

**Deutsche Kälte-
und Klimatagung**



Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019

Ulm

20. – 22. November 2019

Kurzfassungen

Veranstalter:

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.

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

Maritim Hotel Ulm

Basteistraße 40
89073 Ulm
T. +49 (0)731 923-0
F. +49 (0)731 923-1000
E. info-ulm@maritim.de
H. www.maritim.de

Inhaltsverzeichnis

Arbeitsabteilung I	5
Kryotechnik	
Arbeitsabteilung II.1	18
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung II.2	33
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung III	45
Kälteanwendung	
Arbeitsabteilung IV	60
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	
Studentenvorträge	75
Sonderthema: „Energieeffizientes Rechenzentrum“	81

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

I.01

Einsatz eines kompakten, mikrostrukturierten Wärmeübertragers im kryogenen Gemischkältekreislauf

Eugen Shabagin^{1*}, Steffen Grohmann^{1,2}

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

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

Kryogene Gemischkältekreisläufe (*Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycle* – CMRC) sind eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit zur Kühlung im Temperaturbereich des flüssigen Stickstoffs. Dieser nach dem Joule-Thomson-Effekt basierende, geschlossene Kreisprozess (Linde-Hampson-Prozess) eignet sich optimal zur Kühlung von supraleitenden Anwendungen, vor allem von supraleitenden Stromzuführungen. Die Wärmelast hochtemperatur-supraleitender Anwendungen liegt überwiegend in einen Bereich, in dem die Kälteleistung von Kryokühlern nicht ausreicht und die Kosten für Turbo-Braytonanlagen nicht wirtschaftlich sind. Die CMRC-Technologie bietet die Möglichkeit, die bestehende Technologielücke geschlossener Kühlsysteme für solche Anwendungen zu schließen.

Die technische Arbeit in einem Linde-Hampson-Prozess wird entscheidend durch den Energiebedarf der Drosselung und dem der Wärmeübertragung bestimmt. Die Entspannung mit einem Gemisch erfolgt im Vergleich zu reinen Stoffen bei wesentlich geringeren Druckdifferenzen, so dass der größte Anteil der Arbeit von der Irreversibilität der Wärmeübertragung geprägt ist. Durch die Anpassung der Kapazitätsströme lassen sich die Temperaturdifferenzen im gesamten Wärmeübertrager minimieren, so dass die Effizienz erheblich steigt. Dies erfordert jedoch eine große Wärmeübergangsfläche zur Übertragung einer vorgegebenen Leistung. Aus diesem Grund wird der Prototyp eines kompakten, mikrostrukturierten Wärmeübertragers in eine bestehende CMRC Anlage eingebaut und getestet. In dieser Arbeit werden die daraus gewonnenen Erfahrungen und die experimentellen Ergebnisse präsentiert.

Stichwörter:

Gemischkältekreislauf, CMRC, Linde-Hampson, mikrostrukturierter Wärmeübertrager

I.02

Neuer Wärmeübertrager für den Brayton-Prozess

H. Quack, Ch. Haberstroh

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, TU Dresden, 01062 Dresden
quack@sunrise.ch

Für Anwendungen der Hochtemperatur-Supraleitung werden häufig kompakte Kältemaschinen gesucht. Brayton-Kühler könnten im Prinzip eine günstige Lösung erlauben. Größe und Gewicht solcher Brayton-Kühler sind jedoch derzeit durch die vergleichsweise voluminösen und schweren Gegenstrom-Wärmeübertrager vorgegeben. Stand der Technik ist der Einsatz vakuumgelöteter Aluminium-Plattenwärmeübertrager.

Die Größe eines Gegenstrom-Wärmeübertragers ist in etwa proportional zum Quadrat des hydraulischen Durchmessers der Strömungskanäle. Bei Platte-Rippe-Austauschern liegt dieser bei etwa 2 mm. Man sollte in Zukunft in die Größenordnung von 1 mm kommen.

In den letzten Jahren hat die Technologie des 3-D Druckens große Fortschritte gemacht. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, wie man eine geeignete Struktur durch 3-D Drucken erzeugen kann. Die

hydraulischen Durchmesser wurden zunächst auf etwa 1,2 mm reduziert. Gleichzeitig wurde eine Geometrie für ein sehr gutes Verhältnis von Wärmeübertragung zu Druckverlust gewählt. Theoretische Überlegungen zufolge sollte dies bereits eine Größenreduktion um einen Faktor 3 ergeben.

Erste Muster wurden hergestellt und getestet. Hierüber wird berichtet.

Angedacht ist die Realisierung von Braytonkühlern mit Neon, Helium oder einer Mischung der beiden Gase als Kältemittel auf Basis solcher 3D-gedruckten Wärmeübertrager. In Verbindung mit passenden Kompressoren und Expansionsturbinen könnten damit sehr kompakte Kühler mit einer Kälteleistung von 300 W oder mehr bei 50 K realisiert werden.

I.03

Direkte Bestimmung des ortho-para-Verhältnisses bei Wasserstoff

Sebastian Mirz, Robin Größle

Institut für Kernphysik (IKP), KIT, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
sebastian.mirz@kit.edu, robin.groessle@kit.edu

Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist in den zwei Helmholtz-Programmen Materie und Energie beteiligt. Für diese werden Tritium-Technologien entwickelt und Grundlagenforschung betrieben. Ein Schwerpunkt ist dabei die Tritium- und Wasserstoffanalytik. Es werden aktivitätsbasierte Systeme, wie Kalorimetrie, die sensitiv auf den atomaren Tritiumgehalt sind entwickelt, aber auch Methoden wie Massen-, Raman- und IR-Spektroskopie, mit denen die molekulare Zusammensetzung analysiert werden kann. Die Bandbreite der Anwendung reicht dabei vom Nachweis von Spuren von Tritium bis hin zu Messungen an fast reinem Tritium. Eine interessante Aufgabenstellung ist hierbei auch die Messung des ortho-para-Verhältnisses der drei Isotopologe H_2 , D_2 und T_2 . Mittels Ramanspektroskopie gibt es am TLK eine Methode zur direkten Messung der Rotations-Besetzungszahlen und damit des ortho-para-Verhältnisses. Dies wird mittlerweile routinemäßig in Experimenten zur Untersuchung der Kinetik von Katalysatoren eingesetzt. Aktuelle Experimente am TLK konnten zeigen, dass die kryogene Destillationskolonne, eigentlich zur Isotopentrennung designt, auch in der Lage ist, ortho- und para- D_2 zu trennen. Auch hier fand die Messung mit Hilfe der Ramanspektroskopie statt. Für die kryogene Destillationsanlage befindet sich zudem die IR-Spektroskopie in der Entwicklung, um sie später direkt in eine solche Destillationsanlage zu integrieren. Die Herausforderung besteht hierbei in einer ungewöhnlich komplexen Kalibrierung aufgrund der wechselwirkungsinduzierten Übergangsdipolmomente. Auch hier zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Spektren vom ortho-para-Verhältnis.

In diesem Beitrag wird ein kurzer Überblick über das TLK mit dem Schwerpunkt auf Tritiumanalytik, der Messung des ortho-para-Verhältnisses und der Konzentration kalter Wasserstoffisotopologe gegeben.

I.04

Flüssiger Wasserstoff als Energieträger im LKW-Fernverkehr

Julian Will, Christoph Haberstroh,

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, TU Dresden, 01062 Dresden
julian.will@tu-dresden.de

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für den Verkehrssektor wird in den nächsten Jahren noch einmal wesentlich an Relevanz gewinnen. Dabei wird im Bereich des LKW-Fernverkehrs eine Speicherung in tiefkaltflüssiger Form forciert. Aus ingenieurtechnischer Sicht sind hierbei einige Herausforderungen zu stemmen, um eine mobile Anwendung von Flüssigwasserstofftanks realistisch zu gestalten. Der Beitrag behandelt wichtige Aspekte, welche bei der Entwicklung entsprechender Systeme signifikant sind. Wie verhält sich beispielsweise das thermodynamische System in Bezug auf den unvermeidlichen Wärmeeintrag und welche Optima lassen

sich diesbezüglich finden? Weiterhin werden die Gefahren solcher Konzepte diskutiert. Die Ausführungen sollen das Potential der Technik aufzeigen und eine Vorstellung der zukünftigen Applikation vermitteln.

I.05

Einsatz vorisolierter Rohre am Anwendungsbeispiel LNG-Terminal Finnland

Dipl.-Ing. (TU) Thadeus Hoss, Christian Hoppe

Jabitherm Rohrsysteme, AGBrügger Str. 6, D-53842 Troisdorf, Telefon + 49 (0) 2241 9535-33,
Telefax + 49 (0) 2241 9535-40, Mobil +49 (0) 172 9274033
Thadeus.Hoss@jabitherm.com, christian.hoppe@jabitherm.com

Rohrisolierungen für kryogene Prozesse bis -195°C wie beispielsweise Vakuumtechnik oder vorgeformte Isolierschalen stellen erhebliche technische und ökonomische Anforderungen an Anlagenwartung und -überwachung.

Für einen LNG-Terminal in Finnland mit Entladestation, Vorratstanks und Versorgungsleitungen für regionale Verbraucher suchte ein Investor eine technische Lösung, die mehrere Forderungen im Zuge des Betriebs erfüllen sollten:

- Minimierter Wartungsaufwand
- Kurze Errichtungszeiten und geringer Rüstaufwand
- Minimierter Wärmeverlust im Rohr
- Extreme mechanische Festigkeit und Alterungsbeständigkeit
- Erweiterter Brandschutz

Das Konzept vorisolierter Rohre erschien als die mögliche Wahl.

Investitionskosten die um 30 % reduziert sind verbunden mit einem Isoliersystem aus einer geschlossenzelligen Schaumisolierung umhüllt von diffusionsbeständigen Spiralfalzmänteln waren ausschlaggebende Argumente für die Auswahl.

Der Brandschutz durch das System FIRESAFE® mit T90-Klassifizierung beantwortete dann auch die letzte Frage des Investors nach der Sicherheit im Brandfall. Die Entscheidung fiel auf das vorisolierte Rohr des Typs RAPID-CRYO.

Die Lösung hat sich seit Inbetriebnahme des LNG-Terminals vor 2 Jahren bewährt. Technisch wie ökonomisch. Der LNG-Terminal versorgt heute die Produktion eines namhaften Stahlwerkes in Finnland.

I.06

Sichere Produktauswahl für mobile und stationäre Kryo-Applikationen

T. Cordes, E. Dölschner, K. Erlenkamp

Herose GmbH, Bad Oldesloe

In kaum einem angestammten Bereich sind die Normen und Zulassungsregeln international so sehr in Bewegung, wie im Bereich der Kryotechnik. Verschiedene Gase – unterschiedliche Regeln und Standards; verschiedene Applikationen – unterschiedliche Zulassungen. HEROSE, führender Hersteller von Armaturen, Sicherheitsventilen und Reglern in der Kryotechnik, stellt sich dieser Herausforderung. HEROSE zeigt auf, wie sich Konstrukteure und Anwender sicher in der Normenlandschaft für Luft- und Industriegase sowie LNG in Europa anderen Kontinenten aber auch Onshore und Offshore bewegen können. Belegt wird dies mit umfangreichen Beispielen aus der betrieblichen Praxis.

Elektrischen Antrieb mithilfe innovativer Vakuum- und Kryotechnologie vorantreiben

Stefan Lausberg

Leybold GmbH, Bonner Str. 498, 50968 Köln, Tel.: +49 221 347 1035

stefan.lausberg@leybold.com

Bei Ionentriebwerken werden ionisierte Teilchen, in der Regel Xenon, in einem elektrischen Feld beschleunigt. Üblicherweise geschieht das bei einem Gasstrom von 0,1 bis 50 mg°/sec. Um die Hochvakuumbedingungen in der Prüfkammer aufrechtzuerhalten, ist ein Saugvermögen von 10'000 bis 1'000'000°l/s erforderlich. Standard-Hochvakuum Pumpen können kein angemessenes Saugvermögen kostengünstig bereitzustellen. Darüber hinaus stellt das schwerste stabile Edelgas Xenon die modernen Vakuumanlagen vor große Herausforderungen. Leybold hat eine einfache kryogene Lösung zum Pumpen von Xenon entwickelt und optimiert. Unsere leistungsstarken Kaltflächen kondensieren Xenongas mit einem Saugvermögen am theoretischen Limit. In diesem Vortrag stellen wir vor, wie wir die Kaltflächen zusammen mit anderem Vakuumequipment kombinieren um ein Kosten- und Leistungs-optimiertes System bereitzustellen.

Benutzerfreundliche Kühlung von supraleitenden Systemen

Achim Hobl^{1*}, Wolfgang Walter¹

¹Bilfinger Noell GmbH, Magnet Technologies, Alfred-Nobel-Straße 20, 97080 Würzburg, Deutschland

achim.hobl@bilfinger.com

Supraleitende Systeme erfordern zum Betrieb kryogene Temperaturen. Diese Temperaturbereiche können inzwischen durch kommerziell verfügbare Kühler gut erreicht werden, wodurch insbesondere sogenannte leitungsgekühlte Systeme sehr benutzerfreundlich gestaltet werden können. Die besondere Herausforderung solcher Systeme ergibt sich aber aus der thermische Anbindung von ausgedehnten Kaltmassen mit den unterschiedlichsten Wärmeeinträgen aus beispielsweise Wärmeleitung, -strahlung, internen Quellen wie AC-Verlusten und elektrischen Kontakten. Die supraleitenden Systeme müssen auch zur Erstinbetriebnahme, nach Wartungs- oder Fehlerfällen schnell auf Betriebstemperatur abgekühlt werden können. Grundsätzlich ähnliche Kühltechnologien werden bei Anwendungen sowohl von Tief- als auch von Hochtemperatursupraleitern genutzt.

Im Folgenden werden verschiedene Lösungen dieser Aufgabenstellungen präsentiert und Ergebnisse der Abkühlung und des Betriebs von supraleitenden Magnetsystemen und von Energiespeichern als Systeme der elektrischen Energietechnik gezeigt.

Eine Wolke – zwei Kühlkonzepte

Forschungskammern mit aktiver Wandkühlung und hoher Temperaturhomogenität

Tatjana Pfeuffer^{1*}, Achim Hobl¹, Dr. Wolfgang Walter¹

¹ Bilfinger Noell GmbH, Magnettechnik, Alfred-Nobel Str. 20, 97080 Würzburg, Deutschland
Noell.info@bilfinger.com

In Zusammenarbeit zwischen Bilfinger Noell und dem Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Meteorologie und Klimaforschung wurden zwei Expansionskammern für die Wolkenforschung entwickelt. Die beiden Kammern unterscheiden sich aufgrund des Volumens, des Kühlkonzeptes und des Einsatzortes.

Die stationäre Wolkenkammer (AIDA-2) wurde im IMK installiert und umfasst ein Testvolumen von 3900 l für einen Temperaturbereich von +30°C bis -50°C mit aktiver Wandkühlung. Hauptanforderung ist eine Abkühlrate von 10 K/min bei einer Temperaturhomogenität von +/- 2 K an der Mantelfläche bzw. +/- 3 K an der Boden- und Deckfläche während des Abkühlvorgangs. Bei konstanter Temperatur muss eine Temperaturhomogenität von +/- 0,3 K erreicht werden. Eine zusätzliche Anforderung ist, dass die Wandkühlung der Kammer in fünf separat Kühlkreisläufe unterteilt ist um die verschiedenen Schichten der Atmosphäre nachzubilden.

Die portable Wolkenkammer (PINE) umfasst ein Volumen von 10 l und wird bei Feldkampagnen eingesetzt. Durch die Auslegung als „trockenes“ System konnte ein kompaktes, mobiles und autark arbeitendes Messsystem aufgebaut werden. Die Kühlung wurde mittels eines Pulsrohrkühlers realisiert, der Temperaturbereich der Expansionskammer liegt im Betrieb zwischen -10°C und -60°C.

In dem Vortrag wird die Realisierung der beiden Expansionskammern gezeigt.

Inbetriebnahme des Tieftemperatur- Phasengleichgewichtsprüfstands CryoPHAEQTS

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

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

² Institut für Technische Physik (ITEP), Karlsruher Institut für Technologie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
jens.tamson@kit.edu

Supraleitende Energienetze oder dezentrale Wasserstoffverflüssiger erfordern Temperaturen unter 77 K bei einigen kW Kühlleistung. Diese Bedingungen können effizient mittels kryogener Gemischkältekreisläufe (*engl. cryogenic mixed refrigerant cycles*, CMRC) erreicht werden. Für das verfahrenstechnische Design dieser CMRC sind Stoffdaten kryogener Fluidgemische notwendig, die neben einigen binären Systemen noch unbekannt sind.

Am KIT wird daher der Tieftemperatur-Phasengleichgewichtsprüfstand CryoPHAEQTS errichtet, um präzise Stoffdaten in einem Temperaturbereich von 15–300 K und bis zu Drücken von 15 MPa zu ermitteln. Neben Dampf-Flüssig-Gleichgewichten können auch Dampf-Flüssig-Flüssig- und Fest-Flüssig-Gleichgewichte untersucht werden. Zusätzlich kann die spezifische Wärmekapazität der Gasphase im Gleichgewicht bestimmt werden, indem ein neuer kryogener thermischer mit einem Coriolis-Durchflussmesser kombiniert wird. Durch die Messung kalorischer und thermischer Größen der Mischungen können neue Zustandsgleichungen entwickelt werden, die alle thermodynamischen Zustandsgrößen abdecken.

In dieser Präsentation stellen wir den Fortschritt der Anlage vor und zeigen erste Erkenntnisse der Inbetriebnahme. Zur Validierung der Genauigkeit der Phasengleichgewichtsmessdaten werden Ergebnisse von Reinstoffmessungen mit Literaturdaten verglichen.

I.11

Wärmeübergangskennzahlen von tiefkaltem N₂ und CO₂ und deren Einfluss auf die Metallbearbeitung

M. Brouns, R. Grandeau, J. Jagemann

Air Liquide Deutschland GmbH, Krefeld

marcel.brouns@airliquide.com

I.12

Erzeugung und Eigenschaften von Wassereispartikeln zur kryogenen Oberflächenbearbeitung

F. Ritschel, H. Nowak, M. Thürk,

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für Festkörperphysik, Helmholtzweg 5, 07745 Jena

wolf-fabian.ritschel@uni-jena.de

Kryogene Partikel aus Wassereis stellen ein vielversprechendes Substitut für klassische feste Strahlmittel zur Oberflächenbearbeitung wie Hüttensand oder Korund dar^[1]. Sie ermöglichen damit die Realisierung ökonomischerer, ökologischerer und weniger gesundheitsschädlicher Entschichtungs-Verfahren, als nach dem bisherigen Stand der Technik, sowie effektive Methoden zur Oberflächenreinigung. Im Beitrag wird die Temperaturabhängigkeit der Festigkeit von Wassereis, insbesondere das Verhalten der Bruchlast, über einen weiten Temperaturbereich präsentiert. Die daraus resultierenden vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten von schonender Oberflächenreinigung ohne feste Strahlmittelrückstände bis hin zum abrasiven Entfernen von Farb- und Lackschichten werden dargestellt. Abschließend wird ein Verfahren zur Erzeugung geeigneter Wassereispartikel im industriellen Maßstab vorgestellt.

Stichwörter:

Entschichtung, Wassereis, Festigkeit, kryogen

I.13

Cryogenic Cold Stores for Liquid Air Energy Storages

Christian Wendt^{1*}, Niklas Bohne¹, Philipp Bobsin², Detlef Eggers², Gregor Trommler³, Martin Klupsch³

¹ ArianeGroup GmbH, Airbus-Allee 1, 28199 Bremen, Germany

ChristianDr.Wendt@ariane.group

² RST Rostock System-Technik GmbH, Friedrich-Barnewitz-Straße 9, 18119 Rostock, Germany

P.Bobsin@rst-rostock.de, D.Eggers@rst-rostock.de

³ Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Germany

Gregor.Trommler@ilkdresden.de, Martin.Klupsch@ilkdresden.de

In the frame of the nationally funded cluster initiative „Offshore Wind Solutions (OWS)“ a sustainable electricity storage system without geographical limitations has been studied. Such storages are needed for balancing the grid during peaks, which are expected to be even more emphasized by renewable power generation, such as offshore wind parks, in the future. The system studied – known as Liquid Air Energy Storage (LAES) – is based on a cyclic air liquefaction and re-gasification process, where the re-gasification is coupled to a cryogenic turbo machinery for re-generation of electricity. Although the round-trip efficiency of the LAES may benefit from all kinds of waste heat and cold from other industries fed into the system, harvesting of cold from the regasification step considerably reduces the effort for the next liquefaction cycle, especially for a standalone LAES.

Therefore, a more effective cold store, partly filled with Phase Change Material (PCM), has been developed. The PCM has a melting point in the appropriate cryogenic temperature regime and is made of encapsulated Ethanol. It is placed in the lower end of the cold store module and occupies about 20 %vol.; the rest is filled up with gravels. In dedicated simulations of the complete cycle of cold store charging, downtime and discharging phase, the module with PCM turn out to be more efficient by about 8.5 % compared to a standard LAES cold store made of gravels only. In a 1/4-scaled setup of the cold store module, the discharging has been tested for both configurations, the pure gravel configuration and the newly developed combination of gravels with PCM. First measurements show general agreement between experiment and theory. However, refined tests are proposed for ultimate model correlations.

Keywords:

Cryogenic, cold storage, phase change material, liquid air energy storage, efficiency

I.14

Europäische Norm für den Schutz von Heliumkryostaten gegen Drucküberschreitung

S. Grohmann^{1,2*}, H. Barthélémy³, U. Bozkas⁴, P. Bredy⁵, R. Down⁶, E. Ercolani⁷, J.-L. Fournel⁸, A. Henriques⁹, L. Jardel¹⁰, M. Krichler¹¹, W. Otte¹², V. Parma⁹, R. Pengo¹³, J.-M. Poncet⁷, M. Reinhardt¹⁴, R. Soika¹⁵, R. Vallcorba-Carbonell⁵, C. Weber¹, L. Wrede⁴, G. Zick⁸ und C. Zoller¹⁶

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

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

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

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

⁵CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette (F)

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

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

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

⁹CERN, CH-1211 Geneva 23 (CH)

¹⁰AFNOR, 11 rue Francis de Pressensée, 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex (F)

¹¹Bilfinger Noell GmbH, Alfred-Nobel-Str. 20, 97080 Würzburg (D)

¹²Air Liquide Deutschland GmbH, Füttingsweg 34, 47805 Krefeld (D)

¹³INFN, Legnaro National Laboratories, Viale dell'Università 2, 35020 Legnaro (PD) (I)

¹⁴Herose GmbH, Elly-Heuss-Knapp-Str. 12, 23843 Bad Oldesloe (D)

¹⁵Linde Kryotechnik AG, Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen (CH)

¹⁶PSI, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI (CH)

steffen.grohmann@kit.edu

Gegenüber reinen Lagerbehältern für kryogene Gase und Flüssigkeiten beinhalten Heliumkryostate aktive Komponenten wie supraleitende Magnete und Kavitäten, Heizer, Pumpen und Regelventile, die das Risiko der Drucküberschreitung wesentlich beeinflussen. Die Europäische Norm „Heliumkryostate – Schutz gegen Drucküberschreitung“ wird deshalb von der Arbeitsgruppe CEN/TC 268/WG6 erarbeitet, die sich speziell mit Anwendungen der Heliumtechnologie beschäftigt.

Die auf diesem Gebiet erste internationale Norm betrifft alle Heliumkryostate, einschließlich supraleitende Magnetkryostate, Kryostate für supraleitende Beschleunigerkavitäten, Helium-Refrigeratoren und -Verflüssiger, Tiefsttemperatursysteme mit ^3He und $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Gemischen sowie Helium-Transfersysteme. Sie harmonisiert den Prozess der Risikoanalyse, die Schutzkonzepte, die Dimensionierung der Druckentlastungseinrichtungen sowie die Anforderungen für den Betrieb von Heliumkryostaten.

Der Beitrag erläutert die allgemeine Struktur und die konzeptionellen Verbesserungen der neuen Norm, sowie den aktuellen Arbeitsstand.

Stichwörter:

Helium, Kryostat, Sicherheit, Normung

I.15

Digitalisierung 4.0 von Kryobanken am Beispiel des BIOSAFE®-smart

Markus Wörsing, Dipl.Ing. (FH) Wolfgang Flohr

Cryotherm GmbH & Co. KG, Vertrieb / Produktentwicklung, 57074 Kirchen (Sieg)

markus.woersing@cryotherm.de, wolfgang.flohr@cryotherm.de

Digitalisierung 4.0 von Kryobanken bedeutet die Vernetzung verschiedenster Teilbereiche der Kryokonservierung wie zum Beispiel: Vorbehandlung, Einfrierprozeß, Transfer zur Einlagerung, Lagerphase, Transfer zum Auftaegerät, Auftauprozeß und Nachbehandlung.

Alle Teilbereiche sind miteinander vernetzbar.

Jede Einzelkomponente muss dafür ausgelegt sein.

Anhand der Entwicklung der Komponente BIOSAFE-smart soll dies mit Schwerpunkt auf der Lagerung dargestellt werden.

Beim Einsatz als Medizinprodukt entstehen hieraus zusätzliche, hohe Anforderungen an den Entwicklungs- und Zulassungsprozess, insbesondere der Software-Komponenten.

Da speziell bei Kryobehältern für die Langzeitlagerung aufgrund ihres stationären Einsatzes mit erheblichen Produktlebenszeiten zu rechnen ist, muss mit geeigneten Mitteln auch der bestehende Behälterpark technisch und zulassungsrelevant auf das Niveau der „Digitalisierung 4.0“ aufrüstbar sein.

Stichwörter:

Kryobanken, Kryokonservierung, Kryobehälter, Zulassungsprüfungen, Medizinprodukte, 21 CFR Part 11

I.16

ILO (Industrial Liaison Officer) – Tätigkeit am CERN für die deutsche Industrie

Dr. Friedrich Haug

ehem. CERN; Verbindungsstelle Deutsche Industrie – CERN, c/o CERN, CH-1211 Genf 23, beauftragt vom BMBF

Friedrich.Haug@cern.ch

Das Europäische Kernforschungszentrum in Genf ist die weltgrößte Forschungseinrichtung für Teilchenphysik und beherbergt mit dem LHC den mit 27 km Umfang größten je gebauten Teilchenbeschleuniger. Finanziell wird es von Mitgliedstaaten getragen, wobei Deutschland sein größter Beitragszahler ist. CERN benötigt in großem Maße die einschlägige Industrie für die Entwicklung, den Aufbau und den Betrieb seiner Anlagen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ist an einer hohen Beteiligung deutscher Firmen an

Ausschreibungen interessiert. Zur Förderung wurde vom BMBF im Jahre 1995 das CERN Liaison Office gegründet, das neben CERN auch weitere europäische Forschungseinrichtungen unterstützt. Das BMBF ernennt und beauftragt jeweils einen „Liaison Officer“, der vor Ort im Auftrag die Ziele fördern soll. Ein Ziel ist, den Anteil der Vergabe von Aufträgen an die deutsche Industrie zu erhöhen. Typische Aufgaben sind: Kontaktaufnahme, Firmen am CERN einzuführen, Kontaktherstellung zu den technischen Abteilungen und dem Einkauf, Unterstützung im Bereich Technologietransfer. Neben Industrieaufträgen für die Beschaffung wird im Bereich Forschung und Entwicklung oft mit externen Instituten und der Industrie kooperiert. Kältetechnik und Kryotechnik sind von zentraler Bedeutung für CERN's Beschleuniger und Detektoren. Eine Vielzahl von Industrieaufträgen wurden in der Vergangenheit vergeben und werden auch für die Zukunft erwartet. Der Vortrag umfasst eine kurze Vorstellung des CERN, der Beschaffung und Beschaffungsregeln („Procurement“) und die Aufgaben des Liaison Officers und gibt einen kurzen Abriss der Kryo- und Kältetechnik am CERN. Der Autor ist der vierte Liaison Officer seit der Gründung des Büros.

I.17

Kryogene Installationen und Anwendungen bei MAMI und MESA

K. Aulenbacher, A. Denig, F.E. Maas, E. Schilling, A. Skora, Institut für Kernphysik, Univ. Mainz

schier01@uni-mainz.de

In Mainz werden an den Beschleunigern MAMI und zukünftig auch an MESA Versuche mit der Streuung von Elektronen an Atomkernen durchgeführt. Ähnliches geschieht in einem Elektronenmikroskop mit einer Ortsauflösung von 10^{-10} m. Unsere Beschleuniger in Mainz erreichen mit einer Beschleunigungsspannung von bis zu 1,5 Gigavolt eine sehr viel höhere Auflösung (hinunter bis zu $0,1 \times 10^{-15}$ m). Dies erlaubt, Kernstrukturen abzutasten sowie Elementarteilchen zu erzeugen, die Aufschluss geben über das Zusammenspiel und die Eigenschaften der fundamentalen Kräfte der Natur auf kleinsten Distanzen. Ziel ist in Mainz u.a. die weltweit präziseste Messung des Formfaktors des Protons, aus dem sich der Radius extrahieren lässt. Der Protonenradius wird zurzeit diskutiert, weil eine neue atomspektroskopische Messung mit Myonen anstelle von Elektronen am Wasserstoff ein signifikant abweichendes Ergebnis liefert. Myonen sind im Rahmen fundamentaler Theorien bisher (bis auf die 200fach größere Masse) „dasselbe“ wie Elektronen.

Die Anwendungen von Kryoplanzen und Kryogeräten an den Beschleunigern sind sehr vielfältig. Der Temperaturbereich, über den hier berichtet wird, erstreckt sich über 3 Größenordnungen, in Mainz von 20 mK bis 20 K. Entsprechend sind die Mengen (1 mg/s bei 0,1 mbar bis 4 g/s Helium bei 18 mbar), die in Verdampferkryostaten (u.a. mit Joule-Thomson-Entspannung) und/oder unter Verrichtung von Arbeit (Claude-Prozess) expandiert werden. Entsprechende (relativ große) Vakuumpumpstände, Heliumkompressoren und Wärmeübertrager gehören dazu.

Die kälteste Anwendung (1 mg/s), ein ^3He - ^4He -Mischkryostat, friert Kernspins bei 20 mK ein. Die „wärmste“ Anwendung (bei 13 K) verflüssigt Wasserstoff kurz über dem Tripelpunkt. Das passiert in sogenannten „Targets“ (engl. für Ziel, hier für den Elektronenstrahl).

Die jüngste Anwendung (beim supraleitenden Energierückgewinnungsbeschleuniger MESA) läuft bei 1,8 K und 4 g/s und dient zur Erzeugung superfluiden Heliums, dessen gegen die Schwerkraft kriechender Film (unter 2,1 K, am sog. Lambda-Punkt) die supraleitenden Mikrowellen-Kavitäten aus Niob benetzt und kühlt.

I.18

Trockener ^3He -Kryostat für Probenkühlung auf 600 mK bei 26 T

R. Wahle, K. Kiefer, P. Smeibidl, S. Gerischer, B. Klemke

Helmholtz-Zentrum Berlin, Hahn-Meitner-Platz 1, 14109 Berlin

Wir beschreiben einen horizontalen, trockenen ^3He -Kryostaten, der für Neutronenstreuexperimente am „Extreme Environment Diffractometer“ des Berliner Experimentierreaktor II am Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelt wurde. Der Kryostat kühlt Proben auf eine Temperatur von 600 mK und arbeitet bei Magnetfeldern bis zu 26 T. Er ist in einen Vakuumbehälter eingebaut und mit einem zweistufigen Pulsrohrkühler ausgestattet, der ein 50 K-Schild kühlt und ^4He in einem Reservoir kondensiert. Über ein Nadelventil wird ^4He in einen Verdampfer geleitet, der ein 2 K-Schild kühlt und als Kondensator für ^3He dient. Mit 1,5 K wird ^3He über ein zweites Nadelventil in einen ^3He -Verdampfer geleitet und kühlt mit einem Durchsatz von 120 $\mu\text{mol/s}$ die Probe im Magnetfeldzentrum.

I.19

Effizienzsteigerung durch Modernisierung von zwei Helium-Kälteanlagen

Christian Geiselhart

Paul Scherrer Institut, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Schweiz

christian.geiselhart@psi.ch

Am Paul Scherrer Institut (PSI), dem größten Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften der Schweiz, werden derzeit sechs Kälteanlagen zur tiefkalten Verflüssigung von Helium betrieben. Vier der sechs Kälteanlagen versorgen direkt die Großforschungsanlagen des PSI, wie zum Beispiel die Swiss Spallation Neutron Source (SINQ), eine supraleitende Kavität in der Grossforschungsanlage SLS (Synchrotron Lichtquelle Schweiz), die Forschungsanlage UCN (Ultra Cold Neutron Source), sowie die SULTAN Testanlage für supraleitende Kabel mit flüssigem oder überkritischem Helium. Zwei der Kälteanlagen werden für die Versorgung von zahlreichen kleineren Experimenten und für die Abfüllung von mehr als 200 000 l Flüssighelium pro Jahr in Dewars verwendet.

Bisher wurden vier der sechs Kälteanlagen mit alten Kolbenkompressoren betrieben, welche im Vergleich zu energieeffizienteren Schraubenkompressoren einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad haben und deren Betrieb mit einem erheblich höheren Wartungsaufwand und höheren Unterhaltskosten verbunden ist.

Im Rahmen des Projekts Helium-Kompressoren-Wechsel (HeKoWe) wurden zwei Kälteanlagen mit dem Ziel der Effizienzsteigerung, Reduktion der zukünftigen Wartungs- und Unterhaltsarbeiten und Steigerung der Verfügbarkeit modernisiert. In diesem Beitrag wird der erfolgreiche Umbau dieser Kälteanlagen von zwei Kolbenverdichtern auf drei Schraubenkompressoren, die Anpassung der Anlagensteuerung und Infrastruktur sowie der Gebäudeumbau vorgestellt. Außerdem werden die Erfahrungen und Ergebnisse aus dem ersten Betriebsjahr der modernisierten Anlagen präsentiert sowie ein Ausblick auf weitere mögliche Modernisierungsprojekte rund um die Kälteanlagen am PSI gegeben.

