetrieb bei Kondensationstemperaturen bis zu 160 °C.

Diese Studie untersucht die HFOs R1336mzz(Z) und R1234ze(Z), sowie die HCFOs R1233zd(E) und R1224yd(Z) und vergleicht die Leistungszahl und die volumetrische Heizleistung mit den Kältemitteln R365mfc und R245fa bei unterschiedlichen Kondensationstemperaturen und Temperaturhuben.

Auf der Grundlage von Simulationen und Literaturergebnissen wurde eine einstufige HTWP mit internem Wärmetauscher (IHX) entwickelt und aufgebaut. Mit dieser Laboranlage können verschiedene Kältemittel bei einer Heizleistung von ca. 5 bis 10 kW getestet werden. Dabei können bei Quellentemperaturen von 40 bis 80 °C Vorlauftemperaturen von 80 bis 150 °C erreicht werden. Das System arbeitet mit einem drehzahlvariablen Hubkolbenverdichter und besteht aus kommerziell verfügbaren Standardkomponenten. Der stufenlos zuschaltbare IHX gewährleistet eine ausreichende Überhitzung und dient zur Effizienzerhöhung.

Das Systemdesign, die theoretischen Simulationen und die ersten experimentellen Testergebnisse mit den Kältemitteln R1233zd(E) und R1336mzz(Z) werden vorgestellt.

Stichwörter:

Hochtemperatur Wärmepumpe, HFO, HCFO, Kältemittel, niedrige GWP, Wirkungsgrad, COP

IV.06

Design und experimentelle Resultate einer Hochtemperatur Propan-Butan Wärmepumpe

Michael Bantle^{1*}, Christian Schlemminger¹

¹SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway
Michael.Bantle@sintef.no

Thermische Prozesse in der Nahrungsmittelindustrie sind oftmals eine Kombination aus Erwärmung und Abkühlen eines Produktes. Prozesskühlung wird dabei meistens mittels einer Wärmepumpe erzielt während für die Prozesswärme oftmals eine fossile Energiequelle genutzt wird. Kombinierte Wärmepumpensysteme, die sowohl Prozesskühlung als auch Prozesswärme liefern, haben ein hohes Marktpotential, gerade auch vor dem Hintergrund des Pariser Klimavertrags.

Im vorliegenden Fall wurde eine Propan-Butan Wärmepumpe entwickelt welche an der Wärmequelle Prozesskühlung in der Form Wasser mit einer Temperatur von -1°C liefert und an der Wärmesenke Heißwasser mit 115°C bereitstellt. Hierfür wurden bewusst zwei natürliche Kältemittel eingesetzt um zukünftige Beschränkungen und Herausforderungen mit synthetischen Kältemitteln zu umgehen.

Basierend auf den genannten Anforderungen wurde eine 20 kW Demonstrationsanlage projektiert, gebaut und unter variierenden Betriebsbedingungen getestet. Für den Propan Teilzyklus wurden ausschließlich Standardkomponenten eingesetzt, während für den Butan Hochtemperaturzyklus eine Modifikation des Kompressors erforderlich war.

In den durchgeführten Experimenten wurde die Leistungszahl der kombinierten Wärmepumpe mit 2.4 ermittelt, in welcher die wasserseitigen Wärmeverluste bereits mit berücksichtigt wurden. Dies bedeutet, dass für 1 kW elektrische Energie Prozesswärme von 1.7 kW bei 115°C geliefert wurde und gleichzeitig Prozesskühlung von 0.7 kW bei -1°C erzielt wurde. Die Carnot Effektivität der Demonstrationsanlage lag somit bei circa 55%. Das Energiesparpotenzial gegenüber einer herkömmlichen Prozesskühlung mit kombinierten Warmwasserboiler liegt bei 48%.

Die entwickelte Wärmepumpenlösung kann auch dazu genutzt werden existierende Kälteanlagen nachzurüsten bei denen die Wärmesenke derzeit nicht genutzt wird. Dies würde es beispielsweise ermöglichen die Überschussenergie von Gefrieranlagen zur Produktion von Heißwasser zu nutzen.

IV.07

Design zweier Wärmepumpen-Demoanlagen für die industrielle Trocknung

Veronika Wilk^{1*}, Michael Lauermann¹, Franz Helminger¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Sustainable Thermal Energy Systems, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich
veronika.wilk@ait.ac.at

Wärmepumpen können einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung industrieller Prozesse und zur Vermeidung von CO₂-Emissionen leisten und sollen daher in Zukunft verstärkt in der Industrie zur Anwendung kommen. Durch Wärmenutzungstemperaturen über 120°C erweitert sich das Anwendungsfeld für Wärmepumpen in der Industrie deutlich, daher sind Hochtemperatur-Wärmepumpen auch Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, die zum Teil bereits vor der Kommerzialisierung stehen.

In diesem Beitrag werden die Arbeiten zu zwei Wärmepumpen-Demoanlagen in realer industrieller Umgebung vorgestellt, die im Rahmen des H2020-Projektes DryFiciency entwickelt, gebaut und betrieben werden. AGRANA Stärke GmbH betreibt in Pischelsdorf einen Stärketrockner, in dem Stärkepartikel im heißen Luftstrom mit ca. 160°C getrocknet werden. Die Erhitzung der Luft erfolgt derzeit in zwei Stufen, zunächst mit Warmwasser aus dem internen Wärmerückgewinnungssystem und mit Dampf. Die Hochtemperatur-Wärmepumpe nutzt ebenfalls die Wärmerückgewinnung als Wärmequelle, liefert heißes Wasser und wird damit den Dampfbedarf reduzieren. Im Ziegelwerk Uttendorf der Wienerberger AG wird die Hochtemperatur-Wärmepumpe als Kaskade mit einer Absorptionswärmepumpe integriert, die die feuchte Abluft des Trockners als Quelle nützt und Wärme für den Tunnelrockner bereitstellt. Der Einsatz der Hochtemperatur-Wärmepumpe erlaubt eine Verbreitung der Technologie auf sämtliche Ziegelwerke von Wienerberger AG. Die beiden Wärmepumpen werden als geschlossene Kompressionswärmepumpen mit dem Kältemittel OpteonMZ ausgeführt und werden eine Heizleistung von ca. 400 kW erreichen. Als Verdichter kommen sowohl Schraubenverdichter von Bitzer Kühlmaschinen GmbH, die für die hohen Einsatztemperaturen entsprechend adaptiert werden, als auch Kolbenverdichter von Viking Heat Engines AG zur Anwendung. In diesem Beitrag werden wesentliche Erkenntnisse zur Prozessintegration, zu den Designfragestellungen, die sich durch die hohen Temperaturen ergeben und zu den angestrebten Betriebsbereichen behandelt.

Stichwörter: Industrierärmepumpe, Wärmerückgewinnung, Prozessintegration

IV.08

Konfigurations- und Leistungsvergleich von Hochtemperaturwärmepumpen zur Biogas-Aufbereitung

Franz Helminger^{1*},
Michael Lauermann¹, Alexander Baumhake², Gerwin Drexler-Schmid¹

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

² Frigopol Kälteanlagen GmbH
Gamser Straße 21, 8523 Frauental a.d. Laßnitz, Austria

Das neuartige Temperaturwechseladsorptionsverfahren (engl. temperature swing adsorption, kurz TSA) ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Abtrennung von CO₂ zur kontinuierlichen Aufbereitung von Biogas. Ein wesentlicher Teil der Adaptierung des TSA-Prozesses besteht in der Entwicklung innovativer Wärmeerschaltungskonzepte, optimierter Wärmeübertragerdesigns und dem Einsatz von Wärmepumpentechnik. Der Einsatz von sogenannten Hochtemperaturwärmepumpen ist geradezu prädestiniert, da im TSA-Prozess Wärme auf niedrigem Temperaturniveau aus dem Prozess abzuführen ist und Wärme bei hohem Temperaturniveau dem Prozess zuzuführen ist. Bei der Entwicklung von Wärmepumpen

zum Einsatz im TSA Prozess zur Biogas-Aufbereitung ist von Verdampfungstemperaturen zwischen 25°C und 40°C und von Kondensationstemperaturen zwischen 110°C und 125°C auszugehen.

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Konfigurationen und Kombinationen von Wärmepumpenkreisläufen und Kältemitteln untersucht, wobei in einer Vorauswahl für die Prozesstemperaturen geeignete Kältemittel ausgewählt wurden. Diese Vorauswahl wurde anhand von wirtschaftlichen, umweltrelevanten und technischen Parametern durchgeführt. Die unterschiedlichen Wärmepumpenkreise wurden mit den vorausgewählten Kältemitteln kombiniert und deren Modelica™-Modelle mittels Dymola erstellt, simuliert und miteinander verglichen. Es wurde eine Vielzahl verschiedener Wärmepumpenkreisläufe getestet, wie z. B.: Ejektorschaltungen oder Kaskaden. Jeder Kreislauf wurde im relevanten Betriebsbereich simuliert und Kennzahlen, wie COP (engl. coefficient of performance) und Leistungen, ermittelt.

