

# Deutsche Kälte- und Klimatagung 2022

**Magdeburg**

**16. – 18. November 2022**

## Kurzfassungen

**Veranstalter:**

**Deutscher Kälte- und  
Klimatechnischer Verein e.V.**  
Theodorstraße 10  
30159 Hannover  
T. +49 (0) 511 897 0814  
F. +49 (0) 511 897 0815  
E. [info@dkv.org](mailto:info@dkv.org)  
H. [www.dkv.org](http://www.dkv.org)

**Maritim Hotel Magdeburg**

Otto-von-Guericke-Straße 87  
39104 Magdeburg  
T. +49 (0) 391 5949-0  
E. [meeting.mag@maritim.de](mailto:meeting.mag@maritim.de)  
H. [www.maritim.de](http://www.maritim.de)  
H. [www.maritim.com](http://www.maritim.com)

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Studierendenvorträge.....</b>	<b>3</b>
<b>Arbeitsabteilung I. ....</b>	<b>11</b>
Kryotechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.1 .....</b>	<b>24</b>
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.2 .....</b>	<b>39</b>
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung III .....</b>	<b>54</b>
Kälteanwendung	
<b>Arbeitsabteilung IV .....</b>	<b>70</b>
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	

## **Hinweis:**

\* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

**S.01**

## **Einfluss der Kryokonservierung auf koaxiale Alginat-Kapseln**

### **Integritätsuntersuchungen nach dem Auftauen**

**Yajarupika Kirupananthan<sup>1</sup>, Dr. Oleksandr Gryshkov<sup>1</sup>, Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Birgit Glasmacher, M.Sc.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover/Institut für Mehrphasenprozesse, 30823 Garbsen, Deutschland  
[sekretariat@imp.uni-hannover.de](mailto:sekretariat@imp.uni-hannover.de), [yajarupika.kirupananthan@stud.uni-hannover.de](mailto:yajarupika.kirupananthan@stud.uni-hannover.de)

Die Verkapselung von Multipotent-Stromal-Cells (MSCs) in dreidimensionalen Strukturen, welche eine Kern-Hüllen-Matrix (koaxial) aufweisen, stellen eine aussichtsvolle Alternative zur traditionellen Kryokonservierung dar. Sie schützt Zellen vor Schäden und ermöglicht die Aufrechterhaltung metabolischer Aktivitäten nach dem Auftauen.

In dieser Studie wurde die Integrität von zellfreien coaxialen Alginat-Kapseln nach der Kryokonservierung untersucht. Die coaxialen Alginat-Kapseln wurden mittels Electrosprayingverfahren hergestellt und einer definierten Kühlrate runtergekühlt. Optimierungsparameter waren: Inkubationszeit, Behälterart, Gefrierschutzlösung, Auftautemperatur und Auftaudauer. Zur anschließenden Bestimmung der Integrität erfolgte die Einteilung der Alginat-Kapseln in verschiedenen Schadenskategorien.

Es stellte sich heraus, dass die Verwendung der Behälterart starke Auswirkungen auf die Kapselintegrität hat. Zudem wurde beobachtet, dass sich die Anzahl der intakten Alginat-Kapseln mit zunehmender Inkubationszeit, Auftaudauer, Auftautemperatur und Verwendung von Saccharose erhöhten. Das beste Ergebnis wurde für die Parameterkombination mit der Auftautemperatur von 60 °C, -dauer von 60 s, Gefrierschutzlösung 10 Vol.-% DMSO + 0,3 M Saccharose und der Inkubationszeit von 90 min erzielt.

**Stichwörter:**

Alginat-Kapseln, Multipotent Stromal Cells, DMSO, Saccharose

**S.02**

## **Dampf-Flüssig-Gleichgewicht des Stickstoff-Argon-Systems**

### **Kryogene Phasengleichgewichtsmessung am CryoPHAEQTS-Prüfstand**

**Matthias Mair<sup>1\*</sup>, Jens Tamson<sup>1</sup>, Steffen Grohmann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik,  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[matthias.mair@student.kit.edu](mailto:matthias.mair@student.kit.edu)

Aktuelle technische Entwicklungen zur Anwendung von Hochtemperatursupraleitern oder zur Wasserstoffverflüssigung erfordern eine Kühlung im kryogenen Bereich. Dafür sollen in Zukunft effiziente kryogene Gemischkältekreisläufe zum Einsatz kommen. Für die wirtschaftliche Auslegung der Kreisläufe werden genaue Phasengleichgewichtsmessungen benötigt. Am Cryogenic Phase Equilibria Test Stand (CryoPHAEQTS) am KIT können Phasengleichgewichtsmessungen in einem Temperaturbereich von 15 K bis 300 K und bei Drücken bis 150 bar durchgeführt werden. Im Gegensatz zu anderen Anlagen aus der Literatur wird die Kühlung der Messzelle durch einen Pulsrohrküller realisiert, mit dem eine Temperaturstabilität von  $\pm 2$  mK erreicht wird. Die Funktion der Anlage wurde durch Vermessung eines binären Gemisches validiert. Dazu wurde das Dampf-Flüssig-Gleichgewicht (VLE) des Stickstoff-Argon-Systems bei 100 K untersucht. Die Temperaturmessung konnte durch eine Änderung der Sensoranordnung im Vergleich zu vorherigen Messungen deutlich verbessert werden. Im Vergleich mit Literatur und der Referenzzustandsgleichung liefert der Prüfstand nun genaue VLE-Daten. Die Unsicherheiten der Temperatur, des Drucks und der Zusammensetzung liegen bei  $\pm 13$  mK,  $\pm 1$  mbar und  $\pm 1$  %.

**Stichwörter:**

Stickstoff, Argon, Phasengleichgewicht, Stoffdaten

**S.03**

## **Heliumkryostat aus GFK für Magnetokardiographie mit Anbindung eines Kryokühlers**

**Maximilian Grabowski<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland  
[maximilian.grabowski@tu-dresden.de](mailto:maximilian.grabowski@tu-dresden.de)

Die Magnetokardiographie ermöglicht die Messung biomagnetischer Signale des menschlichen Herzens durch gekühlte SQUIDs und die frühzeitige Erkennung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Dafür werden magnetisch rauscharme Kryostate für Flüssighelium aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit einem Kryokühler kombiniert.

In diesem Beitrag wird die Funktion und der Aufbau des kippbaren Heliumkryostaten mit Fokus auf die Anbindung des Kryokühlers erklärt. Die damit einhergehenden Auswirkungen auf das Gesamtsystem werden vor allem hinsichtlich der Wärmeeinträge und der Heliumverflüssigungsrate diskutiert und der Einfluss der Neigung auf die Kühlleistung beschrieben.

**Stichwörter:**

GFK, Kryostat, Kryokühler, Magnetokardiographie

**S.04**

## **Vergleich verschiedener Simulationswerkzeuge am Beispiel einer füllmengenreduzierten Wärmepumpe mit dem Kältemittel Propan**

**Moritz BECKSCHULTE<sup>1\*</sup>, Torsten WILL<sup>1</sup>, Clemens DANKWERTH<sup>1</sup>, Timo METHLER<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Hannes FUGMANN<sup>1</sup>,  
Dr.-Ing. Katharina MORAWIETZ<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Lena SCHNABEL<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Abteilung Wärme- und Kältetechnik,  
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[moritz.beckschulte@ise.fraunhofer.de](mailto:moritz.beckschulte@ise.fraunhofer.de)

Mit Simulationen kann das Verhalten von Kältekreisen vorhergesagt werden, die dann nicht im Labor aufgebaut und vermessen werden müssen. So können Zeit und Kosten eingespart werden. Die Simulationssoftware Modelica mit der TIL-Suite und IMST-ART ermöglichen es, die Komponenten einer Kompressionswärmepumpe und den gesamten Kältekreis zu modellieren und zu analysieren. Nun soll beurteilt werden, inwiefern die beiden Tools zur Bewertung von Wärmepumpen mit geringen Füllmengen geeignet sind.

Dazu wird ein Baumuster einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit dem klimafreundlichen, natürlichen Kältemittel Propan (R290) ist in unterschiedlichen Betriebspunkten untersucht. Die Ergebnisse der analysierten Anlage werden mit den Ergebnissen der Simulationsmodelle aus Modelica und IMST-ART verglichen und gegenübergestellt. Für IMST-ART werden die vorgegebenen Komponenten parametrisiert, für das Modelica-Modell werden die Standardkomponenten Wärmeübertrager, Expansionsventil und Rohre aus der TIL-Suite verwendet, der Verdichter wird mit einem selbst erstellten Modell abgebildet, das anhand der AHRI-Koeffizienten die Effizienzen des Bauteils berechnet. Zudem wird im Modelica-Modell die Absorption des Kältemittels im Öl des Verdichters betrachtet. Der Fokus der Betrachtung liegt dabei auf der Modellierung der Füllmenge sowie

der Systemeffizienz des Kältekreises. Zusätzlich werden die komponentenspezifischen Modellierungen wie die Aufnahmefähigkeit und die Austrittstemperatur des Verdichters, die Sättigungstemperaturen in den Wärmetauscher übertragern oder Druckverluste in den Komponenten miteinander verglichen.

Für beide Simulationswerkzeuge werden Vor- und Nachteile des Modellierungsprozesses und die Genauigkeit der Simulation präsentiert. Das Verbesserungspotential der verwendeten Modelle wird sowohl auf Bauteilebene als auch im Hinblick auf den gesamten Kältekreis vorgestellt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Modellierung und Simulation, Modelica/Dymola, TIL Suite, IMST-ART, Kältemittel-Füllmenge, Propan

**S.05**

## **Agentenbasierte Simulationsmethoden zu Bedarfsprognosen im Kontext integrierter Energienetze**

**Vasco Wild**

Technische Universität Hamburg, Institut für Technische-Thermodynamik, Denickestr. 17, 21073 Hamburg  
[vasco.wild@tuhh.de](mailto:vasco.wild@tuhh.de)

Für das Projekt NRL und iNeP werden als Grundlage dringend zeitlich und räumlich aufgelöste Prognosen für die Entwicklung des Nutzwärmebedarfs benötigt. Um diese Entwicklung für verschiedene Szenarien simulieren und berechnen zu können, gibt es bisher jedoch keine Berechnungstools.

Daher wird in dieser Arbeit ein Prototyp eines solchen Berechnungstools entwickelt. Der Prototyp basiert dabei auf dem Prinzip der agentenbasierten Modellierung und wird so implementiert, dass eine einfache Anpassung und Ergänzung der Eingabeparameter möglich ist. Als Datengrundlage dienen hierzu unter anderem Geodaten der Stadt Hamburg, Bevölkerungsdaten und Daten des ZENSUS 2011. Diese werden miteinander kombiniert und in dem agentenbasierten Modell (ABM) verwendet. Zur Untersuchung der Funktionsfähigkeit des ABMs werden fünf unterschiedliche Simulationsläufe durchgeführt:

1. Untersuchen des Einflusses der Heizkosten
2. Untersuchen des Einflusses der Agentenattribute
3. Untersuchung zur Stabilität der Ergebnisse
4. Untersuchung der Reproduzierbarkeit
5. Nachstellen von Literaturprognosen

Mit Hilfe dieser Simulationsläufe konnte die Funktionsfähigkeit der Implementation nachgewiesen werden und bereits erste Prognosen und Erkenntnisse für den Raum Hamburg getroffen werden. Durch das Nachstellen von Literaturprognosen konnte für den Raum Hamburg die Entwicklung der Marktanteile der Heiztechnologien über die nächsten Jahrzehnte bis auf Stadtteilebene untersucht und prognostiziert werden. Mit dem realisierten Berechnungstool lassen sich jedoch auch Ergebnisse bis auf Straßen-, oder Häuserebene realisieren. Hierfür muss jedoch die ebenfalls untersuchte Stabilität der Ergebnisse bei geringer Agentenzahl beachtet werden.

**Stichwörter:**

Prognosen, Nutzwärmebedarf, agentenbasierte Modellierung, Hamburg, Berechnungstool

**S.06**

## **Einfluss einer horizontalen Rillenstruktur auf den Wärmeübergang beim Sieden von Methanol**

**R. Serr\*, M. Deeb, H. Margraf, A. Luke**

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel, Germany  
[ttk@uni-kassel.de](mailto:ttk@uni-kassel.de)

Der Übergang vom konvektiven Sieden zum Blasensieden ist für viele Bereiche von essentieller Bedeutung. Der Bereich des Blasensiedens ist im Falle vieler Energiewandlungsprozesse technisch von großem Interesse, da hohe Wärmeübergangskoeffizienten bei kleinen treibenden Temperaturdifferenzen erreicht werden. Im Falle von Wärmerohren und Fallfilmverdampfer sind jedoch die Blasenbildung zu vermeiden, da der Fluidtransport behindert wird oder es zu Ablagerungen kommt. Der Übergang zum Blasensieden ist durch die Bildung der ersten Dampfblasen gekennzeichnet. Aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge zwischen den Einflussparametern beim Sieden, wie Versuchsstoff, Druck, Wärmestromdichte, Wandmaterial und Wandrauheit, existiert bis heute keine eindeutige Berechnungsmethode zur Beschreibung des zweiphasigen Wärmeübergangs beim Sieden. Aus diesem Grund werden bisher die Apparate mithilfe von empirischen oder halbempirischen Korrelationen ausgelegt. Für den Übergang vom konvektiven Sieden zum Blasensieden, der durch Hystereseeffekte geprägt ist, sind aufgrund des metastabilen Zustands kaum Berechnungsgleichungen in der Literatur vorhanden.

Die experimentellen Untersuchungen zum Wärmeübergang beim Sieden werden mit dem Versuchsstoff Methanol an einer Heizfläche aus Kupfer, die mit axialen Rillen versehen ist, durchgeführt. Die Rillen entsprechen denen, die in Wärmerohren für den Fluidtransport zuständig sind. Vor der Versuchsdurchführung wird die Form und Rauheit bzw. die Makro- und Mikrostruktur der Heizfläche mithilfe einer optischen Oberflächenmessgerätes bestimmt und nach DIN EN ISO 4287 analysiert. Zusätzlich werden die Ergebnisse der durchgeführten Wärmeübergangsmessungen mit früheren Messungen an ähnlichen Heizflächen und mit Daten aus der Literatur verglichen. Abschließend werden die experimentellen Ergebnisse mit den nach den Korrelationen aus VDI-Wärmeatlas berechneten Daten für das Glattrohr bzw. Rippenrohr bewertet.

**Stichwörter:**

Wärmeübergang, Hystereseeffekte, Wärmerohr, Rillenstruktur; Sieden,

**S.07**

## **„Approximationen experimentell ermittelter thermodynamischer Daten von Kältemittel-Öl-Gemischen“**

### **Möglichkeiten und Grenzen**

**Eric Schmieder**

Student Bachelor Chemieingenieurwesen HTW Dresden, Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie;  
Pillnitzer Platz 2; 01326 Dresden

Praxisarbeit am Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[eric.schmieder@htw-dresden.de](mailto:eric.schmieder@htw-dresden.de)

Für den richtigen Betrieb von Kältemaschinen ist es wichtig, die Betriebszustände der Kältemaschinen zu verstehen. Hierfür werden mathematische Modelle für die thermodynamischen Größen der Arbeitsstoffe, zumeist Kältemittel, benötigt. Besser ist jedoch die Modellierung der thermodynamischen Größen der Kältemittel im Zusammenspiel mit weiteren Betriebsstoffen. Vorrangig zu nennen ist hierbei das Schmiermittel der Kompressoren, dem sogenannten Kältemaschinenöl.

Das Ziel der mathematischen Modellierung ist, wichtige Betriebsgrößen der Kältemaschine aus gut messbaren Zustandsgrößen, die sich in der Kältemaschine bildenden Kältemittel-Kältemaschinenöl-Gemische (kurz: KMÖG), zu erhalten. Diese gut messbaren Zustandsgrößen sind Druck und Temperatur, aber auch die Schallgeschwindigkeit. Aus ihnen lassen sich, zum Beispiel mittels des sogenannten Daniel-Plots, die Zusammensetzung des KMÖG am Betriebspunkt und die zugehörige Viskosität bestimmen. Weitere interessierende Größen sind Dichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Oberflächenspannung, um nur die Wichtigsten zu nennen. Anhand der Viskosität und der Oberflächenspannung lassen sich beispielsweise die Filmstabilität und das Abreißverhalten des Schmierfilmes im Kompressor bestimmen.

Das Ziel meiner Praxisarbeit war die Modellierung der Schaumentstehung bei den im Kompressor auftretenden Betriebszuständen, denn der Schaum beeinflusst nicht nur die Schmierung, sondern kann zu Totalausfällen der Kompressoren führen<sup>1</sup>. Zum Verständnis der Schaumbildung im Kompressor ist wiederum auch das Wissen um den Zusammenhang der thermodynamischen Größen von Nöten. Deshalb habe ich mich intensiv mit der Modellierung der Inter- und speziell der Extrapolation von Literatur- und selber gemessenen thermodynamischen Daten beschäftigt.

Im Vortrag gehe ich auf spezielle Probleme bei der Modellierung sogenannter Exzessgrößen, sowie Umkehrfunktionen und auf das Verhalten bei Randbedingungen ein.

**Stichwörter:**

Modellierung, thermodynamische Daten, Dampfdruck, Dichte, Konzentration, Viskosität, Kompressionskälteanlage, KMÖG

**S.08**

## Austreibereinheit für Diffusions-Absorptionskältemaschinen zur Steigerung der Heizleistung

**Helena Käppeler\*, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiopoulos**

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland

Die Diffusions-Absorptionskältemaschine (DAKM) wird ausschließlich durch Wärme angetrieben und stellt eine Möglichkeit zur klimaschonenden Kälteerzeugung dar. Für den Einsatz der DAKM im Gebäudebereich ist im Vergleich zu den aktuell eingesetzten DAKMs, eine Steigerung der Kälteleistung notwendig. Daran wird derzeit am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) geforscht.

Die DAKM wird durch eine Thermosiphonpumpe angetrieben, welche den Austreiber darstellt. In diesem Vortrag werden Untersuchungen an einer neuartigen Austreibereinheit vorgestellt, die als Naturumlaufplattenverdampfer gestaltet ist. Das Arbeitsmedium Ammoniak/Wasser wird innerhalb des Plattenwärmevertrager erhitzt, partiell verdampft und strömt anschließend in einem zweiphasigen Zustand durch ein senkrechtiges Rohr zu einem Abscheider auf. Die Leistung der Thermosiphonpumpe ist entscheidend für den Massenstrom des Kälte- bzw. des Lösungsmittels und damit auch für die maximale Kälteleistung der Kältemaschine. Zur Steigerung der Leistung der Austreibereinheit werden im Besonderen geometrische und konstruktive Änderungen an der Thermosiphonpumpe vorgenommen.

Das Förderverhalten der neuartigen Austreibereinheit wird an einem dafür entwickelten Prüfstand experimentell untersucht. Dabei wird neben dem Arbeitsmedium Wasser auch das in der DAKM verwendete Ammoniak/Wasser Gemisch betrachtet. Es wird eine Variation des Förderrohrdurchmessers durchgeführt und unterschiedliche Vorlage- und Systemdrücke untersucht. Die Funktionsweise der Austreibereinheit in Abhängigkeit der Parametervariationen, wird anhand der gemessenen Massenströme direkt ermittelt und bewertet. Für eine Aussage über die Strömungsverhältnisse innerhalb der Thermosiphonpumpe, werden die Ergebnisse mit einer Strömungsformkarte abgeglichen. Dabei wird auch die Aussagekraft der Strömungsformkarte für diesen Anwendungsfall untersucht.

<sup>1</sup> BACHMANN, S.: Schadensbildanalyse bei Verdichtern (Teil 1 bis 3), Die Kälte- und Klimatechnik (2017) 8, S. 24-26.; (2017) 9, S. 24-26; (2017) 10, S. 24-27.

Der verwendete Prüfstand sowie die erzielten Ergebnisse bezüglich der Funktionsweise der Austreibereinheit mit dem Arbeitsmedium Ammoniak/Wasser, werden im Rahmen des Vortrags vorgestellt. Darüber hinaus wird auf die Form der Zweiphasenströmung sowie weitere Optimierungspotenziale eingegangen.

**Stichwörter:**

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Thermosiphonpumpe, Naturumlaufplattenverdampfer, Zweiphasenströmung, Strömungsformkarte, Ammoniak/Wasser Gemisch

**S.09**

## **„Identifikation von Korrosionsinhibitoren für Ammoniak-Absorptionsanlagen“**

**Fabian Lange**

Student Bachelor Chemieingenieurwesen HTW Dresden,  
Fakultät Landbau/Umwelt/Chemie; Pillnitzer Platz 2; 01326 Dresden  
Praxisarbeit am Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[fabian.lange@stud.htw-dresden.de](mailto:fabian.lange@stud.htw-dresden.de)

Absorptionskälte ist eine umweltfreundliche Technologie, welche ungenutzte große Wärmemengen in nutzbare Kälte umwandeln kann. Für den sicheren Betrieb von Absorptionskälteanlagen (kurz: AKA) sind Korrosionsinhibitoren notwendig. Diese verhindern die Korrosion der verwendeten Konstruktionswerkstoffe, zumeist preiswerte Baustähle, welche durch die verwendeten Arbeitsstoffe, hier Wasser und Ammoniak, begünstigt wird. Als Inhibitoren kamen dabei viele Jahre Chromat-Verbindungen zum Einsatz. Diese sind jedoch krebsfördernd und dürfen aktuell nur noch mit Ausnahmegenehmigungen in Europa in Verkehr gebracht werden. Seit mehreren Jahrzehnten ist es deshalb das Ziel, einen Ersatz für Chromat zu identifizieren, der ähnlich gute oder bessere Inhibierungseigenschaften aufweist. Dies ist für das Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid bereits gelungen.