Stichwörter:

Schraubenkompressor, Kolbenkompressor, Heliumverflüssigung, Effizienzsteigerung

I.20

Inbetriebnahme eines Teststands für supraleitende Komponenten

Carolin Zoller^{1*}, Ciro Calzolaio¹, Alexander Gabard¹, Jiani Gao¹, Paola La Marca^{1,2}

¹Abteilung Beschleunigertechnologie, Paul Scherrer Institut (PSI), Forschungsstrasse 111,
CH-5232 Villigen PSI, Schweiz
carolin.zoller@psi.ch

²Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via Giuseppe La Masa 1, 20156 Mailand, Italien

Am Paul Scherrer Institut (PSI), dem größten Forschungsinstitut für Natur- und Ingenieurwissenschaften in der Schweiz, sind für die nächsten Jahre mehrere Projekte geplant, in welchen mit Kryokühlern gekühlte supraleitende Magnete zum Einsatz kommen. So werden beispielsweise für ein Upgrade der Synchrotron Lichtquelle Schweiz (SLS-2) mehrere 2-4 T Superbend-Magnete aus Nb-Ti entwickelt, welche aufgrund der starken Einschränkung des vorhandenen Platzes konduktiv mit Kryokühlern gekühlt werden. Außerdem sind die Entwicklung von supraleitenden Undulatoren und Spulen unter Verwendung von Hochtemperatursupraleitern geplant.

Um diese sehr unterschiedlichen Komponenten magnetisch, thermisch und mechanisch unter Betriebsbedingungen charakterisieren zu können, wurde ein neuer variabler Teststand am PSI aufgebaut und in Betrieb genommen.

In diesem Beitrag wird ein Überblick über die am PSI geplanten Projekte mit supraleitenden Komponenten gegeben. Außerdem werden die Infrastruktur und der Aufbau des neuen Magneteststands sowie die Ergebnisse der Inbetriebnahme vorgestellt.

Stichwörter:

Supraleitender Magnet, Kryokühler, Teststand, Betriebsbedingungen

I.21

Kühlung supraleitender Stromkabel mit unterkühltem Stickstoff

F. Herzog¹, T. Kutz²

¹Messer Group GmbH, Gahlingspfad 31, 47803 Krefeld, Germany, ²Messer Industriegase GmbH, 65812 Bad Soden, Germany,
friedhelm.herzog@messergroup.com

Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) können mit flüssigem Stickstoff sehr effizient gekühlt werden. Bei Energieversorgungskabeln aus diesen Materialien erhöht sich die Stromtragfähigkeit mit sinkender Temperatur erheblich. Deshalb werden diese Kabel mit unterkühltem Flüssigstickstoff betrieben. Die Unterkühlung ist allerdings begrenzt auf eine Temperatur von 64 K (-209°C) weil bei 63 K (-210°C) der Stickstoff gefriert.

Im Jahr 2014 wurde ein supraleitendes Kabel der Firma Nexans von der RWE-Deutschland AG (heute: Innogy SE) in der Innenstadt von Essen installiert (AmpaCity-Projekt). Messer lieferte die hierfür erforderliche Kühlanlage, mit der Flüssigstickstoff auf eine Temperatur Nahe des Stickstoff-Festpunktes abgekühlt und durch das Kabel gepumpt wird. Das System läuft seitdem ohne nennenswerte Störungen.

Die nunmehr über 5-jährige Betriebserfahrung stellt die hohe Zuverlässigkeit des HTS-Systems incl. der Kühlung unter Beweis. Die positiven Betriebserfahrungen zeigen, dass ein solches Kabelsystem ohne Probleme betrieben werden kann. Es ist in der Lage ist, einen wichtigen Beitrag zur Modernisierung des Verteilnetzes im Hinblick auf die zukünftigen Herausforderungen durch Energiewende, Elektromobilität und Ersatzbedarf für alte Kabelsysteme zu liefern.

Keywords:

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

I.22

Stirling-Kleinkühler für IR und andere Hochleistungssensoren – Stand und Entwicklungstendenzen

Marcel Nussberger*, Ingo Rühlich, Markus Mai, Carsten Rosenhagen, Sebastian Zehner, Thomas Wiedmann

AIM Infrarot-Module GmbH, Theresienstr. 2, D-74072 Heilbronn
www.aim-ir.com, Marcel.Nussberger@aim-ir.com

In den letzten 15 Jahren haben sich Technologie und Leistungsklassen für Stirling-Kleinkühler aufgrund von Weiterentwicklungen der IR-Sensoren deutlich verändert. Die Betriebstemperatur für MWIR-Sensoren (Mid-Wave Infrared) stieg mit Einführung der HOT-Technologie (High Operating Temperature) schrittweise von 77 K auf bis zu 160 K an. Um die veränderten Anforderungen erfüllen zu können wurde mit der SX-Reihe eine neue Generation von Kühlern entwickelt. Vorrangige Ziele waren dabei die Verbesserungen von SWaP, C (Size, Weight and Power, Costs). Außerdem zeichnen sich diese Kühler durch eine sehr hohe Lebensdauer (MTTF), geringe exportierte Vibrationen und niedrige Geräusch-Emissionen aus.

Der aktuelle Stand der Technik dieser HOT-Kühler wird vorgestellt. Zur Reduktion der Baugröße und Verbesserung der Effizienz werden insbesondere im SWIR-Segment (Short-Wave Infrared) vermehrt auch kleine Einkolbenkompressoren verwendet.

Grundlegende Designänderungen im Vergleich zur alten Generation von Stirling-Kleinkühlern werden dargestellt. Betrachtet wird hierbei insbesondere der Wechsel vom Konzept der bewegten Spulen zu bewegten Magneten. Des Weiteren wird der zur Reduktion der induzierten Mikrovibrationen benötigte passive Ausgleichschwinger von Einkolbenkompressoren vorgestellt.

I.23

-40°C bis -160°C mit Kaltluftkältetechnik

Thomas Frank

Refolution Industriekälte GmbH iG, Karlsruhe
Thomas.Frank@refolution.de

Refolution setzt die neue Luftkältetechnik für Systemlösungen im Bereich Kältetherapie, Tieftemperaturlagerung, Gefriertrocknung, Gasverflüssigung usw. ein.

In dem Vortrag wird die Luftkältetechnik anhand der Anlagentechnik von Mirai Intex und verschiedenen Produkten und Projekten mit Luftkälteanlagen vorgestellt.

Die Kältetechnologie ist ein rekuperativer Joule Prozess mit Luft als Kältemittel zur Erzeugung von Temperaturen von -40°C bis -160°C. Das Kältemittel Luft ist komplett klimaverträglich, fällt nicht unter die EU F-Gase Verordnung und stellt zusätzlich durch den niedrigen Druck keine Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Das Herzstück ist ein ölfreier, luftgelagerter Turboverdichter mit einem Expander auf der selben Welle. Durch den inneren Wärmetauscher (Rekuperator) können die tiefen Temperaturen erzeugt werden. Durch den ölfreien, verschleißarmen Betrieb sind die Anlagen mit 70 dB (optional 50 dB) verhältnismäßig leise und langlebig.

In der Ausführung als offener Kreislauf wird die Luft direkt aus dem Nutzraum angesaugt und in der Kälteanlage herunter gekühlt. Das Eis aus der Luftfeuchte wird automatisch gesammelt und ohne zusätzliche thermische Energie mit einer Schnecke aus dem Kühlraum gefördert. Damit ist kein Verdampfer mit Ventilator und Abtauheizungen im Kühlraum erforderlich und der zusätzliche Kältebedarf dafür entfällt. In dem Vortrag

Arbeitsabteilung I

werden konkrete Anwendungen, wie unsere Kältesauna der Zukunft Refolution 1.0 und unserer Tieftemperaturlagerung Refolution Storage, vorgestellt.

In einer weiteren Ausführung kann die Anlage als geschlossener Kreislauf mit Stickstoff (N₂) als Kältemittel betrieben werden. Somit wird klassisch ein Wärmetauscher angeschlossen, um Gase zu verflüssigen oder z.B. einen Gefriertrocknungsprozess zu kühlen. Durch das Inertgas N₂ werden sensible Prozesse zusätzlich durch das Kältemittel abgeschirmt.

Betriebsergebnisse vom Feldtest Absorptionskälteanlagen für KWKK-Systeme

**Stefan Petersen*, Jan Albers, Rupert Graf, Carsten Hausherr, Sarah Hunt, Christian Hennrich,
Walther Hüls Güido, Wolfgang Lanser, Christopher Paitazoglou, Martin Schröder**

¹TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin

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

stefan.petersen@tu-berlin.de

Das Potential zur Steigerung der Energieeffizienz in Kälteversorgungssystemen mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) war zentraler Untersuchungsgegenstand im Forschungsprojekt „EnEff: Wärme - Feldtest Absorptionskälteanlagen für KWKK-Systeme“, kurz FAKS. In dem Feldtest wurden 25 Absorptionskälteanlagen an 16 Standorten erfolgreich betrieben und gemeinsam mit den Feldtestpartnern und Betreibern der Systeme ausführlich vermessen und analysiert. Auf Basis dieser Analyse erfolgten sowohl diskrete (d. h. auf den jeweiligen Einsatz zugeschnittene), als auch generelle Verbesserungsmaßnahmen. Dabei wurden nicht alleine die Absorptionskälteanlagen betrachtet, sondern die gesamten Kälteerzeugungsanlagen, bestehend aus mindestens einem Kälteerzeuger (Absorptionskälteanlage, Kompressionskälteanlage, Freie Kühlung), den jeweiligen Rückkühleinrichtungen, Versorgungspumpen und Regelorganen, sowie der Kälteerzeuger-Steuerung. Im Jahr 2018 wurde das Projekt beendet. Die 25 eingesetzten Absorptionskälteanlagen haben bei einer akkumulierten Kältemenge von über 10 GWh₀ während der Projektlaufzeit und einem angenommenen Misch-Kältepreis von 25 Cent/kWh₀ einen Kälteumsatz mit einem Wert von ca. 2,5 Mio. € erreicht. Die stufenlos regelbaren Absorptionskälteanlagen wurden in einem Betriebsbereich von ca. 5 % bis 110 % bezogen auf die Nominalleistung, bzw. ca. 10 % bis 175 % bezogen auf die standortspezifische Auslegungsleistung betrieben. Ist die momentane Auslastung größer als 30 % der Nominalleistung, so wird eine thermische Effizienz (d. h. erzeugte Kältemenge bezogen auf die erforderliche Antriebswärme) von mindestens 0,6 kWh₀/kWh₂ erreicht. Mit steigender Auslastung nimmt dieser bis auf Werte von 0,8 kWh₀/kWh₂ zu. Geforderte Rücklauftemperaturen zwischen 60°C und 70°C wurden neben der Kälteerzeugung als weitere Regelgröße vorgegeben und eingehalten. Bestehende Vorurteile, z. B., dass der Einsatz von Absorptionskälteanlagen eine Erhöhung der Netz-Vorlaufemperatur erfordert oder dass die geforderten Rücklauftemperaturen bzw. Heißwasserspreizungen nicht eingehalten werden, konnten somit widerlegt werden.

Die Zielstellung, thermisch angetriebene Kälteerzeugungsanlagen mit einem maximalen spezifischen Elektroenergieverbrauch von 0,05 kWh_{el}/kWh₀ bezogen auf die erzeugte Kältemenge zu betreiben, wurde vielfach erreicht und sogar unterboten. Die mittlere, jahresdurchschnittliche elektrische Effizienz (Kehrwert des spez. Elektroenergiebedarfs, d. h. erzeugte Kälte bezogen auf elektrische Antriebsenergie) der besten Anlagen erreicht Werte von über 30 kWh₀/kWh_{el}. Hierzu wurde z. B. auch eine dynamische Anpassung der externen Versorgungsvolumenströme bei den Absorptionskälteanlagen vorgenommen. Die Kälteerzeugungsanlagen auf Kompressionskälteanlagenbasis, die in sieben Liegenschaften ausgewertet werden konnten, erreichten im Jahresdurchschnitt Werte zwischen 2,1 kWh₀/kWh_{el} und 4,0 kWh₀/kWh_{el}. Mehrere Beispiele zeigen, wie unabhängig von der Kälteerzeugertechnologie der winterliche Einsatz technischer Kälte durch Freie Kühlung ersetzt werden kann, um für Kälteanwendungen oberhalb von 6°C, bzw. oberhalb der Umgebungstemperatur die jährlichen Betriebskosten und die Energieeffizienz weiter zu verbessern.

Die wichtigsten Ergebnisse, der mehr als 40 verschiedene Kälteerzeugungsanlagen (KEA), sowie die im Projekt entwickelten und angewendeten Möglichkeiten zu einer möglichst effizienten Betriebsweise werden im Beitrag vorgestellt.

Stichwörter:

Kältezentralen, Wärmepumpe, Energieeffizienz, Volumenstromregelung, Monitoring

II.1.02

Betriebskennfeld einer 25 kW NH₃/H₂O- Resorptions-Kälteanlage eines Supermarktes

Oliver ZIEGLER^{1*}, Ullrich HESSE¹, Christiane THOMAS¹, Darius SCHREY²

¹ Technische Universität Dresden,
Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062, Dresden, Deutschland
+49 351 463 32603, oliver.ziegler@tu-dresden.de
+49 351 463 32548, ullrich.hesse@tu-dresden.de

² EDEKA Handelsgesellschaft Südwest mbH,
Edekastraße 1, 68542 Heddesheim, Deutschland
+49 7147 9670301, darius.schrey@edeka-suedwest.de

Im Zuge eines vom BMWi geförderten Projektes wurde an der TU Dresden eine Resorptionskälteanlage (RKA) zur Bereitstellung von Normal- (-4°C/0°C) und Klimakälte (6°C/10°C) weiterentwickelt und erprobt. Für den Funktionsnachweis der Technologie und zur Demonstration der Vorteile gegenüber herkömmlichen Absorptionskälteanlagen (AKM) konnte mit den Projektpartnern EDEKA Handelsgesellschaft Südwest mbH und RESOTEC GmbH ein Umbau des Anlagenverbundes mit Integration einer RKA zur Versorgung eines Supermarktes realisiert werden.

Der vorliegende Beitrag umfasst detaillierte Auswertungen des Gesamtsystems hinsichtlich des Betriebskennfeldes der RKA in Abhängigkeit der jahreszeitlich bedingten Randbedingungen. Im Weiteren werden durchgeführte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der RKA präsentiert. Zum einen wurden anlagenseitig Umbaumaßnahmen durchgeführt, wie bspw. der Einsatz von Komponenten zur optimierten Fluidverteilung in dem als Blasenabsorber eingesetzten Plattenwärmeübertrager und die Einbindung eines Eisspeichers zur zeitlichen Entkopplung von Last und Verfügbarkeit. Weiterhin werden steuerungsseitige Änderungen betrachtet. Das System wird abschließend hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit und insbesondere seiner Endenergieeinsparung diskutiert.

Stichwörter:

Resorption, NH₃-H₂O, KWKK, Systemverbund, Supermarkt, Energieeinsparung

II.1.03

Dynamische Simulation von Absorptionskälteanlagenkomponenten

Michael Wernhart*, Alexander Arnitz, René Rieberer

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

Absorptionskälteanlagen können einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von CO₂-Emissionen leisten, wenn Wärme aus regenerativen Energieträgern oder Abwärme aus industriellen Prozessen zum Antrieb verwendet wird. Absorptionskälteanlagen weisen bereits jetzt eine hohe Effizienz auf, bei veränderlichen Betriebsbedingungen kann diese je nach vorhandenen Stellgliedern weiter gesteigert werden. Dazu werden im Rahmen des Forschungsprojektes „Heat Pumping systems Control (HPC)“ zwei Absorptionskälteanlagen mit den Stoffpaarungen Ammoniak/Wasser (NH₃/H₂O) und Wasser/Lithiumbromid (H₂O/LiBr) untersucht, um für unterschiedliche Anwendungen optimale Betriebsstrategien zu entwickeln. Um die Zustandsänderungen in der Absorptionskälteanlage zu berücksichtigen, werden dynamische Simulationsmodelle in der Modellierungssprache Modelica entwickelt und mit Messdaten validiert.

Im Rahmen dieses Konferenzbeitrages werden Komponentenmodelle für die NH₃/H₂O-Absorptionskälteanlage und Simulationsrechnungen bei veränderlichen Randbedingungen präsentiert, sowie ein Vergleich mit Messdaten diskutiert.

Stichwörter:

Komponentenmodelle, Parametrierung, Messdaten

II.1.04

Benetzung eines berieselten Horizontalrohrbündels

Einfluss von Rohrabstand und Berieselungshöhe

Christian Flessner^{1*}, Maximilian Friebe¹, Christian Hennrich¹

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

Horizontalrohrbündel sind eine verbreitete Konfiguration für Rieselfilm-Wärmeübertrager. Typische Anwendungen sind Absorptionskälteanlagen und -Wärmepumpen sowie Meerwasserentsalzungsanlagen. Die Benetzung der Rohroberflächen ist ein bedeutender Einflussparameter für den Wärmeübergang auf der Außenseite der Rohre und damit für die Ausnutzung der verbauten Rohrfläche. Durch die hohe Komplexität der Dreiphasen-Wechselwirkung auf wenig definiert rauen Oberflächen ist kein allgemeines Modell verfügbar.

Berieselungshöhe und vertikaler Rohrabstand sind für Benetzung und Durchmischung des Fluids und damit für den Wärmeübergang relevante Parameter, die sich leicht variieren lassen und im Betrieb langfristig stabil bleiben. Die Oberflächenbedingungen in kommerziellen Absorptionskälteanlagen und Entsalzungsanlagen verändern sich unter dem Einfluss von Korrosion und Fouling stark gegenüber dem Ausgangszustand. Daher ist die Stabilität von definiert vorbereiteten Oberflächen (z. B. hydrophile Beschichtungen) nicht garantiert.

Für die vorliegende Studie werden Rohrabstand und Berieselungshöhe eines aus 6 U-Rohren zusammengesetzten Bündels in einem evakuierten Glaszylinder variiert. Weiterhin werden Berieselungsdichten und Temperaturen variiert. Die Benetzungsrates der Rohre wird fotografisch bestimmt. Zur Verbesserung des Kontrasts wird ein fluoreszierender Farbstoff (Fluorescein-Natrium) zum Arbeitsmedium hinzugegeben. Eine halbautomatische Bildauswertung basierend auf der Python Imaging Library (Pillow) wird für die Berechnung der benetzten Oberfläche benutzt.

Stichwörter:

Benetzung, Rieselfilm, Wasser, wässrige Lithiumbromidlösung, horizontale Rohre.

II.1.05

Elastokalorisches Kühlen: Von Grundlagen zur Realisierung

Susanne-Marie Kirsch^{1*}, Felix Welsch¹, Nicolas Michaelis², Paul Motzki¹, Andreas Schütze², Stefan Seelecke¹

¹ Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für intelligente Materialsysteme, c/o.: ZeMA gGmbH, Eschberger Weg 46, Gewerbepark Gebäude 9, 66121 Saarbrücken, Deutschland
stefan.seelecke@imsl.uni-saarland.de

² Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Messtechnik, Campus Gebäude A5 1, 66123 Saarbrücken, Deutschland
schuetze@lmt.uni-saarland.de

Festkörperkühlung ist eine umweltfreundliche Alternative zur Kältekompensation ohne Einfluss auf den Treibhauseffekt. Elastokalorische Kühlung mittels NiTi-Formgedächtnislegierungen (FGL) weist ausgezeichnete Kühlfähigkeiten auf. Aufgrund der hohen spezifischen latenten Wärme, die bei mechanischer Be- und

Entlastung aktiviert wird, kann eine große Temperaturänderungen im Material erzeugt werden. Das günstige Verhältnis von transportierter thermischer Arbeit bezogen auf die benötigte mechanische bzw. elektrische Arbeit ermöglicht eine hohe Leistungszahl (COP = Coefficient of performance).

In diesem Beitrag werden zunächst die Grundprinzipien der Elastokalorik vorgestellt. Ausgehend vom Vergleich zwischen elastokalorischem und konventionellem Kühlprozesse, wird eine Methode zur Optimierung des COPs anhand von thermodynamischen Prozessparametern präsentiert. Zusätzlich wird auf die Materialoptimierung eingegangen, die durch Änderung der Legierungszusammensetzung, mit vergrößerter latenter Wärme und verringerter mechanischer Hysterese, gesteigerte COPs ermöglicht.

Weiterführend wird das Maschinenkonzept eines ersten, kontinuierlich arbeitenden Demonstrators basierend auf dünnen, zugbelasteten, superelastischen Formgedächtnisdrähten vorgestellt. Das gewählte Konzept ermöglicht die Maximierung der Kühlleistung durch ein geeignetes Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen des FGL-Materials. Zusätzlich erlaubt es eine Effizienzsteigerung durch Umsetzung eines neuen Belastungskonzeptes, welches eine thermodynamisch optimierte Prozessführung gewährleistet. Das neuartige Bündelkonzept der FGL-Elemente reduziert darüber hinaus den Bauraum.

Aufbauend auf dem Maschinendesign wird ein Simulationsprogramm vorgestellt, welches das thermomechanisch Verhalten der FGL-Elemente sowie die Fluidik qualitativ und quantitativ wiedergibt. In Zusammenarbeit mit der Materialcharakterisierung ermöglicht das Simulationsmodell durch zeiteffiziente Parameterstudien die Auslegung des ersten Maschinendemonstrators.

Anschließend wird die Funktionsfähigkeit der Maschine demonstriert und die Maschinenparameter der ersten Umsetzung vorgestellt.

Zum Abschluss werden die ersten Ergebnisse der experimentellen Parameterstudien mit präsentiert und diskutiert.

II.1.06

Magnetokalorik: Ein Vergleich zu Kompressor-Kälte

Christian Vogel^{1*}

¹ GSI Technology UG, Kalmitstraße 30, 67269 Grünstadt
christian.vogel@gsi-site.com

Kalorische Kältemaschinen und Wärmepumpen sind zunehmend Gegenstand der Forschung und Entwicklung an Forschungseinrichtungen und in Unternehmen der Hausgeräteindustrie. Kalorische Kältemaschinen versprechen hohe Energie-Effizienz bei geräuscharmem Betrieb. Zudem werden lediglich unbedenkliche Festkörper als Kältemittel eingesetzt, welche zusammen mit Wasser als Übertragungsmedium einige Vorteile gegenüber Kompressorkälte bieten.

Dieser Vortrag beschäftigt sich mit dem praktisch erreichten Stand der Technik bezüglich Temperaturspanne, Leistungsdichte und Effizienz im direkten Vergleich zu Kompressorkälte in Anwendungen wie Hausgeräten und Wärmepumpen. Zudem wird die zugrundeliegende Thermodynamik der beiden Kreisprozesse beleuchtet und verglichen. Die gegenwärtigen Nachteile der magnetokalorischen Kälteerzeuger wie zum Beispiel das hohe Gewicht und die spezifischen Kosten werden als Folge der Thermodynamik dargestellt. Zwei Wege auf dem Weg zur Konkurrenzfähigkeit mit Kompressorkälte bei geringen Kälteleistungen (100 Watt) werden hierbei genauer beschrieben: Maschinen mit strukturierten kalorischen Materialien und neue Arten der Wärmeübertragung.

Wann und in welcher Anwendung wird die kalorische Kältetechnik marktfähig?

II.1.07

Mit kalorischen Materialien zum thermischen Verdichter

Kilian Bartholomé, Andreas Fitger, Andreas Mahlke, Nora Bachmann, Markus Winkler, Lena-Maria Maier, Tobias Hess, Olaf Schäfer-Welsen

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Thermische Energiewandler,
Heidenhofstr. 8, 79110 Freiburg, Deutschland
kilian.bartholome@ipm.fraunhofer.de

Das Interesse an der Entwicklung alternativer Kühlkonzepte basierend auf magneto-, elektro- und elasto-kalorischen Materialien hat unter anderem aufgrund der F-Gase-Verordnung sowie des Kigali-Abkommens in den letzten Jahren stark zugenommen. Hintergrund ist, dass auf Basis dieser kalorischen Materialien potentiell sehr effiziente Systeme realisiert werden können, welche ohne schädliche Fluide auskommen. So gibt es inzwischen eine große Zahl an kalorischen Kühlsystemen, welche die grundlegende Funktionsweise dieser festkörperbasierten Kühlung nachweisen. Allerdings ist es bisher noch nicht gelungen, die hohen Material-effizienzen ins System zu übertragen. Eine wesentliche Herausforderung ist dabei der zyklisch ablaufende Wärmetransport zwischen dem kalorischen Material und der Wärmequelle bzw. -senke. In den meisten Laborsystemen wird dies über das Pumpen eines Fluides realisiert, welches die thermische Energie über erzwungene Konvektion überträgt. Für hohe Betriebsfrequenzen ist diese Art des Wärmeübertrags allerdings sehr verlustbehaftet und damit ineffizient.

In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, welches die thermische Energie der kalorischen Materialien mittels Verdampfen und Kondensieren überträgt. Durch die damit verbundenen sehr viel größeren Wärmeübergangskoeffizienten kann eine sehr viel höhere Systemfrequenz realisiert werden. Gleichzeitig bleibt eine hohe Effizienz erhalten, da keine dissipativen Verluste durch das Pumpen eines Fluids entstehen. Das Konzept ist daher sowohl aus wirtschaftlicher als auch thermodynamischer Sicht sehr vielversprechend. Es wird gezeigt, dass durch diesen Ansatz ein thermischer Verdichter realisiert wird, mit dem ein Fluid im Zweiphasen-Gebiet verdichtet werden kann. Dadurch ist es möglich, auf ganz andere Arbeitsfluide zurückzugreifen, als bei klassischen Verdichtersystemen. Neben der theoretischen Betrachtung werden in dieser Arbeit experimentelle Ergebnisse vorgestellt, die die Funktionsweise dieses Konzeptes nachweisen.

II.1.08

Magnetokalorische Wärmepumpen mit hohen Zyklusfrequenzen

**Lena Maria Maier^{1*}, Tobias Hess¹, Patrick Corhan¹, Sophie Schmiz¹, Nora Bachmann¹,
Olaf Schäfer-Welsen¹, Jürgen Wöllenstein², Kilian Bartholomé¹**

¹ Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Thermische Energiewandler,
Heidenhofstr. 8, 79110 Freiburg, Deutschland
lena.maria.maier@ipm.fraunhofer.de

² Universität Freiburg, IMTEK, Georges-Köhler-Allee 102, 79110 Freiburg, Deutschland
juergen.woellenstein@imtek.uni-freiburg.de

Seit Jahrzehnten wird an magnetokalorischen Kühlsystemen geforscht, die keinen Kompressor und kein fluidisches Kältemittel benötigen. Sie basieren auf dem sogenannten magnetokalorischen Effekt. Er beschreibt das Phänomen, dass sich magnetokalorische Materialien erwärmen, wenn sie einem magnetischen Feld ausgesetzt werden und wieder abkühlen, wenn dieses Feld entfernt wird. Die feldinduzierte Temperaturänderung ist zu einem sehr hohen Maß reversibel. Dadurch kann ein Kühlzyklus realisiert werden. Magnetokalorische Kühlsysteme haben das Potential, einen höheren Wirkungsgrad zu erzielen als kompressorbasierte Systeme. Zudem können sie eine Lösung für die Kältemittelproblematik sein.

Es wurden weltweit verschiedene magnetokalorische Prototypen realisiert, die meisten basieren auf dem Konzept der „Active Magnetocaloric Regeneration“ (AMR). Hierbei wird ein Arbeitsfluid aktiv durch einen

Regenerator aus magnetokalorischem Material gepumpt, um einen Wärmefluss von dem Kaltseiten- zu dem Warmseitenwärmetauscher zu realisieren. Das Durchströmen des Regenerators ist verlustbehaftet. Insbesondere bei den anzustrebenden, hohen Systemfrequenzen wirken sich die Verluste negativ auf die Systemeffizienz aus. Somit konnten die bisherigen Prototypen noch keinen höheren Wirkungsgrad als kompressor-basierte Systeme zeigen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein neues Systemkonzept für eine magnetokalorische Wärmepumpe vorgestellt, das einen schnellen und effizienten Wärmeübertragung ermöglicht. Dieses Konzept kombiniert einen latenten Wärmeübertrag mit thermische Dioden („Active Magnetocaloric Heatpipe“ - AMH). Basierend auf dem Kondensieren und Verdampfen eines ungefährlichen Arbeitsfluids entsteht mithilfe thermischer Dioden ein gerichteter Wärmefluss. Das Konzept hat das Potential, Wärmeübertragungsraten zu erreichen, die um einige Größenordnungen größer sind als in herkömmlichen magnetokalorischen Systemen.

Um eine bestimmte Temperaturspanne zu erreichen, werden mehrere kalorische Segmente kaskadiert eingesetzt. Die Segmente sind mit magnetokalorischem Material befüllt und durch ein passives Rückschlagventil, das als thermische Diode arbeitet, verbunden. Dadurch wird ein Wärmefluss vom Kaltseitenwärmetauscher über das magnetokalorische Material zum Warmseitenwärmetauscher ermöglicht.

Es werden experimentelle Ergebnisse eines mehrstufigen Systems gezeigt, welche den Funktionsnachweis des AMH-Konzeptes liefern.

Stichwörter:

Magnetokalorik, latente Wärme, thermische Diode, Aktive Magnetokalorische Heatpipe

II.1.09

Kühlung von Laserdioden

Entwicklung eines magnetokalorischen Prototyps

Christina Breitzke¹, Sandra Wieland¹, Jannis Wachter², Maximilian Loth^{3*}

¹Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Deutschland
christina.breitzke@ifam.fraunhofer.de, sandra.wieland@ifam.fraunhofer.de

²AMS Technologies AG, Fraunhoferstrasse 22, 82152 Martinsried, Deutschland
jwachter@amstechnologies.com

³Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Callinstrasse 36, 30167 Hannover, Deutschland
loth@ift.uni-hannover.de

Die Entwicklung eines Prototyps zur Kühlung von Laserdioden ist Thema dieses Vortrags. Die Kühlwirkung beruht auf dem magnetokalorischen Effekt, der auf der Temperaturänderung eines Materials bei Veränderung eines äußeren Magnetfelds basiert. Es bestehen eine Reihe von Entwicklungsthemen zur Realisierung der theoretisch erreichbaren hohen Effizienz, welche unter anderem das Fluidsystem, die Auslegung und Herstellung des magnetokalorischen Materials sowie der Magnetanordnung betreffen. Die Entwicklung fokussiert sich auf ein System mit rund 200 W Kühlleistung bei einem Temperaturunterschied von maximal 17 K. Für eine wirtschaftliche Positionierung werden besondere Anforderungen an das Gesamtsystem gestellt, die bspw. einen kompakten und dennoch modularen Aufbau erfordern. Die Technologie soll zwischen Peltierkühlsystemen, welche in dieser Leistungsklasse in ihrem Grenzbereich arbeiten, und der Kompressorkühlung, mit oder ohne sekundären Wasserkreislauf, positioniert werden und damit eine vibrations- und geräuscharme Kühloption darstellen. Im Rahmen des vorgestellten Projekts werden die zu lösenden Themenschwerpunkte vorgestellt, die sich über die magnetokalorische Systemauslegung- und simulation inklusive Magnetanordnung, die Entwicklung innovativer Formgebungsverfahren zur Erzeugung dünnwandiger Wärmeübertragerstrukturen des magnetokalorischen Materials sowie der Ansteuerung und Regelung des Gesamtsystems erstrecken.

II.1.10

Simulation eines Luft/Sole-Wärmeübertragers unter trockenen und feuchten Bedingungen

Michael Birk, Jakob Metz

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Michael.Birk@ise.fraunhofer.de

Zur realitätsnahen Wiedergabe des dynamischen Betriebsverhaltens eines Luft/Sole Lamellen-Rohr-Wärmeübertragers (WÜT) müssen die unterschiedlichen luftseitigen Betriebszustände berücksichtigt werden. Diese stellen sich abhängig von den Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur und -feuchte) sowie der Oberflächentemperatur des WÜT ein, wobei eine Taupunktunterschreitung in feuchten Zuständen resultiert. Mögliche Betriebszustände sind der trockene, kondensierende, vereisende, bereifende, schmelzende oder verdunstende Betrieb des WÜT.

In diesem Beitrag wird die Entwicklung eines graybox Modells eines Lamellen-Rohr-Wärmeübertragers zur dynamischen Simulation von Luft/Sole-Wärmepumpensystemen vorgestellt. Das entwickelte Modell verknüpft mehrere Modellansätze zu den genannten luftseitigen Betriebszuständen, wodurch eine lückenlose Simulation des WÜT ermöglicht wird. Hierbei berücksichtigt das Modell den dynamischen Auf- und Abbau von Kondensat, Eis oder Reifschichten und ermöglicht somit auch Simulationen des WÜT unter zyklisch wiederkehrenden Bereifungs- und Abtauprozessen.

Das Modell ist Teil des Projektes „LowEx-Bestand HEAVEN“ (FKZ: 03ET1540B, www.lowex-bestand.de/index.php/heaven-viessmann). Hier wird eine umfassende simulative Untersuchung von Mehrquellen-Wärmepumpensystemen aus Außenluft und Erdreich für Mehrfamilienhäuser durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser Analyse liegt in der Ermittlung von geeigneten Regelstrategien und Auslegungskriterien für Mehrquellen-systeme, was die dynamische und realitätsnahe Wiedergabe von Systemkomponenten erfordert.

Der Konferenzbeitrag soll zunächst eine kurze Vorstellung des Projekthintergrunds und der Betriebszustände eines Wärmeübertragers enthalten. Anschließend soll das entwickelte Modell vorgestellt und ein Vergleich mit experimentell ermittelten Ergebnissen präsentiert werden.

II.1.11

Übersicht zu Berechnungsmethoden bei der Strömungskondensation in horizontalen Rohren

Simon Fries, Mohammad Deeb, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Germany

ttk@uni-kassel.de

Verflüssigung bzw. Kondensation von Reinstoffen und Gemischen sind in der Kältetechnik bzw. in vielen verfahrenstechnischen Prozessen von großer Bedeutung, da große Wärmestromdichten bei geringen treibenden Temperaturdifferenzen übertragen werden können. Die physikalischen Phänomene sind auf Grund komplexer Wechselwirkungen beim Energie-, Stoff- und Impulstransport bis heute nur unzulänglich verstanden. Daher werden die Apparate mit Hilfe empirischer oder semi-empirischer Gleichungen ausgelegt. Die Kondensation in den Apparaten erfolgt entweder auf der Außenseite von horizontalen oder senkrechten Rohren bzw. Platten in freier Konvektion oder mit aufgeprägter Strömung der gasförmigen Phase. Im Falle der Kondensation in Rohren oder Kanälen, der sog. Strömungskondensation, erfolgt diese in erzwungener Konvektion. Während für den ersten Fall bereits eine Vielzahl von Veröffentlichungen vorliegt, trifft dies für die Strömungskondensation in horizontalen Rohren, insbesondere für größere Rohrdurchmesser, wie sie in realen Industriekälteanlagen eingesetzt werden, nicht zu.