Es können unter anderem folgende Erkenntnisse aufgezeigt werden:

Je Betriebspunkt weisen Schaltungen mit Ejektoren, seriell zweikreisige Maschinen oder Kaskaden die höchsten kombinierten heiz-und-kühl-COPs auf.

Im möglichen Betriebsbereich des TSA-Prozesses wurden kombinierte heiz-und-kühl-COPs von 3,5 bis 6,3 für Kaskaden und Schaltungen mit Ejektoren erreicht.

Aufbauend auf der Analyse von technischen Betriebskennwerten wird eine Analyse unter Berücksichtigung von Investitions- und Betriebskosten erarbeitet, um eine Empfehlung für die betriebswirtschaftlich günstigste Lösung abgeben zu können.

Stichwörter:

Hochtemperaturwärmepumpe, R600, R1234zeZ, Opteon MZ, R717, temperature swing adsorption

IV.09

**Effizienzsteigerung von Hochtemperaturwärmepumpen:
Auswirkung von rekuperativer Sauggasüberhitzung oder
Nassdampfkompensation auf die Effizienz von Hochtemperaturwärmepumpen
in Abhängigkeit des eingesetzten Kältemittels**

Magdalena Wolf^{1*}, Tobias Pröll¹

1 Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Verfahrens- und Energietechnik, Peter Jordan Straße 82,
1190 Wien, Österreich
magdalena.wolf@boku.ac.at

In einem nachhaltigen Energiesystem spielen Wärmepumpen eine wichtige Rolle. Während im gebäudetechnischen Bereich diese Technologie bereits breite Anwendung findet, kommt ihr im industriellen Wärmebereitungssektor noch eine untergeordnete Rolle zu, wofür es sowohl technologische als auch wirtschaftliche Gründe gibt. Die vorliegende Arbeit zeigt Optimierungspotenziale auf, mit denen die Effizienz dieser Systeme gesteigert werden kann. Bei der Optimierung der Hochtemperaturwärmepumpensysteme wird nach eingesetztem Kältemittel unterschieden. Diese werden entsprechend ihrem Verhalten während des Verdichtungs Vorganges in zwei Gruppen eingeteilt. Die erste Gruppe zeigt ein überhitzendes Verhalten während des Verdichtungs Vorganges. Grund dafür ist ein glockenförmiges Zweiphasengebiet. Bei der zweiten Gruppe hingegen ist ein Überhitzen nach dem Verdampfen zwingend nötig, um während des darauf folgenden Verdichtungs Vorganges Kondensation zu verhindern. Bei diesen Kältemitteln liegt ein überhängendes Zweiphasengebiet vor. Mittels Prozesssimulation werden die relevanten Prozesse abgebildet und, auf Basis thermodynamischer Stoffdaten, die Effizienzparameter bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den untersuchten Optimierungsmaßnahmen eine relevante Effizienzsteigerung erzielt werden kann. Kältemittel mit einem überhängenden Zweiphasengebiet profitieren von rekuperativer Sauggasüberhitzung, während bei Einsatz von Wasser (R718) als Arbeitsmittel die Effizienz durch Nassdampfkompensation gesteigert werden kann. Je nach Prozessdesign kann mit den vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen eine Effizienzsteigerung zwischen 13% und 63% erzielt werden.

Stichwörter: Hochtemperaturwärmepumpe, rekuperative Sauggasüberhitzung, Nassdampfkompensation

IV.10

Simulative Reglerentwicklung für raumluftechnische Anlagen

Alexander Kümpel^{1*}, Jens Teichmann¹, Marc Baranski¹, Dirk Müller¹

¹ RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
akuempel@eonerc.rwth-aachen.de

Die Verteilung von Heiz- und Kühlenergie wird in Gebäuden oft mit hydraulischen Systemen realisiert. Durch die hohe Komplexität weisen die hydraulischen Netze häufig Fehler in der Regelung auf. Aus diesem Grund wurde das Projekt ZUGABE initiiert, in dem hydraulische Systeme untersucht und standardisierte Modultypen identifiziert sowie modulare Regelungsstrategien entwickelt werden. Ein Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten für Heiz- und Kühlregister von raumluftechnischen Anlagen.

Im Rahmen des Projektes werden die identifizierten Modultypen in der Modellierungssprache Modelica modelliert, um hydraulische Systeme und raumluftechnische Anlagen zu simulieren. Mithilfe der Simulationsmodelle lassen sich verschiedene Regelungsstrategien testen und Regelgüte und Energieeffizienz berechnen. Des Weiteren ermöglicht die Simulation ein automatisiertes Tuning der Regler.

In diesem Beitrag werden zur Validierung der Simulation Versuche an einer realen raumluftechnischen Anlage durchgeführt. Es wird gezeigt, dass die simulativ getesteten und parametrisierten Regler an der realen raumluftechnischen Anlage eine hohe Regelgüte aufweisen. Außerdem bieten die entwickelten Regelungen durch eine kombinierte Regelung von Ventil und Pumpe ein hohes Einsparpotential an elektrischer Energie gegenüber Standard-Regelungen.

Stichwörter: Reglerentwicklung, Raumluftechnische Anlagen, Simulation, Gebäudeautomation

IV.11

Bewertung von Klimatisierungskonzepten für Gebäude mit dynamischen Lasten

Thomas Storek^{1*}, Marc Baranski¹,
Dirk Müller¹

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustr. 10 Straße, 52064 Aachen, Deutschland
tstorek@eonerc.rwth-aachen.de

Eine Vielzahl industrieller Entwicklungsprozesse werden heutzutage von Simulationsmodellen unterstützt. Simulationen unterstützen die Entwickler dabei komplexe Systeme hinsichtlich ihrer Funktionszusammenhänge und dynamischer Einflüsse systematisch und kosteneffizient in virtuellen Experimenten mit unterschiedlichen Randbedingungen zu untersuchen und zu bewerten.

Im Gegensatz zu vielen anderen industriellen Anwendungen werden Gebäude und ihre technische Gebäudeausrüstung (TGA) zumeist individuell geplant und gebaut. Darüber hinaus sind die tatsächliche Nutzung und die damit verbundenen Klimatisierungsbedarfe und die damit verbundenen Energiebedarfe im Vorfeld nur schwierig abzuschätzen. Dies führt oft zu einer Überdimensionierung der Anlagen oder einem häufig ineffizienten Teillastbetrieb, da die Systemdynamik bei der Konzeptionierung nicht in ausreichendem Maße miteinbezogen wird. Mithilfe von Simulationsmodellen können jedoch die Funktionsweise von Systemen noch in der Planungsphase sichtbar gemacht werden und in die Konzeptionierung und Dimensionierung der TGA mit einfließen, was später zu einem effizienteren Anlagenbetrieb führt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „M5BAT“ wurde ein Simulationsbaukasten entwickelt, mit dem ein dynamisches Simulationsmodell der TGA einer Großbatteriespeicheranlage, welche im Betrieb ein hochdynamisches Kühllastprofil aufweist, aufgebaut wurde. Mithilfe des Modells wurden unterschiedliche Klimatisierungskonzepte und die TGA-Betriebsführung systematisch untersucht und bewertet, um zukünftige Industrie- und Kraftwerksgebäude effizient zu klimatisieren.

Stichwörter: Dynamische Kühllast, Klimatechnik, Simulation, statistische Versuchsplanung

IV.12

Strömungsvisualisierung mittels Schlieren-Verfahren

Thomas Möller

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauphysik, Coudraystraße 11a, 99423 Weimar
thomas.moeller@uni-weimar.de

Eine wesentliche Aufgabe im Themenkomplex Raumklima ist die zeitlich und räumlich hochaufgelöste Bestimmung der Luftbewegung. Übliche angewandte Messverfahren, wie klassische Anemometer oder das Particle-Image-Velocimetry greifen jedoch in die Strömung ein und führen so zu Messungenauigkeiten.

Um diese Lücke zu schließen wurde sich mit der Erweiterung der Messtechnik um die Schlieren-Bildgebung zur Visualisierung von Raumluftrömungen beschäftigt.

Diese Methode basiert auf dem Prinzip der Lichtstrahlablenkung infolge von Brechungsindexgradienten. Die Lichtstrahlen einer Lichtquelle werden mit Hilfe des Schlierenspiegels gerichtet und fallen durch die Messstrecke. Dichtegradienten in der Strömung führen zu Brechungsindexgradienten, die die Lichtstrahlen ablenken. Auf der anderen Seite der Messstrecke werden die Lichtstrahlen auf einen Punkt fokussiert und fallen dann auf das Objektiv der Kamera. Um die abgelenkten Lichtstrahlen sichtbar zu machen wird eine sogenannte Schlierenkante z.B. von unten in den Fokuspunkt eingebracht, sodass etwa die Hälfte der Lichtstrahlen geblockt werden. Die nach unten abgelenkten Lichtstrahlen können dadurch nicht mehr auf das Objektiv der Kamera fallen, es entstehen dunkle Bereiche. Die nach oben abgelenkten Lichtstrahlen passieren die Schlierenkante und ergeben so auf dem Kameraobjektiv hellere Bereiche. Die Helligkeitsunterschiede visualisieren die erste Ableitung des Brechungsindex.