Für das Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser gibt es noch keine Alternative und eine systematische Suche wurde seitens der Hersteller, der Betreiber und der Wissenschaft mit viel Aufwand betrieben und blieb in den letzten Jahrzehnten ohne Ergebnis. Deshalb wurde ein alternativer Ansatz zur Identifikationen von potentiellen Korrosionsinhibitoren gewählt.

Zunächst wurden aus der Unmenge bekannter chemischer Verbindungen mit Hilfe der Literatur Korrosionsinhibitoren für Metalle zusammengetragen, mittels einer Zufallsauswahl auf eine überschaubare Anzahl zusammengefasst und anschließend unter Beachtung von Umwelt-, Gesundheits- und Wirtschaftsaspekten auf den möglichen Einsatz als Korrosionsinhibitor geprüft. Die verbleibenden Substanzen wurden wiederum mittels einer Versuchsmatrix in Anzahl und Konzentration zufällig miteinander kombiniert. Um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, eine geeignete Inhibitorenkombination zu identifizieren, müssen jedoch immer noch viele Versuche durchgeführt werden. Dafür kommen, beispielsweise aufgrund der kurzen Versuchsdauer, elektrochemische Methoden infrage.

Das Ziel meiner Arbeit war geeignete elektrochemische Messmethoden zur Untersuchung von Korrosionserscheinungen in wässrigen Ammoniaklösungen zu identifizieren. Mit diesen sollten Korrosionsgrößen der verschiedenen Inhibitorkombinationen gemessen werden und nach Möglichkeit potentielle Kandidaten ermittelt werden, welche Chromat in Ammoniak-Absorptionsanlagen ersetzen können.

Im Vortrag gehe ich auf die Wirkungsweise von Korrosionsinhibitoren, die angewandten elektrochemischen Methoden und die Reduktion der unendlich möglichen zu testenden Kombinationen per Zufallsmatrix ein. Des weiteren stelle ich die Ergebnisse der ersten Tests vor und geben einen Ausblick auf in Zukunft durchzuführende Versuche .

**Stichwörter:**

Absorptionskälteanlage, Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser, Korrosionsinhibitor, Versuchsmatrix, elektrochemische Messmethoden

S.10

## Energetischer Vergleich von indirekten Kälteanlagen mit R290 und direkten Kälteanlagen mit R744

Valentin Falk

Hochschule Ruhr West, Duisburger Straße 100, 45479 Mülheim an der Ruhr

[Valentin.falk@stud.hs-ruhrwest.de](mailto:Valentin.falk@stud.hs-ruhrwest.de)

Im Fokus des Umweltschutzes steht derzeit die Reduzierung der Erderwärmung und damit die Reduzierung klimagefährdender Stoffe (Treibhausgase). Dies kann über zwei Wege erfolgen. Zum einen führt der Einsatz alternativer umweltschonender Stoffe zu einer direkten Reduktion der Treibhausgase und zum anderen können Anlagen oder Prozesse optimiert und somit energieeffizienter und ressourcenschonender betrieben werden, wodurch der Ausstoß klimagefährdender Stoffe indirekt reduziert wird. In der Kältebranche werden derzeit herkömmliche Kältemittel durch umweltschonende ersetzt. Bereits der Vergleich von Stoffdaten dieser Kältemittel zeigt allerdings, dass diese sich aus energetischer Sicht für verschiedene Anwendungsfälle unterschiedlich gut eignen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Anwendung entwickelt, die einen Vergleich der umweltschonenden Kältemittel R744 und R290 in einer direkten und indirekten Kälteanlage für unterschiedliche Anwendungsfälle und somit unterschiedliche Temperaturbereiche auf Basis von theoretischen und realen Anlagendaten ermöglicht. Die Ergebnisse werden in Form einer Weboberfläche zur Verfügung gestellt. Es zeigt sich, dass keine pauschale Aussage getroffen werden kann, wann welches Kältemittel verwendet sollte und die Vergleichsergebnisse stark von den realen Bauteilen und deren Einsatzgrenzen abhängen. Daher sollen zukünftig weitere Bauteile in die Betrachtung mit einbezogen werden, um differenziertere Aussagen zu ermöglichen.

S.11

## Industrielle Hochtemperatur-Wärmepumpe mit natürlichen Kältemitteln

### Betriebsanalyse und Konzeptverbesserung

Hannes Trumpf<sup>1\*</sup>, Christian Schlemminger<sup>2</sup>, Riley B. Barta<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
01062 Dresden, Deutschland  
[hannes.trumpf@tu-dresden.de](mailto:hannes.trumpf@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, Sem Sælands vei 11, 7465 Trondheim, Norwegen  
[Christian.Schlemminger@sintef.no](mailto:Christian.Schlemminger@sintef.no)

<sup>3</sup> Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,  
Kolbjørn Hejes vei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen  
[Armin.hafner@ntnu.no](mailto:Armin.hafner@ntnu.no)

Wärmepumpen können einen signifikanten Beitrag zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Steigerung der Effizienz von industriellen Prozessen leisten. Insbesondere Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) können hier Erwärmungsprozesse ersetzen, welche bisher auf Grundlage von fossilen Energieträgern beruhten haben. Durch das Vorhandensein von Abwärme, oder dem gleichzeitigen Bedarf an Kühlprozessen in z. B. der Nahrungsmittelindustrie eignen sich Wärmepumpen hervorragend um bisher ungenutzte Potentiale zu nutzen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Diplomarbeit mit einer industriellen HTWP in dem Molkereibetrieb Tine TM, dessen Hauptaufgabe darin besteht Heißwasser mit einer Temperatur von 115 °C bereit zu stellen, aber auch zur gleichzeitigen Eiswassererzeugung genutzt werden kann. Bei der Wärmepumpe handelt es sich um eine industrielle Pilot Anlage, welche als Kaskade ausgeführt ist. Diese wird in der unteren

## Studierendenenvorträge

Stufe mit dem natürlichen Kältemittel Propan und in der oberen Stufe mit dem Kältemittel Butan betrieben. In einem ersten Schritt gibt diese Arbeit einen Überblick über die aktuellen technischen Hintergründe der Hoch Temperatur Wärmepumpen Technologie, sodass anschließend das Hauptaugenmerk auf eine ausführliche Auswertung der bestehenden Anlage gelegt werden kann, um anhand der gewonnenen Kenntnisse ein Simulationsmodell zu entwerfen, was es ermöglicht die HTWP weitergehend zu untersuchen. Diese Untersuchungen haben einige Verbesserungsvorschläge hervorgebracht, die sich auf die Füllmenge und die allgemeine Performance der Anlage beziehen.

## I.01

# EcoVap: Energieeinsparung beim Einsatz von Industriegasen

(Nutzung der kostenlosen Kälte bei der Verdampfung kryogener Gase)

F. Herzog<sup>1\*</sup>, R. Talluto<sup>1</sup>, J. Tauchmann<sup>1</sup>, S. Terkatz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Messer SE & Co. KGaA, Kleinewefersstr. 1, 47803 Krefeld, Germany

<sup>2</sup>Messer Industriegase GmbH, Messer-Platz 1, 65812 Bad Soden, Germany

[friedhelm.herzog@messergroup.com](mailto:friedhelm.herzog@messergroup.com)

Für die Nutzung der Kälte des flüssigen Stickstoffs gibt es eine Vielzahl von Anwendungen. In den meisten Fällen werden jedoch Stickstoff und auch Sauerstoff und Argon nur deswegen verflüssigt, um diese Industriegase kostengünstig speichern und transportieren zu können. Beim Anwender erfolgt dann wieder eine Verdampfung dieser kryogenen Gase mittels umgebungsluftbeheizter Rippenrohr-Wärmeaustauscher. Die Kälte der Flüssiggase geht dabei nutzlos verloren.

Wenn der Anwender einen Kältebedarf hat, der mittels einer konventionellen Kältemaschine abgedeckt wird, lässt sich der Kälteinhalt der kryogenen Gase jedoch leicht nutzen. Dabei wird der von Messer entwickelte EcoVap in den Kühlmittelkreislauf integriert und entnimmt aus diesem die für die Flüssiggas-Verdampfung erforderliche Wärme. Im Gegenzug entsteht eine Entlastung der Kältemaschine. Das führt zu einer Verringerung des CO<sub>2</sub>-Footprints, macht die Gastemperatur unabhängig von Witterungsverhältnissen, vermeidet Eis- und Nebbildung und reduziert den Platzbedarf.

Bei einem typischen Anwendungsfall lassen sich so leicht 100.000 kWh Elektroenergie pro Jahr einsparen und die Investition in die EcoVap-Technologie amortisiert sich teilweise innerhalb eines Jahres.

**Stichwörter:** Kältenutzung, Flüssigstickstoff, kryogene Gase, CO<sub>2</sub>-Footprint, EcoVap

## I.02

# Herausforderungen der Cryotechnik zur effektiven Separation und Verflüssigung von CO<sub>2</sub> und Methan aus Biogas

**Ziege Corinne<sup>1</sup>, Gwosdz Robert<sup>1</sup>, Dalakov Petar<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>CRYOTEC Anlagenbau GmbH, Dresdener Str. 76, 04808 Wurzen, Deutschland

[corinne.ziege@cryotec.de](mailto:corinne.ziege@cryotec.de), [robert.gwosdz@cryotec.de](mailto:robert.gwosdz@cryotec.de), [\\*petar.dalakov@cryotec.de](mailto:petar.dalakov@cryotec.de)

Die Luftverschmutzung durch industrielle Abgase ist zu einem der globalen Umweltprobleme des letzten Jahrhunderts geworden. Die Emissionen von CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre sind besonders kritisch. Wenn die CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht sinken oder gestoppt werden, wird sich die globale Erwärmung auf dem Planeten verstärken. Auf der anderen Seite kann Methan als Energiequelle und Energiespeicher verwendet werden.

Darauf aufbauend gewinnt die Entwicklung kryogener Systeme zur Abtrennung von CO<sub>2</sub> und Bio-CH<sub>4</sub> aus Biogas zunehmend an Bedeutung. Der Trend zur Schaffung von kryogenen Systemen zielt darauf, nicht nur große, sondern auch kleine Betriebe abzudecken. Dieser Vortrag zeigt die wichtigsten Herausforderungen bei der Planung von kleinen Verflüssigungsanlagen und die Möglichkeit, kostengünstige kleine kryogene Systeme für die Verflüssigung von Bio-CH<sub>4</sub> zu bauen.

**Stichwörter:**

Abgase, Emissionen in die Atmosphäre, globale Erwärmung, Biogas, Bio-CH<sub>4</sub> Verflüssigungsanlagen

I.03

## Das Grassmann-Diagramm und die ortho-para-Umwandlung

Hans Quack

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, TU Dresden, 01062 Dresden  
[quack@sunrise.ch](mailto:quack@sunrise.ch)

Seit einigen Jahren wird im amerikanischen wissenschaftlichen Schrifttum das Exergie-Fliessbild als Grassmann-Diagramm bezeichnet. Ein Anliegen dieses Vortrages ist, diese Bezeichnung auch im deutschen wissenschaftlichen Diskurs anzuregen. Es wird die Bedeutung von Peter Grassmann für die Verwendung dieses Diagrammes für die Prozessanalyse und die Wirkungsgradermittlung – speziell in Kälteanlagen – erläutert.

Bei der Verflüssigung von Wasserstoff muss neben der Abkühlung des Wasserstoffs auf 20 K der Anteil von Para-Wasserstoff mittels Katalyse auf über 95 % erhöht werden. Hierfür kann man den Katalysator entweder in die Wärmeübertrager einfüllen, oder man kann adiabate Katalysatorbehälter jeweils zwischen zwei Wärmeübertragern anordnen. Mit Hilfe des Grassmann-Diagramms wird der Unterschied der beiden Verfahren erläutert.

I.04

## Eine neue Messvorrichtung für die Bestimmung der Aktivität von Ortho-Para-Katalysatoren

Sebastian Eisenhut\*, Christoph Haberstroh

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, TU Dresden, 01062 Dresden  
[sebastian.eisenhut@tu-dresden.de](mailto:sebastian.eisenhut@tu-dresden.de)

Aktuell steigt im Zuge der Energiewende die globale Verflüssigungsleistung für Wasserstoff stark an. Die Wasserstoffverflüssigung ist jedoch ein sehr kosten- und energieintensiver Prozess, der noch viel Optimierungspotential bietet. Einen entscheidenden Baustein zur Optimierung des Prozesses stellt die (kosten-)effiziente und zuverlässige Realisierung der Ortho-Para-Umwandlung dar. Problematisch sind hierbei jedoch die unzureichende Datenlage bezüglich der katalytischen Aktivität des hierfür eingesetzten Standardkatalysators Eisen(III)-oxidhydroxid (mit dem Markennamen „IONEX-TYPE OP CATALYST“) sowie der Mangel an alternativen Katalysatoren. Aus diesem Grund entsteht derzeit an der TU Dresden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts „HyCat“ eine leistungsfähige Apparatur zur umfassenden Charakterisierung von Ortho-Para-Katalysatoren. Die Apparatur wird im Stande sein, den kompletten Arbeitsbereich der Ortho-Para-Umwandler moderner Wasserstoffverflüssiger abzubilden. Hierdurch wird sie die entscheidende Grundlage für die Erneuerung der Datenlage des derzeitigen Standardkatalysators und die Qualifizierung neuer Katalysatoren bilden.

I.05

## Historischer Vortrag

### Kryotechnik – die letzten 75 Jahre – und was kommt jetzt?

Lutz Decker<sup>1</sup>, Hans Quack<sup>2</sup>

<sup>1</sup>\*Linde Kryotechnik AG, Dättlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz

<sup>2</sup>TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte- Kryo- und Kompressorentechnik

[lutz.decker@linde-kryotechnik.ch](mailto:lutz.decker@linde-kryotechnik.ch)

Bis 1947 verstand man unter „Kryotechnik“ primär die Luftverflüssigung und -zerlegung. Tieferen Temperaturen wurden nur in wenigen physikalischen Forschungslaboratorien erzielt. In den folgenden Jahren benötigten immer mehr Anwendungen tieferen Temperaturen und die Anlagentechnik mußte mithalten. Die Erfolgsgeschichte begann mit der Entwicklung von kryogenen Expansionsturbinen, welche die Luftverflüssigung verbesserten und den Temperaturbereich des flüssigen Wasserstoffs für großkalige Anwendungen möglich machten. Die Entdeckung der Typ II Supraleiter ermöglichte den Bau von starken supraleitenden Magneten, die seitdem u. a. in der Beschleuniger-Technik und für die MRI-Geräte Anwendung finden. Kleinkühler erlauben kontinuierliche Kühlung im Weltraum, z. B. im Hubble- und aktuell im James Webb Teleskop. Die größten Kryo-Kälteanlagen werden für die Verflüssigung von Erdgas gebaut, um es dann als LNG über die Weltmeere zu transportieren.

Neue Herausforderungen warten schon:

Die zukünftigen Wasserstoff-Verflüssigungsanlagen werden ein Vielfaches der heutigen Mengen liefern. Flüssiger Wasserstoff soll nicht nur über Land, sondern auch in großen Mengen übers Meer transportiert werden. Wie werden die notwendigen vakuumisierten Tanker aussehen?

Die im Jahre 1986 entdeckten keramischen Supraleiter („Hochtemperatursupraleiter - HTS“) haben lange auf einen Einsatz im großen Rahmen gewartet. Nun soll in München ein 12 km langes HTS-Kabel in die bestehende Infrastruktur integriert werden.

Bei Temperaturen unter 20 K können heute deutlich stärkere Magnetfelder erzeugt werden als mit den klassischen, metallischen „Tieftemperatursupraleitern“. Erste Magnete für experimentelle Kernfusionsanlagen sind bereits getestet.

Ganz extreme Anforderungen stellen die geplanten „Quanten-Computer“. Ihre Arbeitstemperatur liegt bei 0,015 K. Die „Kühlung von Computer-Zentren“ wird eine ganz neue Bedeutung bekommen.

Die Kryotechnik – einst Exot – ist heute eine industrielle Notwendigkeit und sie schickt sich an, unser tägliches Leben zu begleiten.

**Stichwörter:**

Kryotechnik, Expansionsturbinen, Hochtemperatur-Supraleitung, Quanten-Computer

## 1.06

# LH<sub>2</sub>-Speicher für Flugzeugbrennstoffzellenantriebe

Sofiya Pracht<sup>\*1</sup>, Jörg Weiss<sup>1</sup>, Bing Ni<sup>1</sup>, Cornelie Bänsch<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Technische Thermodynamik,  
Energiesystemintegration, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[sofiya.pracht@dlr.de](mailto:sofiya.pracht@dlr.de)

Der Kampf gegen den Klimawandel erfordert wissenschaftliche und industrielle Anwendungen hin zur emissionsfreien Mobilität der Zukunft. Besonders in der Luftfahrt, welche laut ICCT im Jahr 2018 mit ca. 13,8 % zum CO<sub>2</sub>-Ausstoß in der EU im Transportsektor betrug, sind fundamentale technologische Umbrüche notwendig, um CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen. Hierbei spielt die Verwendung von flüssigem Wasserstoff eine wichtige Rolle.

Besondere Herausforderung bietet hierbei die Entwicklung einer Labor-Anwendung für den Realbetrieb. Das im Beitrag vorgestellte BALIS Projekt hat das Ziel, eine Demonstrationsanlage für brennstoffzellenbasierte Antriebe und Flüssig-Wasserstoffspeicher zu realisieren. Diese Anlage ist für eine Systemleistung von 1,5 MW konzipiert und zielt damit auf Anwendungen für Regionalflugzeuge mit ca. 40 bis 60 Sitzen und einer Reichweite von rund 1000 km ab. Die Anlage wird auf einem bodengebundenen Testfeld realisiert, in dem luftfahrtrelevante Komponenten des Antriebstranges modular und im Gesamtsystem getestet werden können. Hierbei werden die Betriebsgrenzen sowie das transiente Verhalten des Brennstoffzellenantriebsstrangs und der Systemsteuerung experimentell untersucht, sowie Leistungsfähigkeit und Systemeffizienz unter anwendungsnahen Lastprofilen demonstriert.

Der hier dargestellte Projektstand beinhaltet die Analyse der Speichertankkonzepte, die erforderliche Wasserstoffvorkonditionierung, die Anforderungen für die Brennstoffzellenversorgung, sowie auch die Abschätzung des Wasserstoffverbrauchs.

**Stichwörter:**

Flüssigwasserstoffspeicher, Brennstoffzelle, Luftfahrt, BALIS-Projekt

I.07

## Fortschritte bei der Wasserstoffverflüssigung von Linde

Burkhard Zinzius\*

Linde Kryotechnik AG, Dättlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz  
[burkhard.zinzius@linde-kryotechnik.ch](mailto:burkhard.zinzius@linde-kryotechnik.ch)

Weltweit ist Wasserstoff als zukünftiger, sauberer Energieträger in den Fokus gerückt. Um die Pariser Klimaschutzziele bis 2050 zu erreichen, wird der Bedarf an sauberer Energie und speziell Wasserstoff enorm wachsen. Es werden größere Anlagen benötigt, die durch die „Economy of Scale“ eine Reduzierung der spezifischen Kosten zur Folge haben. Flüssiger Wasserstoff ist durch seine hohe Energiedichte gekennzeichnet und kann unter geringem Druck in Trailern einfach verteilt werden.

Linde hat seit 2020 mehrere neue Wasserstoff-Verflüssigungsanlagen erfolgreich in Betrieb genommen: eine kleine Anlage in Australien zur Demonstration der Lieferkette, eine weitere mittelgroße 5 TPD-Anlage parallel zu einer bestehenden Verflüssigungsanlage in Leuna, Deutschland und eine große 30 TPD-Anlage in Texas, USA.

Unter Verwendung jüngster Linde-Entwicklungen setzt die zweite Anlage in Leuna neue Maßstäbe in puncto Effizienz. Basierend auf den neuesten technologischen Fortschritten werden derzeit weitere Wasserstoffverflüssigungsanlagen mit jeweils mehr als 30 TPD in Südkorea und in den USA gebaut. Hinzukommt, dass durch die Verflüssigung von grünem Wasserstoff eine hohe Nachhaltigkeit gewährleistet wird.

Die Präsentation zeigt den aktuellen Stand der Linde Wasserstoff-Verflüssigung und gibt einen Ausblick über die zukünftigen Entwicklungen.

**Stichwörter:**

Wasserstoff, Verflüssigung, Wasserstoffverflüssigung

I.08

## Weiterentwicklung eines Laborverflüssigers für Wasserstoff

Johannes Doll\*, Henrik-Gerd Bischoff, Christoph Haberstroh

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, TU Dresden, 01062 Dresden  
[johannes.doll@tu-dresden.de](mailto:johannes.doll@tu-dresden.de)

Im Rahmen aktuell anstehender Untersuchungen und Komponentenerprobungen muss Wasserstoff in tiefkaltflüssiger Form für das Versuchsfeld der TU Dresden bereitgestellt werden. Wenn der Zugang zu einer Flüssighelium-Infrastruktur besteht, kann die Verflüssigung über eine Helium-Gegenkühlung erfolgen. Dabei wird das Hochdruck-Wasserstoffgas über Wärmeübertrager annähernd bis zur Solidustemperatur abgekühlt und anschließend über ein Joule-Thomson-Ventil entspannt. Am Ende des Prozesses wird die Flüssigkeit in einer Dewarkanne aufgefangen. An der Professur wurde bereits vor einigen Jahren ein entsprechender Verflüssigerkryostat realisiert. Dieser Beitrag beleuchtet bestehende Betriebsprobleme wie Blockagen der Wasserstoffleitung aufgrund von Eispropfenbildung. Weiterhin wird die technologische Weiterentwicklung der Anlage mit halbautomatischer Regelung beschrieben. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf die Folgeanlage mit gesteigerter Verflüssigungsleistung.