In dem Beitrag werden die in der Literatur vorhandenen Gleichungen und Modellannahmen zum Wärmeübergang bei der Strömungskondensation vorgestellt und kritisch bewertet. Dies erfolgt anhand von experimentellen Daten aus der Literatur und eigenen Messungen an einer Versuchsanlage im industriellen Maßstab. Als Versuchsstoff dienen Kohlenwasserstoffe, die in der industriellen Kälteanwendung von hohem Interesse sind. Dazu wird der Wärmeübergang sowohl einphasig als auch zweiphasig in unterschiedlichen Rohrkonfigurationen analysiert, Die Parameter Sättigungsdruck, Massenstromdichte sowie des Dampfgehaltes werden in einem breiten Bereich variiert. Zur Bestimmung des Wärmetransportes wird die Temperatur hochaufgelöst gemessen.

Stichworte:

Strömungskondensation, Wärmeübergang, Kohlenwasserstoffe,

II.1.12

Kälteleistungsmessungen an Lamellenwärmetauschern mit Ammoniak und Vergleich mit verschiedenen Berechnungsmodellen

Ceslovas Kizlauskas

Kelvion Refrigeration GmbH, Forschung & Entwicklung, Kühler Weg 1, 82065 Baierbrunn, Deutschland

Ceslovas.Kizlauskas@kelvion.com

Am Entwicklungsstandort der Firma Kelvion in Baierbrunn Deutschland werden unter anderem Leistungsmessungen an Lamellenwärmetauschern mit dem umweltfreundlichen Kältemittel Ammoniak durchgeführt. Kälteleistungsmessungen dienen zur Verifizierung der theoretischen Berechnung, der Weiterentwicklung von bestehenden Produktreihen und der Entwicklung von neuen Baureihen. Diese Messungen beinhalten die betriebsweisen Pumpenbetrieb und Direktexpansion. Die Leistungsmessung eines Luftkühlers im Pumpenbetrieb ist eine Besonderheit, da die kältemittelseitige Leistung indirekt ermittelt wird. Im Vortrag wird der Messaufbau und die Messdurchführung nach EN 328 erläutert. Neben den Normmessungen im Pumpenbetrieb wurden auch systematische Messungen bei Praxisbedingungen durchgeführt und mit verschiedenen Berechnungsmodellen verglichen. Beim Betrieb in NH₃-Direktexpansion wurden neue Bauelemente auf Eignung geprüft und bewertet. Ein Teil der Ergebnisse soll vorgestellt werden.

Stichwörter:

EN 328, Lamellenwärmetauscher, Prüfstände, Kälteleistungsmessung, NH₃, Ammoniak, Berechnungsmodelle

II.1.13

Innovatives Thermomanagement von elektrischen und elektronischen Bauteilen mit Wärmerohren

Mark Edward Newton, Hendrik Margraf, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Germany

ttk@uni-kassel.de

Die steigende Leistungsdichte elektronischer Bauteile, elektrischer Maschinen und Komponenten führt zu Wärmestromdichten, die nicht mit konventionellen, einphasigen Systemen gekühlt werden können. Als Alternative bieten sich mehrphasige Systeme an, z. B. Wärmerohre. Wärmerohre sind passive Bauelemente zur Übertragung hoher Wärmestromdichten bei geringen treibenden Temperaturdifferenzen. Aufgrund der geschlossenen Bauweise sind sie wartungsarm. Daher werden sie seit langem in der Raumfahrttechnik, Tieftemperaturtechnik und Hochleistungselektronik eingesetzt. Zusätzlich weisen Wärmerohre einen weiten Betriebs- und Einsatzbereich unter der Berücksichtigung der jeweiligen Leistungsgrenzen auf, die eine Funktion des verwendeten Fluides und des Materials sind. Diese Leistungsgrenzen müssen insbesondere im Fall der sog. Siedegrenze für den Fall hoher Überhitzungen bestimmt werden, um einen Ausfall der notwendigen Kühlung zu vermeiden.

Grundlegende Arten von Wärmerohren und ihre Leistungsgrenzen, die zunächst theoretisch bestimmt werden, werden vorgestellt und ihre Anwendung wird diskutiert. Anschließend werden anhand der Randbedingungen die möglichen Arbeitsfluide ausgewählt und unter Berücksichtigung thermodynamischer Stoffeigenschaften, Material- und ökologischer Verträglichkeit sowie Toxizität bewertet. Eine Analyse der Kapillarstruktur und der theoretischen Leistungsgrenzen folgt, wobei insbesondere auf die Siedegrenze und deren Einflussparameter eingegangen wird. Dabei wird auf am Institut vorhandene experimentelle Daten zurückgegriffen. Die Ergebnisse verschiedener Kombinationen werden präsentiert und kritisch diskutiert.

Stichwörter:

Wärmerohr, Leistungsgrenzen, Blasensieden

II.1.14

Visualisierung der Gas-Feststoff-Strömung in einem CO₂-Sublimationskreislauf

Yixia Xu^{*}, Thomas Tannert, Christiane Thomas, Ullrich Hesse

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

Im Rahmen einzelner Studien innerhalb der letzten Jahre wurden bereits die Möglichkeiten und Potenziale der Verwendung von CO₂ als Kältemittel unterhalb seines Tripelpunkts (ca. -56°C und 5,2 bar) dargestellt. Eine entsprechende Umsetzung ist beispielsweise in einem Sublimationskreislauf möglich. Jedoch wurde das Verhalten einer Gas-Feststoff-Strömung im Vergleich zur Flüssigkeits-Gas-Strömung in einem klassischen Verdampfer, bisher nur wenig untersucht.

In dieser Studie wird eine Kaskadenkälteanlage mit einem CO₂-Sublimationskreislauf in der unteren Stufe mit geringer Kälteleistung vorgestellt. Der CO₂-Kreislauf ist mit einem Visualisierungsabschnitt ausgestattet, der elektrisch beheizt werden kann. Mit Hilfe dieser Anlage wurden erste Untersuchungen zur Visualisierung der Strömungsformen von fest-gasförmigem CO₂ durchgeführt. Die Partikelbewegungen wurden dabei mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Außerdem wurden während der Versuche interessante Phänomene beobachtet, beispielsweise der Übergang von CO₂ von seiner flüssigen zur festen Phase bei der Umschaltung vom Verdampfungs- in den Sublimationsbetrieb.

Die Ergebnisse können zum Grundlagenverständnis und für die Auslegung eines Sublimators beitragen.

Stichwörter:

CO₂, fest-gasförmig, Sublimation, Visualisierung

II.1.15

Wärmeübertragung von überkritischem CO₂ in vertikaler Rohrströmung

Andreas Wahl, Rainer Mertz, Eckart Laurien, Jörg Starflinger

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Germany
+49 711 685-60787, andreas.wahl@ike.uni-stuttgart.de

In einen Kraftwerkskreislauf mit überkritischem Kohlendioxid (sCO₂) ist der Gaskühler ein entscheidendes Bauteil um einen hohen Gesamtwirkungsgrad zu erreichen. Die Wärmeübertragung und Druckverlust bei der

Kühlung von überkritischem CO₂ ist entscheidend um eine Designoptimierung in Hinblick auf Effizienz und Kompaktheit zu ermöglichen.

Aufgrund der stark variablen Stoffeigenschaften von sCO₂ ist der Wärmeübergang nur schwer vorherzusagen. Durch Experimente in der „SCARLETT“-Anlage an der Universität Stuttgart wird Expertise gesammelt über CO₂ als Arbeitsmittel im überkritischen Bereich. Die Ergebnisse der Grundlagenversuche werden genutzt für die Validierung und Verbesserung von Korrelationen.

Der Wärmeübergangskoeffizient (WÜK) und der Druckverlust nahe des kritischen Punktes wurde untersucht an Rohren mit 2 und 3 mm Durchmesser. Der WÜK wird bestimmt durch die Temperaturmessung in der Rohrwandung. Die eingelöteten Thermoelemente sind gleichmäßig verteilt entlang der Teststrecke, welche durch eine Ringspaltströmung gekühlt wird. Die Effekte von Massenfluss, Betriebsdruck, Temperatur und Strömungsorientierung (aufwärts, abwärts und horizontal) wird untersucht. Der Einfluss von Auftriebs- und Beschleunigungseffekte auf den Wärmeübergang bei vertikaler Strömung werden untersucht und mit bestehenden Kriterien verglichen.

II.1.16

Thermisches Einlaufverhalten von sCO₂ im beheizten Einzelrohr

Konstantinos Theologou, Rainer Mertz, Eckart Laurien, Jörg Starflinger

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Germany
+49 711 685-60786, konstantinos.theologou@ike.uni-stuttgart.de

Aufgrund der hohen Umweltbelastungen von fluorierten Kältemitteln, gewinnen natürliche Kältemittel wie CO₂ zunehmend an Bedeutung. Der niedrige kritische Punkt von CO₂ macht es ebenfalls sehr interessant für dessen Anwendung als Wärmeträgerfluid in Kraftwerksprozessen, da CO₂ im überkritischen Zustand (sCO₂) hohe Wärmeübergangskoeffizienten besitzt. Zur Auslegung einzelner Komponenten, wie z.B. der Wärmeübertrager, sowie zur Berechnung des thermodynamischen Kreislaufs sind Wärmeübergangskorrelationen nötig.

Da die bisher bekannten Wärmeübergangskorrelationen ihre Gültigkeit im überkritischen Zustand verlieren, werden neue Korrelationen speziell für diesen Bereich entwickelt. Die Korrelationen werden dabei immer für den Bereich einer voll ausgebildeten Strömung angegeben. Diese wird erreicht, nachdem sich ein gleichbleibendes Geschwindigkeitsprofil (hydrodynamisch ausgebildete Strömung) und Temperaturprofil (thermisch ausgebildete Strömung) eingestellt hat. Während die hydrodynamische Einlaufänge in der Literatur ausreichend beschrieben ist, fehlt es an Informationen bzgl. einer Quantifizierung der thermischen Einlaufänge. Zusätzlich treten bei sCO₂ in diesem Bereich Einlaufeffekte auf, die zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs führen können.

Gegenstand dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung dieser Effekte und des Einlaufverhaltens beim Wärmeübergang von sCO₂ im beheizten Einzelrohr mit konstanter Wärmestromdichte.

II.1.17

Abdeckung von thermischen Spitzenlasten mittels PCM

Finn Richter^{1*}, Peter Niemann¹, Gerhard Schmitz¹

¹ Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Thermodynamik
Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Germany
finn.richter@tuhh.de, peter.niemann@tuhh.de, schmitz@tu-harburg.de

Die Aufgabe einer Klimaanlage beinhaltet im Sommer die Abkühlung und Entfeuchtung der Außenluft. Hierbei kann bei sorptionsgestützten Klimatisierungssystemen die Entfeuchtung und Kühlung prozesstechnisch getrennt werden. Dadurch wird der notwendige Energiebedarf zum Kühlen im Vergleich zu konventionellen

Systemen verringert und höher temperierte Wärmesenken (z. B. oberflächennahe Geothermie) können verwendet werden. Ein solches geothermisch- und sorptionsgestütztes Klimatisierungssystem wird an der Technischen Universität Hamburg experimentell untersucht.

Dabei ist das Erdreich als Wärmesenke aufgrund der langsamen Regeneration durch Wärmeleitung in einem begrenzten Betrachtungszeitraum nicht unerschöpflich. In Zeiträumen mit konstant hohem Kältebedarf sowie bei zeitlich begrenzt auftretenden Lastspitzen durch innere oder äußere Einflüsse können behagliche Raumlufttemperaturen nicht eingehalten werden. Um lokal die thermische Behaglichkeit zu erhöhen, werden Phasenwechselmaterialien verwendet, die in einer makroverkapselten Bauweise durchströmt werden. Durch den Phasenwechsel von fest nach flüssig wird dem Luftstrom Energie in Form von Wärme entzogen, sodass lokal das Temperaturniveau abgesenkt und die Behaglichkeit erhöht werden kann. Bei einer durchschnittlichen Kühlleistung von 26,58 W kann lokal eine Temperaturabsenkung um 0,7 – 0,9 °C erreicht werden. Der COP beträgt dabei 6,65 mit einer zugehörigen elektrischen Leistungsaufnahme von 4 W.

Stichwörter:

Lokale Kühlung, Phasenwechselmaterialien, Sorptionsrad, Thermische Spitzenlasten, Thermische Behaglichkeit

II.1.18

Development of a Dynamic Fluid-to-PCM Heat Exchanger Model

Jiazhen Ling, Rohit Dhumane, Yiyuan Qiao, Vikrant Aute, Yunho Hwang, Reinhard Radermacher*

*4164 Glenn Martin Hall, University of Maryland, College Park
raderm@umd.edu

Thermal storage equipment gains in popularity in HVAC applications due to its capability in assisting grid balancing, enabling renewable energy utilization to name a few. Among various thermal storage methods, phase change materials (PCM), due to their relatively high latent capacity, have the benefit of high thermal storage density and therefore compactness in size. This presentation discusses the methodology of modeling fluid-to- PCM heat exchangers in order to facilitate the design of PCM integrated heat exchangers. A finite volume-based heat exchanger model was developed in Modelica language to capture the transient heat transfer in both radial and longitudinal directions. The model also employs a staggered grid scheme to conveniently apply both the mass and energy conservation equations. A temperature transformation function is used to calculate the PCM enthalpy and therefore characterize its phase change behavior. The model was then validated against experimental measurements from an in-house test facility including a fluid -to-PCM heat exchanger sample made of eight copper pipes submerged in a cylindrical container filled with paraffin-based PCM melting at 37°C. Hot fluid circulates inside the tubes and gradually melts the PCM. Sixteen thermocouples recorded the tube surface temperature and PCM temperature at various locations inside the cylinder. The fluid -to-PCM heat exchangers was measured at the capacity of 170W for up to 4 hours before the paraffin wax fully melted. The model correctly predicted both the accumulated capacity and temperature distributions, and therefore can be adopted on a system level to further explore system energy efficiency improvement.

II.1.19

Einstufiger R718 Kaltwassersatz in Kombination mit einem PCM Speicher

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

Wasser als Kältemittel wurde in den letzten Jahren eingehend untersucht und mittlerweile sind auch serienreife Maschinen auf dem Markt verfügbar. Dennoch ist dieses Kältemittel aufgrund seiner speziellen Eigenschaften auch aktuell noch Gegenstand der Forschung. Eine große Herausforderung ist das, im Vergleich zu herkömmlichen Kältemitteln, hohe benötigte Druckverhältnis für einen gewissen Temperaturhub. In den aktuell verfügbaren Anlagen wird dieses hohe Druckverhältnis durch einen zweistufigen Verdichtungsprozess erzeugt. Bei klimatischen Bedingungen, wie man sie in Deutschland vorfindet, wird diese zweite Verdichterstufe bei moderaten Kaltwasseraustrittstemperaturen von minimal 16 °C jedoch nur wenige Stunden pro Tag benötigt. Durch die Einbindung eines PCM-Speichers auf der Wärmesenkenseite soll die maximale Temperatur durch entladen des Speichers auf ein definiertes Maximum begrenzt werden. Dadurch soll erreicht werden, dass man auf die zweite Verdichterstufe verzichten kann.

In diesem Beitrag wird ein einstufiger R718 Kaltwassersatz in Kombination mit einem PCM-Speicher theoretisch bewertet und die Zusammenhänge für die Auslegung und den Betrieb eines solchen Systems dargestellt.

Stichwörter:

Wasser als Kältemittel, PCM-Speicher, Turboverdichter, einstufiger Prozess

II.1.20

Geothermisch- und sorptionsgestützte Klimatisierung im Winterbetrieb

Peter Niemann^{1*}, Finn Richter¹, Gerhard Schmitz¹

¹Technische Universität Hamburg, Institut für Technische Thermodynamik,
Denickestraße 17, 21073 Hamburg, Deutschland
peter.niemann@tuhh.de, finn.richter@tuhh.de, schmitz@tuhh.de

Der globale Anstieg von Klimatisierungsanwendungen in Gebäuden ist im Allgemeinen auf steigende Einkommens- und Wohlstandsverhältnisse, Auswirkungen des Klimawandels sowie steigende Energiestandards von Gebäuden zurückzuführen. Aufgrund des meist hohen exergetischen Energiebedarfs konventioneller Klimatisierungssysteme wird als Alternative an der Technischen Universität Hamburg ein geothermisch- und sorptionsgestütztes System untersucht.

Auch wenn der Winterbetrieb eines solchen Systems ein entscheidender Bestandteil der ganzjährigen Betriebsweise ist, vor allem in heizlastdominierten Regionen, wurde dieser bislang nur in wenigen Studien betrachtet. Vor diesem Hintergrund wird der Winterbetrieb anhand einer Versuchsanlage untersucht. Neben der energetischen Analyse ist die Anhebung des Feuchteniveaus der Zuluft ein zusätzlicher Komfortaspekt im Kontext trockener Raumluftzustände im Winter. Auf Basis des in einem sorptionsgestützten System vorhandenen hygroskopischen Materials ist eine Rückbefeuchtung der Zuluft möglich; der Energiebedarf wird auf Hilfsenergien reduziert.

Gegenüber einem Referenzsystem mit isothermer Luftbefeuchtung wird der elektrische Energiebedarf des untersuchten Systems um 40% reduziert. Desweiteren wird die kombinierte Wärme- und Stoffübertragung für ein LiCl-Enthalpierad auf Basis gemessener Daten untersucht und bewertet. Es wird eine mittlere Effizienz der Rückbefeuchtung von 0,73 erreicht. Zusätzlich zur energetischen Systembewertung werden Messergebnisse der Erdreichtemperatur und des thermischen Komforts präsentiert.

Stichwörter:

Klimatisierung, Enthalpieübertragung, Geothermie, Wärmepumpe, Systembewertung, experimentell

II.1.21

Rheologische Eigenschaften von Flüssigeis

Untersuchung und Visualisierung von Einflussfaktoren

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

¹Institut 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 Kompressorentchnik,
Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland
Ulrich.Hesse@tu-dresden.de

Flüssigeis bzw. Eisbrei (engl. Ice Slurry) stellt aufgrund der nutzbaren Schmelzenthalpie und der daraus resultierenden, hohen spezifischen Wärmekapazität ein interessantes Speichermedium im Bereich der Kältetechnik dar. Die Aufrechterhaltung der Pumpfähigkeit erlaubt gegenüber ortsunveränderlichen Blockeis den gleichzeitigen Einsatz als unbedenklichen Kälteträger. Neben der Herstellung von Flüssigeis durch das Kratzeisverfahren kann mittels der Direktverdampfung von Wasser am Tripelpunkt die maximale, thermodynamische Effizienz erreicht werden. Bisherige Untersuchungen zum Transportverhalten wurden ausschließlich mit dem nach der Kratzeismethode hergestellten Flüssigeis durchgeführt. Die Morphologie der Eispartikel wird neben dem Erzeugungsverfahren von weiteren Faktoren innerhalb eines FlüssigeisSpeichersystems beeinflusst (u. a. Art und Konzentration des gewählten Additivs, Speicherlagerdauer, Art der Speicherung, etc.). Mit dem Ziel der Weiterentwicklung von Verfahren und Apparaten zur Erzeugung sowie zur Verteilung von Flüssigeis, wurde am ILK Dresden ein komplexes Versuchsfeld im Modellaßstab aufgebaut. Innerhalb dieses Versuchsfeldes wird es ermöglicht, einen direkten Vergleich der beiden Erzeugungsverfahren und weiterer Einflussfaktoren vorzunehmen. An einem dem Speicher nachgeschalteten Rohrviskosimeter sowie einem Versuchsstand zur Strömungsvisualisierung werden die Einflussfaktoren auf das rheologische Verhalten von Flüssigeisströmungen untersucht. Die draus gewonnenen Ergebnisse werden mit bisherigen Literaturdaten verglichen und diskutiert.

Stichwörter:

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

II.1.22

CFD-Modelle zur numerischen Simulation von Eisbreiströmungen in Wärmeübertragern und Strömungsdiffusoren

Shaimaa Hefny*, 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, Thomas.Tannert@tu-dresden.de, Ullrich.Hesse@tu-dresden.de

Die Verwendung von Eisbrei als Kälteträger erlangt aufgrund der höheren spezifischen Kühlleistung und der umweltfreundlichen Eigenschaften aus wissenschaftlichen und industriellen Gesichtspunkten gegenwärtig wachsende Aufmerksamkeit. Die Eisbreitechnologie setzt Maßstäbe in Bezug auf die Effizienz der Kälteverteilung für viele Anwendungen im Bereich der industriellen Kälteerzeugung und der Klimatisierung von Gebäuden.

In diesem Beitrag wird die Möglichkeit der Simulation der Eisbreiströmung basierend auf CFD-Code für mehrphasige Strömungsmodelle analysiert und für einen Vergleich von drei verfügbaren, mehrphasigen Modellen des Euler-Euler-Ansatzes angewendet und bewertet. Das mathematische Modell zur Beschreibung einer Eisbreiströmung als Eispartikel in einem Trägerfluid wird vorgestellt. Das Eispartikelmodell wird hinsichtlich der Schmelzneigung für eine nicht-isotherme Eisbreiströmung analysiert. Die CFD-Simulation wird angewendet, um die Verteilung von Eiskonzentration, Geschwindigkeit und Druckverlusten innerhalb der Eisbreiströmung in verschiedenen Wärmeübertragerbauformen zu berechnen. Dazu werden Strömung in Rohren in Plattenwärmeübertragern und in einem Strömungsdiffusor betrachtet. Das CFD-Mehrphasenmodell erweist sich als ein effektives Modell zur Beschreibung von homogenen und heterogenen Eisbreiströmungen. Die Validierung mit experimentellen Daten aus vorherigen Studien zeigt gute Übereinstimmungen.

Die CFD-Studie zeigt den Einfluss wesentlicher Parameter, die sich auf die Bewegung von Eispartikeln auswirken wie deren granulare Eigenschaften oder deren Phasenwechselwirkungen. Die Wirkung verschiedener Turbulenzmodelle, wie k-epsilon ($k-\epsilon$), k-omega ($k-\omega$), SSG-Reynolds-Spannung, Scherspannungsstransport und Wirbelviskositätstransport, wird in Bezug auf die Güte der Vorhersage von Partikelkonzentrationsprofilen überprüft. Im Ergebnis können die Verteilungsprofile von Eisanteil, Geschwindigkeit, Druckabfall und Temperatur über repräsentative Strömungssektionen dargestellt werden.

Stichwörter:

CFD, Simulation, Mehrphasenströmung, Eisbrei, Partikelströmung, Phasenwechselwirkungen

II.1.23

Unterkühlung auf verschieden strukturierten Oberflächen

Sebastian Gund^{1*}, Oliver Schmid², Michael Kauffeld³,

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

sebastian.gund@hs-karlsruhe.de

²Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

oliver.schmid@hs-karlsruhe.de

³Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de

Um die Effizienz von Eisbreisystemen zur thermischen Energiespeicherung und -übertragung zu erhöhen muss die Eis-Erzeugung verbessert werden. Durch den Einsatz der Unterkühlungsmethode, anstatt der häufiger eingesetzten Kratzverdampfer, kann alleine durch höhere Verdampfungstemperaturen eine Effizienzsteigerung

von 20 % erreicht werden. Die wichtigsten Parameter mit denen sich die Effizienz der Unterkühlungsmethode charakterisieren lässt, ist die maximal erreichbare Unterkühlung des Eisbreifluides und deren Stabilität über die Zeit. Aus der Kristallisationstheorie kann hergeleitet werden, wie sich die eingesetzten Wärmeübertrager-Oberflächen auf die maximal erreichbare Unterkühlung und die Stabilität auswirken können. In dieser Untersuchung werden reines Wasser und Mischungen mit Propylenglykol und Ethanol auf verschieden strukturierten Oberflächen gekühlt, bis die Kristallisation eintritt. Durch die Messung der mechanischen Spannung, die sich während der Kristallisation, zwischen Substrat und Eispartikel einstellt, kann ein Rückschluss auf die Güte der eingesetzten Oberfläche für die Verwendung als zukünftiges Wärmeübertrager-Material gezogen werden.

Stichwörter:

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

II.2.01

Elektrischer Kältemittelverdichter für PKW-Anwendungen

Florian Wieschollek¹, Lukas Löhmer²

¹Rheinmetall Automotive AG, Neuss
Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com

²Rheinmetall Automotive AG, Neuss
Lukas.Löhmer@de.rheinmetall.com

In Fahrzeugen mit einem klassischem Verbrennungsmotor wird der Klimakompressor in der Regel über den Keilriemen angetrieben. Bei elektrischen Fahrzeugen fällt die mechanische Antriebsmöglichkeit weg, der Klimakompressor läuft hier über einen Elektromotor, der an das Hochvoltnetz des Fahrzeuges angeschlossen ist.

An den Kältemittelkompressor in Elektrofahrzeugen und auch Hybridfahrzeugen werden dabei zahlreiche Anforderungen aufgrund der Architektur und Anwendungsprofils gestellt. Neben dem klassischen Klimabetrieb bei warmen Außentemperaturen ist auch der Einsatz im Wärmepumpenbetrieb bei Kälte zu gewährleisten. Durch den Einsatz einer Wärmepumpe zum Heizen der Fahrerkabine kann je nach Bedarf der Energiefluss aus dem Hochvoltspeicher reduziert und damit die Reichweite des Fahrzeuges erhöht werden. Aufgrund der Erweiterung des Betriebsbereiches durch die Wärmepumpe sowie der Konditionierung der Hochvolt-Batterie erhöhen sich auch die Anforderungen an die Stabilität des Kompressors.

Neben der Erweiterung des Betriebsbereiches stehen insbesondere eine kompakte Bauweise, ein geringes Gewicht, eine hohe Effizienz und ein gutes NVH-Verhalten im Fokus der Entwicklung. Ein geringes Gewicht und eine hohe Effizienz führen zu einem sparsamen Haushalten mit der nur begrenzt zur Verfügung stehenden elektrischen Energie des Hochvoltspeichers. Durch die Optimierung des NVH-Verhaltens werden Geräusche und Vibrationen auf ein Minimum reduziert, die vom Fahrer, Insassen und Personen im Umfeld als störend wahrgenommen werden.

In diesem Vortrag werden technische Lösungen bzw. Umsetzung skizziert und beschrieben.

Stichwörter:

Elektrischer Kältemittelkompressor, Wärmepumpe

II.2.02

Leistungsregulierung von Kältemittelverdichtern mittels steuerbaren Verdichterventilen

Christian Stöckel^{1*}, Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹

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

Die Variation der Drehzahl von Kältemittelverdichtern ist ein probates Mittel zur Massenstrom- und damit Kälteleistungsregulierung. Eine andere Möglichkeit der Mengenregelung stellt das gesteuerte Offenhalten der Saugventile bei Hubkolbenverdichtern dar. Eine ähnliche Maßnahme kann die Offenhaltung des Druckventils sein: das Druckventil wird dabei über den oberen Totpunkt der Kurbelumdrehung hinaus offengehalten und ein Teil des komprimierten Gases strömt zurück in den Zylinder. Ein, im Bereich von Prozessgaskompressoren entwickeltes Prinzip, wird auf die Anwendung von Kältemittelverdichtern überprüft. Ein pilzförmiges Ventilelement wird dabei mit einem definierten Steuerdruck beaufschlagt, was zu einer veränderten Ventildynamik führt. Daraus resultieren einstellbare Öffnungs- und Schließzeiten und damit eine Mengenregelung. Der

notwendige Steuerdruck wird dabei vom Kältekreislauf selbst bereitgestellt, eine externe Energiezufuhr ist demnach nicht notwendig.

Mit Hilfe eines In-House-Simulationstools wird ein exemplarischer Kompressionskältekreislauf mit Druckventilregelung in verschiedenen Betriebspunkten untersucht. Die Auswirkungen des eingestellten Steuerdruckes auf das Ventilverhalten und damit auf den geförderten Kältemittelmassenstrom werden dargestellt.

Anschließend wird der Kältemittelkreislauf untersucht und es werden geeignete Positionen herausgearbeitet, welche zur Bereitstellung des erforderlichen Steuerdrucks genutzt werden können. Zudem wird ein Sensor im Kältekreislauf diskutiert, welcher, auf Basis der erforderlichen Kälteleistung, den jeweils nötigen Steuerdruck zur Verfügung stellt.

Stichwörter:

Kältemittelverdichter, variable Kälteleistung, Druckventiloffenhaltung

II.2.03

Discussion on Numerical Methods in Positive Displacement Mechanistic Models: Case Study using the Z-Compressor

Davide Ziviani¹, Craig R. Bradshaw², Eckhard A. Groll¹

¹Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University
West Lafayette, 47907-2099, USA

²Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University,
Stillwater, Oklahoma, 74078-5016, USA
dziviani@purdue.edu; craig.bradshaw@okstate.edu; groll@purdue.edu

Comprehensive mechanistic models have been widely used for simulating positive displacement (PD) compressors or expanders. Such models are based on a thermodynamic analysis of generic control volumes that describe the working chambers. The thermodynamic analysis results in a set of non-linear ordinary differential equations (ODEs) that describe conservation of mass and energy. The derived ODEs are used to predict the evolution of the thermodynamic properties of the working fluid with respect to crank angle or time. Different sub-models such as flow models and heat transfer models are required, as inputs, in order to integrate the differential equations.

The solution scheme of a mechanistic model involves different layers of solvers that handle the step-by-step integration, the cycle-to-cycle continuity as well as the overall energy balance. Since most of the PD machines feature multiple control volumes that merge or split (*e.g.* scroll-type) or wrap-around a rotor (*e.g.* screw-type), and multiple leakage paths, the integration scheme faces challenges due to the stiffness of the equations or discontinuities in the control volume definition. Adaptive step-size solvers such as RK45 are usually employed to overcome those challenges.

In this paper, a discussion of different integration schemes and numerical considerations are proposed that are applied to a novel compressor called the z-compressor. Different programming languages such as MATLAB and Python have been used to develop and run a compressor model. The instantaneous results of the model are analyzed and compared to evaluate the numerical performance and stability using standard, adaptive, and semi-implicit ODE solvers as well as two different volume formulation techniques.

Keywords:

Modeling, Compressors, Expanders, Integration, Control Volume

II.2.04

Einfluss der Ölrückführung auf den Ölwurf von Scroll-Verdichtern

Clemens Dankwerth^{1*}, Thore Oltersdorf¹, Simon Braungardt¹, Lena Schnabel¹

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Department Heating and Cooling Technologies,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de

Mit Bezug auf die F-Gasverordnung und dem daraus resultierenden Phasedown der F-Gas-Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial besteht derzeit eine große Motivation, Verdichter für neue marktverfügbare, synthetische sowie natürliche Kältemittel zu vermessen. In diesem Rahmen wurden zwei Scroll-Verdichter mit dem Kältemittel R454C an einem Heißgas-Bypass-Verdichterprüfstand vermessen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die energetische Charakterisierung der Verdichter sowie eine Untersuchung des Ölmanagements.

Bei der Vermessung wurde in der Heißgasleitung das Kältemaschinenöl abgeschieden und entweder über den Ölsumpf direkt oder über die Saugleitung zum Verdichter zurückgegeben. Dabei wurden Unterschiede festgestellt, die einen Hinweis auf die Strömungswege des Öls innerhalb eines Verdichters aufzeigen. Bei „normaler“ Zirkulation (Rückführung über die Saugleitung) des Öls im Kältekreis kommt es zu höheren Ölwurfraten als bei der Rückführung in den Sumpf.

In diesem Beitrag werden diese Phänomene näher untersucht und zurückgeführt auf das sogenannte „Entrainment“, das eine Dispersion von Öltröpfchen aufgrund zunehmender Scherkräfte zwischen Ölfilm und der Gasströmung des Kältemittels in der Saugleitung beschreibt.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Verdichter, Scroll, Ölwurf, Ölabscheider, Ölsumpf

II.2.05

Experimentelle Untersuchung von Kältemittel-Öl-Gemischen für die Anwendung in Haushaltsgeräten

Ramona Nosbers^{*1}, Franziska Schmieder¹, Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
ramona.nosbers@tu-dresden.de, franziska.schmieder1@tu-dresden.de
christiane.thomas@tu.dresden.de, Ullrich.Hesse@tu-dresden.de

In Haushaltskälteanwendungen wurden fluorhaltige Kohlenwasserstoffderivate bis auf wenige Ausnahmen aus dem deutschen Markt verdrängt. Auch im Zuge der F-Gas-Verordnung wird der Trend, Fluorkohlenwasserstoffe (FKW) aufgrund ihres hohen Treibhauspotentials (GWP) zu ersetzen, nicht nur fortgeführt, sondern auf weitere Bereiche ausgeweitet. Natürliche Kältemittel werden aufgrund ihres niedrigen GWP als passende Alternative angesehen.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von nicht-azeotropen Kältemittelmischungen, die die Wärmeübertrager-Effizienz des Kältemittel-Kreislaufs positiv beeinflussen können. Um diese Effizienzsteigerung durch genaue Auslegung und Dimensionierung der Kreislaufkomponenten zu ermöglichen, ist die Kenntnis des Verhaltens von Öl-Kältemittel-Gemischen notwendig.

Während die meisten Reinstoff-Kältemittel experimentell gut untersucht sind, steht die messtechnische Evaluierung der thermodynamischen Eigenschaften bestimmter Kältemittelgemische sowie deren Mischungen mit dem notwendigen Schmierstoff oftmals noch aus.

Zur Messung wurden mehrere Prüfstände aufgebaut, die es ermöglichen, thermodynamische Eigenschaften von Kältemittel-Öl-Gemischen unterschiedlicher Zusammensetzung zu bestimmen.

Der vorliegende Bericht beschreibt die experimentelle Untersuchung eines Kältemittelgemisches aus den natürlichen Kältemitteln Propan (R290) und Dimethylether (RE170) mit einem Polyolester (POE) zur Anwendung in Haushaltsgeräten.