Der entwickelte Messstand besteht im Wesentlichen aus einem konkaven und extrem fein geschliffenen Spiegel ($\varnothing=1002$ mm, Brennweite: 3001,5 mm, Mikrorauhigkeit: $< 2,7$ nm RMS, Oberflächenfehler: $< \lambda/9,75$ @ 633 nm), einer Lichtquelle (LED), einer Schlierenkante sowie einer Kamera mit sehr guter Auflösung und einem Objektiv mit sehr hoher Schärfeleistung.

Mit der Inbetriebnahme dieses einzigartigen Großschlieren-Systems zur Untersuchung des Raumklimas steht nun ein innovatives eingriffsfreies Messverfahren zur zeitlich und räumlich hochaufgelösten Bestimmung der Luftbewegung zur Verfügung. Zukünftig werden damit Untersuchungen im Bereich energieeffizienter und behaglichkeitsorientierter Raumklimatisierung, Raumlufthygiene sowie Stofftransport und Schadstoffverteilung der Raumlufte erfolgen.

Stichwörter: Raumklima, Strömungsvisualisierung, Luftbewegung

IV.13

Numerische Untersuchung von Schüllüftungssystemen mit Schichtlüftung

Simon Engstfeld¹, Mohammad Reza Adili^{1*},
Konstantinos Stergiaropoulos¹

¹Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
reza.adili@ige.uni-stuttgart.de

Durch das Konzept der Ganztagschule verbringen Kinder, Jugendliche und Lehrer mehr Wochenstunden als frühere Generationen in Schulgebäuden. Vor dem Hintergrund sinkender Schülerzahlen wird eine energetische und bauliche Sanierung, im Vergleich zum Schulneubau, zunehmend favorisiert. Die energetische Sanierung der Schulgebäude geht oftmals mit einer Abdichtung der Gebäudehülle einher, welche die Infiltration herabsetzt. Die derzeit übliche Lüftungsmethode der manuellen Fensterlüftung führt in sanierten Gebäuden zu einer

unzureichenden Raumluftqualität, die sich negativ auf das Lernvermögen der Schüler auswirkt, wie aus diversen Studien hervorgeht. Maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung kann hingegen die Luftqualität merklich verbessern und den energetischen Aufwand reduzieren.

Die Adaptierung der hoch wirksamen und energieeffizienten Technologie der Schichtlüftung, könnte zu einer verbesserten Raumluftqualität in Klassenzimmern führen. Eine Analyse der vorliegenden Studien zeigt jedoch, dass ein erhöhter Forschungsbedarf besteht, um für die jeweiligen Systeme die Wirksamkeit und die Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit im Raum zu untersuchen.

Die vorliegende Arbeit untersucht mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen verschiedene zentrale und dezentrale Schichtlüftungssysteme. Für ein typisches Klassenzimmer werden verschiedene Luftführungsvarianten untersucht, die sich hinsichtlich der Anordnung und Art von typischerweise eingesetzten Luftdurchlässen unterscheiden. Anhand der Lüftungswirksamkeit und des Luftaustauschwirkungsgrades wird eine Bewertung der Lüftungseffektivität vorgenommen. Zusätzlich findet ein Vergleich der Systeme hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit statt. Auf Basis der Ergebnisse werden Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet, welche zu einer höheren Marktdurchdringung in diesem Anwendungsfeld führen könnten.

Stichwörter:

Luftführungssysteme, Schulgebäude, Lüftungseffektivität, CFD, Schichtlüftungssysteme

IV.14

Bestimmung von Wärmepumpenkennzahlen unter dynamischen Randbedingungen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller*, Moritz Lauster, Philipp Mehrfeld, Markus Nürnberg und Christian Vering

RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

Im Gebäudebereich müssen Treibhausgasemissionen im Rahmen der Energiewende drastisch gesenkt werden. Hierbei spielt die Wärmepumpe eine Schlüsselrolle, da sie zum einen durch die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung zur systematischen Sektorenkopplung dient. Zum anderen reduziert sie durch Nutzung von Umweltwärme zusätzlich die gebäudeverursachten CO₂-Emissionen. Aktuell werden zur Bewertung von Wärmepumpen im Labor statische Verfahren verwendet, welche die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen unter realen Randbedingungen nicht zuverlässig abbilden. Die Durchführung von Feldversuchen mit Wärmepumpen ist aufwendig und diese Versuchsform kann nicht gut in einen Entwicklungsprozess für die Wärmepumpentechnik eingebunden werden. Deshalb wurden in den letzten Jahren an mehreren Forschungsstellen dynamische Messverfahren für Wärmepumpensysteme entwickelt, die im Labor typische Betriebsbedingungen eines Heizsystems abbilden können. Diese Verfahren werden als Hardware-in-the-Loop (HiL) Verfahren bezeichnet.

Im Rahmen eines durch das BMWi geförderten Forschungsprojekts wurde ein dynamisches Bewertungsverfahren für Wärmepumpen entwickelt, welches als Grundlage für die zukünftige Evaluierung von Wärmepumpensystemen dienen kann. Dazu wurden am Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC) mehrere Hardware-in-the-Loop Versuchsstände aufgebaut, die unterschiedliche Wärmepumpentypen und -leistungsklassen versorgen können. Diese bestehen aus einer Klimakammer, die zur Emulation von Umgebungsbedingungen dient, sowie aus einem hydraulischen Versuchsaufbau, der bis zu acht Wärmequellen bzw. –senken simulationsgestützt emuliert. Die Hardware-in-the-Loop Versuchsstände müssen dabei im dynamischen Betrieb hohe Anforderungen hinsichtlich Messgenauigkeit, Regelgüte und Reproduzierbarkeit erfüllen.

Im Rahmen des Vortrags werden aktuelle Ergebnisse des neuen Messverfahrens gezeigt und diskutiert. Zusätzlich wird auf mögliche Produktoptimierungen in einer dynamischen Testumgebung eingegangen.

Stichwörter: Hardware-in-the-Loop, Wärmepumpen, Systemtechnik, Messtechnik

Analyse der Feldmessdaten von Wärmepumpen im EFH-Bestand mit Fokus auf monoenergetischer sowie hybrider (bivalenter) Betriebsweise

Danny Günther^{1,2}, Jeannette Wapler¹, Robert Langner¹, Sebastian Helmling¹, Marek Miara¹

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

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

Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „WPsmart im Bestand“ (FKZ: 03ET1272A; Projekthomepage: <http://wp-smart-im-bestand.de/>) werden Elektro-Wärmepumpen im EFH-Bestandsbereich messtechnisch untersucht und hinsichtlich Effizienz und Betriebsverhalten bewertet. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen werden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und sind in Gebäuden der Baujahre 1850 bis 2001 installiert. Der Zustand der Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert. Von den 60 untersuchten Anlagen werden 9 bivalent (Gas- oder Ölkessel) und die übrigen Systeme überwiegend monoenergetisch betrieben. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe oder Ventilator) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. Bei den hybriden Systemen werden bei der Mehrzahl der Anlagen zusätzlich der Gas- bzw. der Ölverbrauch gemessen. In den Hydraulikkreisläufen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet. Darüber hinaus widmet sich das Projekt der Untersuchung von Lastmanagementpotenzialen mittels Simulation und Feldmessung, worauf in diesem Beitrag nicht eingegangen wird.

Der Konferenzbeitrag umfasst zum einen die Vorstellung der Hauptergebnisse aus der vorangegangenen, einjährigen Messperiode. Dabei stehen die Jahresarbeitszahlen und die Bewertung der direkt quantifizierbaren Einflüsse auf die Effizienz im Vordergrund. Dazu zählen vor allem die Systemtemperaturen und die erforderlichen Hilfsenergien. Als zweiten Fokus werden im Konferenzbeitrag die Betriebsarten der Heizsysteme beleuchtet. Vor allem vor dem Hintergrund des Einsatzbereiches Bestandsgebäude mit seinen individuellen Voraussetzungen (bspw. bereits vorhandener Wärmeerzeuger, hoher Heizkreistemperaturen sowie komplexer hydraulischer Verschaltungen) soll die praktische Umsetzung monoenergetischer sowie bivalenter Betriebsweise vorgestellt werden. Hierfür werden die Heizsysteme hinsichtlich der Deckungsbeiträge der einzelnen Wärmeerzeuger für Raumheizung und Trinkwassererwärmung sowie der Umschalttemperaturen tiefergehend analysiert.