I.09

## Modellierung von Umfüllprozessen in der Flüssigwasserstoff-Transportkette

Chengyuan Wu, Christian Wolf, Alexander Alekseev, René Weber

Linde GmbH, Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14, 82049 Pullach i. Isartal  
[chengyuan.wu@linde.com](mailto:chengyuan.wu@linde.com) - [christian.wolf@linde.com](mailto:christian.wolf@linde.com)

Bereits seit Jahrzehnten wird Flüssigwasserstoff als Raketentreibstoff, in der Halbleiterindustrie oder in der Forschung eingesetzt. Die produzierten Mengen sind dabei allerdings noch überschaubar – so werden in Deutschland heute nur etwa 10 Tonnen Wasserstoff pro Tag industriell verflüssigt und ausgeliefert, auch weltweit sind es in Summe nur ca. 350 Tonnen am Tag. Der erzeugte Flüssigwasserstoff wird von den Verflüssigungsanlagen in der Regel per Tankwagen zu den Kunden transportiert. Insbesondere die Umfüllprozesse in dieser Transportkette führen zu hohen Verlusten an wertvoller Flüssigkeit, da bei den, vergleichsweise geringen, ausgelieferten Mengen robuste Prozesse gefragt und effizientere, ausgeklügelte Methoden noch unrentabel sind. Der Trend zu Flüssigwasserstoff als Energieträger in der Mobilitätssparte und anderen Bereichen befeuert die Nachfrage und lässt damit einhergehend starkes Wachstum der Produktionskapazitäten in den kommenden Jahren erwarten. Um die steigenden Mengen an Flüssigwasserstoff verlustarm und zeiteffizient zum Kunden transportieren zu können, sind neue Strategien und Konzepte nötig. Dafür müssen zuerst die thermodynamischen Hintergründe in der Transportkette verstanden werden. Anschließend können die auftretenden Prozesse modelliert, die dynamischen Transportzyklen simuliert und Maßnahmen zur Effizienzsteigerung entwickelt werden. In diesem Beitrag wird der Stand der Technik der Flüssigwasserstoffs auslieferung per Tankwagen, sowie das thermodynamische Verhalten des zweiphasigen Wasserstoffs in den Umfüllprozessen behandelt. Dabei werden auftretende Hindernisse bei der Modellbildung erläutert und die beeinflussenden physikalischen Eigenheiten von Flüssigwasserstoff diskutiert.

I.10

## Stabilität von kryokonservierten Proben

Johannes Schenkel

Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ) Heidelberg  
[j.schenkel@dkfz.de](mailto:j.schenkel@dkfz.de)

Mittels Kryokonservierung können (Maus-) Mutanten als Präimplantationsembryonen oder Spermatozoen gesichert und gegebenenfalls aus der aktiven Zucht genommen werden. Kryokonserviertes Material lässt leichter und tierschutzgerechter versenden als lebende Tiere. Für das Ziel der Kryokonservierung die Proben zu einem späteren Zeitpunkt wieder sicher zu revitalisieren, haben wir folgendes untersucht/standardisiert:

- Ausreichende Probenzahlen und umfangreiche Qualitätskontrollen als Voraussetzung für eine erfolgreiche Revitalisierung.
- Temperaturstabile Lagerung zur Erhaltung der Revitalisierungskapazität.
- Keine Kontaminanten in den zur Kryokonservierung genutzten Materialien oder Proben. Gelegentliche Kontaminationen nach einem Embryotransfer können einen anderen Ursprung haben.
- An Boden und Deckel von Lagerbehältern werden geringe Mengen von vor allem Umweltkeimen gefunden. Keine Gefahr bei korrektem Verschluss der Proben.
- Transporte führen zu etwas verringerter Revitalisierungsrate (vermutlich wegen „Handlings“). Die Simulation der Strahlenbelastung bei Flügen und Sicherheits- sowie Zollkontrollen belasten die Proben leicht. Durch eine Rückkreuzung lassen sich mögliche Konsequenzen im Tiermodell umgehen.

Diese Studien wurden von der Gemeinschaft Deutscher Kryobanken gefördert

I.11

## Kryokonservierung dendritischer Zellen für die Krebstherapie

Tarek Deeb<sup>1</sup>, Felix Schwebel<sup>2</sup>, Tim Rittinghaus<sup>1</sup>,  
Claudia Dettmer-Richardt<sup>2</sup>, Simon Grammel<sup>2</sup>, Birgit Glasnacher<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> PetBioCell GmbH, Schillerstr. 17, 37520 Osterode am Harz, Deutschland  
[info@petbiocell.de](mailto:info@petbiocell.de)

Dendritische Zellen (DZ) spielen als Antigen-präsentierende Zellen eine wichtige Rolle bei der Immunabwehr. Der Einsatz dieser Zellen stellt eine vielversprechende Methode der Zelltherapie dar, um eine Immunantwort auf Krebserkrankungen zu initiieren. Für eine erfolgreiche Krebstherapie mittels DZ sind regelmäßige Anwendungen notwendig. Dies führt zu einem hohen Kosten- sowie logistischen Aufwand. Außerdem verursacht die wiederholte Blutabnahme Stress bei den zu behandelnden Tieren. Die Anwendung der Kryokonservierung soll in diesem Fall die Haltbarkeit der DZ so verlängern, dass die genannten Probleme überwunden werden. Aufbauend auf einer Durchführbarkeitsstudie wird im Rahmen dieser Arbeit die Optimierung von Kryokonservierungsprotokollen für equine DZ durchgeführt. Zunächst soll die Toxizität der Dimethylsulfoxid-haltigen Kryoschutzlösungen durch den Einsatz alternativer Substanzen reduziert werden. Weiterhin soll das autologe Serum ersetzt werden. Hierbei werden isotone sowie Phosphat-gebufferte Kochsalzlösungen als Serumersatz untersucht. Darüber hinaus werden Kühl- sowie Auftauraten optimiert und die Lagerungstemperatur sowie -dauer angepasst. Im Zuge der Präsentation werden die aktuellsten Ergebnisse vorgestellt und die weiteren Schritte dieses Projektes erläutert.

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, dendritische Zelltherapie, equine Zellen, Krebstherapie

I.12

## Induktive Energieübertragung in eine kryogene Umgebung

**Design und Charakterisierung einer drahtlosen Energieübertragungsstrecke  
für den Betrieb einer Greiferaktorik**

Yves Olsommer<sup>1\*</sup>, Philipp Jahn<sup>2</sup>, Annika Raatz<sup>2</sup>, Frank R. Ihmig<sup>1</sup>

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

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

In der Forschung und Industrie ist die Automatisierung allgegenwärtig und findet ihren Weg in immer mehr hochspezialisierte Anwendungen – einschließlich der Kryokonservierung. Dennoch ist die manuelle Handhabung von biologischen oder toxischen Proben in wissenschaftlichen und kommerziellen Lagereinrichtungen immer noch vorherrschend. Dies bedingt für das Personal ein erhebliches Verletzungsrisiko durch Kälteverbrennungen. Darüber hinaus wird die Unversehrtheit der Proben durch Temperaturschwankungen oder Verunreinigungen gefährdet. In diesem Beitrag stellen wir einen Ansatz für die Automatisierung von Handhabungsprozessen bei tiefen Temperaturen zwischen -130 °C und -190 °C in Kryobanken vor. Das Automatisierungssystem basiert auf einem Parallelroboter, da seine Struktur die Positionierung der Antriebe außerhalb des gekühlten Arbeitsraums erlaubt. Die Gelenke und Manipulatoren des Roboters befinden sich innerhalb des

kryogenen Lagerbehälters, der mit flüssigem Stickstoff gekühlt wird. Die Energieversorgung der kryotauglichen Greiferaktorik im Inneren des Lagerbehälters erfolgt induktiv. Zu diesem Zweck wurden Varianten von Spulen designs und deren Anordnung mit der FEM-Software ANSYS unter Einbeziehung von applikations-spezifischen Randbedingungen modelliert. Die Dimensionierung der Schwingkreise wurde mit Berechnungen in Mathcad ergänzend durchgeführt. Die entwickelte Greiferaktorik lässt sich in flüssigem Stickstoff mit einem Wirkungsgrad von etwa 86% bei einem Spulenabstand von 95 mm und noch mit etwa 10% Wirkungsgrad bei einem Spulenabstand von 335 mm betreiben.

**Stichwörter:**

Kryorobotik, Kryoautomatisierung, Biobanken, Festkörpergelenke, Parallelkinematik

I.13

## **Handling in frostiger Umgebung- kryogene Biobank Automation**

**Lutz Doms**

ASKION GmbH, Geschäftsführer, Gewerbepark Keplerstraße 17-19, 07549 Gera  
[lutz.doms@askion.com](mailto:lutz.doms@askion.com)

- Kurzvorstellung der Firma ASKION und Ihrer Biobankprodukte
- Typische Arbeitsabläufe und Konditionen
- Sensorik in der Kälte
- exemplarische Probleme und deren Lösungsansätze
- Konklusionen und Richtlinien

I.14

## **Challenges of a biobank regarding cryogenics**

**Experience of an university medical center-integrated biobank**

**Jakob N. Keller, Sara Y. Nussbeck\***

University Medical Center Göttingen (UMG), Central Biobank UMG,  
Robert-Koch-Str. 40, 37075 Göttingen, Germany  
[jakob.keller@med.uni-goettingen.de](mailto:jakob.keller@med.uni-goettingen.de), [sara.nussbeck@med.uni-goettingen.de](mailto:sara.nussbeck@med.uni-goettingen.de)

Over the last ten years, the awareness of the problem of partially irreproducible research results has increased. Many approaches have been discussed and implemented to overcome this problem. In biomedical research, an important factor for the irreproducibility of results is improper handling of biospecimens [1]. Biospecimens are subject to degrading processes that are inhibited by storing the biospecimens at low temperatures. Some degrading processes are still active at temperatures above -70 °C, which is why maintaining a strict cold chain is crucial [2].

Establishing central biobanks at university medical centers is a key approach not only to overcome the challenges of irreproducible research results in biomedical research but to support researchers in biospecimen logistics with standardised processes. Even though biobanks have implemented standardised processes and have specifically trained personal, their main challenge is to maintain the cold chain at any time once the samples are frozen.

Currently, the environmental temperature surrounding the biospecimens is measured continuously, but since the inside of a storage robot is several cubic metres large and has different temperature zones, measuring the temperature even at a couple of positions might still be too imprecise to accurately assess the temperature of the biospecimens. Instead, measuring the temperature of biospecimens within the storage tubes while moving

through different areas of the storage robot [3] gives a good indication of which critical steps in the biobanking process endanger the cold chain. However, the battery life at cold temperatures keeps being a limitation. An approach using several mobile temperature loggers simultaneously would be the next step before developing organisational and technical solutions to mitigate the temperature rises.

**Literature:**

- [1] L.P. Freedman, I.M. Cockburn, T.S. Simcoe, The Economics Of Reproducibility In Preclinical Research, Plos Biol 13 (2015), E1002165
- [2] A. Hubel, R. Spindler, A.P.N. Skubitz, Storage of human biospecimens: selection of the optimal storage temperature, Biopreservation and biobanking 12.3 (2014), 165-175.
- [3] T.S.F. Rittinghaus, J.N. Keller, S.Y. Nussbeck, B. Glasmacher, Kryo-Lagerroboter in der Biobank: Erfassung der Probentemperatur, KI Kälte Luft Klimatechnik 08-09 (2021)

I.15

## Float-Verfahren zur Kryokonservierung

### Kryokonservierung wasserbasierter Suspensionen

D. Khayyat<sup>1,2\*</sup>, T. Rittinghaus<sup>1</sup>, B. Glasmacher<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>NIFE, Niedersächsisches Zentrum für Biomedizintechnik, Implantatforschung und Entwicklung,  
Stadtfeiddamm 34, 30625 Hannover, Deutschland

Die Haltbarkeit von bei 4°C gelagerten Blutkonserven beträgt mit den heute üblichen Stabilisatoren maximal bis zu 49 Tage. Die Kryokonservierung von Erythrozytenkonzentrat bietet eine vielversprechende Möglichkeit, Blutkonserven nahezu ohne Verfallsdatum bereitzustellen. Im Rahmen der bekannten Kryoverfahren werden geschlossene Behälter wie Blutbeutel für die Kryokonservierung angewandt. Diese Behälter lassen aufgrund von Material und Geometrie keinen idealen Wärmetransport zu. Die resultierenden suboptimalen Einfrierbedingungen müssen durch den Einsatz großer Mengen teils toxischer Gefrierschutzmittel kompensiert werden. Mit dem neuartigen *Floatfreezing-Verfahren* können wasserbasierte Suspensionen wie Blut kryokonserviert werden. Das Verfahren erlaubt die Kryokonservierung von Blutkonserven ohne Verwendung von Blutbeuteln während des Einfrierens. Dieser Ansatz gewährleistet einen kontinuierlichen und reproduzierbaren Prozess zur Kryokonservierung von Blut mit homogenerem Wärmeübergang.

In der vorgelegten Studie wird eine wasserbasierte Suspension auf einem Bad aus Perfluortributylamin (PFTBA) aufgrund geringer Dichte aufgeschwommen und sich auf diesem zu einer flachen Platte verteilt. Die Kühlung erfolgt durch das PFTBA-Bad als auch durch Stickstoffdampf, der von oben in die Kammer eingeblasen wird. Das Gefriergut wird bei einer Kühlrate von ca. 1 K/min auf Temperaturen von -25°C bis -40°C runtergekühlt. Die Steuerung des Floatfreezers wurde für „Mensch-Maschine-Interaktion“ sicher und funktionsgerecht weiterentwickelt. Die nächsten Schritte sollen zu höheren Kühlraten führen, um das Gefriergut anschließend z. B. bei -196°C einzulagern.

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, Kryotechnik, Blutkonserven, Erythrozyten, Einfrieren, PFTBA, Floatfreezing

## Kryotechnologien in Gesellschaft: Problembewältigung mit Nebeneffekten

Ruzana Liburkina<sup>1\*</sup>, Veit Braun<sup>1</sup>, Sara Lafuente-Funes<sup>1</sup>, Thomas Lemke<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Soziologie,  
Theodor-W.-Adorno-Platz 6, 60323 Frankfurt am Main, Deutschland  
[Liburkina@soz.uni-frankfurt.de](mailto:Liburkina@soz.uni-frankfurt.de)

Im Mittelpunkt einer gesellschaftswissenschaftlichen Perspektive auf Kryotechnologien steht die Frage, wie die Kryokonservierung von Zellen, Gewebe und DNA zeitliche und räumliche Konfigurationen verändert und unser Verständnis von Leben und Tod, Gesundheit und Krankheit, (Un-)Fruchtbarkeit und Nachhaltigkeit prägt. So werden durch Kryotechnologien zum Teil grundlegende Normen und Wahrheitsansprüche verändert. Gleichzeitig steht ihre Anwendung als solche immer im Kontext konkreter Zukunftsvisionen, Forschungsnetzwerke und Allianzen zwischen industriellen Akteuren und politischen Entscheidungsträgern. Die Untersuchung von Kryokonservierungspraktiken ist somit auch wichtig, um zu verstehen, was heutige Innovationsregime ausmacht.

Das Forschungsprojekt CRYOSOCIETIES untersucht das in drei empirischen Teilprojekten in jeweils unterschiedlichen europäischen Staaten und Anwendungsbereichen. Die Fallstudien beschäftigen sich mit (1) Nabelschnurbltlagerung, (2) Eizelllagerung und (3) der Kryokonservierung von Keimzellen, Gewebeproben und DNA von gefährdeten oder ausgestorbenen Tierarten zwecks Erhalts der Artenvielfalt.

In diesem Beitrag werden erste Projektergebnisse präsentiert. Es wird diskutiert, dass kryokonserviertes Material nicht immer erwünscht oder gebraucht wird und zuweilen zur Bürde bzw. zum Selbstzweck wird, ohne dass dessen Lagerung als solche wirkungs- oder folgenlos bleibt. Auch führt die Diversität von Proben unterschiedlichen Ursprungs zu Herausforderungen: Wie kann eine solche Diversität einheitlich dokumentiert und nutzbar gemacht werden? Darüber hinaus thematisiert der Beitrag, wie die zunehmende Optimierung von Kryotechnologien neue, nicht immer unkontroverse Handlungsspielräume eröffnet – sei es im Bereich des Risikomanagements, der Logistik oder der Kommerzialisierung. Zusammenfassend werden die Fragen diskutiert, ob die Anwendung extremer Kälte symptomatisch ist für ein gesellschaftliches Hinauszögern von Problembewältigung, sowie welche neuen Probleme sie generiert.

**Stichwörter:**

Sozialwissenschaften, Gesellschaft, Kryobanken, Kryobiologie

I.17

## Entwicklung und Bau von HTS Stromzuführungen für supraleitende Spulen in Teilchenbeschleunigern

Ulrich Zerweck<sup>1</sup>, Norbert Gust<sup>1</sup>, Andreas Kade<sup>1</sup>, Martin Klupsch<sup>1</sup>, Ronald Miksche<sup>1\*</sup>, Andreas Peusch<sup>1</sup>,  
Alexander Bleile<sup>2</sup>, Vladimir Datskov † <sup>3</sup>

Besten Dank für die Unterstützung an Fanny Haupold<sup>1</sup>, René Kretschmer<sup>1</sup>, Wolf Schottenhamel<sup>1</sup>,  
Sandra Tippmann<sup>1</sup>, Andreas Wesenbeck<sup>1</sup>, Steven Schuster<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Dresden, Germany

<sup>2</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung mbH, Darmstadt, Germany

<sup>3</sup>Joint Institute for Nuclear Research Dubna, Moscow Region, Russia

Im Rahmen des FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) ist der Bau des Schwerionen-Synchrotrons SIS 100 die Hauptaufgabe. Für dieses bei der GSI vorgeschlagene Projekt müssen verschiedene Komponenten für supraleitende Magnete entwickelt und hergestellt werden. Es ist notwendig, den Strom bei Raumtemperatur von Normalleitern in den supraleitenden Zustand bei tiefen Temperaturen zu überführen. Herausforderung ist insbesondere die Entwicklung geeigneter Technologien zum Löten und Kleben der stromführenden Komponenten, welche die Anforderungen an die Stromtragfähigkeit, Isolation und ausreichende Wärmeleitung gewährleisten müssen. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Realisierung eines möglichst geringen Übergangswiderstands beim Verschrauben der supraleitenden Komponenten.

I.18

## Mobile Kryotechnik mit Supraleitern für Schwebewände

Frank N. Werfel, Uta Flögel-Delor, Peter Schirrmeister, Thomas Riedel,  
Rene König, Viktor Kantarbar, Oleksii Vakaliuk

Adelwitz Technologiezentrum GmbH (ATZ), Torgau, Germany  
[werfel@t-online.de](mailto:werfel@t-online.de)

Kommerzielle Schwebewände nutzen Magnetfelder von 0.5 bis 5 Tesla, wie etwa der Transrapid in Shanghai oder der Chuo Shinkansen in Japan. Beide Technologien, die elektromagnetische (EMS) und die elektrodynamische (EDS), erzeugen ihre Magnetkräfte über geregelte Spulen und Wirbelströme in den Schienen- und Stützsystemen. Massive REBCO Supraleiter sind fundamental selbststabilisierend ohne aktive Kontrolle und erlauben höhere spezifische Levitationskräfte im Vergleich zu Permanent-magneten. Voraussetzung ist die gezielte Kühlung der Supraleiter unter ihre kritische Temperatur. Zu Demonstrations- und Technologieuntersuchungen hat ATZ in den letzten 10 Jahren mehr als 100 leistungsfähige Vakuumkryostate mit Supraleitern entwickelt und hergestellt. Für den mobilen Einsatz ist nach wie vor die Kühlung mit flüssigem Stickstoff LN2 vorteilhaft. Die rechtwinkligen Kryostate besitzen eine schrittweise optimierte innere Isolationsstruktur, einen integrierten Speicher bis zu 5.2 l LN2, der einen kryothermischen Betrieb bis zu 2 Tagen ohne Nachfüllen sichert. Der thermische Ausdehnungskoeffizient der eingesetzten Werkstoffe (Edelstahl, Kupfer, HTS, GfK) limitiert die Ausmaße der Kryostate auf maximal 0.5 m. Für Demonstrator-Fahrzeuge auf Magnetschienen werden mehrere Kryostate mit einem Fahrgestell gekoppelt. Bei optimierter Halbach – Magnetschiene tragen die Kryostate mechanische Lasten bis 0.75 t für den Typ CRYO500. Verantwortlich dafür sind 30 YBCO Supraleitern der Abmessung 80 x 40 x 14. Die thermischen Verluste der Kryostate CRYO250 und CRYO500 betragen 2.5 und 5.1 Watt bei einem Isolationsvakuum von < 5x10E-5 mbar. Mit den YBCO Kryostaten wurde ein 12 t Versuchsfahrzeug auf einer PM -Schiene in Chengdu/China aufgebaut und erprobt. Parallel laufen Versuche mit magnetisch gelagerten Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen in evakuierten Röhren mit Geschwindigkeiten über 300 km/h und Beschleunigungen über 10 g. Die LN2 Kühlung in den Kryostaten erweist sich als robust und vorteilhaft, auch unter reduzierter Umgebungs-Atmosphäre.