Stichwörter:

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

II.2.06

Initiierung eines Lithiumkreislaufes – Aufarbeitung von Lithiumbromidlösungen aus Absorptionskälteanlagen

Steffen Feja

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

Absorptionskälteanlagen sind für viele Anwendungen in der Kälte- und Klimatechnik die ökologisch und ökonomisch beste Lösung. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn bisher ungenutzte Wärmequellen verwendet werden können. Für die Erzeugung von Absorptionskälte wird die Temperaturabhängigkeit der physikalischen Löslichkeit zweier Stoffe genutzt. Ein sehr weit verbreitetes Arbeitsstoffpaar ist Wasser/Lithiumbromid. In solchen Absorptionskälteanlagen sind Füllmengen von wenigen 100 kg bis zu mehreren Tonnen an 54 %igen Lithiumbromidlösung üblich.

Bisher werden die gebrauchten Arbeitsstoffe nach dem Lebensende solcher Anlagen bzw. nach Reparaturen der Entsorgung zugeführt; der Rohstoff Lithiumbromid wird dem Kreislauf entzogen. Damit geht auch das für verschiedene Zukunftstechnologien strategisch wertvolle Metall Lithium verloren. Für den Standort Deutschland kommt verschärfend hinzu, dass der Bedarf an Lithiumbromidlösung in derzeit komplett durch Importe gedeckt wird.

Ziel des ILK ist es, ein umweltfreundliches und ökonomisch tragfähiges, einsatzbereites Verfahren zur Aufarbeitung von gebrauchten, hochkonzentrierten Lithiumbromidlösungen zu entwickeln, um einen Kreislauf des Lithiums aus Lithiumbromidlösungen aus Absorptionskälteanlagen zu initiieren und somit einen Beitrag zur Ressourceneffizienz zu leisten. Es soll demonstriert werden, dass eine zu entsorgende 54 %ige Salzlösung, welche mit Korrosionsinhibitoren versetzt und ggf. mit Korrosionsprodukten verunreinigt ist, in eine regenerierte Stammlösung überführt werden kann. Geplant ist ein Batch-Prozess mit einer Kapazität von ca. 1 m³ Volumen pro Tag, welcher entsprechend der geforderten Spezifikationen eine verkaufsfähige neue Lithiumbromidlösung aus Abfalllösungen generiert.

In der Präsentation werden erste Ergebnisse zur Abtrennung von Chromaten aus Lithiumbromidlösungen vorgestellt und deren Eignung zur Wiederverwendung in neuen Absorptionskälteanlagen bewertet.

Stichwörter:

Absorptionskälteanlagen, Lithiumbromid, Recycling, Chromat.

II.2.07

Brandschutz bei A3 Kältemitteln durch sauerstoffreduziertes Abgas in Brennstoffzellen

Paul Kohlenbach^{1,2*}, Uli Jakob²

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

²SOLEM Consulting, Stendaler Str. 4, Hofgebäude, 10559 Berlin, Germany
uli.jakob@solem-consulting.com

Die vorliegende Studie untersucht die Verwendung einer Brennstoffzelle in Kombination mit einer Kälteanlage und Verwendung eines natürlichen Kältemittels der Sicherheitsgruppe A3 für ein Kühlhaus. Das Hauptziel bei dieser Anlagenkombination ist die Nutzung der sauerstoffarmen Abluft der Brennstoffzelle für die Luftversorgung des Kühlhauses und des Maschinenraums. Der Vorteil der Brennstoffzellen-Abluft ist der reduzierte Sauerstoffgehalt, da ein Teil des Luftsauerstoffs für die Reaktion in der Brennstoffzelle verbraucht wird. Durch den geringen Sauerstoffgehalt der Abluft kann der Brandschutz im Kühlhaus selbst, aber auch im Maschinenraum gewährleistet werden. Das Problem des Brandschutzes im Maschinenraum bei der Verwendung von brennbaren natürlichen Kältemitteln der Sicherheitsgruppe A3 kann somit entschärft werden. Von der Brennstoffzelle erzeugter Strom wird verwendet, um die Kälteanlage und das Kühlhaus mit Energie zu versorgen, die erzeugte Abwärme kann zusätzlich zur Entfeuchtung der Kühlhaus-zuluft verwendet werden. Das Paper beschreibt ein ausgewähltes Systemdesign für eine 100 kW_{el}-Brennstoffzelle und präsentiert Ergebnisse zu Leistung, Kosten und Einsparungen.

Stichwörter:

Natürliche Kältemittel, Sicherheitsgruppe A3, Brennstoffzelle, Sauerstoff, Entfeuchtung

II.2.08

Smart Fans and Components with cloud technologies

Stephan Borg

ZIEHL-ABEGG SE, Productmanagement Motors and Control Systems, Ventilation Technology,
Heinz-Ziehl-Strasse, 74653 Künzelsau
Stephan.Borg@ziehl-abegg.de, www.ziehl-abegg.com

For residential and industrial heatpumps there are some key factors to ensure satisfied end users.

Essential of course are a permanent availability of the plant and very low acoustics over the whole lifetime of the heatpump itself. The same is further true for all components of which the device is built of. ZIEHL-ABEGG presents a cloud based solution, initially developed for fans, which can process other than fan data as well: ZABluegalaxy

The introduced solution is capable to provide predictive maintenance data for all ZIEHL-ABEGG fans connected to the cloud and monitoring of all components connected to the cloud, which puts service in the position to act instead of react to provide permanent device operation by exchanging critical components scheduled before they stop operating unanticipated. This is achieved by a lifetime calculation depending on the real duty points of the fan over the whole lifetime which provides customers the remaining service life to schedule service.

In case of unexpected system outage the cloud can provide push notification to the service. Further the operational data and the failures reported to the cloud by the components can be checked remotely. This allows the service to have a first failure diagnosis before being on site.

Further the solution can provide early warnings if something within the system changes the system away from ideal operation: This can as well be soiled or blocked heat exchangers or fans as resonance. The later one is detected by sensors on board of the fan. If resonance is detected within the system a slightly different operational point can be selected remote to provide the best acoustics to the customer.

The presentation will provide an overview over the possibilities of ZBluegalaxy especially in combination with heat pump applications.

II.2.09

Intelligente und vernetzte Systemlösung aus Ventilator und Kühlstellenregler eröffnet neue Potenziale für Kühlmöbel im Lebensmittelhandel

Patrick Stern

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

Patrick.Stern@de.ebmpapst.com

Die Energiesparventilatoren von ebm-papst sind seit Jahren erste Wahl, wenn es um die energiesparende und zuverlässige Kühlung im Supermarkt geht. Mit der seriellen Schnittstelle für MODBUS-RTU-Kommunikation können bereits heute zahlreiche Monitoring-, Controlling- und Steuerungsfunktionen aus der Ferne sowie im laufenden Betrieb und in Echtzeit erledigt werden.

Darüber hinaus ist ebm-papst durch den Zukauf des Elektronikspezialisten IKOR in der Lage, zukünftig ein System aus Ventilator und passendem Regler anzubieten. Die innovative Systemlösung ermöglicht es, technische Parameter mit dem Ziel der Effizienzverbesserung und Anlagenverfügbarkeit zu überwachen und bedarfsgerecht einzustellen. Außerdem eröffnen sich neue Möglichkeiten der Datengewinnung und -auswertung bis hin zur Übertragung von Daten an Clouds. Damit halten auch Megatrends wie „Internet of Things“, Digitalisierung und selbstlernende Systeme Einzug in die Kältetechnik. Der Vortrag zeigt auf, welche Vorteile und Potenziale sich durch eine intelligente Systemlösung aus Ventilator und Kühlstellenregler ergeben.

II.2.10

Expansionsmaschine für CO₂ Kälteanlagen

Dr.-Ing. Karl Steinjan

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

Karl.Steinjan@ilkdresden.de

In den letzten Jahren geht der Trend insbesondere bei der Supermarktkühlung und Gewerbekälte zu Kompressionskälteanlagen mit dem natürlichen Kältemittel Kohlenstoffdioxid (CO₂, R744). Dieses Kältemittel weist aber einen hohen Energieverlust bei der isenthalpen Drosselung auf. Um diesen Verlust zu verringern, haben verschiedene Firmen mittlerweile Ejektoren im Angebot. Diese sind zwar sehr simpel im Aufbau, aber nur bedingt regelbar. Ein anderer Ansatz ist die Nutzung der technischen Arbeit des Entspannungsprozesses mittels Expansionsmaschine. Dazu wurden am Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) in Dresden die möglichen Nutzungsszenarien der gewonnenen technischen Arbeit untersucht und erst theoretische Vorarbeiten durchgeführt. Anschließend wurde eine entsprechende Expansionsturbine ausgelegt, konstruiert, gebaut und erprobt. Die Ergebnisse dieser Versuche und auch die Herausforderungen bei Konstruktion und Auslegung einer solchen Maschine werden präsentiert.

II.2.11

Impact of Low-cost Ejector Design on Transcritical R744 System Performance

Francesco BOTTICELLA^(a), Zishen LIU^(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
Email: elbel@illinois.edu

It is well known that the transcritical CO₂ cycle has higher intrinsic throttling losses than comparable subcritical cycles. Replacing the expansion valve with a two-phase ejector greatly improves cycle performance by reducing throttling losses. However, ejectors have yet to be successfully applied to low-capacity systems in the range of approximately 1 to 5 kW, such as bottle coolers, window air conditioners, beverage dispensers, heat pump water heaters or similar. It is a real challenge to integrate ejectors into mass produced systems of small capacity in a cost-effective manner due to the relatively complex design of an ejector in comparison to simpler expansion devices. The focus of the paper is to systematically determine the possibilities for cost reduction by identifying performance trade-offs of less complex ejector designs. In a first step, various simplified motive nozzle designs were designed, fabricated and tested. These included blunt geometry features instead of articulated conical shapes for the converging and diverging sections of the nozzle. A converging-only design was also investigated. In addition, a less-complex diffuser design was investigated in combination with the different motive nozzle designs. The simplified diffuser uses a sudden step change to connect the smaller mixing section diameter with the larger diameter of the subsequent sections. The results are most interesting: while there are some differences in ejector efficiency between the different motive nozzle designs on the order of 10 percent points, the effects on system performance (capacity and COP) are far less pronounced. That is especially true when a needle mechanism is used to control the high side pressure of the ejector system. In other words, the performance degradation caused by simplified motive nozzle design is negligible in comparison to the reduced efficiency caused by the needle losses. On the other hand, the simplified diffuser design had a more noticeable effect on ejector efficiency even when the needle was used. However, in terms of system capacity and COP the step-change diffuser resulted in similar overall performance as the conventional diverging design. These intriguing results confirm that low-cost ejector designs are a very feasible direction for mass produced, small capacity HVAC&R systems.

Keywords:

Carbon Dioxide (CO₂, R744), Ejector, Ejector Efficiency, Capacity and COP, Design Trade-offs

II.2.12

Innovative Absorber-Technologie in der Fernwärmeversorgung

Ivo Eiermann^{1*}, Dmitrij Gorlovsky²,

¹Johnson Controls, Global Product Management Absorption Chillers & Heaters,
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland
Ivo.Eiermann@jci.com

²Johnson Controls, Global Product Management Absorption Chillers & Heaters,
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland
Dmitrij.Gorlovsky@jci.com

Betriebssicherheit durch 2 stufigen Verdampfer / Absorber bei Absorptionskältemaschinen und Wärmepumpen.

Praxisbeispiele zur Nachrüstung von Absorptionswärmepumpen in der Fernwärmeversorgung zur Effizienzsteigerung und CO₂ Reduktion.

Einsatz von Fernwärme-angetriebenen Single Effect Double Lift Kältemaschinen zur Einhaltung niedriger Rücklauftemperaturen.

Stichworte:

Absorptionskältemaschine, Absorptionswärmepumpe, Fernwärme, Betriebssicherheit, CO₂ Reduktion

II.2.13

Varianten der KWKK mit Gasmotoren und Turbinen

Dipl. Dipl. Ing. Mario Schleith

Thermax Europe Ltd, 2 studio court Queensway Bletchley, Milton Keynes MK2 2DG
mario.schleith@thermaxglobal.com

Einteilung Absorptionskältemaschinen nach Stufigkeit und Heizmedium

Darstellung allgemeine Kopplungsmöglichkeiten:

1-stufig Heißwasser (Standardkopplung)

2-stufig (Abgas, Dampf, Heißwasser)

2-stufig/1-stufig simultan (Abgas/Heißwasser)

Gegenüberstellung der 3 Varianten bei der Kopplung mit jeweils dem gleichen BHKW

Praktisches Ausführungsbeispiel abgasbefeuerte Absorptionskältemaschine mit BHKW bzw. Mikrogasturbine

Praktisches Ausführungsbeispiel 2-stufige/1-stufige (Abgas/Heißwasser) Absorptionskältemaschine mit BHKW

II.2.14

Kaltwasserspeicher

Review der Entwicklung in Deutschland

Thorsten Urbaneck¹*, Ulf Uhlig², Thomas Göschel²

¹Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik,
Professur Technische Thermodynamik, 09107 Chemnitz, Deutschland
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

²inetz GmbH, Augustusburger Straße 1, 09111 Chemnitz, Germany

In Deutschland wurde im Jahr 2007 der erste große Kaltwasserspeicher in Betrieb genommen. Aufgrund vielfältiger Vorteile zeigte in den Folgejahren diese Kurzzeit-Speicherung eine beachtliche Resonanz bei kommunalen und industriellen Energieversorgern (Nah- und Fernkältesysteme). Der Beitrag liefert einen Überblick zur Entwicklung in Deutschland (siehe Bild**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Es werden Einsatzfälle, Betriebsweisen, Bautechniken, Auslegungsaspekte sowie Erfahrungen und Betriebsergebnisse gezeigt und diskutiert.

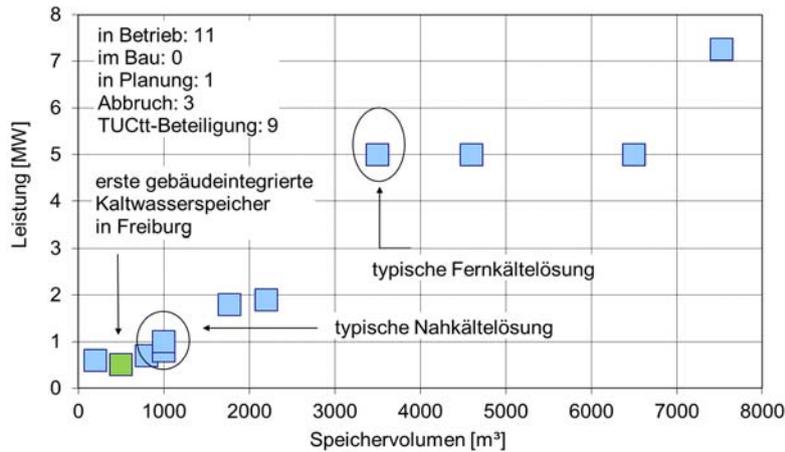


Abbildung 1: statistische Auswertung von Projekten mit großen Kaltwasserspeichern (größer 500 m³), Stand April 2019

II.2.15

Kältemittellösungen und das neue, nicht-brennbare Kältemittel Solstice® N41

Stefan Schüßler

Honeywell Deutschland GmbH
Stefan.Schuessler@Honeywell.com

Durch die Einführung der F-Gase Richtlinie und des Kigali Agreement, geraten die bisher verwendeten Kältemittel aufgrund der hohen Treibhauspotentiale stark unter Druck.

Die Kälteindustrie benötigt dringend Ersatzstoffe, um die Vorgaben zu GWP und Energieeffizienz einzuhalten.

Honeywell hat hierfür ein Produktportfolio entwickelt, das alle Applikationen bedienen kann, und unterstützt die Marktteilnehmer in der praktischen Implementierung dieser neuen Kältemittel.

Der Schwerpunkt des Vortrages liegt auf dem neu entwickelten Stoff Solstice® N41.

Solstice® N41 ist das erste, nicht entflammbare Kältemittel mit <750 GWP, das als R-410A-Alternative in besonders sicherheitsrelevanten Anwendungen, sowie für Data-Center und innenaufgestellte Heiz- und Kühlanlagen, VRF-, Rooftop und Split- A/C Anwendungen benutzt werden kann.

Diese Präsentation gibt einen Überblick über das neue Kältemittel, das demnächst auf dem Markt erhältlich sein und eine weitere sinnvolle Alternative zum Ersatz von R-410A bieten wird.

Eine zentrale Eigenschaft von Solstice® N41 ist sein um 65% geringeres GWP bei gleicher Effizienz und ähnlicher Kapazität wie R-410A; dies hilft bei der Minimierung der Umbaukosten und der Kapitalaufwendungen.

Die Nichtentflammbarkeit von Solstice® N41 ermöglicht es Herstellern einen kostengünstigen Übergang zu einer Alternative mit geringem GWP für ihre R-410A-Geräten. Nicht nur in der Produktionslinie, sondern auch in Bezug auf Service, Logistik und Lagerung bietet Solstice® N41 eine einfache und sichere Anwendung, die die Notwendigkeit von Sicherheitsmaßnahmen für andere Kältemittel mit niedrigerer Entflammbarkeit beseitigt.

Die Auslasstemperatur von Solstice® N41 ist niedriger als R-32 und liegt nahe bei R-410A, eine Dämpfung der Auslasstemperatur ist daher möglicherweise nicht erforderlich. Solstice® N41 hat eine ähnliche Massedurchflussrate wie R-410A, was zu einem ähnlichen Druckabfall führt und potenziell höhere Designkosten für den Wärmetauscher vermeidet. Abgesehen davon, dass Solstice® N41 der Leistung des R-410A sehr nahekommt, kann es mit der gleichen Größe und Konstruktion von Kompressoren und Wärmetauschern verwendet werden.

II.2.16

Vergleich der HFOs Kältemittel zu H-FKW Alternativen in Wärmepumpen

Khaled Gomaa

Chemours Deutschland GmbH, Neu-Isenburg

Khaled.Gomaa@chemours.com

Beschränkungen, die aus der F-Gas Verordnung sowie Ökodesignrichtlinie resultieren, zwingen den Wärmepumpen-Markt nach neuen Lösungen im Bereich der alternativen Kältemittel zu suchen. Als Ersatz für gut bekannten R407C und R410A, wurden neue, auf der Hydrofluorolefin(HFO)-Technologie basierende Alternativen mit sehr niedrigem GWP Wert entwickelt: Opteon™ XL40 (R-454A), XL20 (R-454C) und R-455A als Ersatz von R407C sowie Opteon™ XL55 (R-452B), XL41 (R-454B) oder R32 als Ersatz von R410A. Diese HFO basierenden Kältemitteln wurden anhand der Kriterien wie thermodynamische Leistung und Energieeffizienz sowie Gesamteinfluss auf die Anlage bewertet und mit herkömmlichen Kältemitteln wie R407C, R410A verglichen, um ihre Eignung als zuverlässige Kandidaten zu beurteilen: Opteon™ XL40 (R-454A), XL20 (R-454C) für Sole-Wasser und Luft-Wasser Wärmepumpen sowie Opteon™ XL55 (R-452B), XL41 (R-454B) sowie R32 in Luft-Wasser Wärmepumpen wurden hier untersucht.

II.2.17

Experimenteller Vergleich von R1224yd(Z) und R1233zd(E) in einer HTWP

Cordin Arpagaus*, Stefan S. Bertsch

NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Institut für Energiesysteme IES,

Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Schweiz

cordin.arpagaus@ntb.ch

Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) mit Vorlauftemperaturen von 100 bis 160 °C werden in den kommenden Jahren zunehmend auf den Markt kommen, insbesondere für Trocknungs-, Sterilisations- und Verdampfungsprozesse in der Lebensmittel- und Chemieindustrie. Es gibt umfangreiche Forschungsarbeiten zur Prüfung neuer umweltfreundlicher Kältemittel mit niedrigem GWP für den Einsatz in HTWP. Neben natürlichen Kältemitteln sind die synthetischen Hydrochlorfluorolefine (HCFO) R1224yd(Z) und R1233zd(E) (GWP < 1) geeignete Ersatzstoffe für die Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) R245fa und R365mfc mit einem GWP von > 800.

Diese Studie untersucht die experimentelle Leistungsfähigkeit von R1224yd(Z) und R1233zd(E) als Drop-In-Test in einer Labor-HTWP mit 5 bis 10 kW Heizleistung. Die entwickelte Wärmepumpe ist einstufig aufgebaut, arbeitet mit einem drehzahlgeregelten Kolbenverdichter und enthält einen stufenlos einstellbaren internen Wärmeübertrager (IHX) zur Überhitzungsregelung. Die Leistungsdaten wurden bei 30, 50 und 70 K Temperaturhub (40 bis 80 °C Wärmequelle, 80 bis 150 °C Wärmesenke) gemessen.

Die Integration des IHX in den Wärmepumpenzyklus steigerte den Wirkungsgrad und die Heizleistung über das gesamte Betriebskennfeld deutlich. Die experimentellen Ergebnisse mit R1224yd(Z) bei W60/W110 zeigen einen COP von 2,8 (Basiszyklus) und 3,2 bei IHX-Integration (+14 %). Die gemessenen COP-Daten von R1224yd(Z) waren mit R1233zd(E) vergleichbar. Die Abweichungen lagen innerhalb der Messunsicherheit von ± 0,2 COP. Der Drop-In-Test zeigte, dass die Heizleistung von R1224yd(Z) im Durchschnitt 9 % höher war als mit R1233zd(E). Darüber hinaus hat ein größerer Temperaturgleit auf der Wärmesenke von 5 auf 25 K den COP um +9 % weiter erhöht, was bei Prozessen mit niedrigen Rücklauftemperaturen vorteilhaft ist. Wie erwartet, nahmen die COP-Werte mit zunehmendem Temperaturhub ab und entsprachen einem durchschnittlichen Carnot-Wirkungsgrad von 37 % für R1224yd(Z) mit dem IHX-Zyklus.

Insgesamt sind die experimentellen Ergebnisse von R1224yd(Z) und R1233zd(E) vielversprechend für den Einsatz in HTWP. Die entwickelte Labor-HTWP ermöglicht es in Zukunft weitere alternative HFO- und HCFO-Kältemittel zu testen.

Stichwörter:

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Kältemittel, HCFO, R1224yd(Z), R1233zd(E)

II.2.18

Kältemittelalternativen für Kältekaskaden bis - 80 °C

Tobias Göpfert^{1*}, Christian Haack², Murat Aydin², Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, Helmholtzstr. 10
01069 Dresden, Deutschland

Tobias.Goepfert@tu-dresden.de

²Weiss Umwelttechnik GmbH, Entwicklung, Greizer Straße 41-49, 35447 Reiskirchen, Deutschland
christian.haack@weiss-technik.com, murat.aydin2@weiss-technik.com

Am 1. Januar 2015 ist die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (F-Gas-Verordnung), europaweit in Kraft getreten. Ziel der Verordnung ist die Reduzierung der Emissionen von fluorierten Treibhausgasen. Hierdurch ist in den letzten Jahren das Angebot an Hoch-GWP-Kältemitteln gesunken, wodurch es zu einem starken Preisanstieg gekommen ist. Diese Entwicklung wird sich in Zukunft weiter verschärfen, weshalb die Versorgungssicherheit nicht gewährleistet ist. Um diesem Trend entgegenzuwirken sind alternative Kältemittel mit möglichst niedrigem GWP notwendig. Die Anforderungen an Kältemittel für die Umweltsimulation sind besonders hoch. So werden nur Sicherheitskältemittel der Klassifizierung A1 (gering toxisch und nicht brennbar) verwendet. Darüber hinaus müssen Kältemittel chemisch stabil sein und eine gute Materialverträglichkeit besitzen. Während inzwischen eine Vielzahl an Kältemittelalternativen für Temperaturen bis -50 °C auf dem Markt sind, wurden bisher keine Lösungen für Anwendungen bis -70 °C von den etablierten Kältemittelherstellern erreicht. Aktuelle Reinstoffkältemittel sind aus sicherheitstechnischen oder ökologischen Gründen hierfür auszuschließen. Daher müssen für Anwendungen bis -70 °C Kältemittelgemische verwendet werden, wobei insbesondere Kohlendioxid-Gemische hervorzuheben sind.

Stichwörter:

Kältemittelalternativen, R23 (Trifluormethan), Kohlendioxid-Gemische, Tieftemperaturkältemittel

II.2.19

Auslegung luftbeaufschlagter lamellierter Wärmeübertrager für R717-Trockenexpansion

Eric Gerstenberger

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund, Germany
Eric.Gerstenberger@thermofin.de

Im Zusammenhang mit der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 werden natürliche Kältemittel mehr und mehr (bzw. wieder) interessanter. Das Kältemittel R717 wird dabei seit mehr als einem Jahrhundert im großindustriellen Bereich eingesetzt. Dabei überwiegt der überflutete Betrieb von Verdampfern. Dies hat jedoch zur Folge, dass hohe Füllmengen der Kälteanlage vorliegen. Aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften, wie des hohen Dichteunterschiedes zwischen Gas- und Flüssigkeitsphase bzw. der Hygroskopie von Ammoniak, wird ein Verdampfer selten mit Trockenexpansion betrieben. Oftmals muss die Überhitzung sehr hoch gewählt werden, um ein stabiles Überhitzungssignal zu erhalten.

Am Versuchsstand von thermofin wurden Untersuchungen von Verdampfern mit Trockenexpansion sowie überfluteter Verdampfung durchgeführt. Dabei wurde das Augenmerk neben den erzielbaren Leistungen vermehrt auf Regelstabilitäten gelegt. Neben Untersuchungen der Rohrverschaltung, Rohrmaterialien, Rohrstrukturen, usw., wurde die Stabilität des Überhitzungssignals bei gezielten Störeinflüssen, wie sie in der Praxis vorkommen, betrachtet. Im Rahmen einer Präsentation werden Einflüsse bei der Auslegung von Verdampfern vorgestellt. Weiterhin werden Störeinflüsse, wie Öl oder Wasser im Verdampfer nähergebracht.

II.2.20

Der Winkelfehler bei der Ermittlung der Schalleistung

Erik Jäger

Güntner GmbH & Co. KG, Abteilung Messungen & Versuche, Hans-Güntner-Straße 2-6, 82256 Fürstenfeldbruck
erik.jaeger@guentner.com

Der Winkelfehler ergibt sich bei der Schallmessung, wenn sie gemäß üblicher Praxis nach den Normvorschriften DIN EN ISO 13487 oder EN ISO 3744 durchgeführt wird und ein omnidirektionales Druckpegelmikrophon eingesetzt wird. Die Größe des Fehlers hängt ab von der gewählten Hüllflächenform, von der Größe der Schallquelle und vom Messabstand zur Schallquelle. Bei Rückkühlern und Verflüssigern gängiger Größe liegt der Winkelfehler in einer Größenordnung von 2 dB.

Die theoretischen Grundlagen zum Winkelfehler wurden von Herrn Dr. Wolfgang Probst schon vor ca. 30 Jahren veröffentlicht. Er entwickelte auf Grundlage seiner Untersuchungen eine Näherungsformel zur Bestimmung des Winkelfehlers. Mit Messungen an verschiedenen, real betriebenen Rückkühlern konnte diese Näherungsformel verifiziert werden. Dazu wurde bei den Messungen eine Schallintensitätssonde eingesetzt und Messmethoden in Anlehnung an die DIN EN 9614-2 angewendet. Die Vorgehensweise bei den Messmethoden, das zugehörige Berechnungsverfahren, die Auswirkungen auf den Schalleistungspegel sowie die theoretische Grundlage und Berechnung des Winkelfehlers wird erläutert.

Stichwörter:

Winkelfehler, DIN EN ISO 13487, 3744, 9614, Schallintensitätssonde

II.2.21

Einsatz von Adiabatischen Trockenkühlern in der Kältetechnik

Sascha Ostermann

Kelvion Refrigeration GmbH, Forschung & Entwicklung, Kühler Weg 1, 82065 Baierbrunn, Deutschland
Sascha.Ostermann@kelvion.com

In den letzten Jahren hat sich zwischen den Trockenkühlern und Kühltürmen eine neue Rückkühlart durchgesetzt. Hierbei wird ein Trockenkühler mit einer adiabatischen Vorkühlung der Luft ausgestattet. Bei manchen Produkten wird auch die Wärmeübertragungsfläche befeuchtet um den Verdunstungseffekt des Wassers besser zu nutzen.

Für Kältetechniker, Monteure wie auch Planer entstehen neue Möglichkeiten aber auch Herausforderungen die zu bewältigen sind. Mit diesem Vortrag soll ein kurzer Überblick über verfügbare Adiabatische Systeme gegeben werden und die Möglichkeiten hinsichtlich Energie Effizienz durch Reduzierung von Rückkühltemperatures, kleinerer Stellfläche bei gleicher Leistung und Erhöhung der Abschaltsicherheit bei zu hohen Kondensationsdrücken genauer erläutert werden. Mit einem Blick in die Normungen, Verordnungen, Betriebsanleitungen und Auslegungsprogrammen soll aufgezeigt werden wie so ein System auszulegen, aufzubauen und zu betreiben ist.

Stichwörter:

Adiabatische Kühlung, Hybridkühler, 42. BimSchV, VDI 6022 Blatt 2, Energie Effizienz, Reduzierung von Rückkühltemperatures, Betriebssicherheit, Auslegungsempfehlungen, Wartung

Luftströmung in Kühllagern für Obst

Einfluss der Ventilator Drehzahl und Kistenstapelung auf Luftgeschwindigkeit am Produkt

Ulrike Praeger^{1*}, Marc Sellwig², Daniel A. Neuwald², Reiner Jedermann³, Roland Handschuh⁴,
Ingolf Mayer⁵, Roland Wirth⁶, Martin Geyer¹,

¹Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB), Abteilung Technik im Gartenbau,
Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam, upraeger@atb-potsdam.de

²Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee (KOB), Schuhmacherhof 6, 88213 Ravensburg,
neuwald@kob-bavendorf.de

³Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS), Universität Bremen, Otto-Hahn-Allee, Gebäude
NW 1, Raum Ost-2130, 28359 Bremen, rjedermann@imsas.uni-bremen.de

⁴Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Str. 2 – 6, 82256 Fürstenfeldbruck, roland.handschuh@guentner.com

⁵Plattenhardt + Wirth GmbH, Mehlbeerstraße 2, D-82024 Taufkirchen, ingolf.mayer@plawi.de

⁶Frigotec GmbH, Zöbiger Straße 5, 06188 Landsberg, roland.wirth@frigotec.de

Bei Kühlung von Obst ist Luftbewegung erforderlich, um die Feld- und Atmungswärme der Produkte abzuführen. Der Ventilatorbetrieb verursacht erheblichen Energieverbrauch. Beispielsweise werden in einem Apfel CA-Lager 30-40 % des gesamten elektrischen Energiebedarfs für den Lagerbetrieb von etwa 80-100 kWh / Tonne Äpfel und Lagersaison benötigt. Im Forschungsprojekt 'COOL', gefördert durch BMWI, kooperierten 8 Partner aus Forschung und Industrie aus den Bereichen Kühltechnik, Kühllagerbau, Sensortechnik, Obstlagerung und Kistenherstellung. Durch optimierte Raumgestaltung und Ventilation sollte die Luftströmungsverteilung verbessert und den Produktanforderungen angepasst werden mit dem Ziel, den Energieverbrauch zu verringern ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen.

In einem 100 t Apfellageraum des KOB Ravensburg wurde die Luftgeschwindigkeitsverteilung in Kisten und vertikalen Spalten zwischen den Kistenreihen bei unterschiedlicher Stapelanordnung, Ventilator Drehzahl und -position untersucht. Dazu wurden neu entwickelte 2-dimensionale Funk-Strömungssensoren und Sensoren für richtungsunabhängige Luftgeschwindigkeitsmessung zwischen den Früchten verwendet.

Die Luftgeschwindigkeit war in den Kisten zwischen den Früchten mit $\leq 0,3$ m/s erheblich geringer als in den Spalten mit etwa 1,2 m/s bei 100 % Ventilatorleistung. Im Gegensatz zu den Spalten, in denen sich eine Luftwalze von relativ einheitlicher Geschwindigkeit ausgebildet hat, zeigte sich bei der Luftgeschwindigkeit in den Kisten ein deutlicher Gradient mit etwa 7-fach höheren Werten in den obersten Kisten im Vergleich zu den Kisten am Boden. Auch bei Reduktion der Luftmenge auf etwa 40 % brach die Luftwalze nicht ab und es wurde noch sehr geringe Luftgeschwindigkeit bis zu $5 \cdot 10^{-4}$ m/s in den Kisten gemessen. Auf gleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung in den Kisten wirkte sich Stapelung mit 10 cm breiten Spalten im Vergleich zu Blockstapelung und ein großer Abstand zwischen dem Kistenstapel und der Wand gegenüber den Ventilatoren positiv aus. Die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt können für die Dimensionierung der Kühllagerräume, der Stapelplanung und der Ventilator-Drehzahlregelung genutzt werden.

Stichwörter:

Obstlager, Luftgeschwindigkeit, Ventilator Drehzahl, Strömungssensor, Energieeinsparung

III.02

Maschinenschutz mit integrierter Cyber-Security

Dr. Christian Ellwein, KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH
Prof. Dr. H. Steinhart, Hochschule Aalen

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

Pumpen, Verdichter oder Ventilatoren werden oft in wichtigen, sicherheitsrelevanten Anwendungen eingesetzt. Das umfasst beispielsweise die Lebensmittelkühlkette, die Klimatisierung von Rechenzentren, die Wasserversorgung oder die Belüftung von Tierställen. Es ist schon lange etabliert, dass solche Arbeitsmaschinen durch Motorschutzrelais in Verbindung mit den entsprechenden Sensoren für Wicklungs- und Lagertemperatur, Vibration oder die Überwachung des Versorgungsnetzes vor Beschädigung geschützt werden. Durch die zunehmende Vernetzung dieser Maschinen entsteht nun eine weitere Klasse von möglichen Beschädigungen: diese Maschinen können auch durch Cyberangriffe beeinflusst oder sogar zerstört werden. Dies ist insbesondere von Bedeutung, weil elektrisch angetriebene Maschinen durch einen Cyberangriff tatsächlich physisch beschädigt werden können und es, anders als im traditionellen Bereich der IT, nicht möglich ist, den Schaden durch ein regelmäßiges Backup zu begrenzen. Ein defekter Elektromotor kann nicht durch ein Backup „wieder hergestellt“ werden.