Monitoring Wärmepumpensysteme mit Lüftungsanlagen

Victor Staeudinger^{1*}, Prof. Dr. Werner Jensch¹, Dr. Volker Stockinger²

¹ CENERGIE - Hochschule München, Competence Center - Energieeffiziente Gebäude und Quartiere, München

² BUILD.ING Consultants + Innovators GmbH, Nürnberg
victor.staeudinger@hm.edu

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundforschungsvorhaben „+Eins“ wurde der Ludmilla Wohnpark Landshut beim Bau mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Der Ludmilla Wohnpark besteht aus mehreren Mehrfamilienhäusern und 13 mittig

angeordneten Einfamilienhäusern. Manche sind freistehend manche sind ein- oder beidseitig mit dem Nachbarhaus verbunden. Jedes Einfamilienhaus ist mit einem Kompaktgerät, bestehend aus einer kontrollierten Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung und Sole/Wasser-Wärmepumpe, der Firma Drexel und Weiss ausgerüstet. Als Wärmequellenanlage dienen Erdkollektoren, die in Sandwichbauweise übereinander im Erdreich eingebracht wurden. Die sehr klein ausgelegten Erdkollektoren finden auf der knappen Gartenfläche eines jeden Einfamilienhauses der Siedlung Platz. Die nachfolgende Abbildung zeigt das Anlagenschema und die vorläufigen Bilanzgrenzen zur Berechnung der Arbeitszahlen.

Das Monitoring soll Auskunft darüber geben, ob erdgekoppelte Wärmepumpen mit Flächenkollektoren auf kleinsten Flächen im urbanen Raum Anwendung finden und energieeffizient betrieben werden können.

Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass die Siedlung mit einer mittleren Jahresarbeitszahl 2 von 3,4 energieeffizient betrieben werden. Mehrere Anlagen sind mit Jahresarbeitszahlen von mehr als 3,5 als nennenswert energieeffizient zu bezeichnen. Als Datengrundlage hierfür wurden die Jahre 2011 und 2012 gewählt. Darauf folgende Jahre sind durch Ausfälle der Messtechnik nicht gänzlich auszuwerten.

Stichwörter: Wärmepumpe, Erdkollektor, oberflächennahe Geothermie, kontrollierte Wohnraumlüftung

IV.17

Wärmepumpensysteme im Mehrfamilienhaus-Bestand

Jeannette Wapler^{1*}, Martin Kleinstück¹, Benjamin Köhler¹, Felix Ohr¹, Stefan Hess²

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

jeannette.wapler@ise.fraunhofer.de

2 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH,
Emmy-Noether-Straße 2, 79110 Freiburg

Um die langfristigen klimapolitischen Ziele Deutschlands zu erreichen, besteht die Notwendigkeit zu einer massiven Senkung der CO₂-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden. Die Höhe der CO₂-Emissionen bei der Raumheizung hängt von zwei Faktoren ab: dem Wärmebedarf und den spezifischen CO₂-Emissionen der Wärmebereitstellungstechniken. Rund die Hälfte der Wohnungen in Deutschland befindet sich in Mehrfamilienhäusern (MFH). Diese Gebäudetypen adressiert der Projekt-Verbund „LowEx-Bestand“ [1], im Rahmen dessen Lösungen für den Einsatz von Wärmepumpen, Wärmeübergabe- und Lüftungssystemen in energetisch sanierten Mehrfamilien-Bestandsgebäuden umfassend analysiert und demonstriert werden. Aufbauend auf einer Analyse des deutschen Gebäudebestandes sowie der Sanierungsprozesse einerseits und der Typisierung von Wärmepumpen-Systemkonzepten andererseits, werden LowEx-Konzepte im Hinblick auf die Passung mit unterschiedlichen Gebäudetypen, Gebäudealter, Sanierungsgraden und Siedlungsformen systematisch untersucht. Neben der Bewertung des Einflusses des Raumwärmebedarfes und der Übergabesysteme auf die Performance der Wärmebereitstellung werden unterschiedliche Konzepte zur Trinkwassererwärmung in den Blick genommen. Der Tagungsbeitrag präsentiert Ergebnisse der simulationsbasierten Untersuchung verschiedener Gebäude-System-Konfigurationen und gibt einen Überblick über den thematischen Projektverbund, in dem neben einem übergreifenden Forschungsprojekt auch mehrere Technologie- und Demonstrationsprojekte eingebunden sind.

IV.18

Wärmepumpen im Mehrfamilienhaus-Bestand Vergleichende Analyse verfügbarer Richtlinien und Verfahren zur Quellendimensionierung

Raphael Vollmer*, Stefan Hess, Hans-Martin Henning

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH
Emmy-Noether-Straße 2, DE-79110 Freiburg
raphael.vollmer@inatech.uni-freiburg.de

Im Projektverbund »LowEx-Bestand« werden Lösungen für den Einsatz von WP-Systemen in energetisch sanierten Mehrfamilienhäusern (MFH) entwickelt und demonstriert (www.lowex-bestand.de). Für eine erste Einschätzung des Potentials der Wärmequellen Außenluft, Erdreich und Grundwasser wurde der häufigste MFH-Typ E (IWU-Typologie) um ein typisches Grundstück (EST-3 nach UrbanReNet) ergänzt und die Fälle Mittelhaus (A) und Eckhaus (B) unterschieden. Anhand dieses Beispiels wurden Auslegungsrichtlinien für WP-Systeme verglichen und die ausreichende Quellen-Verfügbarkeit geprüft.

Eine Außenluft-WP kann in beiden Fällen (A und B) so realisiert werden, dass der Wärmebedarf vollständig gedeckt und die TA Lärm erfüllt wird. Für die Versorgung über Erdwärmesonden reichen nach VDI 4640 sowohl Grundstück A und B aus, nach GEO-Hand^{light} nur letzteres. Für Erdkollektoren sind nach VDI 4640 die Flächen nicht ausreichend. Bei der Auslegung von Grundwasser-WP nach dem Leitfaden des Umweltministeriums Baden-Württemberg (2009) lassen die vielen Einflussparameter keine pauschale Aussage zu. Insgesamt wird deutlich, dass die Richtlinien teils stark voneinander abweichen und die vollständige Wärmeversorgung eines auf EnEV 2014 sanierten MFH mit WP durch die Erschließung einer einzigen Quellenart voraussichtlich in vielen Fällen technisch anspruchsvoll bzw. nicht realisierbar ist.

Stichwörter: LowEx-Bestand, Wärmepumpen, Bestandsgebäude, Mehrfamilienhaus, Wärmequellen

IV.19

Wärmepumpen in österreichischen Fernwärmenetzen

Alexander Arnitz*, René Rieberer

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

Im Jahr 2016 betrug der Anteil der Fernwärme an der gesamten Wärmeerzeugung Österreichs 21 %. Mit diesem Anteil können Fernwärmenetze einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele bzw. zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen leisten. Da Wärmepumpen die Einbindung bisher nicht erschlossener Wärmequellen ermöglichen und so den Anteil der fossilen Wärmeerzeugung reduzieren, nimmt die Installation von Wärmepumpen in Fernwärmenetzen eine Schlüsselrolle ein. In diesem Beitrag wird eine Übersicht über die verwendeten Wärmequellen und die installierten Heizleistungen von Wärmepumpen in österreichischen Fernwärmenetzen gegeben. Am häufigsten wird die Kondensationswärme von Rauchgasen aus Biomasseheiz- bzw. Biomasseheizkraftwerken als Wärmequelle genutzt, gefolgt von industrieller Prozessabwärme. Zusätzlich zur umweltfreundlichen Wärmeerzeugung reduzieren Wärmepumpen in diesen Fällen den erforderlichen Aufwand für die Rauchgasentschwadung oder den Betrieb von Kühltürmen. In Verbindung mit regenerativen Wärmequellen wie Geothermie und Solarthermie ermöglicht die Installation von Wärmepumpen Effizienzsteigerungen. Um unterschiedliche Varianten der hydraulischen Einbindung aufzuzeigen, werden abschließend typische hydraulische Schaltungen dargestellt und analysiert.

Stichwörter: Wärmequellen, Heizleistungen, hydraulische Einbindung

IV.20

Hochtemperaturwärmepumpen – praktische Beispiele und Anwendungsfälle für Nah- und Fernwärme

Herr Norbert Stocker

Frigopol Kälteanlagen GmbH, A-8523 Frauental a. d. L., Gamser Straße 21
Norbert.stocker@frigopol.com

Technische & Wirtschaftliche Gesichtspunkte:

Ökonomisch und ökologisch optimierte Anlagen sind eine große Herausforderung für Betreiber von Nahwärme- und Fernwärmekraftwerken.

Die steigenden Energiepreise erfordern innovative und effiziente Lösungen, um wirtschaftliche Erfolge und umwelttechnische Verbesserungen zu erzielen.