I.19

## Aufbau des Compact Accelerator Systems Teststand (COMPASS)

**Jonas Arnsberg<sup>1\*</sup>, Michael Stamm<sup>1</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>**

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

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Stromzuführungen zu supraleitenden Magneten oder Kabeln tragen durch die im Temperaturbereich oberhalb der Sprungtemperatur auftretenden ohm'schen Verluste maßgeblich zur Wärmelast auf kryogene Systeme bei. Die Optimierung von Stromzuführungen erfordert dabei aus thermodynamischer Sicht eine Kühlung entlang der kompletten Länge der Stromzuführung.

Auf dem Joule-Thomson-Effekt basierende kryogene Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) stellen eine kostengünstige, effiziente und beliebig skalierbare Technologie für die Kühlung solcher Stromzuführungen dar. Dabei kann der im Linde-Hampson-Prozess eingesetzte innere Wärmeübertrager die Funktion des Rekuperators mit der einer Stromzuführung vereinen. Nachdem in der Vergangenheit am KIT bereits Prototypen einer solchen Stromzuführung entwickelt und gefertigt wurden, fehlt bislang eine Versuchsumgebung zur Erprobung der Stromzuführungen unter realer Last.

Eine solche Versuchsumgebung soll mit dem Compact Accelerator Systems Teststand (COMPASS) am KIT entstehen. COMPASS wird dabei neben der Möglichkeit zur Erprobung gemischkälte-gekühlter Stromzuführungen auch thermische Untersuchungen zu supraleitenden Beschleunigerkomponenten wie Undulatoren ermöglichen. Der Vortrag soll einen Überblick über die Auslegung und Dimensionierung des Versuchsstandes geben und die Flexibilität von COMPASS im Hinblick auf den Leistungsbereich der Gemischkältekreisläufe aufzeigen.

**Stichwörter:**

Gemischkältekreislauf, Stickstoff-Kohlenwasserstoff-Gemische, Auslegung- und Dimensionierung, Stromzuführungen

I.20

## Optimierung der Kühlung supraleitender Stromkabel

**Potenzial kryogener Gemischkältekreisläufe**

**Friederike Boehm<sup>1\*</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
[friederike.boehm@kit.edu](mailto:friederike.boehm@kit.edu)

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Im Zuge der Energiewende rücken supraleitende Stromkabel in den Fokus, um große Mengen elektrischer Energie in dicht besiedelten Gebieten aber auch über weite Strecken zu transportieren. Für einen ökonomischen und energieeffizienten Betrieb dieser Kabel unterhalb der Sprungtemperatur (deutlich unter 100 K) werden Kälteanlagen benötigt, welche die Betriebskosten maßgeblich beeinflussen. Der Kältebedarf setzt sich hierbei aus der Kühlung der Stromzuführungen und dem Rückkühlen des Kältemittels im Kabel zusammen. Neben den

entsprechenden Kühlstationen an den beiden Enden eines Kabels sind je nach Länge zusätzliche Zwischenkühlstationen nötig, um stets einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können.

In diesem Beitrag werden verschiedene bestehende technische Prozesse zur Bereitstellung der niedrigen Temperaturen analysiert und mit kryogenen Gemischkältekreisläufen (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) auf Basis des Joule-Thomson-Effekts verglichen. Die Besonderheit der Gemischkältekreisläufe liegt hierbei in der Kombination von guter Skalierbarkeit der Kälteleistung, Anpassbarkeit des Gemisches an die spezifische Anwendung (End- oder Zwischenstation) und einem einfachen und somit günstigen Prozessaufbau.

**Stichwörter:**

Gemischkältekreisläufe, Supraleitung, Systemoptimierung

1.21

## Berechnung einer optimalen aktiv eingestellten Schildtemperatur

Holger Neumann

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

Für Anwendungen bei Temperaturen um oder unter 20 K ist es Stand der Technik, einen aktiv gekühlten thermischen Schild zu verwenden, um die Wärmelast von der Umgebungstemperatur auf diesen niedrigen Temperaturbereich zu reduzieren. Flüssiger Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ) mit einer Siedetemperatur von 77 K bei 1 bar wird sehr häufig verwendet, da er einerseits sehr günstig ist und andererseits unbegrenzt und fast überall verfügbar ist. Auch bei zweistufigen Kryokühlern, bei denen die erste Stufe für einen Kühlschild genutzt wird, ist diese auf eine Temperatur von ca. 80 K ausgelegt. Hier in diesem Artikel wird die optimale Schildtemperatur im Fall aktiver Kühlung berechnet. Dazu wird die Energieeinsparung durch den Einsatz eines aktiv gekühlten Schildes im Vergleich zum Verzicht auf einen aktiv gekühlten Schild ermittelt. Es zeigt sich, dass es eine optimale aktiv eingestellte Schildtemperatur gibt, die von der Anzahl der Superisolationslagen zwischen der warmen Wand und dem aktiv gekühlten Schild und von der Anzahl der Superisolationslagen zwischen dem aktiv gekühlten Schild und der kalten Wand bei der niedrigsten Temperatur abhängt.

**Stichwörter:**

MLI, Superisolation, thermischer Schild

1.22

## Referenzmessungen am kryogenen Phasengleichgewichtsprüfstand CryoPHAEQTS

Jens Tamson<sup>\*1</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Organisationseinheit Kälte- und Kryotechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131, Karlsruhe, Deutschland  
[jens.tamson@kit.edu](mailto:jens.tamson@kit.edu)

<sup>2</sup> Institut für Beschleunigerphysik und Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Die Erweiterung etablierter Gemischkältekreisläufe (*engl. mixed refrigerant cycle (MRC)*) zu kryogenen Temperaturen unterhalb von 77 K ermöglicht eine attraktive Lösung zur effizienten Kühlung von Hochtemperatursupraleitern und zur Wasserstoffverflüssigung. Dabei dient ein klassischer MRC mit einem brennbaren Mehrstoffgemisch als Vorkühlung für einen kryogenen MRC, der mit den Tiefsiedern Helium, Wasserstoff,

Neon und Stickstoff betrieben werden kann. Binäre Gemischdaten bilden die Grundlage zur thermodynamischen Modellierung der Stoffsysteme und sind für Hochsiedergemische verfügbar. Für Tiefsiedergemische liegen kaum oder widersprüchliche Daten vor, die eine effiziente Prozessauslegung kryogener MRC behindern.

Der kryogene Phasengleichgewichtsprüfstand CryoPHAEQTS (*engl. cryogenic phase equilibria test stand*) ermöglicht Phasengleichgewichtsmessungen von (brennbaren) Gemischen in einem Temperaturbereich von 15 K bis 300 K und bei Drücken bis zu 150 bar. Es können Proben aus der Dampfphase sowie bis zu zwei Flüssigphasen entnommen und im Gaschromatographen analysiert werden. Die trockene Kühlung der Messzelle über einen Pulse-Tube-Cryocooler und einem dreistufigen Regelungskonzept ermöglicht eine bisher unerreichte Temperaturstabilität und -homogenität von  $\pm 2$  mK. Die typischen Unsicherheiten liegen bei 0,1 % für die Druckmessung, 1 % für die Messung der Zusammensetzung und 20 mK für die Temperaturmessung.

In diesem Vortrag werden Reinstoff- und Gemischmessungen zur Validierung des Prüfstands präsentiert. Außerdem werden erste Ergebnisse zur Implementierung einer Messung der spezifischen isobaren Wärmekapazität in der Gasphase vorgestellt.

**Stichwörter:**

Phasengleichgewicht, Stoffdaten, Wärmekapazität, Gemischkälte

### II.1.01

## Untersuchung der in Gaskühler und Verdampfer auftretenden Strömungsformen eines nicht mischbaren CO<sub>2</sub>-PAG68 Gemisches

Daniel Domin<sup>1\*</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Nikolas Lemke<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[d.domin@tu-braunschweig.de](mailto:d.domin@tu-braunschweig.de)

In CO<sub>2</sub>-Kompressionskälteanlagen werden für die Verdichterschmierung hauptsächlich Polyalkylenglykol (PAG) oder Polyolester (POE) basierte Kältemaschinenöle eingesetzt. Bedingt durch den Ölwurf des Verdichters wird im Kältekreis ein CO<sub>2</sub>-Öl Gemisch zirkuliert und das Systemverhalten beeinflusst. Dabei stellen die Ölzirkulationsrate und die Strömungsform wichtige Einflussfaktoren dar.

Die Stoffeigenschaften der reinen Komponenten wirken sich bedeutend auf die Strömungsform aus. So hängen beispielsweise die Anzahl und die Viskositäten der strömenden Phasen von der qualitativen sowie quantitativen Mischbarkeit der Komponenten und den Reinstoff-Viskositäten ab. In den wenigen auffindbaren Aufnahmen von CO<sub>2</sub>-PAG Strömungen in Makrokanälen werden überwiegend hochviskose PAG100 eingesetzt oder die Viskositätsgruppe nicht angegeben. Auch die in der Literatur vielfach untersuchten Strömungen von CO<sub>2</sub> mit POE sind aufgrund der deutlich unterschiedlichen Mischbarkeit für Rückschlüsse auf die lokale Strömungsform von CO<sub>2</sub> und PAG68 ungeeignet.

In diesem Beitrag werden Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Mehrphasenströmung eines nicht mischbaren CO<sub>2</sub>-PAG68 Gemisches präsentiert, die in Schaugläsern mit einem Innendurchmesser von 6 mm aufgenommen wurden. Es werden die Strömungsformen der überkritischen Zweiphasenströmung im Gaskühler und der Dreiphasenströmung im Verdampfer bei unterschiedlichen Massenstromdichten und sich im Wärmepumpensystem frei einstellenden Ölzirkulationsraten behandelt. Anhand dieser Strömungsaufnahmen sollen weitere Kenntnisse hinsichtlich des lokalen Ölrückhalts sowie der Beeinflussung von Wärmeübergängen und Druckverlusten durch Öl gewonnen werden.

### II.1.02

## Experimentelle Ergebnisse der Erstinbetriebnahme eines kompakten Apparates zur absorptiven, isothermen Luftentfeuchtung

Thomas Meyer, David Dehler, Karl Stinner, Christopher Exner, Sebastian Weck

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik KT2, Fachgebiet Maschinen- und Energieanlagentechnik, Marchstr. 18, 10587 Berlin  
[Thomas.Meyer@tu-berlin.de](mailto:Thomas.Meyer@tu-berlin.de)

### II.1.03

## Experimentelle Untersuchungen zur lokalen Entkopplung von Wärmeentzug und Vereisung in Eisspeichern

Henriette Süß<sup>1\*</sup>, Faruk Al-Sibai<sup>1</sup>, Reinhold Kneer<sup>1</sup>

RWTH Aachen, Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, Augustinerbach 6, 52062 Aachen, Deutschland  
[suess@wsa.rwth-aachen.de](mailto:suess@wsa.rwth-aachen.de)

Eisspeicher sind Niedertemperaturspeicher, die Energie über die Erstarrungs- und Schmelzenergie im Phasenübergang von Wasser zu Eis speichern. Ein Kältefluid fließt durch Wärmeübertrager, die dem Speicherwasser thermische Energie entziehen. Wird die Nukleationstemperatur im Speicherwasser unterschritten, bildet sich Eis auf der Wärmeübertrageroberfläche. Diese Eisschicht erhöht mit zunehmender Dicke den Wärmeleitwiderstand zwischen Kältefluid und Wasser, sodass die Eisschicht den Wärmeentzug aus dem Wasser hemmt.

Ziel von Untersuchungen an einem Modelleisspeicher am Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen (WSA) ist es daher, die Eisbildung und den Wärmeentzug lokal zu entkoppeln und somit den Wärmeentzug nicht zu hemmen, gleichzeitig jedoch Energie im Phasenwechsel zu speichern. Durch den Einsatz verschiedener Wärmeübertrageroberflächen kann Eis an einem Opferwärmeübertrager mit glatter Oberfläche gebildet werden, während gleichzeitig einem Arbeitswärmeübertrager mit rauer Oberfläche die Nukleations temperatur gesenkt werden kann und die Vereisung an diesen Wärmeübertrager so verzögert wird. Da das Wasser nach Vereisung des Opferwärmeübertragers jedoch dendritenartig der kältesten Stelle im Eisspeicher entgegenfriert, vereist auch der Arbeitswärmeübertrager nach kurzer Zeit. Eine lokale Entkopplung von Wärmeentzug und Vereisung ist daher nur zeitlich begrenzt möglich und gleichzeitig nicht reproduzierbar zu erreichen, da Wasser während des Abkühlvorgangs und des Unterkühlens in einem metastabilen Zustand vorliegt.

**Stichwörter:**

Eisspeicher, Vereisung, Nukleation

II.1.04

## Einsatz von faseroptischen Sensoren in der Kältetechnik

### Bestimmung von Temperaturverteilungen in Luftströmungen

Malte Dirks<sup>1\*</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[malte.dirks@kit.edu](mailto:malte.dirks@kit.edu)

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Bei der experimentellen Untersuchung von luftbeaufschlagten Wärmeübertragern stellt die Bestimmung der Lufttemperaturen über den gesamten Strömungsquerschnitt eine messtechnische Herausforderung dar. In Folge von Temperaturdifferenzen über den Querschnitt ist eine hohe Ortsauflösung der Temperaturmessung erforderlich. Eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Messung von Temperaturverteilungen mit hoher Ortsauflösung sind Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensoren, bei denen in den Kern einer Glasfaser eingeschriebene Mikrostrukturen den Brechungsindex des Faserkerns periodisch modulieren. Eine Änderung der Temperatur wirkt sich auf den Brechungsindex und die Gitterkonstante des FBG aus und verändert so die reflektierte Bragg-Wellenlänge. Mittels geeigneter Kalibrierung kann so die Temperatur an der Stelle des Bragg-Gitters gemessen werden, wobei eine Vielzahl von Messstellen (FBGs) in einer einzelnen Glasfaser realisiert werden können. Auf diese Weise kann zum einen der Verdrahtungsaufwand und zum anderen der Wärmeeintrag gegenüber einem Messaufbau mit herkömmlichen Temperatursensoren deutlich reduziert werden.

Das Manuskript stellt die Kalibrier- und Messmethodik für die Temperaturmessung in Luftströmungen mittels FBG-Sensoren vor. Darüber hinaus werden experimentelle Messergebnisse präsentiert, die in einem Windkanal gewonnen wurden und die Vorteile des Messsystems aufzeigen.

**Stichwörter:**

Temperaturmessung, Faseroptische Messsysteme, Lamellenwärmeübertrager

II.1.05

## Diffusions-Absorptionskältemaschine mit Plattenaustrreiber

Johannes Brunder\*, Konstantinos Stergiopoulos

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

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

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

Am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wird an der Skalierung des Diffusions-Absorptionskälteprozesses zu größeren Kälteleistungen geforscht. Ammoniak/Wasser wird als Arbeitsstoffpaar verwendet. Zur Einbringung größerer Antriebsleistungen wird eine neuartige Austreibereinheit bestehend aus einem Plattenwärmeübertrager mit angeschlossenem Förderrohr erprobt. Eine solche

Austreibereinheit ist zudem kompakt, ermöglicht die Nutzung verschiedener Wärmequellen und senkt die zum Betrieb nötige Antriebstemperatur.

Auf der DKV-Jahrestagungen 2020 und 2021 wurden zwei Entwicklungsstränge dieses Projekts vorgestellt. Zunächst wurde die Erprobung der Austreibereinheit auf einem separaten Prüfstand (2020) und dann die Weiterentwicklung einer elektrisch beheizten DAKM, durch Verbesserung des Hilfgaskreislaufs und Absorbers (2021), vorgestellt. Durch diese Maßnahmen konnte die Kälteleistung der DAKM deutlich gesteigert werden, sodass nun eine Erhöhung der Antriebsleistung sinnvoll ist. Beide Entwicklungsstränge werden dafür zusammengeführt und die neuartige Austreibereinheit in den Prototypen der DAKM integriert.

Im Vortrag werden experimentelle Untersuchungen zum Betriebsverhalten einer DAKM mit Plattenaustrreiber vorgestellt. Dabei steht besonders die Betriebsstabilität im Fokus. Weitere Entwicklungsansätze werden diskutiert.

**Stichwörter:**

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Ammoniak-Wasser, Plattenaustrreiber

## II.1.06

### Partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher

Dieter Preßl<sup>1\*</sup>, Eberhard Lävemann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern),  
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching, Deutschland  
[dieter.pressl@zae-bayern.de](mailto:dieter.pressl@zae-bayern.de)

Im industriellen Umfeld stellen mit Abwärme betriebene Absorptionskältemaschinen eine nachhaltige Technologie zur Kältebereitstellung dar. Allerdings können sie heute vielfach nicht eingesetzt werden, da die zum Antrieb erforderliche Abwärme nicht in der richtigen Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort zur Verfügung steht. Dies ist beispielsweise häufig bei Abwärme aus diskontinuierlichen industriellen Prozessen der Fall. Um Absorptionskältemaschinen zukünftig auch mit derartigen, fluktuierenden Abwärmeströmen betreiben zu können, entwickelten wir in einem abgeschlossenen Forschungsprojekt einen Absorptionskältespeicherprozess, bei dem es sich prinzipiell um eine modifizierte Form der Absorptionskältemaschine mit integriertem Speicher handelt. Der Prozess ermöglicht grundsätzlich die zeitliche und/oder örtliche Entkopplung von Abwärmeaufkommen und Kälteleistung. Als Arbeitsstoffpaar und Speichermedium wird H<sub>2</sub>O/LiBr verwendet. Prinzipiell ist die erreichbare Energiespeichererdichte des Prozesses proportional zu der insgesamt realisierten Konzentrationsdifferenz zwischen verdünnter (entladener) und konzentrierter (geladener) Lösung. Die Konzentrationsdifferenz ist folglich im Speicherprozess zu maximieren, um einen kompakten und wirtschaftlichen Speicher realisieren zu können. Auf der einen Seite erfordert dies eine möglichst starke Verdünnung der LiBr-Lösung bei der Absorption, die den Entladevorgang des Speichers darstellt. Hierfür sind spezielle Austauschflächen erforderlich. Auf der anderen Seite muss die LiBr-Lösung beim Beladen möglichst weit aufkonzentriert werden. Um dies zu erreichen, sieht der Prozess vor, einen Großteil der konzentrierten LiBr-Lösung nach der Desorption zu kristallisieren und vor dem Absorptionsvorgang wieder aufzulösen.

Im Rahmen eines Vortrags möchten wir den intendierten Absorptionskältespeicherprozess im Detail vorstellen und erste experimentelle Ergebnisse zur technischen Umsetzbarkeit des Prozesses präsentieren. So konnten wir den Absorptions- und Desorptionsvorgang des Speicherprozesses bereits erfolgreich in einer 10-kW-Versuchsanlage umsetzen. Als Absorber und Desorber kamen dabei horizontale Rohrbündelwärmeübertrager zum Einsatz, die im Vergleich zu Absorptionskältemaschinen mit einem reduzierten spezifischen Lösungsmassenstrom betrieben wurden. Hierfür wurden die Austauschflächen an die Anforderungen des geringen Lösungsmassenstroms angepasst. Erste experimentelle Untersuchungen des Kristallisations- und Wiederauflösungsverhaltens wässriger LiBr-Lösung deuten zudem auf eine gute technische Umsetzbarkeit dieser beiden Teilprozesse hin. Auf Basis dieser Ergebnisse soll der Absorptionskältespeicherprozess in einem zeitnah geplanten Nachfolgeprojekt weiterentwickelt und erstmalig in einer Laboranlage technisch umgesetzt werden.

**Stichwörter:**

Absorptionskältespeicher, Absorptionskältemaschine, thermischer Energiespeicher, Industrie, Abwärme

II.1.07

## Absorptionswärmepumpe zur Brennwertnutzung an Biomasseheizkesseln

### Untersuchungen an Thermosiphon-Desorber und Rieselfilmverdampfer

Tina Hermann<sup>1\*</sup>, Dominik Glöckner<sup>2</sup>, Marco Bauer<sup>2</sup>, Christian Schweigler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CENERGIE Research Center Energy-Efficient Buildings and Districts,  
Munich University of Applied Sciences, 80335 Munich, Germany,  
[tina.hermann@hm.edu](mailto:tina.hermann@hm.edu)

<sup>2</sup> SCHERDEL Energietechnik GmbH, 95615 Marktredwitz, Germany

Der Brennstoffausnutzungsgrad von Hackschnitzelheizkesseln kann durch Abwärmenutzung unter Ausnutzung des Brennwerteffekts je nach Brennstofffeuchte um etwa 20 % gesteigert werden. Bei herkömmlichen Systemen mit Abgaswärmeübertragern wird das Rauchgas durch Wärmeübertrag auf den Rücklauf des Wärmeversorgungsnetzes ausgekühlt. Dabei schränken hohe Rücklauftemperaturen von etwa 50 °C eine Auskühlung unterhalb des Taupunkts des Abgases und somit den Energiegewinn aus der Rauchgaskondensation ein. Die Einbindung einer Absorptionswärmepumpe ermöglicht eine nahezu vollständige Nutzung der Kondensationswärme. Die Rauchgaswärme wird dabei direkt auf das Kältemittel im Verdampfer übertragen, der eine Wärmesenke bei einer Temperatur von etwa 25 °C bereitstellt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird die Kopplung einer Wasser/LiBr Absorptionswärmepumpe mit einem Holzhackschnitzel-befeuerten Heizkessel der Leistungsklasse 50 kW untersucht, der eine Heißwassertemperatur von 95 °C zur Verfügung stellt.