Zusammen mit der Hochschule in Aalen entwickelt die Fa. Kriwan ein neues Schutzrelais, das mögliche Cyberangriffe durch Mustererkennung auf den drei Energieleitungen des Motors (L1, L2 und L3) sicher erkennt und das die Maschine im Falle eines Cyberangriffs in einem Notbetrieb versetzt. Dieser Ansatz der Mustererkennung hat den Vorteil, dass er ohne Updates auskommt und unabhängig von der Version eines Betriebssystems oder Datenstandards ist. Gerade für die lange Nutzungszeit solcher Arbeitsmaschinen im Feld, die häufig über zehn Jahren liegt, ist das von großer Bedeutung.

In dieser Mustererkennung werden wichtige elektrische Parameter wie, die Netzfrequenz, der Phasenwinkel, die Änderungsgeschwindigkeit der Drehzahl und mehr ausgewertet und in Bezug auf zulässige Grenzen für den Motor bewertet.

III.03

Kälte- und Energieoptimierung in einer mittelständischen Bäckerei

Klassische Kältetechnik bis zur Vakuumkühlung

Ing. Christian K. Holzinger EUR-Ing.

TB-Holzinger Ingenieurgesellschaft mbH, Pottendorferstraße 1/38, 1120 Wien, Österreich
project@tb-holzinger.at

- Von Einst bis jetzt, was hat sich getan, bzw. wo wurde optimiert
- Kältetechnik mit Tiefkühlager und Schockstation, gekühlte Verpackung usw.
- Wärmerückgewinnung aus Kälte
- Nutzung der Abwärme für Warmwasserbereitung und Strahlungstechnik zur Beheizung
- Klimatechnik
- Abgas Wärmerückgewinnung aus Trocknungseinheiten mit Lüftung und Klima
- Vakuumkühlung als Ersatz der Schockstation
- Neuer Backofen mit erheblich verbesserter Energieeffizienz
- Kaskaden Wärmepumpe als Ersatz von Heizöl für die Beheizung
- Übersicht zur Energieeffizienz, wie Strom- und Ölverbräuche

CO₂-Kälte auf Schiffen – Herausforderungen und Lösungen aus der Praxis

Benedict Holbein^{1*}, Wolfgang Herntier¹, Jürgen Matthes

¹Noske-Kaeser Maritime Solutions GmbH, Abteilung Kälte, Ruwoldtweg 12, 22309 Hamburg, Deutschland
benedict.holbein@noske-kaeser.com

Neue Kältemittelverordnungen und die Nachfrage nach klimafreundlicheren Lösungen für Kälteversorgung und Klimatisierung bringen den Einsatz natürlicher Kältemittel nach vorne. Im stationären Bereich an Land gehören CO₂-basierte Kühlsysteme bereits zum Stand der Technik. Im Bereich des Schiffbaus steigt die Nachfrage nach entsprechenden Lösungen.

Im Schiffbau sieht man sich, einerseits aufgrund von Klassenrichtlinien und besonderen Sicherheitsvoraussetzungen andererseits aus technischer Sicht besonderen Herausforderungen gegenüber, für die es innovative aber gleichzeitig praktikable Lösungen zu entwickeln gilt. Ohne die Erfahrungen und erprobten Konzepte aus dem Landbereich, beispielsweise von gängigen Supermarktkühlsystemen ungenutzt zu lassen, ist es erforderlich gängige Konzepte an die maritimen Bedingungen anzupassen oder ganz über Bord zu werfen und verschiedene anlagentechnische Aspekte neu zu denken. Zwar sind mittlerweile eine Reihe Standardkomponenten für CO₂-Kühlsysteme verfügbar, allerdings sind auch hier für die maritime Anwendung nötige Anpassungen zu bewerkstelligen.

Um die verschiedenen Kältebedarfe und unterschiedliche Prioritäten bezüglich Kosten, Klimabilanz und Komplexität zu bedienen, kommen verschiedene Grundkonzepte in Frage.

Eine Kompromisslösung mit hoher Effizienz und reduziertem Aufwand stellen Zweistoff-Kaskaden mit CO₂-Tiefkühlung dar. Reine CO₂-Kühlprozesse mit mehrstufiger Verdichtung sind sowohl für den Normal- als auch für den Tiefkühlbereich gangbare Möglichkeiten, die allerdings größeren technischen Aufwand mit sich bringen.

Die präsentierte Arbeit zeigt Konzepte und Lösungen aus der Praxis für verschiedene für den Schiffbau geeignete Systemvarianten auf und geht auf gemachte Erfahrungen und Optimierungspotentiale ein.

Bei der Betrachtung der Fragestellung nach eigensicherem Betrieb ist in erster Linie die Unterscheidung zwischen unter- und überkritischem Betrieb entscheidend und die Auswahl entsprechender Komponenten zu beachten. Hierbei wird eine Abwägung von Kosten und Aufwand bezüglich hochdruckfähigen Komponenten gegenüber nötigen Sicherheitskühleinrichtungen und Druckausgleichvorrichtungen vorgenommen. Diese Thematik spielt vor allem beim Kaskadenbetrieb mit konventioneller Normalkühlung eine wichtige Rolle. Diese Systemvariante verspricht bei richtiger Auslegung eine hohe Anlageneffizienz, birgt aber Herausforderungen für einen zuverlässigen Betrieb und hinsichtlich der Regelung. Anders als im Landbau mit stark schwankenden Umgebungsbedingungen, bietet die frisch- oder seewasserabhängige Gaskühlung in der Schiffskälte weniger Spielraum für druckgeregelte Prozessoptimierungen. Im Kühltemperaturbereich beläuft sich die abzudeckende Bandbreite von unter -30°C bis 6°C. In dieser Kombination kommen individuell auf die vorliegenden maritimen Randbedingungen abgestimmte Regelungskonzepte, mit reduzierter Komplexität zum Tragen.

Basierend auf einem robusten Grundkonzept für eigensichere CO₂-Schiffskälteanlagen, können Tiefkühlsysteme, Proviantkälteanlagen und Kaltwassersätze in einem breiten Leistungsbereich abgedeckt werden.

Neben der technischen Umsetzung CO₂-basierter Kühlsysteme, findet auch die energetische und ökologische Bilanz Betrachtung. Aufgrund der per Schiffsdiesel generierten Antriebsleistung fallen hierbei Wirkungsgrad-einbußen im Vergleich zu konventionellen Anlagen stärker ins Gewicht, sodass erst eine genauere Betrachtung eine belastbare ökologische Bewertung zulässt.

Noch ist der Erfahrungsschatz zu maritimer CO₂-Kälte gering, dennoch eröffnen regulatorische und von der Verfügbarkeit und der Entwicklungserfahrung von Zuliefererkomponenten abhängige Dynamiken Entwicklungs- und Optimierungspotentiale. Diese sowie innovative ganzheitliche Konzepte, etwa für rein auf natürlichen Kältemitteln basierende Kaskadensysteme, finden in einem Ausblick Betrachtung.

Stichwörter:

CO₂, Kälteanlagen, Schiffbau, trans-kritischer Prozess, eigensicherer Betrieb

III.05

Effizienz und Betriebssicherheit von Bestandsanlagen nach Umstellung auf R 290

Simon Bergs¹

¹CoolTool Technology GmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg
info@cooltool-technology.com

Eine objektive Bewertung der Funktionsweise einer Kälteanlage nach einer Umrüstung auf ein alternatives Kältemittel mit einfachen Mitteln ist meist nicht möglich. Nur während der Umrüstung oder der Inbetriebnahme sind Momentaufnahmen möglich. Da nicht alle vorhandenen Bauteile auf das neue Kältemittel ausgelegt sind, beeinflussen diese durch ungünstige Betriebspunkte die energetische Gesamtbilanz der Systeme. Durch eine umfassende Messwerterfassung aller wichtigen Punkte, konnte bei im Anlagenbestand auf R 290 umgestellten Kältekreisläufen, die Betriebssicherheit, die Energieeffizienz und die Leistungsdaten beurteilt werden.

Eine Umstellung auf ein neues Kältemittel erfordert häufig den Umbau einzelner Bauteile, wie Überhitzungsregler und mess- und regeltechnischer Komponenten. Ferner werden häufig Ölwechsel empfohlen. Durch ein „Plug and Play“ Hard- und Softwaresystem zur Diagnose von Kältekreisläufen mittels Kurz- und Langzeitmessungen konnte bei verschiedenen Umstellung auf R 290 oder R 290/R 600a Gemische die Funktionsweise visualisiert werden. Dabei wurden bei Anlagenbestand bei Tiefkühl-, Normalkühl- und in Klimabereich bei Kaltwassersätzen die Wechselwirkung des Kältemittels mit der Anlagentechnik erfasst. Durch die Messdatenerfassung war man in der Lage, alle relevanten Systemzustände vor Ort mittels thermodynamischer Berechnungen in Echtzeit zu erkennen. Basierend auf den Daten von Langzeitmessungen konnten auch kritische Fehlfunktionen und Minderleistungen außerhalb normaler Arbeitszeiten, z. B. Nachts oder am Wochenende, erkannt werden. Dadurch konnten die Einstellungen der Bauteile und der Regelparameter für einen ordnungsgemäßen Betriebszuständen gezielt vorgenommen werden. Dadurch konnten, bedingt durch andere Anforderungen der natürlichen Kältemittel, Schäden an den Anlagen vermieden werden.

III.06

Leistungsmessungen an einer Propan-Kälteanlage

Tobias Guth^{1*}, Sylvia Schädlich¹

¹Hochschule Ruhr West, Institut für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Lützwowstrasse 5, 46236 Bottrop
tobias.guth@hs-ruhrwest.de

Nachdem in der Vergangenheit Kältemittel mit einem Ozonabbaupotential (ODP) verboten wurden sind seit 2015 Kältemittel mit hohem Treibhauspotential (GWP) in den Fokus politischer Reglementierung gerückt. Hierdurch sind Hersteller und Verbraucher gezwungen zukünftig alternative Kältemittel einzusetzen. Neben intensiver Forschung an Stoffgemischen mit niedrigem GWP, die als Drop-In-Kältemittel eingesetzt werden sollen, bieten natürliche Stoffe eine einfache Alternative. Hierzu zählt bspw. Propan, welches eine hohe volumetrische Kälteleistung besitzt. Aufgrund der Brennbarkeit wird es jedoch trotz der sehr guten thermodynamischen Eigenschaften bisher kaum für größere Leistungsbereiche eingesetzt.

Ein Forschungsvorhaben der Eschenfelder KKU GmbH und der Hochschule Ruhr West hat das Ziel, einen Nachweis über die Energieeffizienz des Kältemittels Propan unter Einsatz innovativer Komponenten zu führen. Hierzu werden Leistungsmessungen im Normalkühlbereich (-10 bis +10°C) bei einer maximalen elektrischen Leistungsaufnahme des Verdichters von etwa 4 kW durchgeführt und der Energy Efficiency Ratio (EER) berechnet. In diesem Beitrag werden sowohl die Messergebnisse als auch Vergleiche mit Literaturwerten zu bisher gängigen und aktuellen Kältemitteln dargestellt. Darüber hinaus werden sicherheitsrelevante Aspekte für den Umgang mit Propan betrachtet und Maßnahmen zur Einhaltung der sicherheitstechnischen Vorgaben

präsentiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zunächst für eine Optimierung der Kälteanlage verwendet, bevor die Anlage zur Marktreife weiterentwickelt wird.

Stichwörter:

Propan, R290, Leistungsmessung, EER, Drehzahlregelung

III.07

Kälteversorgung durch Kompressions- und Adsorptionstechnik

LOW GWP Kälteversorgung im Tiefkühlbereich durch kombinierte Anwendung von Kompressions- und Adsorptionskältetechnik

Michael Dölz^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlosser¹, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schabbach²

¹Hochschule Hof, Institut für Wasser- und Energietechnik, Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof,
mdoelz@hof-university.de
thomas.schlosser@hof-university.de

²Hochschule Nordhausen, Institut für Regenerative Energietechnik, Weinberghof, 99734 Nordhausen
thomas.schabbach@hs-nordhausen.de

Die Kältebranche steht in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen. Auf der einen Seite müssen viele Kältemittel aufgrund der F-Gase-Verordnung in Zukunft substituiert werden. Andererseits steigt der Strombedarf für die Kältebereitstellung in Deutschland jährlich. Eine Möglichkeit der Energieeinsparung stellt der Einsatz von thermischen Kältemaschinen dar. Dieser Technologie sind auf Grundlage von Stoffeigenschaften der Kältemittel und wirtschaftlichen Betrachtungen Grenzen gesetzt. Der Leistungsbereich kleiner 200 kW wird heute aus Gründen der Wirtschaftlichkeit von Adsorptionskältemaschinen dominiert. Diese Kälteanlagen können aufgrund des Kältemittels Wasser nicht im Temperaturbereich kleiner 0°C betrieben werden. Die Kooperation des Instituts für Wasser- und Energiemanagement (IWE) der Hochschule Hof und des Instituts für Regenerative Energietechnik (InRET) der Hochschule Nordhausen untersucht zur Effizienzsteigerung der Kälteversorgung im Tiefkühlbereich den Ansatz einer kombinierten Anwendung von Kompressions- und Adsorptionskältetechnik.

Auf der Grundlage von Messdaten und Herstellerangaben wurde in einer Voruntersuchung eine Studie gearbeitet, mit der die Effizienzsteigerung sowie die Wirtschaftlichkeit einer Verbundanlage nachgewiesen werden konnte. In der Studie wurden folgende Varianten untersucht:

Kaskadenschaltung aus Adsorptionskälte- und der Propankältemaschine. Die Verbesserung dieser Kombination gegenüber der Referenz ergibt sich in der Vorkühlung des Kühlwassers der Propankältemaschine und damit der Steigerung der Leistungszahl.

Einbindung der Adsorptionskältemaschine in den Kältekreislauf der Propankältemaschine. Mit Hilfe eines Wärmeübertragers wird das Kältemittel der Propankältemaschine nach dem Verflüssigen weiter unterkühlt. Aufgrund der tieferen Unterkühlung des Kältemittels, ist nach der Entspannung durch die Drossel der Dampfanteil geringer und es kann eine größere Kälteleistung gegenüber dem Referenzprozess realisiert werden.

Als Referenzanlage wird eine Nachbildung einer Propankältemaschine, die auf der Grundlage von Stoffdaten und Herstellerangaben erstellt wurde, verwendet.

In der Simulation wurde der EER (Energy Efficiency Ratio) und ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) der Referenzvariante (Variante 3) mit der Kaskadenschaltung (Variante 1) und der Einbindung in den Kältekreislauf (Variante 2) verglichen. Eine geringere Verbesserung des EER von 11 bis 16 % war bei der integrierten Variante zu beobachten. Bei der Kaskadenschaltung konnte die Kälteleistung dagegen zwischen 53 und 79 % gesteigert werden. Auf der Grundlage von Investitions- und Energiekosten zeigte die wirtschaftliche Betrachtung gegenüber der Referenzanlage eine mögliche Amortisationszeit von 6 bis 8 Jahren.

Energetische Einordnung des Kältemittels R290 für Wäschetrockner

Andreas Möhlenkamp^{1*}, Marcos Bockholt¹, Niklas Brandt², Wilhelm Tegethoff², Jürgen Köhler²

¹Miele Cie&KG, F&E Wäschepflege, Carl-Miele-Straße, 33325 Gütersloh, Deutschland
andreas.moehlenkamp@miele.de

²TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str 25, 33106-Braunschweig, Deutschland
niklas.brandt@tu-braunschweig.de

In Haushaltswäschetrocknern mit Wärmepumpe wird bis heute vorwiegend das Kältemittel R134a eingesetzt. Das verwendete Kältemittel mit einem GWP₁₀₀ von 1430 fällt unter die seit 2017 geltende F-Gas-Verordnung und ist preislich seit 2017 stark gestiegen. Beide Faktoren motivieren eine Umstellung auf ein Kältemittel mit geringem GWP-Wert. Das natürliche Kältemittel R290 hat ein GWP₁₀₀ von 3 und eignet sich aufgrund seiner thermophysikalischen Eigenschaften gut für eine Anwendung im Wäschetrockner.

Die nachfolgende Veröffentlichung stellt erste Ergebnisse eines kommerziell verfügbaren Wäschetrockners mit dem Kältemittel R290 der Firma Miele vor. Eine energetische Einordnung des Wäschetrockners mit R290 gegenüber Wäschetrocknern mit R134a wird durchgeführt.

Stichwörter:

Kältemittel, R134a, R290, Wäschetrocknung, Wärmepumpentrockner

Planungsanforderungen an Kälteanlagen durch das BAFA Förderprogramm

Vilim Mergl¹

¹CoolTool Technology GmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg
info@cooltool-technology.com

Seit der Einführung der neuen BAFA Förderrichtlinie für Kälteanlagen werden nur noch Systeme mit natürlichen Kältemitteln gefördert. Neben diesen grundlegenden Änderungen werden aber innerhalb der Förderrichtlinie weitere konstruktive Maßnahmen gefordert. Diese sollen primär die Energieeffizienz erhöhen und betreffen die zu installierenden Bauteile sowie die zu wählenden Regelstrategien. Dabei sind auch Nebenaggregate wie Lüfter und Pumpen sowie die Anforderungen der Eco-Design-Directive mit in die Überlegungen einzubeziehen. Neben der zukünftigen Verfügbarkeit der Betriebsstoffe soll die Richtlinie damit auch der Einhaltung der Klimaschutzziele dienen.

Um vor dem Hintergrund der neuen BAFA Förderrichtlinie eine sinnvolle Lösung für den jeweiligen Anwendungsfall zu finden, müssen Vorüberlegungen in der Planungsphase angestellt werden, die alle Punkte in ökonomischer, aber auch ökologischer Hinsicht berücksichtigen. Hilfreich sind in dieser Hinsicht Erfahrungen aus bereits ausgeführter Anlagen, die mit Simulationen unter Berücksichtigung der Konstruktion, kombiniert werden müssen, um aussagekräftige Zahlen für den Betrieb neuer Anlagen mit natürlichen Kältemitteln zu machen. Auf Basis von Messungen und Untersuchungen ausgeführter Objekte im Anlagenbestand werden für unterschiedliche Anlagenkonzepte die Kosten, der Nutzen, das Ausfallrisiko, die Anlagenredundanz, die Anlagensicherheit und schließlich der zu erwartende Energiebedarf sowie die Flexibilität im Betrieb einer Abwägung unterzogen. Bezugnehmend auf den geforderten Kältebedarf wurden für zukünftige Planungen der zu erwartende Gesamtenergiebedarf, unter Berücksichtigung der individuellen Funktions-, Betriebs- und Regelweise der Anlagen unter den Anforderungen der BAFA Förderrichtlinie simuliert.

Energetisch optimierte Betriebsführung von Kälteanlagen

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

Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach, Deutschland

hausser@hochschule-bc.de; volkmer@hochschule-bc.de;

becker@hochschule-bc.de; floss@hochschule-bc.de

Die Effizienz von Kältemaschinen kann allgemein mit der Leistungszahl (COP – Coefficient of Performance) oder speziell mit der im Betrieb gemessenen Leistungszahl (TCOP_I – Total Coefficient of Performance nach VDMA 24247-7 für Bilanzraum I) bewertet werden. Unter Berücksichtigung der Komponenten des Rückkühlkreises erweitert sich der Bilanzraum I zum Bilanzraum II und die Effizienz wird mit dem TCOP_{II} für den Bilanzraum einer Kälteanlage angegeben. Durch die bei der Effizienzbewertung zusätzlich zur elektrischen Leistung des Verdichters berücksichtigten Leistungen von Pumpe im Kühlwasserkreislauf und Ventilators des Rückkühlwerks ergibt sich ein im Vergleich zum TCOP_I verringerter TCOP_{II}. Um weiterhin eine möglichst optimale Leistungszahl TCOP_{II} zu erreichen, müssen nach Haußer et al.^[1] die Stellsignale für Pumpe und Ventilator gezielt vorgegeben werden. Werden zudem noch die Hilfsenergien und Wärmeeinträge auf der sekundären Kältenutzungsseite mit berücksichtigt, wird der TCOP_{III} verwendet und damit die energetische Betrachtung auf das kältetechnische Gesamtsystem als Bilanzraum III erweitert.

Aufbauend auf der Veröffentlichung [1] werden im vorliegenden Beitrag verschiedene Führungsgrößen für die Regelung von Ventilator und Pumpe zur Optimierung des TCOP_{II} erprobt. In Abhängigkeit der Wahl der jeweiligen Führungsgröße kann im Betrieb die Kopplung zwischen Pumpe und Ventilator unterschiedlich stark ausfallen. Der Entwurf von stabilen Regelkreisen stellt vor diesem Hintergrund eine besondere Herausforderung dar. Um die Stabilität der Regelkreise hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens gewährleisten zu können, werden diese bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen untersucht. Außerdem wird mittels Jahressimulationen und darauf abgestimmten experimentellen Untersuchungen an einer Laboranlage am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach das Energieeinsparpotential gegenüber herkömmlichen Regelstrategien aufgezeigt.

Stichwörter:

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

^[1]Haußer, S. et al.: Optimierte Betriebsführung von Kühlwasserkreisläufen, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. DKV, 2018 in Aachen, ISBN 978-3-932715-96-9

Algorithmus-gestützte Betriebsoptimierung von Kälteversorgungssystemen

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

¹Hochschule München, CENERGIE – Forschungsinstitut für effiziente Gebäude und Quartiere,

Lothstr. 34, 80335 München

joerg.bentz@hm.edu

²Technische Universität München, Lehrstuhl für Erneuerbare und Nachhaltige Energiesysteme,

Lichtenbergstr. 4a, 85748 Garching b. München

In zentralen Energiesystemen zur Kälteversorgung werden mehrere komplexe Systemkomponenten im Verbund eingesetzt. Somit ergibt sich eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten hinsichtlich des Einsatzplanes der Systemkomponenten, als auch der Betriebsbedingungen. Eine typische Systemkonfiguration besteht zumeist aus einer – oder mehreren – Kältemaschinen in Verbindung mit Rückkühlwerken und deren

Versorgungspumpen. Für die Betriebsoptimierung dieser Systeme können je nach Komplexität und Art der Zielstellung unterschiedliche mathematische Optimierungsprozeduren angewendet werden. Dabei ist die Betriebscharakteristik aller Komponenten in ausreichender Güte modellhaft abzubilden. Um die Prozeduren in Einklang mit der Betriebscharakteristik zu bringen, 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. Dabei werden Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Modellgenauigkeit für die verschiedenen Systemkomponenten entwickelt. Diese Simulationsmodelle können aus einer exakten physikalischen Beschreibung, aus unterschiedlichen vereinfachten empirischen Ansätzen oder einer Kombination aus beidem bestehen.

Es werden Methoden vorgestellt, komplexe thermodynamische Zusammenhänge in Form vereinfachter Modelle für eine Optimierung anwendbar zu machen, diese Modelle zu einem Systemverbund zu verbinden und den Betrieb dieses System zu optimieren. Es wird gezeigt, welche Energieeinsparung durch den Einsatz einer mathematischen Betriebsoptimierung erreicht werden kann und wie diese Einsparung zu erreichen ist.

Stichwörter:

Betriebsoptimierung, Kälteversorgungssystem, Modellierung

III.12

Kühllasttool für instationäre Wärmebilanzen in Großkühlslagern

Gerhard Frei

COOLPLAN | Trimbургstr. 2 | 81249 München | Deutschland

frei@coolplan.eu

Weltweit werden Obst und Gemüse bei Temperaturen zwischen 0 °C bis + 4 °C bei hoher relativer Luftfeuchte in Kühlräumen und Langzeitlagern gelagert. Moderne Verteilerlager bestehen in der Regel aus einer Vielzahl von Räumen mit mehreren 100 t Lagerkapazität je Kühlraum, dessen Kühlgut mit konventioneller Kältetechnik und Hochleistungsluftkühlern gekühlt wird. Die durchschnittliche jährliche EU-Apfelernte von 10 – 12 Mio. Tonnen wird durch witterungsbedingte Ernteauffälle und schwankende Klimabedingungen geprägt.

Üblicherweise werden Kühlager für Obst- und Gemüse nach dem Kältebedarf während der Einlagerungsphase ausgelegt, bei der sehr hohe Wärmemengen bedingt durch die Atmungs- und Feldwärme der lebenden Produkte abgeführt werden müssen. Nach Abkühlung auf die Kern-Solltemperatur sinkt der Bedarf je nach Produkt und Gestaltung des Lagers auf bis zu 1/3 der anfänglich benötigten Kälteleistung. Diese erheblichen Lastunterschiede stellen Planer vor Herausforderungen, hinsichtlich Erhaltung der Produktqualität, Regelbarkeit und energetisch optimalen Betrieb der Kälteanlage im Teillastverhalten von Langzeitlagern.

Die individuelle Einbringung des Kühlgutes, eine mögliche natürliche Vorkühlung in Abhängigkeit von Wetterbedingungen, Erntezeitraum als auch die Logistik am Standort, aber auch die Kühlertemperaturen, die Luftumwälzung, die Stapelung des Kühlgutes und die daraus resultierende Luftströmung im Kühlraum haben erheblichen Einfluss auf die instationäre Wärmeleitung und die daraus resultierende Abkühlkurve, die Abkühlzeit und das Erreichen der Produktkerntemperatur. In der Praxis wird vielfach linear und mit zu kurzen und nicht erreichbaren Abkühlzeiten gerechnet. Hierdurch ergibt sich, dass die Kühllast und max. Kälteleistung dementsprechend zu groß gewählt wird.

Die Lastfaktoren eines Kühlraumes gliedern sich in innere und äußere instationäre Lasten. Eine projektbezogene instationäre Kühl-Lastverteilungsberechnung und Bilanzierung von Einlagerungs- und Lagerphase sind daher Voraussetzung für die planerische Herangehensweise. Mittels eines dynamischen Kühllasttools wird in einem Langzeitlager der Einlagerungsfall, die Abkühlphase und die Langzeitlagerung mit instationärem Lastaufbau und instationärem Wärmeentzug simulativ dargestellt, berechnet und energetisch bilanziert. Verschiedene Abkühlkurven werden in diesem Beitrag simuliert, gegenübergestellt und mit der Praxis verglichen. Die daraus resultierenden Kühllasten, Bilanzen und Einflüsse werden diskutiert.

Stichwörter:

Langzeitlager, instationäre Wärmeleitung, Simulation, Kühllast, Energiebilanz

III.13

Energie-Einsparmöglichkeiten durch verbesserte Regelung

Wie mit guter Regelung Geld und Energie gespart werden kann.

Andreas Risius*, Markus Eberhardt

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

Anlagenzuverlässigkeit, sowie die ökonomischen und die ökologischen Gesichtspunkte sind die Entscheidungskriterien bei der Auslegung von Kälteanlagen. Die Zuverlässigkeit steht an oberster Stelle und darf keinesfalls durch Einsparungen bei Investitions- und Betriebskosten als auch den Auswirkungen der Anlage auf Umwelt und Klima eingeschränkt werden.

Im Hinblick auf den F-Gas Phase Down rücken die ökologische Gesichtspunkte immer mehr in den Vordergrund. So lässt sich mit einem Kältemittel mit niedrigem Erderwärmungspotential gewährleisten, dass die Anlage auch noch viele Jahre lang betrieben werden kann.

Mit einer stabilen und stufenlosen Drehzahlregelung der Kältemittelverdichter können alle drei Bereiche verbessert werden. Die Wahl einer höheren Verdampfungstemperatur vermindert den Strombedarf. Die Anpassung der Verflüssigungstemperatur an die Umgebungstemperatur zielt darauf ab den Stromverbrauch weiter zu senken. Mit Hilfe von Spartransformatoren zur Erhöhung der Eingangsspannung lässt sich sowohl die Regelbarkeit als auch die Leistungsaufnahme positiv beeinflussen.

So werden mit reduziertem Energieverbrauch gleichzeitig der CO₂ Fußabdruck und die Betriebskosten gemindert ohne die Anlagenzuverlässigkeit einzuschränken.

Stichwörter:

Regelung, Regelfaktor, Einsparmöglichkeiten, Hochsetztransformator, Frequenzumrichter

III.14

Vergleich von Kältemitteln für die Bahnklimatisierung

Holger König¹, Lutz Boeck²

¹ref-tech engineering, Bechtersweiler 31, 88131 Lindau (Bodensee); holger.koenig@ref-tech.de

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

Bahnklimasysteme müssen sehr robust konstruiert werden, im Betrieb unterliegen die Kälteanlagen großen Belastungen aufgrund von Schwingungen, Stoß und wechselnden Umwelteinflüssen. Weiterhin bestehen hohe Anforderungen hinsichtlich Dauerfestigkeit und Betriebssicherheit. Diese Anforderungen haben zu Konstruktionen geführt, die eine hohe Anlagensicherheit gewährleisten, dieses gilt insbesondere für die Dichtheit der Bahnklimaanlagen.

In Bahnklimaanlagen wird zum großen Teil noch das dem Phase Down unterliegende Kältemittel R134a eingesetzt, es sind darüber hinaus Anlagen mit Luft (R729), CO₂ (R744) als Kältemittel im Betrieb und intensiv erprobt worden, wobei keines der genannten alternativen Systeme sich bisher am Markt durchsetzen konnte.

Neue Ansätze betrachten neben R1234yf auch Kohlenwasserstoffe (R290, R1270), die sehr gute thermodynamische Eigenschaften aufweisen und damit hohe Energieeffizienz erwarten lassen aber insbesondere als nachhaltige Arbeitsstoffe angesehen werden.

In dieser Arbeit wird ein Vergleich von Kältemitteln für Klimasysteme in der Bahnindustrie durchgeführt. Faktoren zur Gegenüberstellung sind vor allem: Umwelteinflüsse, Energie- und Kosteneffizienz, TEWI, Kompo-

nenten-Verfügbarkeit, Bahntauglichkeit, Komplexität, Wartungs- und Servicefreundlichkeit und die Eigenschaften der Kältemittel, insbesondere werden auch Eigenschaften zur Brennbarkeit bewertet.

Die Brennbarkeit und die damit zusammenhängenden Risiken werden für den Lebenszyklus der Anlagen üblicherweise mittels Risikoanalyse adressiert. Erste Ergebnisse dieser Arbeit werden vorgestellt. Es zeigt sich, dass Risiken nach entsprechendem Re-Design der Anlagen im Betrieb, in der Logistik und vor allem in der Wartung gering sind und beherrschbar erscheinen. Voraussetzungen hierfür werden aufgezeigt und abschließend diskutiert.

Stichwörter:

Bahnklimatisierung, Risikoanalyse, Vergleich von Kältemittel, R290, R729, R744, R1270, R1234yf

III.15

Einfluss der Betriebseinstellungen auf die Effizienz einer Batteriekühlanlage

S. Angermeier^{1,2, *}, B. Kerler³, C. Karcher²

¹ Mahle International GmbH, ² TU Ilmenau, ³ Mahle Industrial Thermal Systems GmbH

sebastian.angermeier@mahle.com

In elektrischen Stadtbussen werden Lithium-Ionen-Batterien als Energiespeicher genutzt und idealerweise zwischen 15°C und 35°C temperiert. Zur Kühlung kann ein einfacher Kältekreislauf genutzt werden, dessen Betriebsparameter (Verdichter-Drehzahl, Verflüssiger-Lüfter-Drehzahl und Überhitzung) Einfluss auf die Leistungszahl des Kreislaufes und damit auf die Reichweite der Busse haben.

Die untersuchte Batteriekühlanlage besteht aus einem einfachen Kältekreislauf (R134a + PAG-Öl) mit elektrischem Scroll-Verdichter, Verflüssiger, Sammler, EXV-Ventil und Verdampfer (Chiller). Die Leistungsmessungen der Anlage werden an einem Systemprüfstand durchgeführt. Durch Variation von Verdichter-Drehzahl, Verflüssiger-Lüfter-Drehzahl und Überhitzung wird die Leistungszahl in Abhängigkeit der Betriebsparameter ermittelt. Hierbei werden unter anderem Änderungen der Verdichter-Kennzahlen (Liefergrad, isentroper und mechanischer Wirkungsgrad) und des Ölumlaufs messtechnisch erfasst. Der Einfluss der Betriebsparameter und das Potenzial zur Effizienzsteigerung im Vergleich zu aktuellen Anlagenregelungen (von bis zu 15 %) werden aufgezeigt und für verschiedene Randbedingungen diskutiert.

Exemplarische Messergebnisse

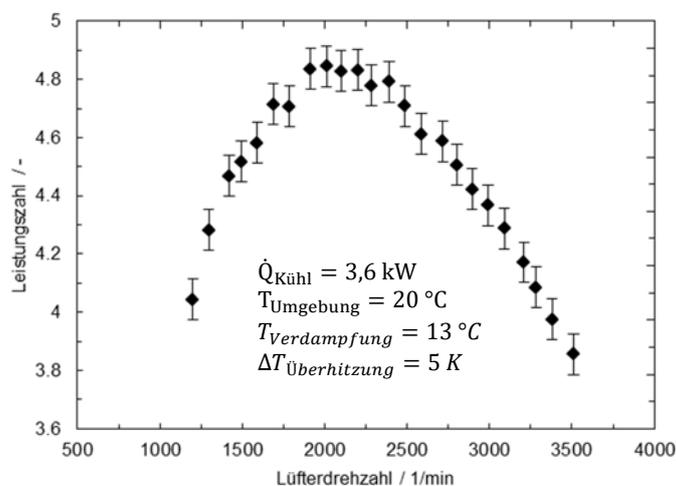


Abbildung1: Messergebnisse für die Leistungszahl bei verschiedenen Lüfterdrehzahlen

III.16

Energieeffiziente Abtauung einer mobilen Wärmepumpe

Jochen Westhäuser^{1*}, 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. Der Umgebungswärmeübertrager fungiert dabei als Verdampfer und nimmt Wärme aus der Umgebung auf. Befindet sich die Oberflächentemperatur des Verdampfers unterhalb des Gefrierpunkts von Wasser und unterschreitet die Außenluft beim Durchströmen des Wärmeübertragers ihren Taupunkt, desublimiert der in der Luft enthaltene Wasserdampf an der Oberfläche des Wärmeübertragers. Durch die Bereifung verringert sich die Wärmeübertragungsfähigkeit und der luftseitige Druckverlust des Wärmeübertragers erhöht sich. Dadurch kann die benötigte Heizleistung nicht mehr über die Wärmepumpe abgedeckt werden und der vereiste Umgebungswärmeübertrager muss abgetaut werden. Anschließend kann der Wärmepumpenbetrieb erneut beginnen.