FRIGOPOL hat dazu einen optimalen Lösungsansatz entwickelt, der Biomasseheizanlagen mit speziellen Hochtemperatur-Wärmepumpen kombiniert. Die Energiegewinnung durch den Einbau von Rauchgaskondensationsanlagen verbessert den Wirkungsgrad der Anlagen erheblich und zusätzlich erzielt man eine Leistungssteigerung der Gesamtanlage.

FRIGOPOL baut diese Hochtemperatur-Wärmepumpen, individuell für jede Anlagengrößenordnung (bis mehrere MW), um die bestmögliche Energieeffizienz zu erzielen.

Praxisbericht anhand von 2 Projekten in Österreich:

Projekt 1:

Die Abwärmequellen einer Molkerei sollten in ein Fernwärmenetz eingespeist werden.

Eine Wärmepumpenanlage dient zur Anhebung des Temperaturniveaus, des aus dem Rauchgaskondensator austretenden Warmwasserstroms, für die Einspeisung in das Fernwärmenetz. Die zweite Wärmepumpenanlage wurde installiert, um die Kondensationswärme aus den Eiswasser-Kälteanlagen der Molkerei für die Fernwärmeeinspeisung nutzbar zu machen.

Projekt 2:

Die Anzahl an Nah- und Fernwärmenetzen in Österreich ist stetig steigend und mit diesen auch der Verbrauch am Rohstoff Holz.

Um diesen möglichst nachhaltig und Ressourcen schonend einzusetzen, ist es notwendig die angewandten Prozesse hinsichtlich ihres Ressourceneinsatzes zu optimieren.

Um die Menge des kondensierten Wassers konstant auf einem hohen Niveau zu halten, wird im vorgestellten Projekt eine Wärmepumpe zum Transfer der Wärme aus dem Niedertemperaturrücklauf in den Hochtemperaturrücklauf eingesetzt.

Im Rahmen des Projekts wird am Beispiel eines Fernheizkraftwerkes der Einbau einer Wärmepumpe in eine bestehende KWK-Anlage mit integriertem ORC (Organic Rankine Cycle)-Kreisprozess bilanziert (Wärme- und Energieauskopplung, korrosive Schadstoffe), und die Optimierung durch eine Prozesssimulation und die Entwicklung und Implementierung einer neuen Prozessregelung untersucht.

IV.21

Modellgestützte Entwicklung dynamischer Auslegungsstrategien für Luft-zu-Wasser-Wärmepumpen im Gebäudebestand

Christian Vering*, Moritz Jaeger, Moritz Lauster, Dirk Müller

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

Die Luft-zu-Wasser-Wärmepumpe (LWWP) stellt eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung der energetischen und umweltspezifischen Ziele der deutschen Bundesregierung dar. Zur Ausnutzung des primärenergetischen Potenzials von Wärmepumpen muss die Systemintegration in den aktuellen Gebäudebestand verbessert werden. Dazu ist es notwendig, verbrauchsangepasste Methoden für die Auslegung und den Betrieb von Wärmepumpen zu entwickeln.

Auf Basis detaillierter dynamischer Gebäudesimulationen und statistischer Analysemethoden wird eine neue Auslegungsstrategie für LWWP vorgestellt. Dynamische Randbedingungen haben Einfluss auf den Heizleistungsverlauf von Gebäuden. Im Vergleich zu statischen Randbedingungen bei der Berechnung der normativen Gebäudeheizleistung, ergibt sich durch den Witterungseinfluss oder das Lüftungsverhalten der Nutzer eine hohe Volatilität der Heizleistung. Feldstudien von LWWP im Gebäudebestand zeigen zudem Diskrepanzen zwischen normativ berechneten Saisonalen Coefficients of Performance (COP) und im Feld gemessenen Werten. Gründe dafür sind fehlerhafte Montage, dynamische Nutzereinflüsse und die Überdimensionierung des Heizsystems für viele Betriebsstunden des Jahres.

Eine Clusteranalyse des dynamischen Heizleistungsverlaufs bestimmt prägnante Betriebsbereiche mit hoher Betriebsstundenzahl, die für die Auslegung der Wärmepumpe verwendet werden. Ein hybrider Ansatz aus Zweipunktregelung und Drehzahlmodulation des Wärmepumpenkompressors zielt auf eine Reduktion der Energieverbräuche infolge von weniger Kompressorstartvorgängen und langen Betriebszeiten des Verdampferventilators ab. In den Mittelpunkten der berechneten Cluster wird der Gütegrad erhöht, um den Einfluss einer Betriebspunktoptimierung in diesen Bereichen aufzuzeigen.

Die entwickelte Auslegungsmethode der Wärmepumpe erzielt eine Verbesserung des Saisonalen Coefficient of Performance von 35,9 %, was zu einer jährlichen Primärenergieeinsparung von 26,4 % und einer Betriebskosteneinsparung von 875 € gegenüber dem Referenzfall der statischen Auslegung führt. Im Vergleich mit einem konventionellen Gaskessel lässt sich eine Primärenergieeinsparung von 6,3 % erzielen.

Eine ausstehende Verbesserung der Betriebsstrategien ist die Grundlage für den abschließenden Schritt der Gesamtsystemoptimierung von LWWP im Gebäudebestand. Geeignete Zielfunktionen dieser mathematischen Optimierung sind die Minimierung der Gesamtkosten und des Primärenergieverbrauchs.

Stichwörter:

Wärmepumpenauslegung, Dynamische Gebäudesimulation, Betriebsoptimierung

IV.22

Anwendung eines Virtuellen Labors zur Integration von virtuellen Sensoren in Bestandsgebäude

Florian Stinner^{1*}, Marc Baranski¹, Dirk Müller¹

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
fstinner@eonerc.rwth-aachen.de

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energien im Gebäude wird der Betrieb von technischen Anlagen im Nichtwohngebäude zu einer großen Herausforderung. Zwischen dem geplanten Energiebedarf und dem real vorhandenen Energieverbrauch existiert eine Lücke, die schwer zu schließen ist. Dies ist auch auf sogenannte blinde Flecken in der installierten Messtechnik zurückzuführen.

Das Konzept des virtuellen Labors bietet die Möglichkeit statt realer Sensoren virtuelle Sensoren in die Regelung eines Gebäudes zu integrieren. Hierbei werden physikalische Modelle der vorhandenen technischen Anlagen verwendet, die anhand von aufgezeichneten realen Daten kalibriert wurden. Diese virtuellen Sensoren werden zu der vorhandenen realen Anlage parallelgeschaltet und in die Gebäudeautomation integriert. So können eventuelle blinde Flecken in der Anlagentechnik aufgedeckt und beseitigt werden.

Wenn ein Austausch oder eine Erweiterung der vorhandenen Anlagentechnik benötigt wird, können diese virtuellen Sensoren das geplante angepasste System mit der vorhandenen Betriebsstrategie testen und anpassen, bevor es gebaut und in Betrieb genommen wird. In diesem Beitrag wird das Potential des Verfahrens am Beispiel des E.ON ERC Hauptgebäudes gezeigt.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03SBE006A.

Stichwörter:

Virtuelles Labor, virtuelle Sensoren, Bestandsoptimierung, Gebäudeautomation

Systemanalyse der Kälteversorgung im Philip Morris Werk Berlin zur Erarbeitung von Kosten- und Energieeinsparpotentialen

Franziska Dan

Technische Universität Berlin, FG Maschinen- und Energieanlagentechnik, Sekr. KT2, Marchstraße 18,
10587 Berlin, Deutschland

franziskadan@hotmail.de

Masterarbeit, betreut durch Dipl.-Ing. Anja Hanßke

anja.hansske@mailbox.tu-berlin.de

Mit einem Anteil von 41% am Gesamtstrombedarf aller Hauptenergiemedien des Produktionsstandorts Berlin stellt die historisch gewachsene Kälteversorgungsstruktur des Philip Morris Werks einen entscheidenden Anknüpfungspunkt zur Identifikation energetischer Optimierungspotentiale dar. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden für eine der Hauptkältezentralen gesamtheitliche Lösungsansätze unter Berücksichtigung aller kosten- und energieintensiven Hauptkomponenten erarbeitet. Als Werkzeug zur Analyse des komplexen Zusammenspiels der unterschiedlichen Systemkomponenten kommt eine dynamische Simulation zum Einsatz. Der Fokus der hier vorliegenden Teilanalyse liegt auf einer Optimierung der Betriebszeiten der verfügbaren Rückkühlssysteme.