Die Komponenten der Absorptionswärmepumpe wurden unter dem Gesichtspunkt eines minimalen Einsatzes an elektrischer Hilfsenergie entwickelt. Der Lösungsumlauf wird durch den Aufstieg der Sorptionslösung im Desorber, der nach dem Thermosiphon-Prinzip arbeitet, angetrieben. Der Verdampfer ist als senkrechtes Rohrbündel ohne Kältemittelumlauf ausgeführt, so dass auf eine Kältemittelpumpe verzichtet werden kann. Im Beitrag werden die thermo-hydraulische Einbindung der Absorptionswärmepumpe in das Wärmeversorgungsnetz des Heizkessels und die Konzeption der Apparate vorgestellt sowie Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Betriebsverhalten des senkrechten Rieselfilmverdampfers und des Thermosiphon-Desorbers der Versuchsanlage präsentiert.

II.1.08

## Zyklische Wasserverdampfer für Adsorptionskälteanlagen - Herausforderungen eines vereisenden Betriebs

Rahel Volmer<sup>1\*</sup>, Adrian da Silva Moreira<sup>1</sup>, Thomas Nonnen<sup>2</sup>, Gerrit Füldner<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>, Ralph Herrmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Wärme- und Kältetechnik, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[rahel.volmer@ise.fraunhofer.de](mailto:rahel.volmer@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> Fahrenheit GmbH, Zscherbener Landstraße 17, 06126 Halle (Saale), Deutschland  
[Thomas.Nonnen@fahrenheit.cool](mailto:Thomas.Nonnen@fahrenheit.cool)

Wasser ist als Arbeitsmittel in Sorptionsprozessen weit verbreitet und findet vereinzelt auch in der Kaltdampfkompression Anwendung. Wasser ist aufgrund seiner sehr hohen Verdampfungsenthalpie, seiner Umweltfreundlichkeit sowie der breiten und günstigen Verfügbarkeit ein sehr attraktives Arbeitsmittel für Kälteanlagen. Die Anwendung in Kälteprozessen ist bisher deutlich vor allem durch den Gefrierpunkt, aber auch die geringe Dampfdichte limitiert, die im Vergleich zur klassischen Kältetechnik deutlich andere Wärmeübertragungs- und Apparatekonzepte erfordert.

In zyklischer Betriebsweise eines Adsorptionsmoduls wird derselbe Wärmeübertrager als Kondensator und Verdampfer genutzt (Abbildung 1). Das Vorhaben hat die Entwicklung eines Verdampfers zum Ziel, der Sorptionsmodule in zyklischer Betriebsweise für den Betrieb mit Wasser unter 0°C ertüchtigt.

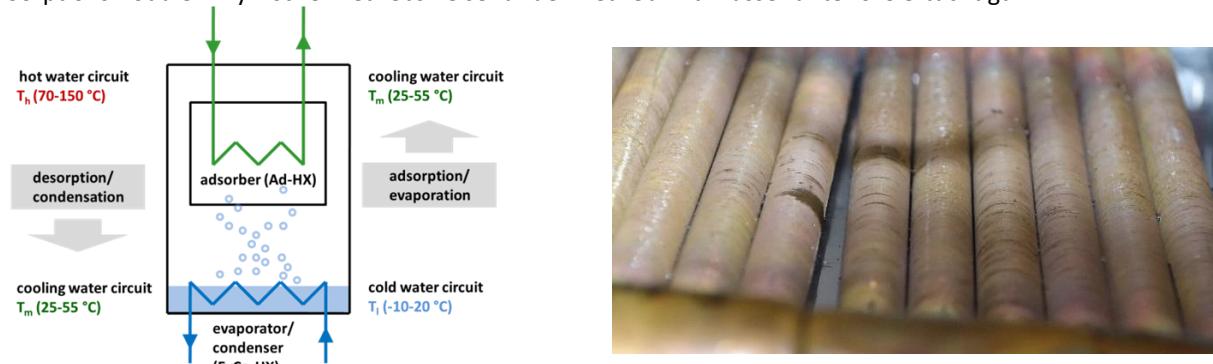


Abbildung 1, links: Schematische Darstellung eines Einkammer-Adsorptionsmoduls. Adsorber und Verdampfer wechseln ihre Funktion zum Desorber und Kondensator durch Änderung der externen Temperaturen. Rechts: Vereister Rippenrohrwärmeübertrager.

In diesem Beitrag werden zyklische Messungen an Wärmeübertragermustern vorgestellt und diese als ver-eisende Verdampfer charakterisiert und bewertet. Die Messungen geben einerseits Aufschluss über das Vereisungsverhalten des aufkondensierten Kältemitteldünnfilms sowie dessen Verteilungsdynamik während des Prozesses. Daraus werden Erkenntnisse über geeignete Wärmeübertrager- bzw. Strukturgeometrien gewonnen. Andererseits findet eine energetische Bewertung des Sublimationsprozesses in Abhängigkeit der Prüflingsgeometrie sowie im Vergleich zum Betrieb über 0°C statt.

**Stichwörter:**

Wasser als Kältemittel, Verdampfung, Adsorption, Sublimation

## II.1.09

### Eisbrei-Erzeugung aus unterkühlten Fluiden

#### Untersuchung von neuen Wärmeübertrager-Materialien in einer realen Anlage

Sebastian Gund\*, Oliver Schmid, Michael Kauffeld

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

[sebastian.gund@h-ka.de](mailto:sebastian.gund@h-ka.de)

[oliver.schmid@h-ka.de](mailto:oliver.schmid@h-ka.de)

[michael.kauffeld@h-ka.de](mailto:michael.kauffeld@h-ka.de)

Die Unterkühlungsmethode hat große energetische Vorteile gegenüber dem Industriestandard, dem Kratzverdampfer. Eine Flüssigkeit wird unter ihren Gefrierpunkt abgekühlt und anschließend direkt Eisbrei erzeugt. Für die großtechnische Anwendbarkeit dieser Methode wurden Faktoren, wie z. B. die Instabilität der Unterkühlung und die geringe erreichbare Unterkühlung verbessert. Diese Faktoren sind hauptsächlich von der Grenzfläche zwischen unterkühltem Fluid und der Substratoberfläche abhängig. Durch die Auswahl geeigneter Substratoberflächen in vorhergehenden Untersuchungen, wie z. B. nichtmetallische sowie amorphe Substratoberflächen konnte sowohl die Stabilität als auch die Unterkühlbarkeit verbessert werden. In dieser Untersuchung werden diese Substratoberflächen auf ihre Stabilität und Unterkühlbarkeit in einer realitätsnahen Anlage untersucht und die Effizienz mit dem Industriestandard verglichen.

**Stichwörter:**

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

### II.1.10

## Systemplattform für Digitale Zwillinge am Beispiel von Wärmepumpen – ein ganzheitlicher Ansatz

J. Seifert<sup>1</sup>, M. Knorr<sup>1</sup>, L. Haupt<sup>1</sup>, P. Seidel<sup>1</sup>, L. Schinke<sup>1</sup>, A. Perschk<sup>1</sup>, S. Wiemann<sup>1</sup>

Th. Hackensellner<sup>2</sup>, S. Kuboth<sup>2</sup> (Glen Dimplex Deutschland GmbH)

S. Borges<sup>3</sup>, F. Wüllhorst<sup>3</sup>, C. Vering<sup>3</sup>, D. Müller<sup>3</sup> (RWTH Aachen)

K. Spreitzer<sup>4</sup>, A. Eggert<sup>4</sup>, C. Grozescu<sup>4</sup>, P. Langner<sup>4</sup> (Viessmann Werke Allendorf GmbH)

<sup>1</sup> TU Dresden, Institut für Energietechnik

[joachim.seifert@tu-dresden.de](mailto:joachim.seifert@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Glen Dimplex Deutschland GmbH

<sup>3</sup> RWTH Aachen

<sup>4</sup> Viessmann Werke Allendorf GmbH

Digitale Werkzeuge zur Planung und Auslegung von energetischen Systemen in der Kälte- und Wärmepumpentechnik sind seit Jahren bekannt und werden erfolgreich in der Praxis eingesetzt. Durch die stetig steigende Rechenleistung rücken vermehrt Werkzeuge in den Fokus, die im Betrieb über den gesamten Lebenszyklus hinweg eingesetzt werden können. Daher sind die digitalen Werkzeuge und die unterliegenden Methoden anzupassen und zu erweitern, um dem zunehmenden Interesse von Herstellern und Betreibern von Kälte- und Wärmepumpenanlagen zu genügen, deren Fokus insbesondere auf der Optimierung von Prozessen im Betrieb (u. A. Betriebsoptimierung, Fehlererkennung, etc.) liegt. Zusätzlich ist vorteilhaft, alle digitalen Werkzeuge in einem Cloud-Plattformsystem zusammenzufassen und jeweils kompatibel für die einzelnen Entwicklungs- und Nutzungsphasen auszuwählen und zu verwenden, um die verfügbare Rechenleistung gewinnbringend zu nutzen.

Im Rahmen der avisierten Veröffentlichung wird eine Systemplattform detailliert beschrieben, die am Beispiel eines Digitalen Zwilling für Wärmepumpensysteme unterschiedliche Modelle für verschiedene Entwicklungs- und Nutzungsphasen der Wärmepumpe beinhaltet. Neben der grundsätzlichen Systemarchitektur und Kommunikationssoftware wird auf die Modellierung des Kältekreislaufes eingegangen. Dabei werden die Vor- und Nachteile ausgewählter TeilmODELLE (z. B. Verdichter, Expansionsventil) beschrieben. Weiterhin werden eine Kalibrierungs- und Validierungsprozedur sowie die Ergebnisse der Validierung anhand von Messdaten dokumentiert. Die Veröffentlichung endet mit einem Fazit und einem Ausblick auf weitere Arbeiten des Forschungsprojektes „Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergietechnik (DZWI) (FKZ: 03EN1022A-D)“, welches die Grundlage dieser Veröffentlichung darstellt.

### II.1.11

## Modellbasierte Analyse einer NH<sub>3</sub>-HTWP in einem Molkereibetrieb

Manuel Verdnik\*, Philipp Wagner, Michael Wernhart, René Rieberer

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

[manuel.verdnik@tugraz.at](mailto:manuel.verdnik@tugraz.at)

Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) ermöglichen Prozesswärmebereitstellung durch das Anheben von Abwärme auf für Prozesswärme erforderliche Temperaturniveaus. Dadurch kann der Energieverbrauch industrieller Prozesse wesentlich gesenkt und durch den verminderten Bedarf an fossiler Wärmebereitstellung eine Dekarbonisierung der Industrie erreicht werden. Insbesondere Prozesse, die gleichzeitig sowohl einen Kälte- als auch Wärmebedarf aufweisen, haben ein großes Potential für den Einsatz von HTWP.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine direkt in den Kältemittelkreis einer NH<sub>3</sub>-Kälteanlage integrierte HTWP betrachtet, welche die Abwärme der Kälteanlage zur Beheizung des Cleaning-in-Place (CIP) Systems einer Molkerei auf einem Temperaturniveau von ca. 90°C nutzbar macht. Der Betrieb der HTWP beeinflusst den Betrieb und den Energieverbrauch der Kälteanlage. Der Einsatz von Speichern ermöglicht das Ausgleichen von Lastspitzen des CIP-Systems.

Kopplungseffekte der Teilsysteme Kälteanlage, HTWP, Speicher und CIP-System wurden anhand eines in Dymola unter Verwendung der TIL-Suite aufgebauten Simulationsmodells analysiert. Dazu wurden – nach einem Abgleich des Simulationsmodells mit Messdaten – unterschiedliche Strategien zum Beladen der Speicher und dem Betrieb des CIP-Systems analysiert.

**Stichwörter:**

R717, Abwärmenutzung, Simulation, Molkerei

### II.1.12

## Vereinfachung von Absorptionskälteanlagen-Modellen

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

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

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

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

Absorptionswärmepumpen und -kälteanlagen (AWPA) können einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten, wenn Wärme aus regenerativen Energieträgern oder Abwärme aus industriellen Prozessen zum Antrieb verwendet wird. AWPA weisen bereits jetzt eine hohe Effizienz auf, die jedoch bei veränderlichen Betriebsbedingungen je nach vorhandenen Stellgliedern weiter gesteigert werden kann.

Zur Optimierung des Betriebsverhaltens von AWPA werden im Forschungsprojekts „Dekarbonisierung der Wärme- und Kältebereitstellung mittels Absorptionswärmepump-Anlagen (DekarbWP)“ vereinfachte AWPA-Modelle entwickelt und zur simulationsgestützten Dimensionierung und Regelung unterschiedlicher Wärme- und Kältebereitstellungssysteme eingesetzt, welche in Anwendungsfällen betrachtet werden (AWPA zur Nutzung von z. B. industr. Abwärme, ...).

Im Rahmen dieses Konferenzbeitrags werden das gemessene Verhalten einzelner Komponenten (z. B. Absorber, ...) einer H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskälteanlage simulationsgestützt analysiert und ausgehend von geometriebasierten Modellen vereinfachte Modellansätze (z. B. UA-Wert-Modelle, ...) präsentiert. Die vereinfachten Modellansätze werden anhand eines Vergleichs von Simulationsergebnissen mit Messdaten bei unterschiedlichen Betriebspunkten bewertet.

**Stichwörter:**

Komponentenmodelle, Modelica, Wasser/Lithiumbromid

### II.1.13

## Betriebsartwechsel in Kälteerzeugungssystemen mit Hilfe einer effizienzorientierten Anlagen- und Systemregelung

Jan Albers<sup>1\*</sup>, Carsten Hausherr<sup>1</sup>, Walther Hüls Güido<sup>1</sup>, Stefan Petersen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT-2, Marchstraße 18, 10587 Berlin, Germany  
[jan.albers@tu-berlin.de](mailto:jan.albers@tu-berlin.de)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Regelung für energieaufwandsoptimierte Kälteerzeugungssysteme zur Primärenergieeinsparung“ (ReKs) ist ein Anlagen- und Systemregler konzipiert worden, um durch aktive Volumenstromregelung bei Absorptionskälteanlagen und durch intelligente Folgeschaltungen verschiedener Betriebsarten (z. B. Absorptions-, Kompressions- und Freikühlbetrieb – AKB, KKB, FKB) die primärenergetische Effizienz von Kälteversorgungssystemen zu verbessern.

Die wesentliche Zielstellung für die Regelung von Kälteversorgungssystemen bestehen darin, eine geforderte Kälteleistung auf einem geforderten Temperaturniveau bereitzustellen. Häufig stehen dazu mehrere Kälteerzeuger mit unterschiedlichen Antriebsarten und unterschiedlichem Teillast- bzw. Effizienzverhalten zur Verfügung. Durch den neu entwickelten Systemregler wird jeweils die optimale Kombination der verfügbaren Kälteerzeuger ausgewählt, um diesen Lastfall mit höchster Effizienz zu decken. In Ergänzung dazu wird beim Wechsel der Betriebsart von Absorptions- auf Freikühlbetrieb und umgekehrt über den Anlagenregler die Kühlwassertemperatur so geregelt, dass sich ein möglichst geringer spezifischer Strombedarf ergibt.

In diesem Beitrag werden die Grundlagen zur Anlagen- und Systemregelung (siehe DVK-2021) in Bezug auf das Zusammenspiel zwischen den beiden Regelungsebenen beim Wechsel der Betriebsarten zwischen AKB und FKB dargestellt. Dieses Zusammenspiel führt einerseits durch die effizienzorientierte Auswahl der Betriebsart (Systemebene) und andererseits durch eine intelligente Umschaltprozedur zwischen den Betriebsarten (Anlagenebene) zu einer insgesamt höheren Effizienz bei der Kälteerzeugung. Die Unterschiede beim Wechsel der Betriebsart von AKB zu FKB mit und ohne Anwendung der neu entwickelten Regelstrategie sowie die dabei erreichte Effizienzverbesserung wird dargestellt. Hierzu werden Messdaten aus mehreren Liegenschaften genutzt, in denen die kombinierte Anlagen- und Systemregelung eingesetzt wird.

#### Stichwörter:

Kältezentralen, Energieeffizienz, modellbasierte Regelung, Erzeugerfolgeschaltungen, Monitoring

### II.1.14

## Entwicklung eines Dampfverdichters

Bojan Kajasa<sup>1</sup>, Steffen Klöppel<sup>1\*</sup>, Maximilian Kriese<sup>1</sup>,  
Martino Köhler<sup>1</sup>, Robert Schaffrath<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),  
Schwenninger Weg 1, 02763 Zittau  
[steffen.kloeppel@dlr.de](mailto:steffen.kloeppel@dlr.de)

Die Bereitstellung von Prozesswärme erfolgt in vielen Industriebetrieben durch Dampf, der durch die Verbrennung fossiler Energieträger erzeugt wird. Bis spätestens 2050 müssen diese durch regenerative Energiequellen ersetzt werden. Dabei bietet sich insbesondere bei Dampfnetzen die Nutzung von Ab- und Umweltwärme, z. B. Solar- oder Geothermie, in Kombination mit einer Dampfverdichtung an.

Industriell und prototypisch verfügbar sind verschiedene Verdichtertypen, die allerdings zumeist nur geringe Druckverhältnisse und damit Temperaturhübe erlauben und aus wirtschaftlichen Gründen meist nur für große Leistungen angeboten werden.

Insbesondere bei kleineren Betrieben mit nur einer Druckstufe des Dampfnetzes ergeben sich Anwendungspotentiale für die Dampfverdichtung unter der Voraussetzung, dass entsprechende Kompressoren zur Verfügung stehen.

Am Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse wird derzeit eine geschlossene Wärmepumpe mit Dampf als Arbeitsmittel aufgebaut. Für diese wird eigens ein Radialverdichter mit hohem Druckverhältnis bei kleinen Volumenströmen entwickelt, der in einer weiteren Entwicklungsstufe bei verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen kann. Zum Erreichen der Prozessparameter werden sehr hohe Umfangsgeschwindigkeiten benötigt, die sowohl eine strukturmechanische als auch aerodynamische Optimierung des Impellers erforderlich machen.

In diesem Vortrag werden die auf dem Markt verfügbaren Verdichtersysteme, mögliche Anwendungsfälle und die Entwicklung des Turboverdichters vorgestellt.

**Stichwörter:**

Hochtemperaturwärmepumpe, Wasserdampfverdichter, Optimierung

II.1.15

### ***Historischer Vortrag***

## **Die Umweltrelevanz historischer (und heutiger) Kältemittel**

**Dipl.-Ing. Jörn Schwarz**

Ice-TeX Ingenieurbüro, Rühlower Damm 36, 17039 Sponholz-Rühlow  
[icetex@web.de](mailto:icetex@web.de)

II.1.16

## **Neue Trends und Entwicklungen bei der Verwendung natürlicher Kältemittel**

**Prof. Dr.-Ing. Paul Kohlenbach**

Berliner Hochschule für Technik, Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin  
[kohlenbach@bht-berlin.de](mailto:kohlenbach@bht-berlin.de)

Der Vortrag berichtet von aktuellen Entwicklungen, Produkten und Forschungsarbeiten im Bereich natürlicher Kältemittel. Es wird ein Querschnittsbericht der Gustav-Lorentzen-Konferenz 2022 in Trondheim/Norwegen präsentiert. Insbesondere das Thema Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit bei Kältemitteln wird diskutiert, weiterhin neue Produkteinführungen im Bereich Propankälteanlagen und -wärmepumpen beschrieben. Der Status bei der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Supermarktanlagen wird berichtet. Neuentwicklungen im Bereich Komponenten und Anlagen werden präsentiert.

**Stichwörter:**

Gustav Lorentzen Konferenz, Kältemittel, CO<sub>2</sub>, Ammoniak, Propan, Nachhaltigkeit, HFO, TFA

II.1.17

## Messergebnisse einer dampferzeugenden Wärmepumpe mit Flash tank

Franz Helminger<sup>1\*</sup>, Johannes Riedl<sup>1</sup>, Alexander Steurer<sup>1</sup>  
Clément Gachot<sup>2</sup>, Florence de Carlan<sup>2</sup>, Yannick Beucher<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> EDF LAB Les Renardières, Département Technologies et Recherche pour l’Efficacité Energétique, Avenue des Renardières – Ecuelles, 77250 Moret Loing et Orvanne, France

Die Wärmerückgewinnung in Industrieanlagen gewinnt aufgrund der Dekarbonisierungsziele zahlreicher Industrieunternehmen zunehmend an Bedeutung. Neben der direkten Wärmerückgewinnung in Form von Wärmeübertragernetzen werden zunehmend industrielle Wärmepumpen in Betracht gezogen, um Niedertemperaturabwärme auf ein für die Nutzung in industriellen Prozess notwendiges Temperaturniveau zu heben.

In der industriellen Energieversorgung dient Dampf als effizientes Medium zur Wärmeübertragung und als Reaktionsmittel. Durch die Steigerung der mit Wärmepumpen möglichen Nutzungstemperaturen in den letzten Jahren können sie auch zur Niederdruckdampferzeugung eingesetzt werden. Es finden sich unterschiedliche Arten von Wärmepumpen zur Dampferzeugung [1–3], vielfach fehlen jedoch Referenzanlagen, da diese Einsatzart von Wärmepumpen neuartig ist. Im H2020-Projekt BAMBOO wurden unterschiedliche Arten theoretisch untersucht und ein Demonstrator, bestehend aus einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe und einem Flash tank-System hergestellt und getestet. [4]

Dieser Beitrag beschreibt die wesentlichen Messergebnisse und Erkenntnisse aus Design und Betrieb des genannten Demonstrators.