Der Abtauprozess hat eine signifikante Auswirkung auf die Gesamteffizienz der Wärmepumpe. Während dieses Zeitraums steht nur sehr wenig Energie zur Beheizung der Fahrzeugkabine aus der Wärmepumpe zur Verfügung. Die zusätzlich benötigte Energie zum Heizen der Fahrzeugkabine während des Abtauvorgangs erfolgt durch den Einsatz eines elektrischen Zusatzheizers. Demzufolge sollte der Abtauvorgang in möglichst kurzer Zeit und unter geringen Energieaufwand verlaufen. Aus der stationären Wärmepumpentechnik sind bereits aktive Abtaumethoden bekannt. In dieser Arbeit werden diese Methoden vorgestellt und auf die Anwendung in der Fahrzeugtechnik diskutiert. Anhand experimenteller Untersuchungen werden unterschiedliche Prozessführungen auf ihre Energieeffizienz bewertet.

Stichwörter:

Vereisung, Reif, Wärmeübertrager, Pkw-Wärmepumpe, Abtauung

III.17

CO₂-Kälteanlage mit Eisspeicher und Photovoltaik

Betriebserfahrungen und Auswertung

Erik Wiedenmann^{1*}, Jonas Schönenberger¹

¹Friigo Consulting, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz
e.wiedenmann@friigoconsulting.ch

Im Herbst 2018 wurde in der französischen Schweiz eine neue Verkaufsstelle einer renommierten Supermarktkette eröffnet. Die Verkaufsstelle ist mit einer grosszügig dimensionierten Photovoltaikanlage ausgestattet um auch bei geringer Sonneneinstrahlung einen Grossteil des Energiebedarfs des Gebäudes zu decken. Während sonnenreichen Tagen steht daher mehr elektrische Energie aus der Photovoltaik zur Verfügung als im Gebäude benötigt wird. Um die Eigennutzung der elektrischen Energie aus der Photovoltaik in der Verkaufsstelle zu erhöhen, wurde zusätzlich ein thermischer Speicher in die vorhandene transkritische CO₂-Kälteanlage integriert. Bei einem Überschuss an elektrischer Energie wird zusätzlich der thermische Speicher durch die Kälteanlage gekühlt. Bei einem Defizit an elektrischer Leistung wird der thermische Speicher genutzt um das CO₂ in der Kälteanlage nach dem Gaskühler zu unterkühlen. Dadurch wird der elektrische Energieverbrauch in der Verkaufsstelle entsprechend der vorhandenen Photovoltaikleistung angepasst. Der Eigennutzen an elektrischer

Energie aus der Photovoltaik wird erhöht bzw. der Bezug aus dem öffentlichen Netz wird minimiert. Nachdem im November 2018, an der DKV Tagung in Aachen, das System und die Konzeptfindung vorgestellt wurden, sollen in dieser Arbeit die Auswertung und Erkenntnisse aus dem Betrieb vorgestellt werden.

Stichwörter:

Latentspeicher, Eisspeicher, Transkritische CO₂-Booster-Kälteanlage, Supermarkt Kälte

III.18

Auslegung und Optimierung von Ammoniak-Kälteanlagen mit Trockenexpansion zur Reduzierung der Kältemittelfüllmenge

B. Eng. Marcello Kukulenz¹, Dipl.-Ing. Tobias Heier², Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß^{1*}

¹Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach, Deutschland
marcello.kukulenz@hochschule-bc.de, floss@hochschule-bc.de

²KTI-Plersch Kältetechnik GmbH, Carl-Otto-Weg 14/2, 88481 Balzheim, Deutschland
heier@kti-plersch.com

Ammoniak-Kälteanlagen werden derzeit meist als überflutete Systeme gebaut und betrieben. Dies erfordert jedoch sehr große Kältemittelfüllmengen. Um die Gefahren für Gesundheit und Sicherheit im Havariefall zu minimieren kann die Kältemittelfüllmenge durch ein Trockenexpansionssystem reduziert werden. Die Schwierigkeiten, ein solches System mit dem Kältemittel Ammoniak zu realisieren, liegen bisher in der Überhitzungsregelung, der Ölrückführung und der Fluidverteilung in den Verdampfern. Dies kann zu Beschädigungen und einem ineffizienten Betrieb der Anlagen führen. Neue Verdampferkonstruktionen, mit Ammoniak mischbare Kältemaschinenöle sowie eine neue Sensorik ermöglichen es, heute Ammoniak-Trockenexpansionssysteme energieeffizient zu betreiben und eine hohe Anlagensicherheit zu gewährleisten.

Die hygroskopische Eigenschaft von Ammoniak und damit verbundene Wasserkontamination in Ammoniak-Kälteanlagen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Überhitzungsregelung und den Energiebedarf. Studien haben gezeigt, dass die meisten NH₃-Kälteanlagen einen Wassergehalt von 1 bis 3 Gew.-% aufweisen. Der durch den Wassergehalt erhöhte Siedebeginn und Temperaturgleit bei der Verdampfung (zeotropes Gemisch) führen dazu, dass die konventionelle Überhitzungsregelung diesen Anstieg als „falsches“ Überhitzungssignal interpretiert. Aufgrund dieser Fehlinterpretation muss die eingestellte Überhitzung erhöht werden, um einen sicheren Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Dies führt zu einer Reduzierung der Effizienz. Alternativ hierzu kann das Expansionsventil über einen Gasqualitätssensor geregelt werden.

Die Analyse einer projektierten Ammoniak-Kälteanlage ergab, dass der Trockenexpansionsbetrieb die Kältemittelfüllmenge um 77,5 % reduziert. Bei der Regelung des Expansionsventils über einen Gasqualitätssensor wird eine Leistungszahl erreicht, die die einer vergleichbaren, mit R134a betriebenen Anlage um 3,4 % übersteigt.

Der Trockenexpansionsbetrieb mit angepasster Regelung ist daher nicht nur zur Reduzierung der Kältemittelfüllmenge, sondern auch aus energetischer Sicht interessant.

Stichwörter:

Ammoniak, Trockenexpansion, Wasserkontamination

Noch effizientere Kühlung in Supermärkten mit Adsorption und CO₂

Matthias Hoene*, Ursula Wittstadt, Eliza Lubryka, Steffen Kühnert

Fahrenheit GmbH, Siegfriedstraße 19, 80803 München, Deutschland

matthias.hoene@fahrenheit.cool

Immer strengere Vorschriften für F-Gase ermutigen Handelsketten europaweit, natürliche Kältemittel für die Kühlung in Supermärkten einzusetzen. Dabei hat Kohlendioxid als nicht brennbares und ungiftiges Kältemittel in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen. Bereits in 12 % der europäischen Märkte mit einer Fläche von >400 m² wird Kälte mittels transkritischen CO₂-Kältekreisen bereitgestellt (14.000 Anlagen)^[1]. Transkritische CO₂-Systeme weisen jedoch gegenüber herkömmlichen Systemen mit synthetischen Kältemitteln einen niedrigeren Wirkungsgrad (Energy Efficiency Ratio, EER) auf. Eine deutliche Erhöhung des EER kann durch Wärmeabfuhr erreicht werden, wenn diese Abwärme zum Heizen oder für die Warmwasserbereitung genutzt wird. Allerdings fallen die größten Wärmemengen bei hohen Außentemperaturen an, wenn der Wärmebedarf niedrig ist. Eine erfolversprechende Lösung ist hier der Einsatz von Adsorptionskältemaschinen der Firma Fahrenheit, die mit hoher Effizienz aus der Abwärme des CO₂-Prozesses Kälte erzeugen können. In diesem Beitrag werden zwei Möglichkeiten der Einbindung des Adsorptionsprozesses in der Kälteerzeugung in Supermärkten vorgestellt.

Die erste Möglichkeit besteht darin, die aus der Abwärme erzeugte Kälte im Sommer direkt für die Klimatisierung des Supermarktes zu nutzen. Da 10 % des Stromverbrauchs in Supermärkten für die Klimatisierung und Lüftung aufgewendet werden^[2], kann hier eine wesentliche Einsparung erreicht werden. So können beispielsweise bei einer Nennkälteleistung von 250 kW aus einer CO₂-Kälteanlage 95 kW Wärme aus dem Gaskühler abgeführt und damit 50 kW Kaltwasser für die Klimatisierung produziert werden. Auf diese Weise kann der Stromverbrauch für Klimatisierungszwecke um die Hälfte reduziert werden.

Eine zweite Möglichkeit ist die direkte Integration der Adsorptionskühlung in den CO₂-Kreislauf. Diese Variante wird bereits in Supermärkten in Italien und in den Niederlanden getestet. Dabei wird die Adsorptionskälte verwendet, um gleichzeitig die Kälteleistung und die Effizienz des CO₂-Systems zu steigern. Hierbei wird das CO₂ vor dem Drosselventil am Austritt aus dem Gaskühler unterkühlt. So wird die Menge an Entspannungsgas (engl. flash gas) im Verdampfer reduziert, was mit einer Steigerung sowohl der Kälteleistung als auch der Effizienz des CO₂-Systems einhergeht. Diese direkte Integration kann mit einer relativ kleinen Adsorptionskältemaschine den durchschnittlichen jährlichen EER des CO₂-Systems je nach Auslegungsbedingungen um 10 bis 20 % erhöhen. Bei dieser Variante kann die Abwärme des CO₂-Systems das ganze Jahr über als Antriebsquelle für Adsorptionskältemaschinen verwendet werden, ohne dabei die für andere Zwecke verfügbare Wärmemenge zu beschränken.

Quellen:

^[1] Zolcer Skacanova K., Gkizelis A., World Guide to CO₂ Transcritical Refrigeration, sheccoBase Webinar 2018

^[2] Chini B., Fleischmann L., Energiemanagement im Einzelhandel 2017, Forschungsergebnisse zur Energieeffizienz im Einzelhandel, EHI Retail Institute

Effizienzsteigernde Maßnahmen für transkritische CO₂-Kälteanlagen

Vorstellung einer Laborkälteanlage

Christian Doerffel^{1*}, Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹

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

christian.doerffel@tu-dresden.de

Transkritische CO₂-Kälteanlagen finden in der gewerblichen Kälteversorgung zunehmend größere Verbreitung. Aufgrund der niedrigen Energieeffizienz des transkritischen Kreislaufs bei hohen Umgebungs- bzw. Rückkühl-

temperaturen werden unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz angeboten. Zu diesen Möglichkeiten zählen die Parallelverdichtung, Ejektoren oder Expansionsmaschinen zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit sowie externe Unterkühlungsaggregate.

Die jeweilige Effizienzsteigerung dieser Maßnahmen findet sich in zahlreichen Veröffentlichungen wieder, wobei die jeweilige Kälteanlage selbst ohne zusätzliche Maßnahmen meist den Referenzfall bildet. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften jeder Anlage ist daher die Vergleichbarkeit der Maßnahmen untereinander nicht gegeben.

An der TU Dresden wurde eine Versuchsanlage konzipiert und aufgebaut, die einen direkten Vergleich aller genannter Maßnahmen ermöglicht. Jede Kreislaufvariation ist einzeln zuschaltbar und – soweit möglich – auch mit anderen Maßnahmen kombinierbar. In diesem Beitrag werden die Versuchsanlage und erste theoretische Untersuchungen vorgestellt.

Stichwörter:

R744, Energieeffizienz, Parallelverdichtung, Expander, Ejektor, Unterkühlung

III.21

Experimentelle Untersuchung solar betriebener Impfstoffkühler im Feld

Ramona Nosbers^{*1}, Ivan Katic², Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹

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

ramona.nosbers@tu-dresden.de

christiane.thomas@tu-dresden.de

Ullrich.Hesse@tu-dresden.de

²DTI, Danish Technological Institute

ik@teknologisk.dk

Eine gesicherte Kältebereitstellung in Gebieten ohne Anbindung an das Stromnetz, insbesondere für lebenswichtige Impfstoffe und Medikamente, ist in vielen Entwicklungsländern eine große Herausforderung. Vor allem in subtropischen und tropischen Gebieten stellen außerdem die zumeist hohen Umgebungstemperaturen eine weitere Problemstellung dar.

„Solar Direct Drive“-Kühlschränke sind eine umweltfreundliche Möglichkeit, diese Herausforderung zu meistern. Diese Geräte verfügen anstelle einer Batterie über einen internen thermischen Speicher, um Zeiten minimaler bzw. keiner Sonneneinstrahlung zu überbrücken. Die Geräte unterliegen einem strengen Prüfprotokoll und Genehmigungsverfahren der Weltgesundheitsorganisation (WHO), welches jährlich überprüft und erneuert werden muss.

Es gibt jedoch nur wenige Daten zum tatsächlichen Systemverhalten im Feld.

Im Rahmen eines internationalen Kooperationsprojektes, wurden mehrere dieser Geräte verschiedener Hersteller in drei Ländern unterschiedlicher Klimazonen installiert und mit Monitoring-Systemen ausgestattet. Das Paper umfasst eine entsprechende Auswertung der Daten sowie den Vergleich des Systemverhaltens unter variierenden Randbedingungen.

Stichwörter:

Solare Kühlung, Solar Direct Drive, Natürliche Kältemittel

III.22

Bestimmung von Wärmeverlusten in Haushaltskältegeräten

Andreas Paul¹, Lukas Moczarski¹, Mirko Gieselmann¹, Michael Reineke¹, Andreas Elsner^{1*},
Elmar Baumhögger¹, Gerrit Sonnenrein¹, Jadran Vrabec²

¹Lehrstuhl für Thermodynamik und Energietechnik (ThEt), Universität Paderborn,
Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, Deutschland
elsner@thet.uni-paderborn.de

²Fachgebiet Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik, Technische Universität Berlin,
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin, Deutschland
vrabec@tu-berlin.de

Wie jedes technische System unterliegen auch Haushaltskältegeräte einer alterungsbedingten Degeneration, die zu einem Anstieg des Energieverbrauchs über die Lebensdauer dieser Geräte führt. Ursache hierfür sind verschiedene Effekte, die in dem vom BMWi geförderten Projekt ALGE untersucht werden. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen sollen dann degenerationsbeständigere Haushaltskältegeräte entwickelt werden. Eine wichtige Alterungsursache ist der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaums der Gehäuseisolierung. Zur Bestimmung dieses Einflusses auf den Energieverbrauch ist die Entwicklung neuer Messmethoden notwendig, die zerstörungsfrei sein und den realen Anwendungsbedingungen möglichst nahe kommen sollen. Dazu wurde eine Wärmesenke entwickelt, die den Geräteinnenraum unabhängig vom Kältekreislauf abkühlt. Die Wärmesenke ist als Eiswasserbehälter ausgeführt, sodass die Schmelzenthalpie des Eises die durch die Isolierung in den Geräteinnenraum einfallende Wärme aufnimmt. Durch die Bestimmung der Abtauzeit einer bestimmten Eismenge kann so der alterungsbeeinflusste $k \cdot A$ Wert des Gehäuses von Haushaltskältegeräten bestimmt werden.

Stichwörter:

Haushaltskältegeräte, Isolierung, PUR-Schaum, $k \cdot A$ Wert, Messmethoden

III.23

Untersuchung eines Wäschetrockners mit zeotropem Kältemittelgemisch

Franziska Clausner^{1*}, Ramona Nosbers¹, Christiane Thomas¹, Ullrich Hesse¹

¹Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
franziska.clausner@tu-dresden.de, ramona.nosbers@tu-dresden.de
Ullrich.Hesse@tu-dresden.de, christiane.thomas@tu-dresden.de

In wärmepumpenden Systemen werden fluorierten Kältemittel derzeit aufgrund ihres hohen Treibhauspotentials und steigenden Preises vielfach ersetzt. Für die Anwendung in Wärmepumpenwäschetrocknern werden Ansätze für den Austausch des derzeit am häufigsten genutzten Arbeitsfluides R134a entwickelt. Eine Möglichkeit, die sich bereits bei anderen Haushaltsgeräten etabliert hat, sind Kohlenwasserstoffe. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes werden diese als zeotrope Kältemittelgemische theoretisch und experimentell miteinander verglichen und bewertet. Ziel dieses Ansatzes ist das Ausnutzen des Temperaturgleits beim Phasenwechsel des Kältemittels zur Steigerung der Effizienz bei der Wärmeübertragung und damit der Leistungszahl der Gesamtanlage. Es wurde ein Gemisch ausgewählt und in einem für messtechnische Zwecke umgebauten handelsüblichen Wärmepumpenwäschetrockner experimentell untersucht. Zur Bewertung des neuen Gemisches wurden kreislaurelevante Parameter wie Druck, Temperatur, Massestrom und Verdichterleistung mit dem ursprünglich genutzten Kältemittel R134a verglichen.

Stichwörter:

Wärmepumpenwäschetrockner, Haushaltsgeräte, Natürliche Kältemittel, Zeotrope Kältemittelgemische

IV.01

Controller-in-the-loop: neue Wege für Heizung-Lüftung-Klima in der Gebäudetechnik?

Stefan Hauer^{1*}, Christian Köfinger¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Giefinggasse 4, 1210 Wien, Österreich
stefan.hauer@ait.ac.at

In einigen Industriebereichen ist Hardware-in-the-loop (HIL) bereits State-of-the-Art. Dieses Konzept wird unter anderem für Prüfstände genutzt, um die digitale und reale Welt mit einander zu verbinden und dessen jeweilige Vorteile zu nutzen. Dadurch können virtuelle physikalische Modelle von zum Beispiel Antriebsmotoren mit realer Steuerungselektronik getestet bzw. weiterentwickelt werden, ohne teure Prototypen oder Prüfstände bauen zu müssen. Dieser Ansatz kann auch für den Bereich Heizung-Lüftung-Klima (HLK)-Systemen angewendet werden. Mit Hilfe des Controller-in-the-loop (CIL) Ansatz ^{[1], [2]}, ist es möglich vor Inbetriebnahme einer HLK Komponente ihre Regelung auf korrekte Funktion bzw. Energieeffizienz zu prüfen, bevor die Komponente/Regler im vorgesehen Bauprojekt eingebaut wird. Dieses Paper gibt Einblicke aus dem Forschungsprojekt PEAR, mit denen es möglich ist, die Regelung einer Lüftungsanlage noch vor der eigentlichen Inbetriebnahme zu überprüfen. Des Weiteren wird anhand eines zweiten Use Cases gezeigt, dass sich diese Methode auch für andere HLK Komponenten, wie zum Beispiel einer Wärmepumpe, anwenden lässt. Hierbei kann einerseits die Regelung des Kältekreislaufes validiert werden andererseits auch die Implementierung in das Hydrauliksystem. Das Paper zeigt die prinzipielle Vorgehensweise und zeigt Ergebnisse aus der CIL-Überprüfung.

Stichwörter:

CIL, Funktionsüberprüfung, Wärmepumpe, Lüftungsanlage

Referenzen:

- ^[1] F. Judex, S. Hauer, und K. Eder, „Post am Rochus“ as case study for accelerated testing of building automation systems“, in *Zukunft der Gebäude, digital-dezentral-ökologisch*, Pinkafeld, 2017, S. 47–52.
- ^[2] F. Judex und S. Hauer, „Hardware-in-the-loop: eine Chance für die Gebäudeautomatisierung“, *TGA-Plan*, 2018, Nr. 2018, S. 6-7, 2018.

IV.02

Entwicklung einer Propan Wärmepumpe mit einer Kältemittelfüllmenge von 150g

Clemens Dankwerth^{1*}, Timo Methler¹, Simon Braungardt¹, Thore Oltersdorf¹, Lena Schnabel¹

¹Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Department Heating and Cooling Technologies,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de

Auf Grund der F-Gasverordnung besteht derzeit großer Bedarf Wärmepumpen zu entwickeln, die Kältemittel mit geringem Global Warming Potential (GWP) einsetzen. Die meisten der hierfür verfügbaren Kältemittel unterliegen im technischen Einsatz höheren Sicherheitsanforderungen und/oder sind aufgrund der kontinuierlichen Reduzierung der am Markt verfügbaren Mengen synthetischer Kältemittel immer teurer im Einkauf. Die Reduzierung der Kältemittelmenge und die Entwicklung einfacher, robuster Verfahren zur Absicherung sind daher aktuell wichtige Fragestellungen.

Für Propan ist die Verwendung einer Menge von 150g ohne erhöhte Sicherheitsauflagen möglich. Am Fraunhofer ISE wurde ein mit Propan befüllter Wärmepumpenkreis aufgebaut, mit dem die Leistungsgrenzen für eine Kältemittelfüllmenge von maximal 150g untersucht und bewertet werden. Dieser ist für eine Sole/Wasser-Wärmepumpenanwendung ausgelegt.

Die Reduktion der Kältemittelmenge wurde in der Auslegung mit verschiedenen Ansätzen erzielt. Das innere Volumen aller Komponenten wurde reduziert, um die Kältemittelfüllmenge insbesondere an den Stellen, an denen das Kältemittel in flüssiger Form vorliegt, zu minimieren. Dazu gehören beide Wärmeübertrager und die Flüssigleitung. Beide Wärmeübertrager wurden als asymmetrische Plattenwärmeübertrager mit einer langen thermischen Länge konzipiert und das innere Volumen der Flüssigleitung minimiert.

Ein weiterer starker Einflussfaktor auf die Kältemittelfüllmenge ist die Absorption des Kältemittels im Öl. Da sich ein Großteil des Öls im Verdichtersumpf befindet, wurde das Öl auf eine minimale notwendige Menge reduziert und die Komponenten so platziert beziehungsweise dimensioniert, dass es nicht zu Ölrückhalteeffekten kommen kann.

Im Wärmepumpenkreis wurden zwei verschiedene Verdichter untersucht. Zum einen ein Sauggas gekühlter Scroll-Verdichter und zum anderen ein Heißgas gekühlter Doppel-Rollkolben-Verdichter. Beide Verdichter sind über einen Frequenzumrichter Drehzahl geregelt.

Im Beitrag werden die erzielten Ergebnisse für unterschiedliche Leistungen und die beiden Verdichtervarianten vorgestellt und Bezug auf Betriebsgrenzen, praktische Anwendbarkeit und weitere Optimierungspotenziale hin diskutiert.

Schlagwörter:

Wärmepumpe, Propan, Füllmenge, F-Gase Verordnung,

IV.03

Augmented Reality Akustik von Luftwärmepumpen - APP-Entwicklung und Methoden

Gerwin Drexler-Schmid*, Christian Köfinger, Johann Emhofer, Christoph Reichl

AIT -Austrian Institute of Technoloy GmbH, Thermal Energy Systems Abteilung,
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich
gerwin.drexler-schmid@ait.ac.at

Lärm bedeutet Ärger. Er wird neben Verkehr und Gewerbe auch von Heiz- oder Kühlgeräten emittiert: Luftwärmepumpen, Rückkühlern und Lüftern. Generell hat die Lärmbelästigung in den letzten Jahren zugenommen. Bereits 40 % der Österreicher fühlen sich davon betroffen. Unter dem Gesichtspunkt des stetigen Ausbaus von erneuerbaren Energien für Wärme und des in Zukunft stark wachsenden Bedarfs an Klimageräten, werden vor allem Luft-Wärmepumpen als auch Klimaanlage im urbanen Gebiet stark zunehmen.

Um die Schallimmissionen auf die Bevölkerung im urbanen Gebiet zu minimieren, wurde eine Methoden entwickelt beziehungsweise kombiniert, die einen einfachen und intuitiven Zugang zu Schallemissionen und deren Minderung ermöglicht. Hierbei handelt es sich zum einen um die Verfahren der Schallmessung, als auch um Augmented Reality, welches eine Darstellung des Gerätes und die davon ausgehenden Schallemission virtuell jedoch in realer Umgebung ermöglicht.

In dieser Arbeit werden die verwendeten Methoden der Schallmessung gezeigt, mit welchen sich neben dem Schalleistungspegel bei unterschiedlichen Betriebszuständen auch richtungsabhängiges und frequenzabhängiges Schallemissionsverhalten eines Gerätes transient bestimmen lassen. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Entwicklung einer Applikation für Mobilgeräte, die das Endgerät mit richtungsabhängiger Schallausbreitung virtuell in realer Umgebung darstellt. Die Wärmepumpe, beziehungsweise deren Außeneinheit, kann dabei mittels Augmented Reality frei platziert und später auch einfach verschoben werden, um den akustisch optimalen Aufstellungsort und die optimale Ausrichtung zu finden. Die Schallemissionen und der Schalldruckpegel können schließlich an beliebiger Position vom Betrachter aus eruiert werden. Die Technik soll in Zukunft die Planung und Installation von Heiz- und Klimageräten in Hinblick auf Lärmbelastung erleichtern, die Akzeptanz für Wärmepumpen erhöhen und damit zu einem höheren Anteil an erneuerbarer Energie führen.

Die nächsten Entwicklungsschritte sind insbesondere die Implementierung von Absorptions- und Reflexionsverhalten durch Erkennen der Umgebung.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Luftwärmepumpe, Akustik, Schallausbreitung, Lärm, Augmented Reality

IV.04

Flexibilisierung der Wärmebereitstellung für RLT-Anlagen

Matthias Eydner^{1*}, Konstantinos Stergiaropoulos²

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

²Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
Tel: 0711/685-67656; Email: konstantinos.stergiaropoulos@igte.uni-stuttgart.de

Aufgrund des steigenden Anteils erneuerbarer Energien und der damit verbundenen fluktuierenden Stromspeisung ist von einem steigenden Bedarf an Flexibilität auf Seiten der Stromverbraucher auszugehen. Der Gebäudesektor stellt vor allem im Bereich der Lüftungs- und Klimatisierungstechnik einen wesentlichen Stromverbraucher dar, so dass hier prinzipiell Flexibilisierungspotenziale vorhanden sind. In Gebäuden lässt sich eine Flexibilisierung beispielsweise über die Toleranzbänder der raumklimatischen Sollwerte oder die Speicherfähigkeit der Gebäudemasse erreichen. Auch die Anlagensysteme können gezielt für eine Verschiebung von Lasten eingesetzt werden.

Vor diesem Hintergrund wird anhand thermisch-energetischer Simulationen (TRNSYS) untersucht, inwieweit die Wärmebereitstellung für ein RLT-Anlagensystem in einem Bürogebäude mittels einer Wärmepumpe in Kombination mit einem thermischen Speicher flexibilisiert werden kann. Der hierbei betrachtete Luft/Wasser-Wärmeübertrager des RLT-Anlagensystems soll den gesamten thermischen Energieaufwand des Gebäudes decken. Daneben kann bei großem Stromangebot auch die Solltemperatur im Raum erhöht und die Speicherfähigkeit der Gebäudemasse für eine Flexibilisierung genutzt werden.

Um in Zeiträumen mit geringem Stromangebot eine möglichst geringe Leistungsabnahme bzw. bei erhöhtem Stromangebot eine hohe Leistungsabnahme zu erzielen, wird ein Regelalgorithmus eingesetzt, welcher die Betriebsweise des Wärmepumpen- und des Wärmeübergabesystems an die jeweilige Netzauslastung anpasst. Dies wird mit den Netzbelastungen eines rein wärmegeführten Betriebs verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass mit einer Wärmepumpe und der entwickelten Regelungsstrategie die Leistungsabnahme aus dem Stromnetz ohne Sollwertunterschreitungen in den Räumen variiert werden kann und damit ein netzdienlicher Betrieb möglich ist. Das Flexibilisierungspotenzial wird sowohl für charakteristische Tage als auch ganzjährig ermittelt sowie der zusätzliche Energieaufwand der flexiblen Betriebsweise analysiert.

Stichwörter:

Flexibilität, Wärmepumpe, RLT-Anlage, Regelungsstrategie, thermisch-energetische Simulation (TRNSYS)

IV.05

Untersuchungen von Wärmepumpenschaltungen

**Simulationen von Kompressionswärmepumpen mit großem Temperaturhub
und variablen Quelltemperaturen**

Shengqing Xiao*, Dimitri Nefodov, Thorsten Urbaneck

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik,
Professur Technische Thermodynamik, 09107 Chemnitz, Deutschland
shengqing.xiao@mb.tu-chemnitz.de

In Deutschland wird ein großer Teil der Endenergie zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser eingesetzt. Um die „20-20-20-Ziele“ zu erreichen, stellen Wärmepumpen mit der Nutzung vom Strom und Wärme aus regenerativen Energiequellen eine gute Alternative dar.

Im Rahmen der Förderinitiative des BMBF und des BMWi mit dem Titel „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ startete im November 2017 das Projekt „Zwickauer Energiewende Demonstrieren“ (ZED). Im Projekt soll in Zwickau im Stadtteil Marienthal die Umgestaltung zu einem Null-Emissions-Quartier untersucht werden. Als optimale Nahwärmelösung bietet sich der Einsatz von Kompressionswärmepumpen in Kombination mit Solarthermie an.

Die vorliegende Arbeit behandelt die theoretischen Betrachtungen verschiedener Wärmepumpenschaltungen für den Einsatz in diesem Projekt. Ein großer Temperaturhub zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke sowie variable Quelltemperaturen seitens der Solarthermie haben große Auswirkung auf den Betrieb bzw. die Leistungszahl. Die Untersuchungen erfolgen durch die Modellierung und Simulationen mittels der Software EBSILON. Die optimalen Lösungen sind zurzeit eine zweistufige Verdichtung mit einem Open-Flash-Economizer und eine Reihenschaltung aus zwei einstufigen Wärmepumpen.

IV.06

Integration einer Hochtemperaturwärmepumpe zur Kopplung des Rückkühlkreislaufs von Absorptionskältemaschinen mit einem Nahwärmenetz

David Wackerbauer^{1*}, Florian Stinner¹, Peter Remmen¹, Martin Hopfer², Dirk Müller¹

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

²Bayernwerk Natur GmbH, Carl-von-Linde-Str. 38, 85716 Unterschleißheim, Deutschland
martin.hopfer@bayernwerk.de

Aktuell gewinnen Hochtemperaturwärmepumpen für Anwendungen im Nah- und Fernwärmenetzen an großer Bedeutung. In urbanen Gebieten sind Wärmequellen wie Geothermie jedoch oft nur begrenzt realisierbar. Für einen effizienten Betrieb der Wärmepumpe und zur Steigerung der Effizienz des lokalen Energiesystems ist es daher interessant alternative Wärmequellen zu erschließen. In der vorliegenden Untersuchung nutzt eine Wärmepumpe die Abwärme aus dem Rückkühlkreislauf von Absorptionskältemaschinen um in einem zweistufigen Prozess Temperaturen für die Einspeisung in das vorliegende Nahwärmenetz eines Quartiers zu erreichen. Das System wird mit Hilfe eines dynamischen Modells abgebildet und verschiedene Betriebszustände untersucht.

Die Hochtemperaturwärmepumpe soll in ein bestehendes Energiesystem integriert werden, welches bereits Blockheizkraftwerke, Gaskessel, Elektrodenkessel, Grundwasserwärmepumpen sowie Absorptionskältemaschinen umfasst. Durch die Hochtemperaturwärmepumpe wird eine weitere Möglichkeit zur Wärmebereitstellung geschaffen, welche die Flexibilität der Erzeugerseite erhöht und die Abwärme verringert. Das untersuchte Energiesystem des Quartiers versorgt neben Einzelhandel, Büros, Hotels und Gastronomie auch angrenzende Industrie. Daher sind sowohl für die Wärme- als auch Kältebedarfe hohe und über das Jahr nur wenig schwankende Bedarfsprofile anzunehmen.

Zur Bewertung der Maßnahme wurde in einer ersten Abschätzung eine statische Auslegung vorgenommen. Diese basiert auf Annahmen zum Wärme- und Kältebedarf im Quartier und erfolgte anhand von Jahresdauerlinien. Zur detaillierteren Bewertung der geplanten Konfiguration des Energiesystems mit Hochtemperaturwärmepumpe werden dynamische Simulationen mit allen thermischen Erzeugern durchgeführt. Anhand der Ergebnisse können verschiedene Betriebszustände, welche beispielsweise auch Modulations- und Teillastverhalten von Anlagen abbilden, dargestellt werden.

Die Integration der Hochtemperaturwärmepumpe bietet im vorliegenden Anwendungsfall eine innovative Möglichkeit der Effizienzsteigerung des Energieversorgungssystems durch die Wärmerückgewinnung aus dem

Rückkühlkreislauf der Absorptionskältemaschinen. Durch den objektorientierten Aufbau der Simulationen wird die Methodik auch für andere Energiesysteme anwendbar.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Abwärmenutzung, Sektorkopplung, Simulation

IV.07

Kostenoptimierte Speicherintegration für eine dekarbonisierte Industrie

Anton Beck^{1*}, Gerwin Drexler-Schmid¹, Sabrina Dusek¹

¹Austrian Institute of Technology, Thermal Energy Systems, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich
anton.beck@ait.ac.at

Aufgrund von schwankenden erneuerbaren Energiequellen, die in Zukunft in dekarbonisierten, strombetriebenen Energiesystemen eingesetzt werden, kann die aktive Teilnahme energieintensiver Industriezweige am Energiemarkt die Netzstabilität positiv beeinflussen. Durch die Teilnahme ergeben sich Potenziale für die Industrie, ihre Energiekosten zu senken, indem sie ihren Heizbedarf durch thermische Energiespeicherung zu Zeiten niedriger Strompreise verlagert decken. Neben der Teilnahme am Energiemarkt können thermische Speicher zudem dazu genutzt werden schwankenden Prozesswärmebedarf auszugleichen. Für Industrieunternehmen spielt bei Investmententscheidungen der Amortisationszeitraum für Speichertechnologie eine wesentliche Rolle.

Im vorliegenden Tagungsbeitrag werden Methoden präsentiert, mit deren Hilfe die kostenoptimale Speichertechnologie und deren Dimensionierung für den jeweiligen Anwendungsfall identifiziert werden kann. Neben Speichersystemen werden auch Wärmepumpen als nachhaltige Umwandlungseinheiten und die mögliche Kombination von Wärmepumpen und Wärmespeichern zur kostengünstigen Energieversorgung betrachtet. Die für die Lastverschiebung in Betracht kommenden Speichersysteme sind latente thermische Energiespeicher mit hohen Energiedichten und industrietauglichem Temperaturbereich und Dampfspeicher, die als bewährtes Konzept hohe Lade-/Entladeraten ermöglichen.