In Hinblick auf die oftmals hohen Wasseraufbereitungskosten im Zusammenhang mit dem Nassrückkühlbetrieb kann durch eine stärkere Ausschöpfung der Kapazitätsgrenze von Trockenrückkühlwerken ein signifikantes Energie- und Kosteneinsparpotenzial gehoben werden. Die Höhe der Einsparung ist jedoch entscheidend von der spezifischen Anlagencharakteristik und den individuellen Kostenfaktoren abhängig. Mit Hilfe einer dynamischen Simulation in Modelica/Dymola konnte für die untersuchte Kältezentrale des Philip Morris Werks Berlin gezeigt werden, dass durch optimierte Umschaltkriterien und das damit verbundene verbesserte Regelungskonzept eine Verlängerung der jährlichen Betriebsdauer der Trockenrückkühler um mindestens 1400 Betriebsstunden erreicht werden kann. Für diesen Betriebszeitraum konnte eine Steigerung der Gesamtanlageneffizienz um 18,1% und eine damit einhergehende Betriebskostenreduzierung um 22,4% nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass durch intelligente Umschaltregelungen signifikante Einsparpotentiale erschlossen werden können, wobei in jedem Fall von einer wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit der entsprechenden Maßnahmen ausgegangen werden kann. Eine differenzierte Einzelfallbetrachtung je nach Anlagentyp ist jedoch zur konkreten Quantifizierung erforderlich.

Stichwörter:

Regelungskonzepte, Rückkühlssysteme, Wasseraufbereitungskosten, Kosteneffizienz, Energieeffizienz

Energieanalyse und Effizienzmaßnahmen in einem Bürogebäude

Annika Kubis

Hochschule Ruhr West, Lützowstraße 5, 46236 Bottrop, Deutschland

Annika.Kubis@stud.hs-ruhrwest.de

Mit einem steigenden Energieverbrauch sind ökologische und ökonomische Nachteile verbunden, sodass energieeffiziente Anlagen und Bauten, sowie Energieeinsparmaßnahmen immer mehr in den Vordergrund rücken. In dieser Arbeit werden die Energieflüsse in einem Bürogebäude untersucht, um daran anschließend Effizienzmaßnahmen vorzuschlagen. Diese Analyse findet anhand einer Immobilie der Firma Canzler GmbH statt. Im Vordergrund stehen hierbei die Wärme- und Kältebilanzierungen der Immobilie sowie die Gebäudehülle und die damit verbundenen Wärmeverluste. Neben der Darstellung der Verbrauchsdaten des Gebäudes geht es im Wesentlichen um eine Analyse des Wärmebereitstellungssystems, welches in Form eines

Blockheizkraftwerkes installiert ist. Des Weiteren wird eine Kühllastberechnung für eine Analgenauslegung zur Abführung der Wärmelasten im Sommer durchgeführt und ein verbrauchsbasierter Energieausweis erstellt.

Im Bereich Wärme sind Gas- und Stromabrechnungen der letzten Jahre, sowie Daten, welche im Blockheizkraftwerk gespeichert sind, ausgewertet worden. Damit können die Verbräuche der einzelnen Jahre miteinander verglichen werden. Weiterführend ist die Amortisationszeit errechnet worden, um die Investition in das BHKW bewerten zu können. Im Bereich Kälte ist eine Kühllastberechnung anhand der VDI 2078 aus dem Jahr 2015 mit dem Programm Plancal Nova durchgeführt worden. Das Ergebnis des EDV-Programms wird dargestellt und anhand des Abschätzverfahrens derselben Norm die Zusammensetzung der Wärmelasten verdeutlicht. Die Verbrauchsdaten werden des Weiteren in einem Energieausweis zusammengefasst. Unterteilt in den Bereich Wärme und den Bereich Strom werden diese den Vergleichswerten der entsprechenden Nutzungsgruppe gegenübergestellt.

Nach der Analyse der Verbrauchsdaten ergibt sich im Bereich Wärme folgendes Ergebnis: Die Anschaffung des neuen Wärmebereitstellungssystems, dem BHKW, hat sich in Bezug auf die Senkung der Verbrauchskosten sowie in ökologischer Hinsicht gelohnt. Mit einer Amortisationszeit von 13 Jahren rentiert sich das Blockheizkraftwerk innerhalb der vom Hersteller maximalen Nutzungszeit von 20 Jahren. Der Bereich Kälte ist durch die Untersuchung der inneren Lasten geprägt, um daran anschließend die gesamte Kühllast zu bestimmen. Es ergibt sich eine Kühllast von ca. 38 kW. Gut die Hälfte des Wärmeeintrags wird durch innere Wärmequellen, allen voran durch Beleuchtung, verursacht. Mit der Berechnung der Kühllast soll aufgezeigt werden, dass eine Einrichtung zur Klimatisierung der Büroräumlichkeiten eine gute Möglichkeit zur Förderung der thermischen Behaglichkeit darstellt. Allein die Installation eines äußeren Sonnenschutzes lässt die Kühllast um 28 % reduzieren. Da mit dieser Maßnahme keine weiteren Energiekosten durch einen steigenden Stromverbrauch verbunden sind, erscheint diese Maßnahme besonders effektiv. Mit der zusätzlichen Installation von LED-Lampen wäre eine Senkung der Kühllast auf ca. 28 kW möglich. Bezüglich des Energieausweises sind Abweichungen zwischen den Verbrauchsdaten des Gebäudes sowie der Vergleichswerte der Nutzungsgruppe festzustellen. Gerade eine höhere Abweichung im Bereich Strom lässt sich durch den in dem Gebäude befindenden Serverraum erklären, welcher in dem als Vergleichswert der herangezogenen Nutzungsgruppe unberücksichtigt bleibt.

Stichwörter:

BHKW, Amortisationszeit, Kühllastberechnung, Einsparmaßnahmen

S.03

Elektrische Wärmepumpe für Gebäudeheizung – Experimentelle Vermessung, Analyse und vergleichende Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit

Grant Sloan Sivula^{1, 2}

¹ TU Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Institut für Energietechnik, Marchstr. 18, 10587 Berlin

² Beuth Hochschule für Technik Berlin, Fachbereich VIII Maschinenbau, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin

Heute gilt die DIN EN 14511:2013 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und -kühlung als Stand der Technik für die Prüfung, die Betriebsanforderungen sowie die Kennzeichnung von elektrischen Wärmepumpen. Nach der Norm wird die Effizienz der Wärmepumpe nur bei drei Betriebsbedingungen angegeben, welche das Verhalten der Wärmepumpen über das ganze Jahr nicht hinreichend abbilden. Dies führt zu höheren erwarteten Jahresarbeitszahlen (Jahreseffizienzwerte) durch die erhöhten, nach DIN EN 14511:2013 gekennzeichneten Leistungszahlen (COP). Das grundlegende Ziel dieser Arbeit ist es, die an der Beuth-Hochschule für Technik Berlin stehende Wärmepumpe nach den Anforderungen der DIN EN 14511:2013 zu testen. Außerdem werden Messpunkte zwischen den in Anlehnung an DIN EN 14511 getesteten Bedingungen und Extrembedingungen außerhalb des Testbereichs, die in mitteleuropäischem Raum vorkommen können, betrieben. Mit den Testergebnissen werden technische und ökonomische Grenzen der Wärmepumpe aufgewiesen. Das zweite Ziel

dieser Arbeit ist es, die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Wärmepumpe mit der aus der Vermessung ermittelten Kennlinie der Leistungszahl in Abhängigkeit des Temperaturhubs bei einem bestimmten Fall zu ermitteln. Diese Wirtschaftlichkeitsanalyse untersucht, ob eine Wärmepumpe in Verbindung mit einer abgeschriebenen Photovoltaikanlage kosteneffektiver als eine alternative Heizungstechnologie ist. Im Einzelnen sind folgende Arbeitspakete bearbeitet worden:

- Durchführung des Prüfverfahren nach DIN EN 14511:2013, Messungen bei anderen Temperaturhüben, welche nicht in der Norm stehen, in Anlehnung an DIN EN 14511
- Aus- und Bewertung der experimentellen Daten im Vergleich zu den Daten des Herstellers
- Untersuchung der Heizleistungen und der Leistungszahl (COP) der Wärmepumpe als Funktion des Temperaturhubes für unterschiedliche Heiztemperaturen
- Simulation zweier Wärmepumpenszenarien in Verbindung mit einer PV-Anlage in TRNSYS
- Ermittlung der Heizgestehungskosten (LCOH) der Wärmepumpe und der alternativen Technologie zur Wärmebereitstellung
- Vergleich der Heizgestehungskosten inklusive einer Sensitivitätsanalyse der wesentlichen Bestandteile bezogen auf die Heizgestehungskosten

Stichwörter:

Wärmepumpe, Heizgestehungskosten, DIN EN 14511:2013, Wirtschaftlichkeit

S.04

Numerische Untersuchungen zur Sauggaskühlung in Ansys CFX

Tobias Janitschke

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
tobias.janitschke@tu-dresden.de

Vor dem Hintergrund der gestiegenen Effizienzanforderungen an Kältemittelverdichter rücken auch deren Teilsysteme zunehmend in den Fokus. Die bei (semi-)hermetischen angewandte Sauggaskühlung hat Einfluss auf den Verdichtungsprozess und die Betriebssicherheit des Motors. Eine lokale, experimentelle Untersuchung der Durchströmung des Motors ist aufwendig und kaum rückwirkungsfrei durchzuführen. In diesem Fall kann die numerische Simulation einen sinnvollen Ansatz darstellen, die strömungsmechanischen Vorgänge genauer zu untersuchen.