### Literaturverzeichnis

- [1] Heaten AS, 1MW HeatBooster: Key product characteristics, <https://www.heaten.com/>, Zugriff am 8. April 2022.
- [2] SPH Sustainable Process Heat, Die Wärmepumpe: Produktbeschreibung, <https://www.spheat.de/>, Zugriff am 8. April 2022.
- [3] F. DI(FH) Helminger, Steam generating heat pumps: Upcoming technology for heat recovery, Nürnberg, 2021.
- [4] J.A. Villanueva, V. Meneghelli, Boosting Industrial Flexibility, <http://bambooproject.eu/>, Zugriff am 8. April 2022.

### Stichwörter:

Industrielle Abwärmenutzung, Dampferzeugung, Industrie-Wärmepumpen

II.1.18

## Untersuchung einer NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Hybrid-Wärmepumpen-Testanlage

Marcel U. Ahrens\*, Khalid Hamid, Ignat Tolstorebrev, Armin Hafner, Trygve M. Eikevik

Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,  
Kolbjørn Hejes vei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen,  
[Marcel.u.ahrens@ntnu.no](mailto:Marcel.u.ahrens@ntnu.no), [Armin.hafner@ntnu.no](mailto:Armin.hafner@ntnu.no)

In diesem Beitrag werden die Funktionsweise und Leistungsanalyse einer neu entwickelten und konstruierten Hybrid-Wärmepumpen-Testanlage (oder auch Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf) vorgestellt.

Die Hybrid-Wärmepumpe kombiniert die Technologien einer Absorptions- und Kompressionswärmepumpe mit einem Arbeitsfluid-Gemisch aus Ammoniak und Wasser als Kältemittel. Die Wärmeübertragung erfolgt bei gleitendem Temperaturlevel und das notwendige Druckniveau und Kompressionsverhältnis sind niedriger im Vergleich zu herkömmlichen Kompressionswärmepumpen mit Reinstoffen, wie Ammoniak. Diese Eigenschaften machen die NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Hybrid-Wärmepumpe für den Einsatz in einer Vielzahl von industriellen Hochtemperaturanwendungen interessant.

Die Testanlage wurde unter Verwendung von Standardkomponenten der Kältetechnik für den Einsatz in industriellen Hochtemperatur-Wärmepumpenanwendungen entwickelt und befindet sich im Labor der NTNU und SINTEF in Trondheim. Die maximale Betriebstemperatur beträgt 180 °C mit einem maximalen Betriebsdruck von 40 bar und einer Wärmeleistung von bis zu 200 kW. Die entwickelte Testanlage ist für die Untersuchung der Systemleistung bei verschiedenen Betriebsbedingungen sowie für die Entwicklung und Erprobung einzelner Systemkomponenten ausgelegt. Der Forschungsschwerpunkt auf Komponentenebene liegt hierbei auf der Auslegung der Wärmeübertragern mit Flüssigkeits-Gas-Mischung und die Entwicklung eines ölfreien Schraubenverdichters mit Flüssigkeitseinspritzung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Funktionsweise der Testanlage erläutert und aktuelle Lösungsansätze für die definierten Forschungsschwerpunkte inklusive bestehender Herausforderungen vorgestellt. Zusätzlich werden Experimente durchgeführt und hinsichtlich definierter Leistungsparameter, wie der erreichbaren Senkenaustrittstemperatur und der Systemleistungszahl (COP), ausgewertet. Anschließend wird das Systemverhalten analysiert und es werden Verbesserungspotentiale für die Weiterentwicklung des Systems identifiziert. Die Ergebnisse werden abschließend dargestellt und diskutiert.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Hybrid-Wärmepumpe, Ammoniak, Wasser

#### II.1.19

## Neue Perspektiven für den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen

Jürgen Voß<sup>1\*</sup>, Dr. Christian Hüttl<sup>2</sup>, Norbert Wenn<sup>2</sup>, Dr. Florian Reißner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siemens Energy, Rheinstraße 100, 45478 Mülheim a. d. Ruhr, Deutschland  
[voss.juergen@siemens-energy.com](mailto:voss.juergen@siemens-energy.com)

<sup>2</sup>Siemens Energy, Freyeslebenstraße 1, 91058 Erlangen, Deutschland  
[norbert.wenn@siemens-energy.com](mailto:norbert.wenn@siemens-energy.com)  
[christian.huettl@siemens-energy.com](mailto:christian.huettl@siemens-energy.com)

<sup>3</sup>Siemens Technology, Freyeslebenstraße 1, 91058 Erlangen, Deutschland  
[florian.reissner@siemens.com](mailto:florian.reissner@siemens.com)

Industrial heat pumps are an efficient and cost-effective solution for the generation of industrial heat. They take up thermal energy from a low-temperature heat source (e.g. waste heat from industries or ambient heat from sea, lake, rivers or geothermal sources) and supply thermal energy at higher temperature to a heat sink.

During the next years, heat supply will be electrified and decarbonized step by step, due to the gradual replacement of fossil-fired heat supply by natural gas, coal and oil. As the electricity generation is also decarbonized further in coming years, heat pumps will have more and more renewable electric energy available to achieve a climate neutral heat supply.

Siemens Energy has a long-term experience with large scale heat pump solutions up to 95°C and 30 MW of heat output per heat pump unit. Several industrial branches need heat pumps with even higher temperatures and heat output. Thus Siemens Energy developed new heat pump solutions and enhanced its heat pump portfolio to very high temperature and larger heat output up to 70 MW in one unit. Industrial steam requirements can be supplied by these heat pumps with or without additional steam compressors.

Heat pump solutions and possible applications for industrial hot water, steam supply and district heating are presented. Furthermore ongoing and future projects of large scale heat pump installations are shown.

**Stichwörter:**

Großwärmepumpe, Hochtemperaturwärmepumpen, Turboverdichter, Industrie, Dampferzeugung

**II.1.20**

## **Studie zu möglichen Arbeitsfluiden bei Hochtemperatur-Wärmepumpen**

**Maximilian Loth<sup>1\*</sup>, Stephan Kabelac<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Deutschland  
[loth@ift.uni-hannover.de](mailto:loth@ift.uni-hannover.de)

Konservative Schätzungen gehen davon aus, dass in den 28 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union etwa 6 % des industriellen Wärmebedarfs von Wärmepumpen bedient werden können, dies entspricht einer Menge von etwa 181 TWh/a. Anders als in Haushalten beginnt ein nennenswerter Anteil dieses Wärmebedarfs aber erst ab Temperaturen von über 100 °C, wodurch trotz der Jahrzehntelangen Erfahrung mit Kompressionswärmepumpen unterhalb von 100 °C sowie der aktuellen F-Gase-Verordnung neue technische Herausforderungen entstehen. Auf der einen Seite wird an neuen Arbeitsfluiden für den klassischen Kompressionskreisprozess geforscht, auf der anderen Seite können angepasste Kreisprozesse mit alten Arbeitsfluiden den neuen Umständen Rechnung tragen.

Diese beiden Ansätze werden vor dem Hintergrund technischer Randbedingungen in Abhängigkeit von Temperaturhub und Senkenaustrittstemperatur für verschiedene synthetische und natürliche Arbeitsfluide sowie Kreisprozesse verglichen. Es zeigt sich, dass der klassische Kompressionskreisprozess weniger durch Kältemittel oder Prozessart, sondern vielmehr durch die Temperaturgrenze des in den Verdichtern typischerweise eingesetzten Schmieröls und dem damit verbundenen geringen Temperaturhub der Wärmepumpe in der Anwendung limitiert ist.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpen, Arbeitsfluide, Kältemittel, Kreisprozesse

**II.1.21**

## **Vermessung von Öl-Kältemittel-Schäumen**

**Katharina Stöckel<sup>1\*</sup>, Riley B. Barta<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik  
[katharina.stoeckel@tu-dresden.de](mailto:katharina.stoeckel@tu-dresden.de)  
[riley.barta@tu-dresden.de](mailto:riley.barta@tu-dresden.de)  
[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

Ölschäumung kann bei allen Kältemittelkompressoren auftreten und unter anderem zu einer mangelhaften Schmierung der Lagerstellen führen. Eine Beschädigung bis hin zum Ausfall des Kompressors ist die Folge.

Ölschäumung tritt unter anderem durch eine plötzliche Druckreduktion insbesondere beim Anfahren des Kompressors auf. Die Stärke der Ölschäumung kann unter anderem von der Kompressorgeometrie beeinflusst werden, jedoch liegt die Grundaffinität der Schaumbildung und die Schaumstabilität in den Eigenschaften von Kältemittel und Öl begründet. Um eine Minimierung der Ölschäumung zu erreichen, werden verschiedene Methoden, bspw. der Einsatz einer Ölsumpfheizung zum Austreiben des Kältemittels aus dem Schmierstoff oder die Verwendung von Antischam-Additiven, angewendet. Somit muss eine Möglichkeit zur Bestimmung der grundlegenden Schaumbildungsaffinität und Schaumstabilität geschaffen werden, um verschiedene Minimierungsmethoden vergleichen zu können.

Mit Hilfe einer speziellen Laborapparatur erfolgt die Untersuchung der Schaumbildungsaffinität und der Schaumstabilität von verschiedenen Schmierstoffen und ausgewählten natürlichen Kältemitteln sowie dem zeotropen Gemisch bestehend aus Dimethylether (DME, RE170) und Propan (R290). Im Zuge der Untersuchungen ist ein Vergleich der Schaumbildung in Abhängigkeit der Schaumentstehung – Druckerhöhung, Druckreduktion und Kältemitteldurchfluss – am Beispiel von Propan und einem Mineralöl erfolgt. Mit der Untersuchung von Schmierstoffen mit und ohne Antischaum-Additiven ist es möglich die Änderung der Schaumeigenschaften in Abhängigkeit von dem verwendeten Additiven zu dokumentieren. Die Untersuchungen erfolgen bei Temperaturen von 10 °C bis 50 °C und einem maximalen Druck von 25 bar.

**Stichworte:**

Thermische Energiespeicherung, Eisbrei, Eisbrei-Erzeugung

**II.1.22**

## **Residual Entropy Scaling Model for Viscosity**

### **A Study for Refrigerants, other Fluids and their Mixtures**

**Xiaoxian Yang<sup>1\*</sup>, Xiong Xiao<sup>2</sup>, Monika Thol<sup>3</sup>, Ian H. Bell<sup>4</sup>, Markus Richter<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Applied Thermodynamics, Chemnitz University of Technology, 09107 Chemnitz, Germany  
[xiaoxian.yang@mb.tu-chemnitz.de](mailto:xiaoxian.yang@mb.tu-chemnitz.de); [m.richter@mb.tu-chemnitz.de](mailto:m.richter@mb.tu-chemnitz.de)

<sup>2</sup> Fluid Science & Resources, School of Engineering, University of Western Australia, 6009 Crawley, Australia  
[xiong.xiao@uwa.edu.au](mailto:xiong.xiao@uwa.edu.au)

<sup>3</sup> Thermodynamics, Ruhr University Bochum, 44780 Bochum, Germany  
[monika.thol@thermo.rub.de](mailto:monika.thol@thermo.rub.de)

<sup>4</sup> Applied Chemicals and Materials Division, National Institute of Standards and Technology,  
Boulder, Colorado 80305, United States  
[ian.bell@nist.gov](mailto:ian.bell@nist.gov)

In our previous work (*J. Chem. Eng. Data* 2021, 66, 3, 1385–1398), a residual entropy scaling (RES) approach was developed to link viscosity to residual entropy using a simple polynomial equation for refrigerants. The present study extends the RES approach to other fluids and their mixtures with refrigerants. More than 68.2% (one time the standard deviation) of the well-selected experimental data agree with the RES model within 3.2% and 8.0% for 124 pure fluids and their mixtures, respectively. With advantageously much less parameters, the RES approach yields similar statistical agreement with the experimental data as the best-selected models implemented in the NIST REFPROP database, the current state-of-the-art for thermophysical property calculations. The present work will be a basis for developing a RES approach for mixtures of refrigerants with lubricants relevant to compressor design. The new model will be implemented in an open source software package.

**Stichwörter:**

Entropy Scaling, Lubricant, Mixture, Multi-Parameter Equation of State, Refrigerant, Viscosity

**II.1.23**

## **Bewertungsmethodik von Ersatzarbeitsfluiden**

### **Ein kombinierter Ansatz aus Technik, Vertrieb und Strategie**

**Benedikt G. Bederna<sup>1\*</sup>, Riley B. Barta<sup>1</sup>, Christoph Wieland<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme, 85748 Garching

Bereits seit Jahrzehnten prägt die Suche nach immer neuen Ersatzarbeitsfluiden für bewährte Kältemittel die Kältemaschinen- und Wärmepumpenbranche. Aktuell hat diese Problematik durch Diskussionen über mögliche Verschärfungen politischer Rahmenbedingungen neue Fahrt aufgenommen. Wenn für Bestandsfluide Alternativen identifiziert werden sollen, ergibt sich meist die Schwierigkeit, dass die vergleichende Bewertung in Abhängigkeit von der gewählten Perspektive sehr unterschiedlich ausfällt. Dies liegt zumeist darin begründet, dass für die Erreichung sowohl ökologischer als auch ökonomischer, technischer und vertrieblicher Zielsetzungen unterschiedliche Prämissen entscheidend sind. Hinzu kommt, dass eine Bewertung der Zukunftsfähigkeit der Kältemittel mit großen Unsicherheiten verbunden ist, da Veränderungen im Preis, in der Verfügbarkeit oder bei den politischen Rahmenbedingungen nur schwer abschätzbar sind. Darüber hinaus ist aktuell der Ausgang wissenschaftlicher Forschungsarbeiten zu Abbau- und Zersetzungsmechanismen von Arbeitsfluiden noch nicht abzusehen. Dies stellt insbesondere Hersteller kältetechnischer Anlagen, welche mittlere und kleine Serien fertigen und auf die Verfügbarkeit eines speziellen Fluides und der passenden Komponenten auf dem Markt angewiesen sind, vor große Herausforderungen.

Aus diesen Gründen wird deswegen eine Methodik zur Bewertung von Ersatzarbeitsfluiden eingeführt, welche sowohl technische, als auch vertriebliche Aspekte berücksichtigt und gleichzeitig langfristig Risiken mit einbezieht. Hierfür wird ein potentieller Absatzmarkt abgeschätzt, welcher als Erwartungswert dient und beschreibt, welcher Anteil der maximal veräußerbaren Anlagen trotz des eingesetzten Arbeitsfluids verkauft werden können. In die technische Bewertung fließen thermodynamische und physikalische Kennzahlen des Arbeitsfluids, Abschätzungen zum technischen Aufwand einer Umrüstung, Kundenprioritäten, sowie Eintrittswahrscheinlichkeiten von politischen und wissenschaftlichen Entwicklungen ein.

Beispielhaft wird diese Methodik an der Suche nach einem neuen Arbeitsfluid für standardisierte ORC-Anlagen zur Abwärmeverstromung illustriert. Verglichen werden dabei, als Alternativen zum Bestandsfluid R-245fa, die Fluide R-1233zd(E), R-1234ze(Z) und R-600. Die Untersuchungen zeigen, dass trotz des technischen Aufwandes und Vorbehalten auf der Kundenseite durch die Unsicherheiten im Bereich der Verfügbarkeit und der politischen Rahmenbedingungen der Erwartungswert für veräußerbare Module mit Butan am höchsten ist.

**Stichwörter:**

Kältemittelvergleich, Organic Rankine Cycle (ORC), Kohlenwasserstoffe, Hydrofluorolefine (HFO), Risiko-management

## II.2.01

# Modellbasiertes Design von Wärmepumpen mit R-454C

## – Leistungs- und Effizienzsteigerung mit Hilfe Thermodynamischer Modelle

Hans-Dieter Küpper<sup>1\*</sup>, Dominic Düing<sup>2</sup>, Arnd Lagies<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Chemours Deutschland GmbH, Dornhofstraße 34, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland

[hans-dieter.kupper@chemours.com](mailto:hans-dieter.kupper@chemours.com)

[dominic.duing@chemours.com](mailto:dominic.duing@chemours.com)

[arnd.lagies@chemours.com](mailto:arnd.lagies@chemours.com)

Getrieben durch Energieeffizienz-Forderungen und gesetzliche Beschränkungen wie die F-Gas Verordnung suchen Wärmepumpen OEM Hersteller nach alternativen Kältemittel Lösungen. HFO basierende niedrig-GWP Kältemittel können helfen, die System Effizienz zu steigern und den Arbeitstemperaturbereich zu erweitern sowie die CO<sub>2</sub> Emissionen zu reduzieren. A2L klassifizierte Kältemittel erlauben einen erweiterten Anwendungsbereich, insbesondere bei sehr niedrigen Quellentemperaturen, bei hoher Anlageneffizienz und bei hohem Sicherheitsniveau.

Der Aufwand für die Anpassung der Wärmepumpe an das einzusetzende Kältemittel kann mit Hilfe von thermodynamischen Modellen wesentlich erleichtert und die Entwicklungszeit dadurch verkürzt werden. Ein neuerlich entwickeltes Modell wird vorgestellt, das hier wesentliche Unterstützung leisten kann.

Neben dem Vergleich verschiedener Parameter werden wesentliche Aspekte bei der Umstellung auf Low GWP HFO Kältemittel beleuchtet, die für eine optimale Nutzung des vollen Potentials dieser Kältemittel notwendig sind. Die durch A2L niedrig-GWP Kältemittel bereitgestellten Vorteile für weite Leistungsbereiche von A/W und B/W Wärmepumpen werden herausgestellt und der Weg zu deren Erreichung aufgezeigt.

### Stichwörter:

A2L, Low GWP, HFO, Kältemittel, Energieeffizienz, CO<sub>2</sub> Reduktion, Sicherheit, Kältemittel-Umstellung, thermodynamisches Modell, Modellierung

## II.2.02

# Neue hocheffiziente Kältemittel für Wärmepumpen

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

<sup>1</sup> Koura, Runcorn, GB

[bob.low@kouraglobal.com](mailto:bob.low@kouraglobal.com)

<sup>2</sup> Koura, Frankfurt am Main

[karsten.schwennesen@kouraglobal.com](mailto:karsten.schwennesen@kouraglobal.com)

Eine wichtige Option für die Dekarbonisierung von Gebäudeheizungen ist die verstärkte Nutzung von Wärmepumpen. Auch in Elektrofahrzeugen sorgen Wärmepumpen für die optimale Nutzung elektrischer Energie.

Die massive Steigerung des Wärmepumpeneinsatzes erfordert neben den zurzeit verwendeten Kältemitteln R-32, R-410A oder R-290 auch Kältemittel mit niedrigem GWP, um trotz des in der F-Gas-Verordnung festgelegten Phase-Downs ausreichend Kältemittel für den Wärmepumpenbetrieb zur Verfügung zu haben. Die Entflammbarkeit von R-290 schließt seine Verwendung in größeren Anlagen aus.

Koura hat daher eine Reihe von Kältemitteloptionen mit geringer oder sogar ohne Entzündlichkeit, GWP-Werten unter 300 bzw. sogar unter 150 und mit hoher Effizienz auch bei hohen Wärmeabgabetermineperaturen, entwickelt.

Über LFR3, eine ternäre Mischung aus R-744, R-1132a und R-32, wurde bereits auf den letzten DKV-Tagungen berichtet. LFR3 hat ein GWP von 140 und hat sich in für R-744 ausgelegten Wärmepumpen als deutlich

effizienter als R-744 erwiesen. In diesem Vortrag werden neue Ergebnisse mit LFR3 in Wärmepumpen für Privathaushalte und Vergleiche mit R-744, R-32 oder R-290 dargestellt.

Ebenfalls gezeigt werden erste Testergebnisse zu Kältemittelentwicklungen mit niedrigerer, mit R-32 und R-407C vergleichbarer, Drucklage.

## II.2.03

### Optimierung der Auslegungen von NH<sub>3</sub>-Verdampfern für Wärmepumpen in der Fernwärme

**Dr. Stefano FILIPPINI – LU-VE Group Technischer Direktor**

LU-VE Group, Via Caduti della Liberazione 53, Uboldo, 21040, Italien  
[stefano.filippini@luvegroup.com](mailto:stefano.filippini@luvegroup.com)

Effiziente Fernwärme- und Fernkältesysteme können eine Schlüsselrolle bei der Verwirklichung der Ziele der Energieunion spielen. Fernwärmesysteme tragen wesentlich zur Reduzierung der Primärenergieversorgung, der Kohlenstoffemissionen und der Kosten bei. Trotz ihrer vielen Vorteile deckt die Fernwärme derzeit nur einen kleinen Teil des gesamten Wärmebedarfs in Europa ab, was bedeutet, dass der größte Teil der Wärme über Heizkessel für fossile Brennstoffe bereitgestellt wird.

Wärmepumpen sind wichtige Systemkomponenten, wenn es um die Bereitstellung nachhaltiger Wärme und die Integration von Energiesystemen in eine klimafreundliche Zukunft geht. Wärmepumpen ermöglichen die Nutzung verschiedener zugänglicher Wärmequellen wie Umgebungsluft, Meerwasser, Grundwasser oder Abwärme aus der Industrie.

Derzeit befindet sich der Einsatz von Wärmepumpen für die FernwärmeverSORGUNG in einer kritischen Phase, in der viele Fernwärmeunternehmen abwarten, ob diese Systeme den Erwartungen des täglichen Betriebs gerecht werden und auch ohne staatliche Unterstützung und Anreize wettbewerbsfähig sind. Effizienz und Zuverlässigkeit sind der Schlüssel für die Verbreitung dieser Systeme in größerem Umfang.