Die erarbeiteten Methoden werden anhand verschiedene Szenarien für Energiepreise (unterschiedlicher Ausbau regenerativer Erzeugungsanlagen) und Schwankungen des Wärmebedarfs (Batchbetrieb, nicht-kontinuierliche Produktion) demonstriert.

Stichwörter:

Dampfspeicher, Latentwärmespeicher, Hochtemperaturwärmepumpe, Optimierung, Energiemärkte

IV.08

Klimasystem mit Latentwärmespeicher zur verbesserten Netzkopplung

**Richard Schex^{1*}, Andreas Krönauer¹, Simon Pöllinger¹, Stefanie Tafelmeier¹, Stefan Hiebler¹,
Timo Korth², Christian Schweigler²**

¹Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., Bereich ES,
Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching, Deutschland
richard.schex@zae-bayern.de

²Hochschule München, Fakultät 05 Versorgungs- und Gebäudetechnik,
Lothstr. 34, 80335 München, Deutschland

Es wird die Entwicklung, Integration und wissenschaftliche Auswertung eines Latentwärmespeichers in ein netzgekoppeltes, PV unterstütztes VFR-Klimasystem (Variable Refrigerant Flow) im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts Solar Split (FKZ 0325900B) beschrieben. Ziel der Speicherintegration ist eine verbesserte Anpassung von Luft/Luft- basierten Heiz- und Kühlsystemen an die, durch den stetigen Anstieg erneuerbarer Energiequellen, zunehmend volatile Stromerzeugung.

Um den Speicher gut in den vorliegenden Kältekreislauf einzubinden, wurde ein direkt mit Kältemittel beaufschlagter Speicherwärmeübertrager umgesetzt. Es werden die Ergebnisse aus der zweijährigen Messkampagne an der Pilotinstallation in Bezug auf Systemeffizienz, solaren Deckungsanteils sowie der Reduktion von Last- und Bezugsspitzen der Kopplung Photovoltaik/VRF/Latentwärmespeicher gezeigt. Um den Nutzen des Speichers valide darstellen zu können, wurde das System in der Kühlperiode 2018 zunächst ohne thermischen Speicher betrieben, optimiert und energetisch bewertet. Die erhobenen Daten dienen als Grundlage für den Betrieb und Vergleich des Systems mit Speicher in der Kühlperiode 2019.

Die Ergebnisse liefern außerdem Anhaltspunkte für weitere Anwendungen von Speichern, die bspw. durch variable Stromtarife interessant sein können.

Stichwörter:

Latentwärmespeicher, kältemittelbeaufschlagter Speicherwärmeübertrager, VRF-Klimasystem (Variable Refrigerant Flow), Eigenverbrauch, Autarkie, Demand Side Management

IV.09

Künstliche Intelligenz für Kennzeichnungssysteme nach VDI 3814 in Bestandsanlagen

Florian Stinner^{1*}, Paul-Werner Neißer-Deiters¹, Marc Baranski¹, Alexander Kümpel¹, Dirk Müller¹

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

Gebäudeautomationssysteme (GA) liefern unzählige Daten über den Zustand der Kälte- und Wärmeversorgung eines Gebäudes. Diese Daten liegen jedoch häufig unstrukturiert und nicht automatisiert auswertbar vor. So verwenden Bauherren regelmäßig eigene Kennzeichnungssysteme von Datenpunkten. Dies erschwert die herstellerübergreifende Anwendung von automatisierten Regelungen.

Die neue VDI 3814 mit Blatt 4.1 versucht die starke Variation mit einem eigenen, übergreifenden Standard zu vereinheitlichen. Bei der Anwendung ist die Integration von Bestandssystemen eine besondere Herausforderung. Dies ist aktuell nur sehr personalintensiv und zu hohen Kosten möglich.

In diesem Paper wird ein Ansatz vorgestellt, der bestehende Kennzeichnungssysteme mit stark reduziertem Personalaufwand erkennen und in den vorgeschlagenen VDI 3814 Standard umwandeln kann. Die Basis des zweistufigen Ansatzes bildet Natural Language Processing (NLP).

Der Algorithmus wurde auf acht verschiedene Kennzeichnungssysteme angewendet. Er konnte anhand von zehn von unserem Algorithmus vorgeschlagenen und vom Menschen zugeordneten Datenpunkten die restlichen Datenpunkte der GA-Systeme mit einer Genauigkeit von bis zu 97 % korrekt zuordnen. Nach 100 zugeordneten Datenpunkten wurden in 7 von 8 Fällen eine Genauigkeit von mindestens 90 % erreicht.

Das verwendete Verfahren kann mit einer vorhandenen einfachen grafischen Oberfläche genutzt werden, um vorhandene Systeme mithilfe von künstlicher Intelligenz auf den VDI 3814 Standard zu bringen. Dies kann in Zukunft genutzt werden, um vorhandene GA Systeme der Kälte- und Wärmeversorgung zu harmonisieren mit aktuellen Standards.

Stichwörter:

Gebäudeautomationssystem, Kennzeichnungssystem, VDI 3814, Natural Language Processing, Metadaten

IV.10

Cloudbasierte Regelung einer RLT Anlage unter Verwendung von Funktechnologie

Alexander Kümpel^{1*}, Thomas Storek¹, Carlo Guarnieri¹, Markus Schumacher¹, Dirk Müller¹

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

Moderne Gebäudeenergiesysteme bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten, Aktoren und Sensoren, die miteinander verbunden und geregelt werden müssen. Die Verkabelung und Integration der Sensoren/Aktoren ist aufwändig und die Wartung bzw. Aktualisierung der lokalen Hard- und Software zur Steuerung kann kostspielig sein. Die 5G Mobilfunk-Technologie ermöglicht eine kabellose, direkte Internetanbindung, wodurch der Verkabelungsaufwand reduziert und die Nutzung von Cloud-Computing zur Regelung ermöglicht wird.

Im Rahmen des Projektes National 5G Energy Hub (N5GEH) werden die Möglichkeiten der Funktechnologie und von cloudbasierten Lösungen zur Regelung von Gebäudeenergiesystemen untersucht. Hierfür werden Internet of Things (IoT) Module entwickelt, welche das Testen verschiedener Funktechnologien wie WLAN, 4G und zukünftig 5G ermöglichen. Des Weiteren werden im Projekt Cloud-Services wie Regler und Analysetools entwickelt, die in eine im Projekt entwickelte Cloud-Plattform eingebunden werden. Die Basis für diese Plattform bildet die FIWARE-Toolbox.

In diesem Beitrag wird zur Demonstration des Frameworks das Heizregister einer raumlufttechnischen Anlage mit einem PID-Regler, der in einer Cloud-Umgebung ausgeführt wird, geregelt. Die Kommunikation mit der Anlage wird mithilfe der IoT Module realisiert, die über eine Mobilfunkschnittstelle verfügen. In einem Versuch wird gezeigt, dass die Anlage unter Verwendung der cloudbasierten Regelung geregelt werden kann, wobei eine im Vergleich zu einer lokalen Regelung vergleichbare Regelgüte erreicht werden kann.

Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Förderkennzeichen 03ET1561B.

Stichwörter:

IoT, 5G, Gebäudeautomation, Raumlufttechnische Anlagen

IV.11

Betriebsoptimale Auslegung von Wärmepumpensystemen

Christian Vering*, Laura Maier, Katharina Brinkmann, Hannah Krützfeldt, Markus Nürnberg, Dirk Müller

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

Wärmepumpen bieten die Möglichkeit durch eine Elektrifizierung der Wärmebereitstellung auf fossile Energiequellen im Gebäudesektor zu verzichten und dadurch die direkten Kohlenstoffdioxidemissionen zu senken. Damit vermehrt Wärmepumpensysteme im Gebäudebestand installiert werden, müssen aufgrund hoher Investitionen im Vergleich zu konventionellen Systemen Auslegungsverfahren verbessert werden, sodass diese Systeme wirtschaftlicher werden. Aktuelle Studien zeigen, dass zur Verbesserung der Auslegung die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und das Betriebsverhalten im Auslegungsprozess berücksichtigt werden sollten.

Am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen wird die Auslegungsverbesserung durch Simulationsstudien untersucht. Zudem werden mathematische Optimierung zur Dimensionierung der Systemkomponenten angewandt. Im Rahmen dieser Arbeit werden einerseits simulationsbasierte Ansätze unter Berücksichtigung der hydraulischen Verschaltung und der Betriebsdynamik zur Dimensionierung von Wärmepumpensystemen (Wärmepumpe, Heizstab, Warmwasser- und Trinkwarmwasserspeicher) untersucht.

Andererseits wird die Auslegung durch eine Optimierungsrechnung mittels MILP-Modell für mehrere Typtage durchgeführt.

Um einen Vergleich sämtlicher Auslegungsverfahren zu ermöglichen, werden für die nach Norm und nach Optimierung ausgelegten Systeme dynamische gebäudeenergetische Jahressimulationen zur Verifizierung durchgeführt. Die Analyse der Simulationsergebnisse ergibt, dass die hydraulische Struktur und die Betriebscharakteristik die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Systeme beeinflusst. Durch Anpassung der Auslegungsgrößen der betrachteten Komponenten können verschaltungsabhängig Betriebskosten bis zu 14 % im Vergleich zur Norm reduziert werden.

Durch die Optimierung wird die Wärmepumpe um bis zu 50 % kleiner und die Speicher bis zu sechsmal größer ausgelegt als bei normativer Auslegung. In Verifizierungssimulationen sind durch wesentlich geringere Investitionskosten die Gesamtkosten niedriger als bei einer Auslegung nach Norm. Die Betriebskosten sind durch eine vermehrte Nutzung des Heizstabs jedoch höher. Zur gleichzeitigen Ausschöpfung der Potentiale der Simulation und Optimierung ist daher eine Integration optimierungsbasierter Ansätze in die Simulationsumgebung notwendig.

IV.12

Anwendung von künstlicher Intelligenz zur Fehlererkennung in Gebäudemessdaten

Gerrit Bode*, Simon Thul, Marc Baranski, Dirk Müller

RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Mathieustraße 10, 52072 Aachen
gbode@eonerc.rwth-aachen.de

Mit der zunehmenden Verbreitung erneuerbarer Energien soll der Wärme- und Kältebedarf von Gebäuden zunehmend durch Wärmepumpen gedeckt werden. Störungen reduzieren jedoch die Energieeffizienz, was zu einem erhöhten Bedarf an Primärenergie führt.

Mit dem Aufkommen von künstlicher Intelligenz und großen Datenmengen sowie detaillierteren Überwachungssystemen sind datengetriebene Fehlererkennungsalgorithmen in den letzten Jahren zu einem Forschungsschwerpunkt geworden und zeigen vielversprechende Ergebnisse. In Studien werden jedoch oft spezifische Trainingsdatensätze verwendet, so dass die erprobten Fehlererkennungsalgorithmen häufig an das Versuchssystem angepasst sind.

In diesem Beitrag wird untersucht, ob Fehlererkennungsalgorithmen, die an einem mit einem bestimmten Wärmepumpensystem erfassten Fehlerdatensatz trainiert wurden, ohne aufwendige Modifikationen auf eine weitere Anlage mit unterschiedlichen Eigenschaften angewendet werden können.

Zu diesem Zweck wird ein vom National Institute of Standards and Technology (NIST) zur Verfügung gestellter Datensatz mit Daten für mehrere typische Wärmepumpenausfälle, die an einer speziell ausgestatteten Luft-Wasser-Wärmepumpe gemessen wurden, verwendet. Die Algorithmen werden trainiert, um Fehler im Trainingsdatensatz zu erkennen. Nach dem Training werden die angepassten Fehlererkennungsalgorithmen auf die Messdaten der zweiten Anlage übertragen und deren Leistungsfähigkeit ausgewertet.

Stichwörter:

Wärmepumpen, Fehlererkennung, Künstliche Intelligenz

IV.13

Automatisierte Foulingdetektion an Verdunstungskühlanlagen mit geschlossenem Kreislauf

**Björn Nienborg^{1*}, Thorsten Müller-Eping¹, Nicolas Rehault¹, 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. Gleichzeitig bilden sich als Folge von Verdunstung und Erwärmung im Sprühwasser gelöste Salze und eventuelle Schwebstoffe Ablagerungen an den Austauschflächen ab.

Nachdem im vergangenen Jahr Messergebnisse zum quantitativen Einfluss dieser Ablagerung auf die thermische Leistung der VKA vorgestellt wurden, wird nun am Beispiel von Betriebsdaten zweier Anlagen gezeigt, wie eine kontinuierliche Leistungsüberwachung zur automatischen Foulingdetektion genutzt werden kann. Dabei werden eine modellbasierte (white box) und qualitative (black box) Methode verglichen.

^[1] <http://www.heatexchanger-fouling.com/index.htm>, letzter Zugriff am 18. Apr. 2019

Stichwörter:

Fouling, Kühlturm, Verdunstungskühlanlage, Übertragungsleistung, Foulingwiderstand

Danksagung:

Die vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des Projekts WCS-energy mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert (FKZ01LY1618).

IV.14

Hybridwärmepumpen für den Mehrfamilienhaus-Bestand

Constanze Bongs^{1*}, Jeannette Wapler¹, Felix Ohr¹, Martin Kleinstück¹

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

Zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands spielt die Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudesektor eine zentrale Rolle. Insbesondere im Gebäudebestand liegen aufgrund niedriger Sanierungsraten und im Regelfall konventioneller Ersatzlösungen für bestehende Heiztechnik besondere Herausforderungen vor. Gegenstand des laufenden Projektvorhabens „LowEx-Bestand“ ^[1] ist es, für das Segment der Bestands-Mehrfamilienhäuser (MFH) Systemlösungen aufzuzeigen, die es ermöglichen, einen Beitrag zur Dekarbonisierung zu leisten. Im Schwerpunkt werden hier Wärmepumpensysteme untersucht. Im Bestand stellt sich dabei auch die Frage, inwiefern bestehende und neue Anlagentechnik kombinierbar ist. Aufgrund dessen, dass zum Einen zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser, zum Anderen bei weiterer Nutzung von Bestandsübergabesystemen höhere Temperaturen bereitgestellt werden müssen, erscheint eine Kombination aus Wärmepumpe als Grundlastwärmeerzeuger mit einem ggf. bestehenden konventionellen Wärmeerzeuger als sinnvoll. Zur Analyse und Vordimensionierung solcher hybriden Wärmepumpensysteme wurde ein auf der DKV2018 vorgestelltes Berechnungsverfahren erweitert. Im Beitrag werden Ergebnisse einer Variantenrechnung verschiedener Auslegungen von Hybridsystemen für den Einsatz in sanierten Bestands-MFH vorgestellt, mit

alternativen monovalenten Wärmepumpensystemen verglichen und darüber eine Systemeinsatzsystematik hergeleitet.

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

IV.15

Erdwärmepumpen für die energieeffiziente Gebäudesanierung

Michael Lauermann^{1*}, Johann Emhofer¹, Edith Haslinger¹, Karl Ochsner sen.²

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria
michael.lauermann@ait.ac.at; johann.emhofer@ait.ac.at; edith.haslinger@ait.ac.at

²Ochsner Wärmepumpen GmbH, Krackowizerstraße 4, 4020 Linz Austria
kontakt@ochsner.com

Der Gebäudesektor in Europa ist für 40 % des gesamten Energieverbrauchs verantwortlich und verursacht etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen. Fast die Hälfte der Gebäude ist vor dem Jahr 1992 mit Heizkesseln ausgestattet, die einen Wirkungsgrad von unter 60 % vorweisen. Obwohl die energetische Sanierung bestehender Gebäude dazu beitragen könnte, die Klima und die Energieziele der EU zu erreichen, liegt der Sanierungsgrad derzeit unter 1 %. Im Rahmen des H2020-Projekts GEOFIT werden an fünf Pilotstandorten in ganz Europa - ein historisches Gebäude (ITA), eine Schule (ESP), ein Hallenbad (IRL), ein Bürogebäude (FRA) und ein Einfamilienhaus (IRL) - einfach zu installierende und wirtschaftliche Erdwärmesysteme in Kombination mit Wärmepumpen zur energieeffizienten Gebäudesanierung implementiert und demonstriert.

Die Integration von Erdwärmesystemen für Heiz-/Kühlösungen in Zusammenspiel mit der Wärmepumpentechnologie ist speziell im Sanierungsfall eine große Herausforderung. Um für jeden einzelnen Pilotstandort die beste Lösung für die erhöhten Vorlauftemperaturen im Vergleich zu einem Neubau zu finden, werden verschiedene Wärmepumpenkonfigurationen vorab nach energetischen und wirtschaftlichen Kriterien bewertet und die ausgewählten Varianten schließlich in den vorgesehenen Pilotstandorten implementiert. Als Arbeits-medium wird ein Kältemittel mit niedrigem Treibhausgaspotential (engl. GWP), z. B. R1234ze(E) mit einem GWP kleiner als 10, verwendet. Eine günstige Kältekreisconfiguration für hohe Vorlauftemperaturen ist ein Zweikreisystem, das im Wesentlichen aus zwei Wärmepumpen mit unterschiedlichen Verflüssigungstemperaturen und gleichen Verdampfungstemperaturen besteht. Eine Alternative dazu ist eine einstufige Konfiguration mit einem deutlich größeren Kondensator zur verbesserten Unterkühlung. Beide Systeme sollen bei der Gebäudesanierung einen effizienten Betrieb ermöglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Demonstrationsprojekt GEOFIT sollen die Durchdringung erneuerbare Energiequelle in der Gebäudesanierung durch die Kombination von Geothermie mit Wärmepumpen erhöhen.

Stichwörter:

Geothermie, Gebäudesanierung, Erdwärmepumpen, Zweikreisiger Kältekreis, erhöhte Unterkühlung, Low GWP Kältemittel

IV.16

Gezielter Heizkörperaustausch in Wärmepumpen-Heizungsanlagen

Low-Ex-Ertüchtigung in Bestandsgebäuden

Manuel Lämmle*, Jeannette Wapler, Sebastian Herkel

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Abteilung Energieeffiziente Gebäude,
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland
manuel.laemmle@ise.fraunhofer.de

Die Anlagentechnik von Bestands-Mehrfamiliengebäuden stellt den Einsatz von Wärmepumpen vor Herausforderungen. Neben hohen Temperaturen für die Trinkwassererwärmung, reduzieren unnötig hoch eingestellte Heizkurven die Arbeitszahl. In Kombination mit einem hydraulischen Abgleich, stellt der gezielte Austausch einzelner Heizkörper eine wirksame Möglichkeit dar, die Heizungstechnik für Low-Ex-Technologien zu ertüchtigen, ohne die gesamte Anlagentechnik auszutauschen.

Im Rahmen der Modernisierung der Energieversorgung eines Quartiers im Karlsruher Stadtteil Durlach wurden für ein Gebäude die raumweise Heizlast und die installierte Heizkörperleistung analysiert. Die Heizkörper in den einzelnen Räumen sind recht unterschiedlich ausgelegt, sodass durch einen gezielten Austausch von einzelnen, knapp dimensionierten Heizkörpern, die Heizkurve deutlich gesenkt werden kann.

Um die Heizkurve von 70 °C/55 °C auf 60 °C/50 °C, bzw. 55 °C/45 °C abzusenken, reicht in diesem Gebäude ein Austausch von 8 %, bzw. 13 % aller Heizkörper aus. Jahressimulationen der erdreichgekoppelten Wärmepumpenanlage zeigen, dass dadurch die Jahresarbeitszahl für Heizung und Warmwasser von 3,0 auf 3,4 bzw. 3,5 steigt und der Endenergiebedarf entsprechend sinkt.

Mit einem relativ kleinen Investitions-Aufwand kann somit bereits ein großer Effekt hinsichtlich Energieeffizienz und damit CO₂-Einsparungen und Betriebskosten erzielt werden.

Stichwörter:

Wärmepumpenanlage, Jahressimulation, LowEx im Bestand

IV.17

Höchsttemperaturwärmepumpe HeatBooster im industriellen Einsatz

Dr. Tim Hamacher

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

Prozesswärme im Bereich zwischen 100°C und 200°C macht ca. ein viertel des gesamten Wärmebedarfs der Industrie aus. Aktuell wird dieser Temperaturbereich fast ausschließlich durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe abgedeckt. Die Höchsttemperaturwärmepumpe HeatBooster bietet nun erstmals die Möglichkeit diese Anwendungen auch sehr energieeffizient mit Hilfe der Wärmepumpentechnologie abzudecken. Aktuell ist der HeatBooster in der Lage Temperaturen von bis zu 165°C als Heißwasser oder Dampf zu erzeugen. Hierbei werden ausschließlich nicht brennbare, umweltfreundliche niedrig GWP Arbeitsmittel wie R1336mzz-Z eingesetzt.

Vorgestellt werden in diesem Beitrag verschiedene im Jahr 2018 und 2019 realisierte Anwendungen in der Industrie, wie z. B. der Einsatz zweier System zur Heißwasserversorgung bei der PET Flaschen Produktion oder die Prozessdampferzeugung bei 138°C in der Zuckerindustrie. Zusätzlich werden Ergebnisse aus dem Labor präsentiert.

Stichwörter:

Abwärmenutzung, Hochtemperatur Wärmepumpe, Industrie, HFO, Dampf

IV.18

Testergebnisse einer Rotation Heat Pump (RHP)

Andreas Längauer^{1*}, Bernhard Adler¹, Christian Rakusch¹

¹ ecop Technologies GmbH, Forschungs- und Entwicklungsabteilung, Perfektastraße 73, 1230 Wien, Austria
office@ecop.at

Kältemittel mit geringem Treibhauspotential (GWP) sind bereits seit längerem Gegenstand der Forschung und auch teilweise schon am Markt und in Wärmepumpen in Verwendung. Diese sind vor allem in der mittel- bis langfristigen Planung zu berücksichtigen und auch notwendig um das Klimaziel zu erreichen. Das in der Rotation Heat Pump (RHP) verwendete Arbeitsgas besteht durch seinen GWP-Wert von 0 und ist zudem nicht brennbar und nicht toxisch. Das Grundprinzip, der linksläufige Joule-Prozesse, auf dem die RHP basiert, wurde bereits mehrmals publiziert und theoretisch erläutert. Den Schlüsselfaktor bildet hier die, auf Zentrifugalkräften beruhende, Verdichtung des Arbeitsmittels in einem geschlossenen Rotor.

Nachdem nun mehrere Anlagen der RHP K7 gefertigt und getestet wurden, sind nun Messergebnisse verfügbar, welche dargestellt und erläutert werden. Anhand der Messdaten sind einerseits die Flexibilität des Prozesses und andererseits die durchlaufenen Temperaturen validiert und belegt. Im Detail werden Temperaturen von Quelle und Senke, Massenströme sowie thermische und elektrische Leistungen angeführt, welche schlussendlich die Berechnung des Coefficient of Performance (COP) erlauben. Es werden unterschiedliche Betriebspunkte dargestellt, welche mit Hilfe eines Prüfstandes simuliert wurden. Ergänzend wird auch auf den Aufbau des Teststandes eingegangen und die verwendete Sensorik angeführt.

Abschließend werden aktuelle Entwicklungen und zukünftige Anwendungsgebiete vorgestellt, die das bisher noch nicht genutzte Potential von (Ab-)Wärmequellen aufzeigen und mit einer Rotationswärmepumpe nutzbar sind.

Stichwörter:

Rotation Heat Pump, Rotationswärmepumpe, Testergebnisse, Flexibel, Hochtemperatur

IV.19

Dampferzeugung aus Abwärme mit Wärmepumpen

Veronika Wilk^{1*}, Franz Helminger¹, Sabrina Dusek¹, Michael Lauermann¹, Thomas Fleckl¹

¹AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien
veronika.wilk@ait.ac.at

Im Jahr 2015 wurden in Österreich 10.721 GWh Erdgas zur industriellen Dampferzeugung eingesetzt^[1]. Dampf dient als effizientes Medium zur Wärmeübertragung und als Reaktionsmittel. Je nach Branche entfallen bis zu 40 % des gesamten Wärmebedarfs auf Niederdruckdampf mit rund 3-5 bar (134-152°C)^[2]. Werden Wärmepumpen zur Dampferzeugung an Stelle von Erdgas eingesetzt, können signifikante Primärenergie- und CO₂-Emissionseinsparungen erzielt werden. Diese Wärmepumpen gewinnen für Industriebetriebe immer mehr an als Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele. Außerdem können mit Wärmepumpen Abwärmeströme, die bislang auf Grund des niedrigen Temperaturniveaus nicht genutzt werden können, effizient und sinnvoll in die betriebliche Wärmeversorgung integriert werden. In dieser Arbeit werden verschiedene Konfigurationen von dampferzeugenden Kompressionswärmepumpen mit geschlossenem Kältekreis in numerischen Simulationen miteinander verglichen und hinsichtlich der Effizienz, Komplexität und Energie- und Emissionseinsparung bewertet.

^[1] Statistik Austria, Nutzenergieanalyse Österreich 2015.

^[2] Nellissen, P., Wolf, S., Heat pumps in non-domestic applications in Europe – Potential for an energy revolution, 8th EHPA European Heat Pump Forum, 2015.

Stichwörter:

Industrielle Abwärmenutzung, Dampferzeugung, Hochtemperatur-Wärmepumpen

IV.20

Projektentwicklung einer kombinierten Bereitstellung von Kälte und Wärme mittels Hochtemperaturwärmepumpe in der Lebensmittelindustrie

Justus Franzen

COMBITHERM GmbH, Friedrichstraße 16, 70736 Fellbach
franzen@combitherm.de

Die Nutzung von Wärmepumpen zur Erzeugung industrieller Prozesswärme ist einer der Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende. Durch den fallenden Primärenergiefaktor von Strom trägt der Einsatz von Wärmepumpen dabei auch in künftigen Jahren zu einer Effizienzsteigerung in der energetischen Unternehmensbilanz bei. Die kombinierte Bereitstellung von Kälte und Wärme macht den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll.

Dieser Beitrag zeigt die Projektentwicklung zur Integration einer Hochtemperaturwärmepumpe in ein bestehendes Wärmenetz in der Lebensmittelindustrie. Mit der Wärmepumpe wird ein bestehender 100 m³ Prozessheißwasser-Pufferspeicher beladen. Da es sich bei dem Pufferspeicher um eine drucklose Ausführung handelt, ist die Vorlauftemperatur auf 95°C beschränkt. Seitens der Wärmepumpe sind Temperaturen bis 110°C möglich. Simultan kühlt die Maschine das Öl der vorhandenen Ammoniak-Kältemaschinen und senkt die Rücklauftemperaturen des bestehenden BHKWs ab, um dessen jährliche Betriebsstunden zu steigern. Die Hochtemperaturwärmepumpe leistet 350 kW und erreicht einen Heiz-COP von 6,0.

Vorgestellt werden sowohl die Herausforderungen bei der Entwicklung der Hochtemperaturwärmepumpe selbst (z. B. zulässige Sauggasttemperatur zur Motorkühlung, erreichte Druckgastemperaturen, Auswahl des Kältemittels) als auch die Herausforderungen bei der Integration der Maschine in das bestehende Wärmenetz des Kunden (z.B. Außenaufstellung, Auswahl der Wärmequelle).

IV.21

Entwicklung einer transkritischen R600-Hochtemperaturwärmepumpe

Manuel Verdnik^{1*}, René Rieberer¹, Alexander Baumhake²

¹Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25B, 8010 Graz, Österreich
manuel.verdnik@tugraz.at

²Frigopol Kälteanlagen GmbH, Gamser Straße 21, 8523 Frauental, Österreich
alexander.baumhake@frigopol.com

Durch die Realisierung eines transkritischen Wärmepumpenprozesses kann der Einsatzbereich der verwendeten Kältemittel über deren kritische Temperatur erweitert werden. Somit sind hohe Nutzttemperaturen mit natürlichen Kältemitteln, die sich durch einen niedrigen GWP-Wert auszeichnen und hinsichtlich in der Atmosphäre verbleibenden Abbauprodukten als unproblematisch erwiesen haben, möglich.

Ein Funktionsmuster zur Umsetzung der transkritischen Prozessführung mit dem Kältemittel R600 (n-Butan) zum Erreichen von Wärmesenkenaustrittstemperaturen über 150°C wurde entwickelt. Im Rahmen der Inbe-

triebnahme konnten das Funktionskonzept bestätigt und erste Aussagen zur Effizienz der Wärmepumpe getroffen werden.

Das unter Verwendung der TIL-Suite in Modelica erstellte Modell der Hochtemperaturwärmepumpe wird vorgestellt. Anhand dieses Simulationsmodells wird der Einfluss des Hochdruckes und der Sauggasüberhitzung auf die Heizleistung und die Effizienz der Wärmepumpe beurteilt. Insbesondere die Einflussgrößen auf das hinsichtlich Effizienz optimale Hochdruckniveau werden betrachtet und zeigen Potentiale zur Effizienzsteigerung durch Vergrößerung der Sauggasüberhitzung im internen Wärmeübertrager.

Stichwörter:

Transkritischer Prozess, n-Butan, Kompressionswärmepumpe

IV.22

Hochtemperatur Wärmepumpe mit Ejektor

Christian Schlemminger¹, Christian Kopp¹, Michael Bantle¹, Gerwin Draxler-Schmid²,
Michael Lauermann², Alexander Baumhake³

¹SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norwegen
Christian.Schlemminger@sintef.no

²AIT Austrian Institute of Technology GmbH 1210 Wien, Österreich

³Frigopol Kälteanlagen GmbH, A-8523 Frauental an der Laßnitz, Österreich

Thermische Prozesse in der Industrie arbeiten oft in einem Temperatur Bereich von 100 °C bis 130 °C. Gleichzeitig steht Prozessabwärme im Temperaturbereich von 50 °C bis 80 °C zur Verfügung, z. B. bei Trocknung, Sterilisation und Pasteurisation. Prozesswärme wird oftmals mit fossilen Energiequellen bereitgestellt. Die Nutzung einer Hochtemperatur Wärmepumpe ermöglicht die effiziente Nutzung der Prozessabwärme und hat damit hohes Marktpotential, gerade auch vor dem Hintergrund des Pariser Klimavertrags und der steigenden CO₂ Zertifikatpreise.

Im vorliegenden Fall wurde eine Butan Wärmepumpe entwickelt welche an der Wärmequelle Prozessabwärme in der Form Wasser auf eine Temperatur von 50 °C abkühlt und an der Wärmesenke Heißwasser bis 130 °C bereitstellt. Hierfür wurde bewusst das natürliche Kältemittel Butan eingesetzt, um zukünftige Beschränkungen und Herausforderungen mit synthetischen Kältemitteln vorzubeugen. Die Neuheit der Anlage ist ein Butanejektor, der die Leistungszahl der Anlage steigert. In dieser Arbeit wird der Ejektor im Detail betrachtet.

Basierend auf den genannten Anforderungen wurde eine 50 kW Demonstrationsanlage projektiert, gebaut und unter variierenden Betriebsbedingungen getestet. Es wurde ein modifizierter Kompressor eingesetzt, und beim zwei Fasenejektor handelt es sich um eine Prototyp.

In den durchgeführten Experimenten wurde die Leistungszahl der Wärmepumpe im Ejektorbetrieb mit 2,5 ermittelt, in welcher die wasserseitigen Wärmeverluste bereits mit berücksichtigt wurden. Der Einsatz des Ejektors führt zu einem Saugdruckanstieg um 0,8 bar auf 4,6 bar, was zu einer Reduktion den Kompressionsdruckverhältnisses von 6,5 auf 4,3 führt. Der optimale Ejektor Betriebspunkt war bei 130°C Wärmesenktemperatur mit einer Effizienz von 16 %, einer Druckerhöhung von 1.4 bar und einem Druckverhältnis von 1.4 und einen Massenstromverhältnis von 0.4. Der Vergleich der Ejektor Messungen und Modellierung zeigt hinreichend genaue Übereinstimmungen. Größere Abweichung sind meist instationären Betriebszuständen geschuldet.

Die entwickelte Wärmepumpenlösung kann auch dazu genutzt werden derzeit ungenutzte Wärmequellen effektiv zu erschließen, CO₂ Emissionen und Energie kosten zu reduzieren.

Entwicklung einer NH₃-H₂O Hybridwärmepumpen-Testanlage

Marcel Ahrens*, Armin Hafner, Trygve Eikevik

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,
Kolbjørn Hejes vei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen,
<mailto:marcel.u.ahrens@ntnu.no>

In diesem Beitrag werden Untersuchungen zur Entwicklung industrieller Hochtemperaturwärmepumpen, basierend auf der Analyse der aktuell verfügbaren Komponenten sowie bestehende Herausforderungen, durchgeführt. NH₃-H₂O Hybridwärmepumpen kombinieren die Technologien einer Absorptions- und Kompressionswärmepumpe mit einem Gemisch aus Ammoniak und Wasser als Kältemittel^[1]. Die Wärmeübertragung erfolgt bei gleitendem Temperaturlevel und das notwendige Kompressionsverhältnis ist im Vergleich niedriger als bei herkömmlichen Kompressionswärmepumpen. Diese Eigenschaften machen die Hybridwärmepumpe für den Einsatz in industriellen Hochtemperaturanwendungen interessant. Die Funktionalität dieses Verfahrens wurde bereits in der Industrie unter der Verwendung von Standardkomponenten aus der Kälte- und Wärmetechnik nachgewiesen^[2]. Im Rahmen dieser Arbeit werden bestehende Ansätze und Herausforderungen für die Entwicklung einer Hybridwärmepumpen-Testanlage untersucht. Die geplante Testanlage soll Austrittstemperaturen auf der Sekundärfluidseite von 140°C bis 180°C erreichen. Hierzu werden aktuell verfügbare Komponenten identifiziert und anhand definierter Prozessanforderungen bewertet. Eine Übersicht der identifizierten Komponenten und Herausforderungen sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die Prozessauslegung der Hybridwärmepumpen-Testanlage werden vorgestellt.