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Modell besteht aus dem schmalen Spalt zwischen Rotor und Stator sowie den axialen Kühlbohrungen im Rotor. Bei der Modellerstellung werden insbesondere die Aufteilung des Netzes und die Auswahl passender numerischer Methoden untersucht.

Aufgrund der herausfordernden strömungsmechanischen Bedingungen ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes eines komplexen Turbulenzmodells, um physikalisch korrekte Ergebnisse zu erhalten. Des Weiteren werden die kritischen Stellen der Durchströmung charakterisiert und eine adäquate Netzaufteilung vorgeschlagen.

Stichwörter:

Numerische Simulation, ANSYS CFX, Sauggaskühlung, Kältemittelverdichter

Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Additiven auf die Oberflächenspannung von LiBr bei niedrigen Drücken

Mark Edward Newton, F. Lonardi, A. Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Kurt-Wolters-Str. 3, 34121 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Ein hoher Anteil des Bedarfes an elektrischer Energie ist auf den Kühlbedarf z.B. zur Klimatisierung zurückzuführen. Eine Möglichkeit diesen Energiebedarf zu reduzieren ist anstelle von Kompressionskältemaschinen Absorptionskältemaschinen zu verwenden. Diese sind in der Lage die Exergie von Niedertemperaturwärme zu nutzen, um Kälteleistung bereitzustellen. Allerdings ist der Betrieb, die Auslegung und Anschaffung solcher Anlagen aufwendig, da die Mechanismen des Wärme- und Stoffübergangs sehr komplex sind. Als kritische Komponente wird zumeist der Absorber in der Literatur genannt, der insbesondere bei dem Stoffpaar Wasser/Lithiumbromid als Rieselfilmapparat mit einem horizontalen Rohrbündel konstruiert ist. Zu den Sorptionsmitteln werden oberflächenaktive Additive hinzugefügt, um den Wärme- und Stoffübergang zu optimieren und so den Apparat kompakter und effizienter gestalten zu können. Diese führen zu einer Verringerung der Oberflächenspannung und damit zu einer höheren Benetzbarkeit und Marangoni-Konvektion. Das Resultat ist ein verbesserter Wärme- und Stofftransport. Bislang wurden die Auswirkungen dieser Additive auf die Oberflächenspannung von wässriger Lithiumbromidlösung bei niedrigen Drücken noch nicht untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist, die Einflüsse solcher Additive auf die Oberflächenspannung der Lithiumbromidlösung in den thermodynamischen Zuständen im Apparat zu untersuchen. Daher werden nach der Pendant Drop Methode statische und dynamische Messungen der Oberflächenspannung von wässriger Lithiumbromidlösung (60 % Masseanteil LiBr) durchgeführt. Die Tropfen werden in einer Vakuumzelle bei niedrigen Drücken erzeugt und gemessen, um die realen Betriebsbedingungen in einem Absorber zu simulieren. Der Lithiumbromidlösung wird in einer von 10 ppm bis 1000 ppm variierenden Konzentration Additiv hinzugefügt. Die Einflüsse von verschiedenen Additiven werden untersucht. Die Ergebnisse der Messungen werden dargestellt und anschließend diskutiert.

Stichwörter:

Absorption, Oberflächenspannung, Pendant Drop Methode, Lithiumbromid, Tensid, niedriger Druck

Experimentelle Untersuchung zur Kopplung einer Ammoniak-Wasser Absorptionswärmepumpe in Fernwärmenetzen

Daniel Gehring

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik,
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
danielgehring9@gmail.com

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) wird derzeit die Einbindung einer Ammoniak-Wasser Absorptionswärmepumpe (AWP) in Fernwärmenetzen experimentell untersucht. Durch diese Art der Systemkopplung soll die transportierte Wärmemenge durch eine Absenkung der Rücklauftemperatur besser genutzt werden. So soll die Gesamteffizienz der Fernwärmenetze gesteigert werden. Das Fernwärmenetz stellt bei dieser Systemkopplung die benötigte Wärme des Austreibers bereit. Die Kühlleistung des Verdampfers wird zur weiteren Temperaturabsenkung des Fernwärmerücklaufs verwendet. Das Heizungswasser wird durch den Kondensator und den Absorber der AWP, sowie durch einen Hauptwärmeübertrager erwärmt. Letzterer

entnimmt die Wärme aus dem Fernwärmemedium zwischen Austreiber und Verdampfer und stellt damit die reguläre Hausübergabestation dar.

Das Ziel der Arbeit ist eine Optimierung der AWP im Hinblick auf die Effizienz für die Kopplung mit Fernwärmenetzen. Um einen optimalen Tiefdruck der AWP zu ermitteln, wird dieser experimentell variiert und die maximale Gesamteffizienz als Auswahlkriterium verwendet. Bei optimalem Tiefdruck soll durch Bilanzierung einzelner Wärmeübertrager, wie dem Verdampfer und dem Kondensator, das Verbesserungspotential aufgezeigt werden. Hierfür soll der Temperaturverlauf bei der Wärmeübertragung berechnet und analysiert werden. Das Besondere an der Systemkopplung AWP und Fernwärme sind die hohen Temperaturen am Verdampfer von 30 °C. Daraus resultiert eine geringe Temperaturdifferenz zum Kondensator, weshalb die Notwendigkeit eines Kältemittelwärmeübertragers zur inneren Wärmerückgewinnung überprüft werden muss.

Im Vortrag wird auf den Aufbau der AWP und den Temperaturverlauf innerhalb eines Wärmeüberträgers eingegangen. Zusätzlich werden Optimierungsvorschläge für die AWP aufgezeigt.

Stichwörter:

Absorptionswärmepumpe, Komponenteoptimierung, Fernwärme

S.07

Entwicklung und Validierung eines neuronalen Netzwerks zur Simulation einer Adsorptionskältemaschine

Okan Sahin

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

Sorptions-Kältemaschinen werden immer häufiger eingesetzt, um Abwärme mit niedrigeren Temperaturen aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Maschinen zu nutzen oder um Solarenergie in Kälte umzuwandeln. Das innovative System Solarkühlung ist mit der komplett erneuerbaren Energieversorgung aus umweltfreundlichen und wirtschaftlichen Aspekten sehr interessant.

Um die zyklische Betriebsweise einer Adsorptionskältemaschine (AdKM) zu betrachten, sind sowohl thermische Rechnungen als auch mathematische Modelle wichtig. Mit der Entwicklung der Prozessorleistung der heutigen Computer bietet ein künstliches neuronales Netzwerk schnelle Prädiktionsmöglichkeiten.

Die Masterarbeit erforscht und diskutiert die Eignung künstlicher neuronaler Netzwerke für eine AdKM. Das komplexe Prozessverhalten wurde anhand realer Messdaten einer Adsorptionskältemaschine an der Beuth Hochschule mit der Programmiersprache *Matlab* modelliert. Auf diese Weise sind unterschiedliche künstliche neuronale Netze erstellt worden. Diese Netze werden hinsichtlich ihrer Annäherung an reale Daten miteinander verglichen. Zum Schluss werden die Ergebnisse mit Fokus auf das Netzmodell *NARX* (Nonlinear autoregressive exogenous model) bezüglich ihrer Annäherungsfähigkeit bewertet.

Stichwörter:

Absorptionswärmepumpe, neuronale Netze, Matlab, dynamische Simulation

Modellierung und konstruktive Auslegung eines Koaxialwärmeübertragers zur Verwendung in einer Propan-Kälteanlage

Lars Wilke^{1*}

¹ Hochschule Ruhr West, Lützowstraße 5, 46236 Bottrop, Deutschland

lars.wilke@stud.hs-ruhrwest.de

* Korrespondenzautor

Im Institut Energiesysteme und Energiewirtschaft an der Hochschule Ruhr West wird derzeit an einer "Smart-Grid-fähigen Plug-and-Play-Kälteanlage mit dem natürlichen Kältemittel Propan in Modulbauweise" geforscht. Für die Übertragung der Wärme am Verflüssiger und Verdampfer wurden herstellerseitig Plattenwärmeübertrager (PWT) gewählt. Da in der Literatur jedoch Koaxialwärmeübertrager (CHX) bisher weitgehend erforscht und messtechnische Untersuchungen bei dieser Bauform einfacher durchgeführt werden können, sollen die PWT zeitweise durch CHX ersetzt werden. Die Leistungen des Verdampfers und Verflüssigers wurden bereits durch die Eschenfelder KKK GmbH, Marl ausgelegt. Nach diesen Auslegungsgrößen soll im Rahmen dieser Arbeit nun der Verdampfer als CHX konstruiert werden.