LU-VE war von Anfang an bei der Entwicklung spezieller großer Verdampfer für Fernwärmeanwendungen beteiligt, die NH<sub>3</sub> als Kältemittel verwenden.

Der Beitrag beschreibt im ersten Teil die Hauptprobleme, die das Design eines großen Feldes von Verdampfern für die Anwendung von Wärmepumpen in Fernwärmeanlagen charakterisieren.

Im zweiten Teil wird die F&E-Tätigkeit beschrieben, welche die jüngste Produktentwicklung ermöglicht hat, mit welcher der Energieverbrauch der Verdampfer um 21 % gesenkt werden konnte.

Es wurde ein neues Belüftungskonzept entwickelt und es wurden spezielle experimentelle Tests durchgeführt, um das Design zu bewerten. Die Luftverteilung wurde ebenso verbessert wie die aerodynamische Konfiguration des Lüftungsgehäuses. Mit dieser neuen Entwicklung war es möglich, auch den Geräuschpegel zu verbessern, und eine spezielle Testreihe in einer Akustikkammer bestätigte die vorhergesagten Ergebnisse.

**Stichwörter:**

Stichworte: Verdampfer, Fernwärme, Wärmepumpen, Niedrigenergie

**II.2.04**

## **Absorptionswärmepumpe zur Abwärmenutzung**

### **Modellierung einer Anlage zur Rauchgaskondensation in einem Biomasseheizkraftwerk**

**Philipp Wagner\*, René Rieberer**

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

Zur Verringerung des Energieeinsatzes sowie der Treibhausgasemissionen im Bereich der Raumwärmeverzeugung wird der Ausbau von Fernwärmennetzen und die Erhöhung des Anteils von Wärme aus erneuerbaren Energieträgern (Biomasse, ...) forciert. Zur Steigerung der Brennstoffausnutzung und Reduktion der Abgasverluste von Heiz(kraft)werken können Absorptionswärmepumpen (AWPs) einen wichtigen Beitrag leisten. Dabei wird Wärme auf niedrigem Temperaturniveau aus der Rauchgaskondensation genutzt und auf ein Temperaturniveau angehoben, welches zur Einspeisung in Fernwärmennetze ausreichend ist. Bei nachträglicher Integration einer AWP in ein bestehendes Heiz(kraft)werk kann zudem die Wärmeleistung erhöht werden und gegebenenfalls bei höherem Leistungsbedarf den Bau eines zusätzlichen Wärmeeinspeisers obsolet machen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationsmodell einer Absorptionswärmepumpe basierend auf Kenn- und Messdaten mittels Engineering Equation Solver (EES) erstellt. Der Kreislaufaufbau sowie die getroffenen Annahmen werden diskutiert und ein Vergleich von Kenn- und Messdaten sowie der Simulationsergebnisse wird gezeigt. Darüber hinaus wird das Betriebsverhalten der AWP während eines Betriebsjahres analysiert.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Wasser/Lithiumbromid, Abwärmenutzung

**II.2.05**

## **Flüssigkeitseintrag in Kältemittelverdichter**

### **Vergleich kostengünstiger Messverfahren**

**Miroslav Andjelkovic<sup>\*1</sup>, Franz Joseph Pal<sup>1</sup>, Tobias Pfliehinger<sup>1</sup>, Robin Langebach<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klimate und Umwelttechnik  
[Miroslav.Andjelkovic@h-ka.de](mailto:Miroslav.Andjelkovic@h-ka.de)

Bisher werden Kältemittelverdichter in Standardanlagen – wenn überhaupt – nur auf der Basis kontinuierlicher Messungen von Temperatur, Druck, elektrischen Größen und dem Ölstand im Gehäuse überwacht. Weitere Messgrößen werden aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten für die Sensorik nicht oder nur selten berücksichtigt. Dazu gehören z. B. mechanische Schwingungen oder der Dampfanteil in der Saugleitung. Insbesondere der Eintrag von flüssigem Kältemittel in den Verdichter kann sowohl für kurzfristige Schäden als auch für langfristige Schädigung am Verdichter verantwortlich sein. Dazu gehören die Flüssigkeitsschläge ebenso wie Ölauswaschungen an wichtigen Lagerstellen. Für die Messung des Dampfanteils stehen bisher hauptsächlich kapazitive Sensoren zur Verfügung, die preislich nur für große Kälteanlagen attraktiv sind. Um dieser Situation in entgegenzuwirken, wurden drei Messverfahren zur Erfassung von Flüssigkeit in der Saugleitung des Verdichters untersucht. Dies sind die optische Detektion mittels Kamera und Bilderkennung unter Einsatz von OpenCV, die optische Detektion der Lichtintensität bei Durchleuchtung durch eine Infrarot-Diode und die Änderung der Eigenfrequenz eines Biegebalkens, in Form einer Platine und einem MEMS-Beschleunigungsaufnehmer. Die Ergebnisse zeigen, dass alle drei Messverfahren grundsätzlich in der Lage sind, flüssiges Kältemittel in der Saugleitung mit sehr geringem Aufwand zuverlässig zu detektieren. Als besonders gut geeignet hat sich die optische Erfassung der Lichtintensität durch Durchleuchtung mit einer Infrarot-Diode

erwiesen. Die Verwendung eines Schauglasses mit wenigen elektronischen Bauteilen ermöglicht hier eine sehr gute Erkennung der Phasengrenze und filtert zudem Störereignisse, z. B. durch Maschinenöl, welches die Messstrecke passiert, heraus.

**Stichwörter:**

Kältemittelverdichter, Flüssigkeitseintrag Saugleitung, Detektion, Low-Cost, MEMS, Infrarot, OpenCV

**II.2.06**

## Modellbasierte Analyse von Scroll-Verdichtern

**Jan Christ<sup>1\*</sup>, Fabian Schmid<sup>1</sup>, Konstantinos Stergiopoulos<sup>2</sup>, Stefan Bertsch<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, Corporate Research, Building Systems (CR/AES2),  
Robert-Bosch-Campus 1, 71272 Renningen, Deutschland  
[jan.christ@de.bosch.com](mailto:jan.christ@de.bosch.com), [fabian.schmid4@de.bosch.com](mailto:fabian.schmid4@de.bosch.com)

<sup>2</sup> Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung,  
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[konstantinos.stergiopoulos@igte.uni-stuttgart.de](mailto:konstantinos.stergiopoulos@igte.uni-stuttgart.de)

<sup>3</sup> Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme, Werdenbergstraße 4, 9471 Buchs, Schweiz  
[stefan.bertsch@ost.ch](mailto:stefan.bertsch@ost.ch)

Verdichter sind eine Kernkomponente von Kältemaschinen und Wärmepumpen. Daher ist es für Systementwickler von Vorteil ein gutes Verständnis der Komponente und ihres Verhaltens zu erlangen. Ein in Wärmepumpen mittlerer Größe häufig eingesetzter Typ sind Scroll-Verdichter.

Spezialwissen, wie z. B. die Geometrie der Scrolls, ist zumeist nur den Komponentenherstellern bekannt. Für eine effiziente Bewertung von Verdichtern müssen sich Systementwickler daher auf die begrenzten Daten, die üblicherweise von Herstellern veröffentlicht werden, verlassen.

Es wird ein semi-empirisches Scroll-Verdichtermodell vorgestellt und damit der Einfluss verschiedener physikalischer Effekte in Scroll-Verdichtern auf das Gesamtverhalten der Komponente analysiert und illustriert. Das Modell ist sowohl physikbasiert als auch datengetrieben. Es wird durch Optimierungsalgorithmen auf Basis der vom Hersteller nach EN 12900 zur Verfügung gestellten Leistungsdaten und Angaben im Datenblatt auf einen spezifischen Verdichter angepasst.

Die Analyse ermöglicht ein besseres Verständnis einerseits des Modells und andererseits der Physik in Scroll-Verdichtern. Es wird herausgearbeitet, welche Effekte im Modell berücksichtigt sind und wie es gezielt verbessert werden kann. Das eingesetzte Modell wird außerdem in den Zusammenhang zur bestehenden Literatur gesetzt.

**Stichwörter:**

Scroll-Verdichter, Semi-empirisches Modell, Physikalische Effekte, Data-Science, Kältemittel

## II.2.07

### Ejektoren für Industrie-Kälteanlagen mit R744

Florian Simon<sup>1\*</sup>, Oliver Javerschek<sup>1</sup>, Julian Pfaffl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BITZER Kuehlmaschinenbau GmbH, Application Engineering and Product Performance, Peter-Schaufler-Strasse 3, 72108 Rottenburg-Ergenzingen, Deutschland

[florian.simon@bitzer.de](mailto:florian.simon@bitzer.de)

[oliver.javerschek@bitzer.de](mailto:oliver.javerschek@bitzer.de)

[julian.pfaffl@bitzer.de](mailto:julian.pfaffl@bitzer.de)

Stark steigende Energiekosten, der gemäß F-Gas Verordnung vorgeschriebene schrittweise Ausstieg aus F-Gasen wie R134a, sowie ein gestiegenes Umweltbewusstsein erfordert die Entwicklung und den Einsatz von energieeffizienten, zukunftssicheren Kälteanlagen. Die Anwendungen für CO<sub>2</sub>, ein natürliches Kältemittel mit einem GWP von eins, sind vielfältig und erstrecken sich von der Gewerbekälte bis hin zur Wärmerückgewinnung z. B. für District Heating. Die Energieeffizienz von CO<sub>2</sub>-Anlagen, insbesondere im transkritischen Betrieb, lässt sich hierbei durch den Einsatz von Gasejektoren erhöhen. Der Ejektor nutzt die Energie, die während des Drosselvorgangs eines Expansionsventils dissipiert, um einen Druckhub zu erzeugen und hierdurch den Saugdruck der Verdichter anzuheben. Die vorliegende Arbeit diskutiert, unter Berücksichtigung von Voll- und Teillastbetrieb, die Auslegung und den Betrieb einer CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Gasejektoren im High-Lift-Betrieb an Hand eines industriellen Beispiels. Das System wird hinsichtlich verschiedener Kenngrößen analysiert. Zur Systemauslegung wird eine BETA Version der BITZER CO<sub>2</sub> Auswahlsoftware verwendet. Aufgrund der großen Leistungen werden Ejektoren der HDV Serie sowie neu entwickelte acht Zylinder Verdichter eingesetzt.

#### Stichwörter:

R744, Ejektoren, Energieeffizienz, High-Lift-Anwendungen

## II.2.08

### Überblick über Methoden zum Flüssigkeitseintrag in Hubkolbenverdichter

Franz Joseph Pal<sup>1\*</sup>, Miroslav Andjelkovic<sup>1</sup>, Tobias Pfliehinger<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>2</sup>, Robin Langebach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klimate und Umwelttechnik  
[franz\\_joseph.pal@h-ka.de](mailto:franz_joseph.pal@h-ka.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, BITZER-Professur für Kälte-, Kyro- und Kompressorentechnik,  
Institut für Energietechnik

In der Kompressionskälte nimmt der Verdichter eine zentrale Rolle ein. Er ist typischerweise das Bauteil mit dem höchsten Energieverbrauch in der Anlage. Die Verdichter können bei sachgemäßem Betrieb zuverlässig über Jahre ohne Ausfall arbeiten. Treten Schäden am Kältemittelverdichter im Betrieb auf, stellt sich die Frage nach der Ursache. Eine häufige Ursache bei Designschwächen der Kälteanlage ist der Eintrag von flüssigem Kältemittel in den Verdichter während des Betriebs. Dies ist zum einen der Fall, wenn sich kurzzeitig große Mengen von flüssigem Kältemittel durch den Verdichter bewegen, die bis in den Arbeitsraum vordringen können. Dies zieht Schädigungen an den Ventilen und Dichtungen nach sich, welche häufig kurzfristig zum Ausfall des Verdichters führen. Zum anderen kann es vorkommen, dass immer wieder kurzzeitig kleinere Mengen an flüssigem Kältemittel in den Verdichter vordringen können – etwa in transienten Betriebszuständen beim Anfahren der Maschine oder bei Wechsel der Betriebsbedingungen. Dies hat nicht sofort einen Ausfall der Maschine zur Folge, vielmehr kann es durch unerwünschte Nebeneffekte – etwa durch Auswaschungen des Kältemaschinenöls aus Lagerstellen – zu einer längerfristigen, schleichenenden Schädigung führen. Der Eintrag

von flüssigem Kältemittel in den Verdichter hat daher nicht nur Auswirkungen auf die mechanischen Komponenten des Verdichters, sondern kann sich auch in der Änderung einer Vielzahl von Prozess- und Leistungsparametern zeigen. In Rahmen dieser Veröffentlichung werden die in der Literatur diskutierten Methoden zum gezielten Flüssigkeitseintrag und die damit verbundenen Auswirkungen in Hubkolbenverdichtern hinsichtlich der Umsetzung, ihres Messverfahrens, der eingesetzten Sensorik und der Praktikabilität verglichen. Als Ergebnis ist eine Übersicht mit allen wichtigen Kenngrößen zu den untersuchten Messverfahren erstellt worden. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein neues Konzept für einen Prüfstand zum gezielten Flüssigkeitseintrag an verschiedenen Stellen des Verdichters vorgestellt und diskutiert.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Flüssigkeitsschlag, Flüssigkeitseintrag, Prüfstand, Schwingungen, Zustandsüberwachung

**II.2.09**

## **Verdichterpolynome**

### **Planung von Messungen und Bestimmung der Messunsicherheit**

**Jan Pitz<sup>1</sup>, Michael Sonnekalb<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>KONVEKTA AG, Versuch und Validierung; Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, Deutschland  
[janpitz@konvekta.com](mailto:janpitz@konvekta.com)

<sup>2</sup>KONVEKTA AG, Forschung und Entwicklung, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, Deutschland  
[MichaelSonnekalb@konvekta.com](mailto:MichaelSonnekalb@konvekta.com)

CO<sub>2</sub>-Verdichter wurden gemessen. Aus der Vermessung sollen Verdichterpolynome erstellt werden, die das Betriebsverhalten gut wiedergeben. Um zuverlässige Messergebnisse erhalten zu können, müssen die Messungen anforderungsgerecht geplant werden. Auswirkungen von Messunsicherheiten auf erstellte Polynome müssen berücksichtigt werden.

Nachfolgend wird ein neuartiger Vorschlag zur homogenen, sowie statistisch unabhängigen Verteilung von Stützpunkten zur Erstellung von Verdichterpolynomen innerhalb eines gegebenen Envelope vorgestellt. Eine empirische Untersuchung von Verdichterdaten liefert dabei die Anzahl der mindestens erforderlichen Stützpunkte. Abschließend wird eine einfache Methode zur Bestimmung der Messunsicherheit bei der Erstellung von Verdichterpolynomen vorgestellt. Eigene Messungen verdeutlichen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens.

**II.2.10**

## **Messtechnische Erfassung von Fehlern in Wärmepumpen**

**Tim Klebig \*, Christian Vering, Dirk Müller**

RWTH Aachen, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[tim.klebig@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:tim.klebig@eonerc.rwth-aachen.de)

Brennbare Kältemittel gelten aufgrund hervorragender thermodynamischer Eigenschaften und ihrem geringem GWP bereits als Grundbaustein für die effiziente und nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung. Der sichere und fehlerfreie Betrieb ist entscheidend für die Etablierung der Technologie in Innenräumen. Um die hohe Effizienz auszunutzen und Gefährdungen durch brennbare Kältemittel zu reduzieren, kann einerseits die Füllmenge weitestgehend reduziert werden und andererseits eine messtechnische Erfassung von Fehlerzuständen vorgenommen werden. Besonders im Falle einer Leckage bei geringen Füllmengen bedeutet dies einen vergleichsweise hohen relativen Verlust, wodurch die Leistungsfähigkeit des Kältemittelkreislaufs nicht sichergestellt werden kann. Um die Leistungsfähigkeit zu überwachen und Fehlerzustände frühzeitig zu erkennen, ist die Detektion von Fehlerzuständen Gegenstand aktueller Forschung.

In dieser Arbeit wird ein bereits entwickelter Kältemittelkreislauf mit dem Kältemittel Propan genutzt, um das Potential der Fehlerdetektion systematisch zu erschließen. Als Anwendungsfall dient die Wärmeversorgung von Bestandsgebäuden mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. An dem Prüfstand werden typische, realitätsnahe Fehlerzustände eingestellt und deren Auswirkungen auf den dynamischen Betrieb des Kältemittelkreislaufs analysiert. Betrachtete Fehlerzustände sind neben dem Füllmengenverlust infolge einer Leckage, ein zugesetzter Verdampfer, ein Defekt des Expansionsventils sowie ein defekter Verdichter.

Das Anlagenverhalten wird für den Referenzfall auf Kältekreisebene (Überhitzung, Unterkühlung, COP, Wärmeleistung, elektrische Leistung) charakterisiert. Anschließend werden Fehlerzustände separat voneinander vorgesehen und deren Auswirkungen auf das Regelverhalten und die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe untersucht. Darauf basierend werden Regelalgorithmen entwickelt, die eine automatische Detektion der Fehlerzustände ermöglichen. Außerdem wird die für die Erfassung der Fehlerzustände mindestens notwendige Messtechnik abgeleitet. Versuche zeigen, dass Indikatoren für einen Füllmengenverlust neben Leistungs- und Effizienzeinbrüchen die Größen von Überhitzung und Unterkühlung sind. Im Regelverhalten wirkt sich der induzierte Fehler direkt auf den Stellwert des Expansionsventils aus. Eine Abweichung von dem gemessenen Referenzfall impliziert also die erfolgreiche Detektion des Fehlerzustands. Zum Einsatz in der Praxis kann der vermessene Referenzfall zum Beispiel in einem Kennfeld abgebildet werden, wodurch die Verwendung eines Kennfeldreglers großes Potential für innovative Wärmepumpenregler aufweist.

Durch die frühzeitige Erkennung von kritischen Zuständen (Abweichungen zwischen Kennfeld und Messwert) kann sowohl die Sicherheit im Umgang mit brennbaren Kältemitteln gesteigert werden als auch ein Einbruch der Leistungsfähigkeit oder der Ausfall der Wärmepumpen durch die frühzeitige Einleitung von Wartungsmaßnahmen verhindert werden.

**Stichwörter:**

Fehlererkennung, Natürliche Kältemittel, Füllmenge, Wärmepumpe, Leckageerkennung

## II.2.11

# Analyse der Füllmengenberechnung von Plattenwärmevertragern

Torsten WILL<sup>1,2\*</sup>, Dr.-Ing. Lena SCHNABEL<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Jürgen KÖHLER<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[ift@tu-braunschweig.de](mailto:ift@tu-braunschweig.de)

Aufgrund der F-Gas-Verordnung ist die Reduktion der Kältemittelfüllmenge von Kälteanlagen und Wärmepumpen bereits seit einigen Jahren Schwerpunkt der aktuellen Forschung und weiterhin wichtig, um klimaschädliches Kältemittel einzusparen sowie die Sicherheitsrisiken bei der Verwendung von natürlichen Kältemitteln zu vermindern. Zur Wärmeübertragung zwischen Kältemittel und flüssigen Sekundärmedien werden überwiegend Plattenwärmevertragern eingesetzt, da sie sehr effizient Wärme übertragen und bereits bei geringer Füllmenge ideal arbeiten. Hersteller von Plattenwärmevertragern entwickeln die Komponenten kontinuierlich weiter, um möglichst effizient und mit wenig Arbeitsmedium die Wärme zu übertragen.

Auf Grundlage diverser Labor-Messergebnisse sind drei Plattenwärmevertragern detailliert hinsichtlich der Füllmenge untersucht worden, wobei sowohl die absolute Füllmenge als auch der Füllgrad einbezogen wurden. Es ist ein Clustering des Füllgrades der einzelnen Wärmeübertragern festgestellt worden. Mit der anschließenden Modellierung der untersuchten Plattenwärmevertragern in Modelica erfolgt die weitere Analyse zur adäquaten Beschreibung der Geometrie und des Innenvolumens sowie dem Einfluss des lokalen Wärmeübergangs, von Druckverlusten und von Fehlverteilungen, die für den Zustand des Kältemittels in den Kanälen relevant sind. Einen weiteren Einfluss hat die Geometrie bzw. die Verteilung der eingeschlossenen Volumina zwischen Zu- und Fortläufen sowie dem Bereich der wärmeübertragenden Fläche. Die Ergebnisse der simula-

tiven Analyse der Plattenwärmeübertrager werden präsentiert und daraus notwendige Optimierungen abgeleitet.

**Stichwörter:**

Plattenwärmeübertrager, Füllmenge, Modellierung, Wärmepumpe

**II.2.12**

## **Experimenteller Vergleich von Abtaumethoden**

**Jonas Klingebiel<sup>1\*</sup>, Christian Vering<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>**

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

Lamellenwärmeübertrager werden in zahlreichen Anwendungen wie Lebensmittelkühlung, Klimatisierung und industrieller Prozesskühlung eingesetzt, um einem Zielsystem effizient Wärme zu entziehen. Durch die Interaktion mit feuchter Luft bildet sich unter bestimmten Betriebsbedingungen an den Lamellen des Wärmeübertragers Reif, was zu einer verminderten Effizienz der Gesamtanlage führt. Um die Anlage robust und effizient zu betreiben, muss der Reif durch geeignete Abtaumethoden entfernt werden.

In der Fachliteratur wird die Effizienz einer Abtaumethode mit dem Abtauwirkungsgrad bestimmt. Die ermittelten Abtauwirkungsgrade sind stark abhängig von den Umgebungsbedingungen, dem Anlagenbetrieb, der Geometrie des Wärmeübertragers und dem Zeitpunkt der Abtauinitiierung, sodass die Vergleichbarkeit der Literaturwerte eingeschränkt ist: Für die gleiche Abtaumethode geben Studien Abtauwirkungsgrade zwischen 35 % und 60 % an.