Stichwörter:

Hochtemperaturwärmepumpe, Hybridwärmepumpe, Ammoniak, Wasser

^[1] Jensen, J.K., Reinholdt, L., Markussen, W.B., & Elmegaard, B. (2014.). *Investigation of ammonia/water hybrid absorption/compression heat pumps for heat supply temperatures above 100 °C*. In Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC 2014) (Vol. 1, pp. 311-320). Center for Environmental Energy Engineering.

^[2] Nordtvedt, S.R., Horntvedt, B.R., Eikefjord, J., & Johansen, J. (2013). *Hybrid heat pump for waste heat recovery in Norwegian food industry*.

S.01

Inbetriebnahme des Cryogenic Phase Equilibria Test Stand CryoPHAEQTS

Philipp Blanck^{1*}, Jens Tamson¹, Steffen Grohmann^{1,2}

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

²KIT, Institut für Technische Physik (ITEP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
philipp.blanck@student.kit.edu

Die Entwicklung von Gemischkältekreisläufen beruht auf den physikalischen Eigenschaften der Gemische, welche für die meisten binären und vielen ternären Systeme nicht verfügbar sind.

Der Tieftemperatur-Phasengleichgewichts-Prüfstandes CryoPHAEQTS liefert hierzu präzise physikalische Stoffdaten für kryogene Stoffgemische bei Temperaturen von 15 K bis 300 K und Drücken bis zu 15 MPa. Es ist möglich, entzündbare (z. B. mit Wasserstoff) oder oxidierende Gemische (z. B. mit Sauerstoff) zu untersuchen. Verschiedene Phasengleichgewichtszustände wie Dampf-Flüssig, Dampf-Flüssig-Flüssig und Fest-Flüssig, können mittels einer direkte Probeentnahme von der Messzelle mit Hilfe einer Gaschromatographie analysiert werden. Zusätzlich verfügt die Messzelle über einen optischen Zugang, über welchen die koexistierenden Phasen identifiziert werden können.

Um CryoPHAEQTS in Betrieb zu nehmen, ist es erforderlich, den Teststand mit einer Referenz zu validieren. Hierzu wird zunächst Stickstoff gewählt, da die Dampfdruckkurve bereits einen großen Temperatur- und Druckbereich abdeckt. In Bezug auf Stoffdaten aus der Literatur werden die Messergebnisse beurteilt.

S.02

Ölgehaltsbestimmung in der sCO₂-Forschungsanlage SCARLETT

**Sergio Iván Cáceres Castro^{*1}, Konstantinos Theologou¹,
Rainer Mertz¹, Eckard Laurien¹, Jörg Starflinger¹**

¹Universität Stuttgart, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE), Pfaffenwaldring 31,
70569 Stuttgart, Germany
konstantinos.theologou@ike.uni-stuttgart.de

Am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE) der Universität Stuttgart steht die Versuchsanlage SCARLETT (Supercritical Carbondioxide Loop at IKE Stuttgart) zur Untersuchung von überkritischem CO₂ (sCO₂) zur Verfügung. Die Druckerhöhung und CO₂-Förderung erfolgt über einen Verdichter, der zur Schmierung POE-Öl verwendet, welches gut in CO₂ löslich ist und bei der Verdichtung teilweise aufgenommen wird. Das Öl soll über einen Hochleistungsölabscheider nach dem Verdichter aufgefangen und durch einen Ölkreislauf zurückgeführt werden. Trotz eines Abscheidegrads des Ölabscheiders von bis zu 99 % besteht dennoch die Möglichkeit, dass geringe Ölkonzentrationen im System erhalten bleiben.

Da selbst eine geringe Ölkonzentrationen die Wärmeübertragung des sCO₂ beeinflussen kann, wurde im Rahmen dieser Arbeit der Ölgehalt im strömenden sCO₂ in der SCARLETT-Anlage bestimmt. Dabei wurde der Ölgehalt zum einen mittels gravimetrischer Messung nach dem ANSI/ASHRAE Probeentnahmeverfahren und zum anderen mit einer Dichtemessung mithilfe eines Coriolis-Messgerätes bestimmt. Für die Ermittlung des Ölgehaltes bei überkritischen Drücken wurde zunächst die Methode der Probeentnahme verifiziert und als Referenzmethode festgelegt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der mit Hilfe der Dichtemessung bestimmte Ölgehalt unter Verwendung von vorhandenen Korrelationen im überkritischen Bereich mit den Ergebnissen aus der Probeentnahme nicht

übereinstimmen. Weiterhin wurde aus den Ergebnissen der gravimetrischen Messung festgestellt, dass die Ölkonzentration im CO₂ in der SCARLETT unter 0,1 % liegt und sie im untersuchten Bereich mit einem Messfehler von 0,01 % bestimmt werden kann. Somit ließ sich darauf schließen, dass der Einfluss des verbleibenden Ölgehaltes auf die Wärmeübertragung aufgrund der gering vorhandenen Ölkonzentration in der SCARLETT vernachlässigbar ist.

S.03

Regeneration von chromathaltigen Lithiumbromidlösungen aus Absorptionskälteanlagen

André Kind

HTW Dresden, Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie; Pillnitzer Platz 2; 01326 Dresden
Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
andre.kind@htw-dresden.de; steffen.feja@ilkdresden.de (Betreuer, Korrespondenz)

Chromate gelten als die besten Korrosionsinhibitoren für wässrige Systeme und wurden deshalb jahrzehntelang zu diesem Zweck genutzt. Nachteilig sind jedoch ihre vor Langem nachgewiesenen krebserzeugenden Eigenschaften. Durch Aufnahme einiger Chromate in die SVHC (substances of very high concern) Liste der REACH Verordnung der Europäischen Union wurde Lithiumchromat als langjährig genutzter Korrosionsinhibitor in Lithiumbromidlösungen in Absorptionskälteanlagen (AKA) durch andere Chemikalien ersetzt. Obwohl Lithiumchromat nicht direkt in die SVHC Liste aufgenommen wurde, ist jederzeit mit einem Verbot des Inverkehrbringens zu rechnen. Daraus ergibt sich, neben der Suche nach geeigneten Alternativen zur Korrosionsvermeidung, auch die Fragestellung nach dem Verbleib der gebrauchten, chromathaltigen Lithiumbromidlösungen. Diese werden nach aktuellem Stand der Technik bei Wartungen oder Rückbau von AKA entsorgt, d.h. sie werden in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt. Das wertvolle Strategiemetall Lithium geht mit der Entsorgung der Lithiumbromidlösung als Rohstoff verloren.

Am ILK Dresden wurden deshalb im Zuge dieser Arbeit Methoden entwickelt, Lithiumchromat aus den Lithiumbromidlösungen zu entfernen, so dass die aufgearbeiteten Lösungen wieder für den Einsatz in AKA zur Verfügung stehen. In der Präsentation werden verschiedene Wege der Aufarbeitung aufgezeigt, welche am ILK Dresden und bei externen Partnern getestet wurden. Beim zurzeit favorisierten Verfahren wird mit Hilfe eines geeigneten Reduktionsmittels das Chromat zu Chrom(III) reduziert und als Chrom(III)-hydroxid ausgefällt. Dieses kann anschließend durch Filtration von der Lösung abgetrennt werden.

Korrosionstests konnten zeigen, dass die so aufgearbeiteten Lösungen gleiche Eigenschaften aufweisen wie fabrikneue Lithiumbromidlösungen. Damit ist im Labormaßstab ein Recycling von chromathaltigen Lithiumbromidlösungen möglich. Es finden derzeit Versuche zum Upscaling mit einem Partner aus der Industrie statt.

Stichwörter:

Absorptionskälteanlage, Lithiumbromid, Lithiumchromat, Recycling

S.04

Einfluss von nicht-kondensierbaren Gasen auf den thermodynamischen Prozess im Absorptionswärmetransformator

Eine experimentelle Untersuchung mit Stickstoff

Dominik Metzner

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT 2
FG Maschinen- und Energieanlagentechnik, Marchstraße 18, 10587 Berlin

d.metzner@campus.tu-berlin.de

Der Einfluss von nicht-kondensierbaren Gasen auf den thermodynamischen Prozess in einem Absorptionswärmewärmetransformator (AHT), auch als Wärmepumpe 2. Art bezeichnet, wurde an der Technischen Universität Berlin am Fachgebiet für Maschinen- und Energieanlagentechnik untersucht. Diese Untersuchung entstand im Rahmen des Projekts „Indus3es“ der Europäischen Union. Das Ziel ist die Einsparung fossiler Brennstoffe.

Der AHT dient der Wärmeenergieerückgewinnung aus industriellen Prozessen, wie beispielsweise Raffinerien oder Kraftwerken. Der AHT ermöglicht es, das Temperaturniveau der Nutzwärme gegenüber dem der Wärmequelle mittels Absorptionstechnik signifikant zu steigern. Da die Anlage mit einer Wasser-Lithiumbromidlösung betrieben wird, findet der Prozess, aufgrund der durch die Temperaturen gegebenen Wasserdampfpartialdrücke, im luftleeren Raum statt. Nicht-kondensierbare Gase, wie beispielsweise Stickstoff, behindern den Prozess und lassen sowohl die Effizienz als auch die Nutzleistung des AHT sinken.

Für die Messungen wurde der Einfluss von nicht-kondensierbaren Gasen bei verschiedenen übertragenen Wärmeleistungen des Absorptionswärmewärmetransformators untersucht, wodurch der Effekt auf verschiedene Temperaturniveaus in den einzelnen Komponenten verdeutlicht werden soll. Weiter wurden unterschiedliche Mengen des nicht-kondensierbaren Gases sukzessive in die Anlage eingebracht, um so die Leistungskorrelation verdeutlichen zu können. Es wurden sowohl im Niederdruck- als auch im Hochdruckbehälter des AHT verschiedene Messreihen durchgeführt und miteinander verglichen.

Die Messergebnisse zeigen die unterschiedlichen Einflüsse des nicht-kondensierbaren Gases auf die Absorption und Kondensation im thermodynamischen Prozess und verdeutlichen zugleich die Relevanz der Dichtheit des Absorptionswärmewärmetransformators.

Stichwörter:

Absorption, Wärmewärmetransformator, nicht-kondensierbare Gase

S.05

Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs und Druckverlustes von R1270 bei der Strömungskondensation im horizontalen Rohr

Christos Tsitsiloudis, Simon Fries, Andrea Luke

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

In Großkälteanlagen und Industriekälteanlagen werden zumeist Rohrbündelwärmeübertrager eingesetzt. Für Kaskadenanlagen, in denen auf der Außenseite Verdampfung und auf der Innenseite Strömungskondensation vorliegt, fehlen validierte Daten bzw. Berechnungsmodelle für die Auslegung der Apparate. Demzufolge bestehen große Unsicherheiten hinsichtlich der Dimensionierung. Dies betrifft insbesondere Anwendungen mit Kohlenwasserstoffen oder neuartigen Kältemitteln in Rohren realer technischer Abmessungen. Daher werden in einer Technikumsanlage der Wärmeübergang und der Druckverlust zunächst in einem Einzelrohr eines solchen Rohrbündels gemessen.

In dem Beitrag werden die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen zum Wärmeübergang und Druckverlust bei der Strömungskondensation in einem horizontalen Stahlglattrohr vorgestellt. Als Versuchsstoff wird das natürliche Kältemittel R1270 eingesetzt, dessen Sättigungsdruck und Massenstromdichte sowie Dampfgehalt in einem großen Bereich variiert wird. Das Temperaturprofil wird hierbei hochaufgelöst gemessen. Die experimentellen Ergebnisse werden kritisch anhand empirischer Gleichungen und Daten aus der Literatur diskutiert.

Keywords:

R1270, Wärmeübergang, Druckverlust, Kondensation

S.06

Evaluation of AC and DC Powered Residential Split-System Heat Pump Performance using a DC Nanogrid

Fatih Meral, Eckhard Groll

Purdue University, Ray W. Herrick Laboratories, 177 S Russell St, West Lafayette, IN 47906, USA
fmeral@purdue.edu

Over the past 10 years, significant progress has been made in the field of distributed DC power in commercial buildings. Data centers and lighting systems, which are comprised primarily of DC components are now commonly designed using a distributed DC architecture. These DC distribution systems have been shown to have a number benefits over their AC counterparts including: increased system efficiency, simpler and more cost effective electrical systems, and the ability to better integrate with distributed energy generation systems, such as solar photovoltaics and battery storage. Modeling efforts to show the benefits of distributed DC power in residential buildings have indicated similar results, but the number of empirical studies is insufficient and often limited to low-power devices. The goal of the research presented in this paper is to demonstrate the application of a distributed DC power system to improve the efficiency of the largest DC load in a residential building; the HVAC system. Many modern heat pumps already employ compressors and fans that operate on DC power, and HVAC systems account for approximately 45% of the energy usage in U.S. homes – as a result, designing a heat pump to operate directly using DC power presents a significant potential for energy savings. This paper presents the results of laboratory testing a DC powered 4-ton air-source split-system heat pump fashioned to operate directly using 350 VDC power. The residential DC Nanogrid system is simulated in a psychrometric laboratory setting employing a 60 kW variable voltage DC power supply. Heat pump system efficiency and electrical characterization results are reported in this paper, along with an evaluation against a standard commercial AC unit installed in a residential home. Future research will involve the field testing of the heat pump in a home with a DC distribution system and integrated solar photovoltaics.

Keywords: DC Power, Direct Current, Nanogrid Heat Pump

S.07

Design Consideration of a Vapor Compression Refrigeration Systems for Spaceflight

Leon Brendel¹, James E. Braun¹, Eckhard A. Groll¹

¹Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University
West Lafayette, 47907-2099, USA
brendel@purdue.edu, jbrown@purdue.edu, groll@purdue.edu

Most spacecraft that are used for orbital research or long-term manned missions require refrigerated stowage. The vapor compression cycle would be an intuitive technology for its superior COP, but until today it has a very low technology readiness level. The main reason is that access to microgravity testing platforms is very difficult. As a result, it is unclear which sections of the vapor compression cycle would be affected by reduced gravity and with what severity. The very few flight experiments in the open literature do not reveal the needed information. This presentation first introduces four available microgravity testing platforms. Secondly, all possible effects of microgravity on the vapor compression cycle are presented and the critical ones are identified. The knowledge about the testing platforms and critical impacts of gravity are then merged to suggest research towards robust vapor compression refrigeration in space.

Keywords: vapor compression cycle, refrigeration, spacecraft, microgravity, microgravity testing

Betrachtungen zum Einsatz der Vakuum-Flüssigeistechnologie in Großwärmepumpen zur thermischen Nutzung von Gewässern in zukünftigen Wärmenetzen

Stephan Marx 1, Christoph Steffan2*, Mathias Safarik2, Holger Hahn1

¹ Fachhochschule Erfurt, Lehrstuhl für Gebäude- und Energietechnik,
Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt, Deutschland
h.hahn@fh-erfurt.de

² Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
christoph.steffan@ilkdresden.de

Die vorgestellte Arbeit betrachtet die theoretischen Einsatzmöglichkeiten der Vakuumflüssigeis-Technologie in Verbindung mit konventionellen Wärmepumpensystemen in modernen Wärmenetzen zur thermischen Nutzung von Gewässern. Mit der Vakuumflüssigeistechnologie kann Wasser als natürliches Kältemittel eingesetzt werden. Gleichzeitig können durch die Nutzung der hohen Schmelzenthalpie von Wasser und der Erzeugung eines Wasser-Eis-Gemisches selbst bei sehr niedrigen Gewässertemperaturen hohe spezifische Energiedichten erreicht werden. Zur Überprüfung und Bewertung der Einsatzmöglichkeiten werden auf der Basis eines Mustergebäudes zwei Quartiere mit innovativen Wärmenetzen konstruiert. Die Netze werden anhand ihrer Systemtemperaturen und der Anordnung der Wärmepumpen unterschieden. Somit wurden zwei unterschiedliche Quartiere betrachtet, deren Wärmeversorgung mit einer Kaskade aus R718 und einem konventionellen Wärmepumpensystem realisiert werden soll. Es konnte herausgearbeitet werden, dass sich sowohl das kalte System mit Vakuumflüssigeiserzeuger und dezentralen Wärmepumpen als auch das warme mit Flüssigeiserzeuger und zentraler Großwärmepumpe jeweils in Verbindung mit thermischer Gewässer-nutzung zur Wärmeversorgung von Quartieren eignet. Es konnte vor allem gezeigt werden, dass die Wärme-Kältekopplung im Mischquartier über besonders hohes Potenzial verfügt. Von der wirtschaftlichen Seite betrachtet stellt sich heraus, dass die Systeme durch die hohen Vollkosten-Wärmepreise unter den heutigen Rahmenbedingungen (Energiepreis, Technologiereifegrad) nur bedingt konkurrenzfähig sind. Allerdings zeigten sich bereits gute Ergebnisse im Vergleich zu anderen Wärmenetzen mit hohem Innovationsgrad.

Stichwörter:

Großwärmepumpen, Nah- / Fernwärme, Wärme-Kälte-Kopplung, Vakuum-Flüssigeis

Prozesstechnische Optimierung eines Kratzeiserzeugers zum erweiterten Einsatz in speichergestützten Kälteversorgungssystemen

Fabian Lau^{1,2}, Christoph Steffan^{2*}, Ernst Jahn³, Detlef Hansen³, Ulrich Hesse¹

¹ Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
Georg-Schumann-Bau, Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland
Ulrich.Hesse@tu-dresden.de

² Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
christoph.steffan@ilkdresden.de

³ Cooltech GmbH,
Raiffeisenstr. 8, 24986 Mittelangeln OT Satrup, Deutschland
info@cooltech-online.de

Die Anforderungen an zukünftige Kälteanlagen werden entgegen klassischer Auslegungsprinzipien durch die Minimierung von Primärkältemittelmengen sowie durch Adaption eines effizienten Lastmanagements geprägt sein. Als vielversprechender Lösungsansatz stellt Flüssigeis eine sichere, umweltfreundliche und effiziente Lösung zur thermischen Energiespeicherung dar. Im Rahmen der vorzustellenden Arbeit wurde die Flüssigeiserzeugung mittels Kratzverfahren hinsichtlich der Herstellungsparameter Volumenstrom und Rotordrehzahl untersucht. Dazu konnten die Einflüsse auf die Prozesssicherheit, den Wärmedurchgang sowie die Systemeffizienz ermittelt und bewertet werden. Weiterhin wurde die Charakterisierung von Flüssigeis hinsichtlich Größenverteilung und resultierender Druckverluste vorgenommen. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau zur visuellen Bewertung von Flüssigeisströmungen konzipiert, aufgebaut und in eine bestehende Versuchsfeld-Struktur integriert. Es konnte festgestellt werden, dass höhere Drehzahlen zur Bildung kleinerer Eiskristalle führen. Weiterhin wurde in Abhängigkeit der Herstellungsparameter und des Eisanteiles die jeweilige Grenze für stabile Betriebsbedingungen ermittelt. Ausgehend von einer energetischen Betrachtung konnte der optimale Betriebspunkt zur Speicherbeladung ermittelt werden.

Stichwörter:

Kratzeisverdampfer Kälteträger, Kältespeicherung, Phasenwechselstoffe, Flüssigeis, Eisbrei

S.10

Untersuchungen zu Peltier-Stromzuführungen für Anwendungen der Supraleitung

Kevin Raczka ^{1*}

¹Karlsruher Institut für Technologie, Student, Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, Deutschland
kevin.raczka@student.kit.edu

Eine der entscheidenden Technologien zur Lösung von Energieproblemen ist die Gleichstromübertragung mittels Supraleitung. Um den Effekt der Supraleitung zu erreichen, kommen tiefkühlende Flüssigkeiten zum Einsatz. Die Einspeisung des Stroms erfolgt über eine Stromzuführung. Zwischen der Umgebungstemperatur und der kryogenen Arbeitstemperatur entsteht über die Stromzuführung eine hohe Wärmelast, welche die tiefkühlende Flüssigkeit schneller verdampfen lässt. Zur Reduktion der Wärmelast im kryogenen Bereich können Peltier-Elemente in der Stromzuführung eingesetzt werden. Diese Halbleiterelemente können, wenn sie mit einem elektrischen Strom durchflossen und am warmen Ende mit Wasser gekühlt werden, eine Temperaturdifferenz von 50 K bis 100 K erzielen.

In dieser Arbeit wurden die Temperaturprofile einer Peltier-Stromzuführung, bestehend aus den Halbleiterelementen und einer Stromzuführung aus Kupfer, für verschiedene Stoffdaten erstellt. Zusätzlich wurde die erzielte Reduzierung der Wärmelast berechnet. Für die temperaturabhängigen Stoffdaten ergab sich eine Reduzierung von bis zu 27,82 %. Des Weiteren wurden mithilfe einer Parameterstudie die optimalen Geometrien einer Peltier-Stromzuführung für eine Stromstärke von 1 kA bestimmt, welche die kompakte Konstruktion eines experimentellen Versuchstandes gewährleisten.

Stichwörter:

Peltier-Element, Supraleitung, Stromzuführung, Wärmelast

RZ 01

Eröffnung und Einführung

Stand der Normung

Dr.-Ing. Bertold Mengede

ZWP Ingenieure-AG, München,

RZ.02

Energieeffiziente Klimasysteme für Rechenzentren

Mathias Köster

Weiss Klimatechnik GmbH, Geräte- und Anlagenbau, Greizer Straße 41-49, 35447 Reiskirchen, Germany

tina.lotz@weiss-technik.com

Unsere Welt wird von Tag zu Tag digitaler. Immer mehr IT-Technologie mit immer größerer Rechenleistung wird benötigt. Und die dafür notwendigen Rechenzentren verbrauchen inzwischen enorme Energiemengen (über 13 TWh allein in Deutschland).

Der wesentliche Anteil der elektrischen Serverleistung wird in Wärme umgewandelt, die abgeführt werden muss. Effiziente Kühlung ist deshalb nach wie vor ein zentrales Thema beim Betrieb jedes Rechenzentrums. Neben dem gestiegenen Umweltbewusstsein spielt dabei vor allem die Wirtschaftlichkeit eine große Rolle, denn der auf die Klimatisierung entfallende Kostenanteil beträgt bis zu 1/4 am Gesamtenergieverbrauch. Gerade in großen Rechenzentren summieren sich auf diese Weise hohe Energiekosten, die durch die geeignete Wahl der Klimatisierung nachhaltig reduziert werden können.

Der Vortag gibt einen Überblick über innovative Lösungen zur effizienten IT-Klimatisierung. Es wird aufgezeigt, wie die klassische raumbasierte Kühlung im IT-Raum weiterentwickelt wurde (Umluftklimageräte vs. CoolWall). Außerdem werden aktuelle Konzepte zur optimalen Nutzung der freien Kühlung vorgestellt.

RZ.03

Realisierung eines KWKK-Systems für Serverräume

Kombinierte Kälte- und Stromversorgung in der Praxis

Dipl.-Ing. Sören Paulußen

InvenSor GmbH, CEO, Nussbaumweg 7-9, 06886 Lutherstadt Wittenberg, Deutschland

karoline.mickan@invenSor.de

Adsorptionskältemaschinen erfreuen sich in Deutschland immer größerer Beliebtheit, da sie als Antriebsenergie die Abwärme von z.B. Blockheizkraftwerken nutzen. Strom wird zur Kälteerzeugung nicht benötigt. Gegenüber konventioneller Kälteerzeugung sparen die InvenSor Kältesysteme bis zu 70 % Strom ein und ermöglichen so eine deutliche Reduzierung der Energiekosten und CO₂-Emissionen. Als Kältemittel verwenden die Anlagen lediglich Wasser R718 und verzichten komplett auf umweltschädliche F-Gase, wodurch die F-Gase-Verordnung nicht greift. Sie sind für einen Leistungsbereich von 30 bis 300 kW Kälte geeignet.

Darüber hinaus bieten die thermisch angetriebenen Kältemaschinen eine außerordentlich hohe Ausfallsicherheit und sind durch die Wartungsfreiheit der Kälteerzeuger prädestiniert für den 24/7-Betrieb in Rechen-

zentren. Im Vortrag wird Herr Paulußen neben der Funktionsweise der Kältesysteme insbesondere die Kombination mit Blockheizkraftwerken am Beispiel eines realisierten Projekts bei einem unserer Kunden ausführlich darstellen. Das Unternehmen spart seit 2016 durch das installierte KWKK-System zur Kühlung des Serverraums jährlich 110.000 kWh Energie ein und reduziert zudem den eigenen CO₂-Ausstoß um 63 Tonnen/Jahr gegenüber herkömmlichen Kälteanlagen.

Stichwörter:

KWKK-System, Adsorptionskältemaschinen, InvenSor, Abwärmenutzung, Serverraumkühlung

RZ.04

Rechenzentren: Kreative Konzepte für die Abwärme (-nutzung)

Dr.-Ing Rainer M. Jakobs

DMJ-Consulting, Kreuzfeldstr. 10, 64747 Breuberg

Dr.Rainer.Jakobs@t-online.de

„Verwenden statt Verschenden“ heißt eine Strategie zur Reduzierung von Lebensmittelabfällen. Das Prinzip ist auch auf das Thema Abwärme sinnvoll zu übertragen. In Deutschland könnte mit der Abwärme aus den Kälte- und Klimaanlageanlagen fast 40 % der benötigten Raumwärme abgedeckt werden.

Der Vortrag zeigt grundsätzliche hybride Anwendungen, also die gleichzeitige Nutzung der kalten und warmen Seite einer Anlage auf, und erläutert die dazu gehörigen Fragestellungen. Anhand von bereits vorhandenen Anwendungen wird die bisherige Nutzung in verschiedenen Bereichen aufgezeigt.

Die Abwärme aus Rechenzentren fällt kontinuierlich an und wird schon für benachbarte Anwendungen genutzt. Das große Potential, der stark wachsende Markt, Förderprogramme zur Abwärmenutzung und neue interessante Geschäftsmodelle sind Gründe, sich mit den Herausforderungen und Möglichkeiten intensiv zu beschäftigen. Es gibt bereits sehr viele kreative Konzepte bei Rechenzentren, Wärmesenken und Wärmequellen zu nutzen und nachhaltig mit dem Umfeld zu vernetzen.

Es werden verschiedene Aspekte zu den Rechenzentren vorgestellt und kreative Projekte aufgezeigt. Dies soll Planer, Anlagenbauer und Betreiber anregen, immer alle Möglichkeiten zu prüfen, wie man die Abwärme einer sinnvollen Aufgabe zuführen oder in thermische Netzwerke einbinden könnte.

RZ.05

Klimatisierung am Scheideweg – Hyperscale vs. Enterprise

T. Wolf

Stulz GmbH, Hamburg

RZ.06

Rackintegrierte Adsorption – ein neues Paradigma für die Rechenzentrumskühlung

Matthias Hoene*, Charles Peurois, Steffen Kühnert

Fahrenheit GmbH, Siegfriedstraße 19, 80803 München, Deutschland

matthias.hoene@fahrenheit.cool

Hochleistungsrechner (HPCs) werden für zahlreiche rechenintensive Anwendungen verwendet. Hierfür müssen die Prozessoren und Netzteile aufgrund der steigenden Leistungsdichte (ca. 50 kW elektrisch pro Rack und stetig steigend) zunehmend mit Flüssigkeiten auf einem höheren Temperaturniveau (ca. 50°C) gekühlt werden. Andere Teile der Rechner und die Rechnerumgebung, die durch Konvektion und Strahlung von der Warmwasserseite aufgewärmt wird, werden mit Luft gekühlt. Diese Luftkühlung auf einem niedrigeren Temperaturniveau (unter 20°C) ist normalerweise mit einem hohen Stromverbrauch verbunden.

Ein Ansatz, um diesen Stromverbrauch erheblich zu reduzieren, ist Adsorptionskühlung. Diese hat sich bereits in der Praxis bewährt: So setzt z.B. das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) zwei Adsorptionskälteanlagen der Fahrenheit GmbH mit 50 kW bzw. 600 kW Kälteleistung ein. Diese Adsorptionsmaschinen nutzen die Abwärme der Rechner-CPU's statt Strom, um Kälte für die Luft zu erzeugen, und reduzieren dabei den Stromverbrauch um ca. 70%.

Diese Art der zentralisierten Kühlung stellt aber auch hohe Anforderungen an die Infrastruktur, ihre Installation und an die Projektplanung.

Eine Lösung, um die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile der Adsorptionskühlung beizubehalten und gleichzeitig die Planung und Installation zu vereinfachen, ist die Integration der Adsorptionskältemaschinen direkt in die Computer-Racks. Dies stellt hohe Anforderungen an die Leistungsdichte der Adsorptionsaggregate, denn der wertvolle Platz in den Racks soll möglichst viel Rechnerleistung behausen. Das Zeolith-Aufkristallisationsverfahren von Fahrenheit ermöglicht die Miniaturisierung der Adsorptionskühler und gleichzeitig hinreichend viel Kälteleistung bei der relativ niedrigen Antriebstemperatur der CPU's.

Durch diese Integration arbeiten das Rechnerrack und seine Kältemaschine als eine selbstständige Einheit, was die komplexen hydraulischen Verbindungen für die Warm- und Kaltseiten einspart. Lediglich eine Außenverbindung wird benötigt, um die Adsorptionsmaschine auf dem Außentemperaturniveau wieder abzukühlen (Rückkühlung). Der Projektaufwand und die Implementierungsrisiken werden damit reduziert. Die Wartung der Anlage sowie die spätere Erweiterung werden ebenfalls vereinfacht, da der Aufbau der Adsorptionsmaschinen und der Racks modular ist. Darüber hinaus ist mit dieser dezentralen Kühllösung eine inhärente Redundanz im System eingebaut.

Das erste Rack mit integrierter Adsorptionskühlung wurde 2019 entwickelt.

RZ.07

Effiziente RZ-Klimatisierung: 2 MW Klimatisierung mit Kreuzwärmeübertrager und adiabater Kühlung auf 3 Etagen

U. Terrahe

dc-cd RZ-Beratung GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main

RZ.08

Energieeffiziente Klimatisierung in Rechenzentren

Stephan Hülskamp (Key Account Manager Data Center Europa)

Menerga GmbH, Alexanderstraße 69, DE-45472 Mülheim an der Ruhr, Germany

stephan.huelskamp@menerga.com

Ziel war ein hocheffizientes Umluftkühlgerät für die RZ-Klimatisierung zu entwickeln welches unabhängig vom Außenluftzustand (auch bei AU-Feuchtkugeltemp. > Soll-Zulufttemp.) die geforderten Zulufttemperaturen einhalten kann, jedoch auf den Einsatz von Kältemitteln mit GWP>0 verzichtet und für den Betrieb der Zusatzkühlung kein bzw. ein minimaler Einsatz elektrischer Energie benötigt wird.

Das Umluftkühlgerät arbeitet mit indirekter freier Kühlung durch Außenluft. Durch Zuschaltung der direkten Befeuchtung der Außenluft im Plattenwärmeübertrager (indirekte Verdunstungskühlung) wird die Kühlleistung bei Bedarf erhöht. Zur Sicherstellung der geforderten Zulufttemperaturen auch bei sehr hohen Außenluftfeuchten sind im Gerät Adsorptionskältemodule zur Zuluftkühlung integriert.

Mit der kompletten Integration der Adsorptionsmodule zur Zusatzkühlung in ein Umluftkühlgerät mit Verdunstungskühlung werden diese zwei energieeffizienten Technologien erstmalig in einem Gerät kombiniert. Die ebenfalls im Umluftkühlgerät integrierte Rückkühlung der Adsorptionsmodule vereinfacht die Planung und erleichtert die Inbetriebnahme dieser nachhaltigen Klimatisierungslösung.

Mit dieser nachhaltigen Klimatisierungslösung wird dem Planer ein neuer Freiheitsgrad für die Planung "Grüner" RZ zur Verfügung gestellt. Neben dem Verzicht auf umweltgefährdende Arbeitsstoffe (F-Gase, Kältemaschinenöle) bietet die Nutzung von Wärme als Antriebsquelle der Zusatzkühlung die Möglichkeit neue Klimatisierungskonzepte unter Nutzung von Fern-/Nahwärme oder Abwärme zu projektieren.

Mit der Integration von thermisch angetriebenen Adsorptionsmodulen in ihre Umluftkühlgeräte mit Verdunstungskühlung wird dem Planer und Betreiber von Rechenzentren ein neuer Freiheitsgrad für die Planung "Grüner" Rechenzentren geboten. In der Kombination mit einem Luft-Luft-Gegenstromplattenwärmeübertrager für höchste Effizienz der indirekten Kühlung bei minimalen Druckverlusten werden minimale pPUE für die Klimatisierung erreicht. Der einfache und robuste Aufbau ist neben der Nachhaltigkeit ein weiterer wesentlicher Vorteil der zur Zusatzkühlung eingesetzten Adsorptionsmodule.

RZ.09

Fünf Jahre Erfahrung mit Wasser als Kältemittel zur Kühlung der Serverräume beim Deutschen Milchkontor

Jürgen Süß^{1*}, Joachim Hagenah²

¹ Dr.-Ing. Jürgen Süß Consulting, Herrengartenstr. 7, 88131 Bodolz
j.suess@live.de

² DMK Deutsches Milchkontor GmbH, Industriestraße 27, 27404 Zeven
joachim.hagenah@dmk.de

Seit Ende 2014 wird die Abwärme der Konzernserver der DMK Deutsches Milchkontor GmbH erfolgreich mit Wasser (R718) als Kältemittel über das gesamte Jahr an die Umgebung mit sehr hoher Energieeffizienz abgegeben. Dazu kommt seit Projektstart die eChillertechnologie der Efficient Energy GmbH zum Einsatz, bei der der Kompressionskälteprozess mit R718 die Abwärme der Serverrauminfrastruktur auf das jeweils erforderliche Temperaturniveau anhebt, um die Abwärmeabgabe über Trockenkühler stets zu gewährleisten.

In dem Beitrag wird das Gesamtprojekt detailliert vorgestellt. Dazu werden sowohl die Funktionsweise des eChillers aber auch der Gesamtinstallation erläutert. Weiterhin werden die aufgezeichneten Energieeffizienzwerte anhand gängiger Kennzahlen dargestellt und Anlagen nach dem Stand der Technik gegenübergestellt.

In letzten Teil des Vortrages wird noch auf die großen Anwendungspotentiale von R718 eingegangen und bisherige Anwendungen bewertet.

Stichwörter:

Wasser als Kältemittel, R718, Serverkühlung, Elektronik Kühlung, natürliche Kältemittel, Energieeffizienz