Zu diesem Zweck wurden zunächst die relevanten Korrelationen zu den Wärmeübertragungsvorgängen in einem Doppelrohr aus aktueller Literatur betrachtet, konkrete Berechnungsvorschriften entwickelt und aus diesen ein Gesamtmodell erstellt. Die Umsetzung erfolgte in der Programmiersprache Python. Anhand des Modells konnten Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden, die gemeinsam mit der Übertragungsfähigkeit des Wärmeübertragers nach Baehr und Stephan für die Berechnung der Gesamtlänge dienen. Für die Modellbildung wurde der Koaxialwärmeübertrager in verschiedene Abschnitte aufgeteilt, für die jeweils eine andere Korrelation Gültigkeit besitzt.

Die insgesamt benötigte Länge des CHX beträgt 20,60 m, wobei hiervon der größte Teil auf den Siedevorgang mit 17,22 m entfällt. Die Länge, welche zur Überhitzung benötigt wird, beträgt 3,38 m. Diese Ergebnisse wurden nach insgesamt 10 Iterationen bei einem Fehler von 0,0 % erreicht. Dies bedeutet, dass die Länge, die zur Berechnung verwendet wurde, exakt der Länge entspricht, die durch das Modell berechnet wird.

Zur Validierung des Modells wurden Messwerte eines CHX der Universität Duisburg-Essen (UDE) verwendet. Mit den vorliegenden Messwerten wurde eine benötigte Länge zur Wärmeübertragung von 12,99 m simuliert. Die tatsächliche Länge des CHX der UDE beträgt 14 m. Dies entspricht einem Fehler von 7,21 %. Das entwickelte Modell und Simulationsprogramm ist anhand dieser Messwerte als valide zu betrachten. Lediglich bei der Berechnung der Siedekrise scheinen die angewandten Korrelationen nicht valide, da der kritische Strömungsdampfgehalt > 1 ist. Bei einer vollständigen Verdampfung und Überhitzung, wie in diesem Fall, ist jedoch mit dem Auftreten einer Siedekrise zu rechnen. Die abweichenden Werte für den Beginn der Siedekrise sind dadurch erklärbar, dass das Umrechnungsverfahren von Ahmad bisher keine nachgewiesene Gültigkeit für das Kältemittel Propan besitzt. Ein alternatives Verfahren zur Berechnung der Siedekrise konnte in aktueller Literatur nicht gefunden werden.

Insgesamt konnte die konstruktive Auslegung des CHX mithilfe des entwickelten Modells und des Simulationsprogramms erreicht werden, ein etwaiger Fehler wird durch die Sicherheit in der Auslegung von 20 % ausreichend berücksichtigt. Geänderte Durchmesser oder Temperaturverhältnisse können mithilfe des Simulationsprogramms schnell und einfach implementiert werden. Darüber hinaus ist auch die Simulation bei verschiedenen Wärmeträgermedien möglich.

Kältesystem mit alternativen Kältemitteln für die pharmazeutische Gefriertrocknung

Dominik Hof^{*1}, Simon Tobelander¹, Jens Philipp¹, Thomas Maurer²

¹OPTIMA pharma GmbH, Kältetechnik, Vor dem langen Loh 8, 35075 Gladenbach, Deutschland
dominik.hof@optima-packaging.com

²Technische Hochschule Mittelhessen, Wiesenstraße 14, 35390 Gießen, Deutschland
thomas.maurer@me.thm.de

Die Kältemittel R404A und R410A in zweistufigen Kältesystemen sind Stand der Technik in der pharmazeutischen Gefriertrocknung. Aufgrund des Phase-down Prozesses der EU kommt es bei diesen Kältemitteln verstärkt zu Lieferengpässen und starken Preisanstiegen. Nach der aktuellen EU F-Gas Verordnung ist die pharmazeutische Gefriertrocknung (Kühlung auf unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) von einem Kältemittelverbot ausgenommen.

Jedoch zeigt die aktuelle Marktsituation, dass R404A und R410A schwer lieferbar bis nicht mehr lieferbar sind. Aus umwelttechnischer Sicht und aus Gründen der Verfügbarkeit der Kältemittel, muss ein langfristiges alternatives Kältesystem für die pharmazeutische Gefriertrocknung entwickelt werden.

Um ein geeignetes Kältesystem für die pharmazeutische Gefriertrocknung zu entwickeln, wird zu Beginn untersucht, welche Kältemittel sich thermodynamisch für den Gefriertrocknungsprozess eignen. Bei dem pharmazeutischen Gefriertrocknungsprozess ist bei einer Kälteleistung von etwa 5 kW eine Verdampfungstemperatur von etwa $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ nötig. Ein alternatives Kältemittel muss aus Gründen der Kältemittelverfügbarkeit am Markt einen möglichst niedrigen GWP-Wert aufweisen.

Nach der Ermittlung geeigneter Kältemittel wird untersucht, mit welchen Kältemaschinen (Hubkolben, Schraubenverdichter, ...) und in welchen Kältesystemen (einstufig, zweistufig, Kaskade, ...) sich die Kältemittel am sinnvollsten betreiben lassen.

Es folgt die Bestimmung des am besten geeigneten Kältesystems hinsichtlich energetischer Effizienz, Betriebskosten, Anschaffungskosten und der Skalierbarkeit der Systeme. Das Ergebnis der Arbeit ist ein Konzept für ein alternatives Kältesystem für die pharmazeutische Gefriertrocknung. Dieses Konzept beinhaltet eine Sicherheitsbetrachtung des Systems, ein R&I-Fließbild und einen CAD Entwurf des Kältesystems.

Stichwörter:

Kältemittel, Gefriertrocknung, Tiefkühlung, Pharmazie

Transiente Simulation von kaskadierten Kältekreisläufen für den Anwendungsbereich unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Melanie Cop

Technische Universität Dresden, BITZER Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
Melanie.Cop@mailbox.tu-dresden.de

Vor dem Hintergrund der zweiten Phase des Kältemittel Phase-Downs nach der EU-Verordnung 517/2014 im Jahr 2018 kommt es zur Verknappung von Kältemitteln mit hohem GWP, wie R32. Obwohl zunächst als Ausnahme betrachtet, sind die Tieftemperaturkältemittel für die Anwendung unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ indirekt von dieser Entwicklung betroffen.

Aus diesem Grund wurde in einer Studie eine konventionelle Kältemittelkaskade, mit R23 auf der kalten und R404A auf der warmen Seite, mit einer Kaskade reiner Kohlenwasserstoffe, sowie einer zusätzlichen

Argontieftemperaturstufe, verglichen. Die transiente Simulation der kaskadierten Kreisläufe im Tool GT Suite ist vorteilhaft zur zeitlichen Darstellung der entstehenden Systemdrücke und zur Bestimmung der Kältemittelfüllmenge. Die betrachteten Varianten wurden nach dem Anfahrverhalten, dem inneren COP und dem Treibhauspotential bewertet.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Ethan (GWP 2) anstelle von R23 (GWP 14800) in der Tieftemperaturstufe zu einer kleineren Kreislauffüllmenge führt. Trotzdem steht der geringen Umweltbelastung durch reine Kohlenwasserstoffe und Argon die schlechtere Kreislauffeffizienz gegenüber. Dank des Modells sind weitere Untersuchungen der alternativen Kältekaskade möglich.

Stichwörter: Kältemittelkaskade, brennbare Kältemittel, Simulation

S.11

CO₂ Vapor Compression Systems and Cold Thermal Energy Storage

Yannik Zahrt

Weiss Umwelttechnik GmbH, Greizer Straße 41-49, 35447 Reiskirchen, Germany und
Europäische Studienakademie für Kälte- und Klimatechnik, ESaK, Maintal
yannik.zahrt@weiss-technik.com

It is well known that refrigeration systems with the working fluid carbon dioxide have proven their reliability and good performance in Northern Europe. Since this technology is the current preferred solution for commercial refrigeration and particular the food retail sector in this region it should be possible to provide this solution for even more applications. However, the working fluid carbon dioxide with the corresponding refrigeration systems are not included in the air conditioning business yet. As the European Union published minimum efficiency standards for the placement of comfort chillers on the EU market, which became active on the 1st January of 2018, it should have become even more difficult to provide such a system with the refrigerant carbon dioxide. Since the moment that a multi-ejector driven system allows efficient operation also in the part load regions, the adherence of the required minimum efficiency standards could be possible.

This project analyzes experimentally the adherence of the minimum efficiency standards, which are provided by the European Union through the EcoDesign Directive 2009/125/EG, with a transcritical carbon dioxide refrigeration system. For this experimental analyze the required test conditions for the fulfillment of the EcoDesign Directive 2009/125/EG are going to be determined. This required test conditions are going to be investigated on the transcritical carbon dioxide refrigeration system.

It was concluded that an ejector supported carbon dioxide refrigeration system is possible to fulfill the required minimum efficiency standards for an air-to-water comfort chiller.