In diesem Beitrag werden weit verbreitete Abtaumethoden an einem einzigen Verdampfer-Prüfling experimentell untersucht, wodurch die oben genannten Einschränkungen eliminiert werden. Neben der Abtauung mittels Kreislaufumkehr (KU), der Abtauung mit elektrischen Heizstäben (EH) wird auch die Warmsole-Abtauung (WS) analysiert. Für die WS werden besonders niedrige Vorlauftemperaturen (10° C / 20° C / 30° C) untersucht, um das Potenzial von Niedrigtemperaturabwärme zu bewerten. Die Versuche werden bei 0 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit sowie bei -7 °C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass KU die höchste Abtaueffizienz zwischen 56 % und 61 % aufweist. WS mit 30 °C Solevorlauftemperatur und EH haben ähnliche Abtauzeiten und Wirkungsgrade zwischen 40 % und 45 %. WS bei 20 °C bzw. 10 °C weisen geringe Abtauwirkungsgrade auf und werden damit als ungeeignet eingestuft.

**Stichwörter:**

Reibbildung, Abtauung, Abtauwirkungsgrad, Experiment, Energieeffizienz

**II.2.13**

## **Das hocheffiziente Ventilatorsystem**

**Patrick Stern**

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Bachmühle 2, 74673 Mulfingen  
[patrick.stern@de.ebmpapst.com](mailto:patrick.stern@de.ebmpapst.com)

Der Systemwirkungsgrad eines motorgetriebenen Ventilators ergibt sich aus der Multiplikation der Wirkungsgrade seiner Einzelkomponenten. Bei einem Ventilator mit EC-Motor sind dies die Komponenten Motor, Kommutierungselektronik und aerodynamische Einheit. Heutige EC-Motoren erreichen je nach Ausführung und Leistung Wirkungsgrade von bis zu 94 %, Kommutierungselektroniken erreichen Wirkungsgrade von bis zu 96 %.

Das größte Potenzial zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Ventilatorsystems liegt im aerodynamischen Teil. Am Beispiel eines Ventilators in Axialbauweise werden wir die Fortschritte bei der Verbesserung des Wirkungsgrades in den letzten Jahren betrachten. Es liegt auf der Hand, dass nicht nur das Ventilatorlaufrad allein für den Wirkungsgrad verantwortlich ist, sondern auch andere aerodynamisch relevante Bauteile wie Düsen, Schutzgitter, Diffusoren oder Leitschaufeln.

Betrachtet man das Ventilatorsystem als Teil einer größeren Einheit, so wird deutlich, dass nicht nur der Wirkungsgrad des Ventilators allein sich positiv auf die Effizienz der gesamten Einheit auswirkt, sondern auch die Luftpelistungseigenschaften eine Rolle spielen. Nehmen wir als Beispiel einen Verdampfer für einen Kühlraum. Ein höherer Wirkungsgrad des Ventilators führt zu einer geringeren Verlustleistung und damit zu einer geringeren Abwärme. Folglich wird weniger Wärme in das Kältesystem eingebracht, so dass weniger Strom für den Kältekreislauf benötigt wird. Darüber hinaus hat eine druckstabile Luftpelistungscharakteristik den positiven Effekt, dass der Verdampfer wesentlich länger betrieben werden kann, bevor eine Abtauung notwendig wird. Das heißt, dass in einer bestimmten Betriebszeit weniger Abtauzyklen notwendig werden und somit die Gesamteffizienz des Kühlgerätes deutlich verbessert wird.

#### II.2.14

## Berechnungstool für R744-Kälteanlagen mit effizienzsteigernden Maßnahmen

Christian Doerffel<sup>1\*</sup>, Riley B. Barta<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden,  
BITZER-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, Dresden, Deutschland  
[christian.doerffel@tu-dresden.de](mailto:christian.doerffel@tu-dresden.de)

Um Kälteanlagen mit dem Kältemittel CO<sub>2</sub> (R744) auch bei Temperaturen der Wärmeabgabe oberhalb der kritischen Temperatur von CO<sub>2</sub> von 31°C zu betreiben ist ein transkritischer Prozess erforderlich. Die damit einhergehende Minderung der Anlageneffizienz kann durch darauf abgestimmte Maßnahmen und Kreislaufgestaltung minimiert werden. Beispielsweise kommen sogenannte Parallelverdichter, Ejektoren, Expansionsmaschinen, externe Unterkühlungseinheiten oder Kombinationen dieser Möglichkeiten zum Einsatz. Diese Varianten wurden an der BITZER-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik der TU Dresden und an einer Testanlage von Viessmann Kältetechnik Ost experimentell untersucht. Dabei konnten u. a. für den transkritischen Betrieb eine Effizienzsteigerung von 25 bis über 50 % experimentell nachgewiesen werden.

Auf dieser Datengrundlage wurde ein Berechnungstool entwickelt, womit der ganzjährige Anlagenbetrieb für die unterschiedlichen Kreislaufschaltungen bei Voll- und Teillast hinsichtlich Energiebedarf, Effizienz und Kosten dargestellt werden kann. Es ermöglicht damit eine individuelle, anwenderfreundliche Anlagenkonzeptionierung für maximal wirtschaftliche oder verbrauchsminimierte Einsatzfälle. In diesem Beitrag werden sowohl Grundlagen des Berechnungstools als auch Ergebnisse für zwei beispielhafte Anwendungsfälle vorgestellt.

### Stichwörter:

R744, Energieeffizienz, Parallelverdichtung, Expander, Ejektor, Software, Teillastbetrieb

## II.2.15

# Sichere Verwendung von brennbaren Kältemitteln in Kaltdampfkompressionsanlagen

Christian Sonner<sup>1\*</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>, Hannes Fugmann<sup>1</sup>

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

Die F-Gas-Verordnung und die daraus resultierende schrittweise Abschaffung von fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFOs) hat zu verstärkten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für alternative Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial geführt. Neben neuen synthetischen Kältemitteln liegt der Schwerpunkt auf natürlichen Kältemitteln wie Kohlenwasserstoffen, Ammoniak und Kohlendioxid.

Im Falle von Leckagen kann sich bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak jedoch ein explosives Gemisch bilden, Ammoniak verursacht eine giftige Atmosphäre und Kohlendioxid kann zu gefährlichen Berstdrücken führen.

Daher ist die Untersuchung von Leckagemechanismen und die Entwicklung von Sicherheitskonzepten von zentraler Bedeutung für die Forschung und Entwicklung von Wärmepumpen und Kältemaschinen. Insbesondere innenaufgestellte Geräte stehen wegen der fehlenden natürlichen Belüftung im Fokus.

In einem ersten Schritt werden neuere Arbeiten zur Bestimmung der Kältemittelverteilung nach einer Leckage, die durch Simulation oder Experiment analysiert wurden, kurz vorgestellt. In einem zweiten Schritt wird auf die Adsorption als Mögliche einer Leckage entgegenzuwirken, eingegangen. So wird eine Studie zum Adsorptionsverhalten des Kältemittels Propan im Falle eines Lecks vorgestellt. Der Schwerpunkt der vorgestellten Ergebnisse liegt in der Bewertung und Auswahl des Adsorptionsmaterials für die Aufnahme des brennbaren Kältemittels Propan. Dazu wurden die Materialeigenschaften bestimmter adsorptiver Materialien charakterisiert und das Adsorptionsgleichgewicht bei verschiedenen Temperaturen und Drücken evaluiert. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse und thermodynamischer Modelle wurde das Sicherheitskonzept unter Laborbedingungen evaluiert. Hieraus wird die allgemeine Funktion mit einem Proof-of-Concept-Aufbau im Labormaßstab demonstriert.

### Stichwörter:

Sicherheit, Propan, natürliche Kältemittel, Kaltdampfkompressionsanlagen, Wärmepumpe, Leckage

## II.2.16

# Ein physikalisch motiviertes Simulationsmodell für Kühlmöbel zum Einsatz in Digitalen Zwillingen

Andreas Schulte<sup>1\*</sup>, Sven Försterling<sup>2</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[andreas.schulte@tu-braunschweig.de](mailto:andreas.schulte@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup>TLK-Thermo GmbH, Rebenring 31, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[s.foersterling@tlk-thermo.de](mailto:s.foersterling@tlk-thermo.de)

Das dynamische Regelverhalten von Kühlmöbeln in einem Supermarkt ist die wesentliche Störgröße für die Leistungsregler der Verbundkälteanlage. Dabei müssen die Leistungsregler kontinuierlich die Störungen durch die Kühlmöbel ausregeln, um den Verdampfungsdruck konstant zu halten.

Das dynamische Verhalten von Kühlmöbeln ist gekennzeichnet von komplexen Wechselwirkungen im Gesamtsystem einer Supermarktkälteanlage. So ist die externe Kältelast der Kühlmöbel nicht nur getrieben von einem

deterministischen Anteil als Folge von Temperatur und Luftfeuchtigkeit, sondern auch von einem stochastischen Anteil in Folge von Kundeninteraktionen. Weiterhin wird die Dynamik wesentlich durch die Kühlstellenregler und das implementierte Regelverhalten beeinflusst. Nicht zuletzt entstehen Wechselwirkungen zwischen den individuellen Kühlmöbeln und Wechselwirkungen zwischen den Kühlmöbeln und den Verdichtern. Simulationsmodelle können dabei helfen diese Wechselwirkungen zu charakterisieren.

Die Erstellung geeigneter Simulationsmodelle für Kühlmöbel ist mit einigen Herausforderungen verbunden. Auf der einen Seite soll das Modell eine hinreichend gute Abbildung der Realität ermöglichen, auf der anderen Seite steigt mit zunehmenden Detaillierungsgrad der Aufwand zu Parametrierung des Simulationsmodells. Ein besonders herausfordernder Bereich, ist die Erstellung von Simulationsmodelle für Digitale Zwillinge. Um eine großflächige Anwendbarkeit der Digitalen Zwillinge im Supermarkt zu gewährleisten, müssen die Simulationsmodelle möglichst automatisiert erstellt und aus Monitoringdaten parametriert werden können.

Digitale Zwillinge in Form von Simulationsmodellen eröffnen die Möglichkeit neue digitale Dienstleistungen für Supermärkte anzubieten. Dabei reichen die möglichen Dienstleistungen von Benchmarking und Entscheidungsunterstützung bis zur virtuellen Inbetriebnahme eines Supermarktes. Des Weiteren besteht großes Potential für die Forschung und Entwicklung. Insbesondere in der Erforschung neuer Betriebs- und Regelstrategien.

In dieser Arbeit wird die Implementierung eines Kühlmöbelmodells für den Einsatz in Digitalen Zwillingen, in der Modellierungssprache Modelica, vorgestellt. Das Modell ist in der Lage die Dynamik realer Kühlmöbel, inklusive aller für die Kälteanlage relevanten Interaktionen abzubilden. Dabei wird das thermische Verhalten des Kühlmöbels auf Basis eines thermischen Netzwerkes abgebildet. Die Modellparameter können aus Monitoringdaten identifiziert werden. Die Vorteile und Grenzen des Modellansatzes werden diskutiert.

**Stichwörter:**

Kühlmöbel, Supermarkt, Digitaler Zwilling, R744

**II.2.17**

***Historischer Vortrag***

**Geschichte der lamellierten Wärmeübertrager-Hersteller  
in Deutschland**

Dipl.-Ing. Roland Handschuh

Refplan Ingenieur-Büro, Hohenschäftlarn

**II.2.18**

**Effizienzorientierte Speicheraktivierung zur energetischen und  
betrieblichen Verbesserung von Kälteversorgungssystemen**

**Stefan Petersen\*, Walther Hüls Güido, Carsten Hausherr, Jan Albers**

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

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

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

Im letzten Projekt- und Betriebsjahr des Demonstrationsvorhabens „Regelung für energieaufwandsoptimierte Kälteerzeugungssysteme“, kurz ReKs, FKZ: 03ET1583, gefördert durch das BMWK, wird der Systemregler seit Ende 2021 in verschiedenen Installationen zur Regelung eingesetzt und übernimmt dabei in unterschiedlichen Tiefen und Umfängen die Aufgaben der bisherigen übergeordneten Leittechnik hinsichtlich der effizienzorientierten Folgeschaltung vorhandener Kälteerzeuger. Der neue Systemregler reduziert den Betriebsener-

gjeeinsatz einer Kältezentrale indem er den Stand der Technik, die Aufteilung der Kälteerzeuger in Grund- und Spitzenlastanlagen, ersetzt und zu jedem Zeitpunkt die Effizienz der unterschiedlichen Erzeuger prognostiziert und den Einsatz dynamisch an die konkrete, situationsabhängige Effizienzfähigkeit jedes Erzeugers koppelt.

In den Beiträgen der TU Berlin zur DKV Tagung 2021 wurden die Potentiale und die theoretische Arbeitsweise eines neuartigen Systemreglers vorgestellt. Im aktuellen Beitrag ist der Fokus auf den Herausforderungen, der Implementierung und dem Nutzen verschiedener Speicherbetriebskonzepten.

Neben der effizienzorientierten Folgeschaltung der Erzeuger kann der Systemregler einen vorhandenen Speicher sowohl als Erzeuger, als auch als Last einbinden. Für die Erzeuger hat das mehrere attraktive Folgen:

- Taktzeiten verlängern, bzw. schnelle, häufig ineffiziente Taktung verhindern,
- Betrieb bei maximaler Effizienz der Erzeuger zu verlängern (sowohl im Be- als auch im Entladebetrieb des Speichers),
- Häufig ineffizienten Schwachlastbetrieb der Erzeuger verhindern.

Neben der klassischen, passiven Be- und Entladung von Kaltwasserspeichern, bei Pendelspeichern durch die (im Auslegungspunkt definierte) Differenz der Erzeuger- und Verbrauchervolumenströme, bei Trägheitsspeichern durch Verlängerung der Betriebszeit der Erzeuger und deren Betriebspausen, kommt im Projekt zur Be- und Entladung der Kaltwasserspeicher eine aktive, dynamische Regelung der Erzeugervolumenströme zum Einsatz. Unter bestimmten Voraussetzungen kann dies ergänzt werden, um eine Absenkung der Kaltwassersollwerte der Erzeuger gegenüber des zentralen Kaltwassersollwert. Dadurch wird eine signifikante Erhöhung der Speicherkapazität erreicht, da diese in der Regel in Kaltwassersystemen wegen der geringen Netzspreizung stark limitiert sind.

Betriebsergebnisse realer Kältezentralen aus verschiedenen Liegenschaften, darunter Rechenzentrumskühlung, Gewerbekühlung und die Kälteversorgung eines Kongress- und Veranstaltungszentrums werden vorgestellt. Durch den Einsatz des Systemreglers auch in Verbindung mit Kältespeicherbe- und -entladungsarten können so bis zu 30 % an Betriebsenergie gespart werden. Bei Systemen, deren einzelne Erzeuger mindestens zum Teil noch nicht im Effizienzoptimum ihrer Technologieart laufen, kann diese Einsparung durch Substitution der weniger vorteilhaften Anlagen oder Betriebszustände auch deutlich über 30 % liegen, was an ausgewählten Beispielen gezeigt wird.

**Stichwörter:**

Kältezentralen, Energieeffizienz, Regelung, Speicher, Monitoring, Konzepte, Entwicklung

**II.2.19**

## Multipack-Anwendung mit halbhermetischen Ammoniak-Verdichtern

Ron Hoffmann, Ole Fredrich

GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Straße 165, 13509 Berlin  
[Ron.Hoffmann@gea.com](mailto:Ron.Hoffmann@gea.com)

Noch vor einigen Jahren gab es eine eindeutige Trennung zwischen der kommerziellen und der industriellen Kältetechnik. Durch zunehmend schärfere Umweltauflagen und steigende Nachfrage nach energieeffizienten Systemen findet Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) als Kältemittel vermehrt einen Platz im Bereich der semi-industriellen Kältetechnik. Ammoniak ist aufgrund des geringen Treibhauspotentials und der verhältnismäßig großen Verdampfungsenthalpie aus vielen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Für den Umstieg auf natürliche Kältemittel benötigen die Aggregate- und Anlagenbauer Komponenten, die durch eine geringe Komplexität die Handhabung und deren Implementierung vereinfachen.

Am Beispiel einer Multipack-Anwendung wird gezeigt, wie halbhermetische Verdichter den Umstieg auf natürliche Kältemittel in kommerziellen Anwendungen vereinfachen können. Dabei wird auf die Vor- und Nachteile einer semi-hermetischen Lösung im Vergleich zu einer offenen Aufstellung eingegangen, sowie die Effizienzpotentiale eines halbhermetischen Verdichters mit Wurzeln aus der Industrietechnik aufgezeigt.

**Stichwörter:**

natürliche Kältemittel, Multipack-Anwendungen, halbhermetische Verdichter, Ammoniak

II.2.20

## Kostengünstiges Monitoring des Betriebsverhaltens von Rückkühlern

Alexander Morgenstern <sup>\*</sup>, Björn Nienborg

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg  
[alexander.morgenstern@ise.fraunhofer.de](mailto:alexander.morgenstern@ise.fraunhofer.de)

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik KETEC wird am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE das Betriebsverhalten von Rückkühlern untersucht. Hierfür erfolgten der Aufbau und die Inbetriebnahme eines kostengünstigen, nicht-intrusiven Monitoringsystems. Neben den meteorologischen Randbedingungen Temperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit werden Durchfluss und Temperaturdifferenz am Rückkühlerkreis mittels Clamp-on Sensorik gemessen. Als weitere Parameter werden die elektrische Stromaufnahme der Ventilatoren sowie der Differenzdruck über dem Wärmeübertrager des Rückkühlers erfasst. Die Möglichkeit der optischen Erfassung des Verschmutzungszustands der Wärmeübertrageroberfläche mittels Kamera bietet eine Zusatzinformation.

Der erste Test des Messsystems an einem Rückkühler des Fraunhofer ISE liefert seit einigen Monaten zuverlässige Daten. Durch den Abgleich der erfassten Parameter mit den Daten der Gebäudeleittechnik sowie aus einer Vergleichsmessung mit teurer hochpräziser Messtechnik wurde die Datenqualität erfolgreich überprüft. Da für die Beurteilung des Betriebsverhaltens der Rückkühler relative Änderungen der Messdaten genutzt werden, ist hier keine hochpräzise Messung der Absolutwerte notwendig und der kostengünstige Ansatz kann weiterverfolgt werden.

Aktuell ist geplant, das Monitoringsystem an zwei weiteren Rückkühlern im Raum Freiburg zu installieren, um in den folgenden Monaten Messdaten an unterschiedlichen Standorten zu erfassen. Ziel der Untersuchungen ist es dabei, Effekte und ihre Auswirkungen auf die Effizienz der Rückkühlung durch die zunehmende Verschmutzung der Wärmeübertrager zu erkennen. Aus den Messdaten sollen anschließend Strategien zur Optimierung des Betriebsverhaltens abgeleitet werden. Die Messdaten des Monitoringsystems werden von den jeweiligen Standorten per Mobilfunknetz in eine Datenbank übertragen. Auf einer Webseite werden die Daten dann mittels Grafana visualisiert. Dies bietet ebenfalls für die Anlagenbetreiber eine komfortable Möglichkeit zur Betriebsüberwachung.

Im Tagungsbeitrag wird einerseits das Messsystem vorgestellt, andererseits erfolgt die Präsentation der Ergebnisse des Monitorings der Rückkühler an den realen Standorten.

II.2.21

## Bestimmung des EER und SEER mit der Sensitivitätsanalyse

unter Berücksichtigung der Temperatur und Feuchte im Standortvergleich zwischen München, Düsseldorf und Wittmundhaven

Frank Meyer zur Heide

Puls + GmbH, Windmeierweg 4, 32758 Detmold  
[mzh@de-tec.net](mailto:mzh@de-tec.net)

Die zweistufige adiabatische Kühlung ermöglicht besonders in den Sommermonaten ein behagliches Raumklima ohne klassische teure Kompressions- oder Klimakälte und spart bis zu 80 % der Energiekosten und 90 % der CO2-Emissionen ein. Somit kann das System einen erheblichen Beitrag zur Behaglichkeit in großen Räumen,

zur Prozess- und Arbeitssicherheit und zur Erreichung unserer europäischen Klimaziele leisten. Leider findet das Thema in der Fachausbildung keine oder nur untergeordnet eine Rolle.

Mit einem Kubikmeter Wasser rund Kilowatt Kälte erzeugt werden. Hier sind bei klassischer Kompressionskälteanlagen 200-300 Kilowattstunden Strom erforderlich. Da das System mit einem hohen Anteil an Frischluft arbeitet, ist die effektive Kühlleistung von der Lufttemperatur und der Luftfeuchte abhängig.

Die Außenluftbedingungen schwanken je nach Jahreszeit oder Standort sehr stark. Im Vortrag werden diese Faktoren erörtert und die Standorte München, Düsseldorf und Wittmundhaven gegenübergestellt und das Intrcooll System von OXYCOM mit herkömmlichen Kompressionskälteanlage mit den Kältemitteln R410A und R134a verglichen.

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

## II.2.22

### **Adiabatische Vorkühlung des Gaskühlers von R744-Anlagen – wo und wann ist dies sinnvoll, Erfahrungen, Potential?**

#### **Diskussionsrunde**

## II.2.23

### **Alterungsmechanismen von Haushaltskältegeräten**

**Andreas Paul<sup>1\*</sup>, Elmar Baumhögger<sup>1</sup>, Andreas Elsner<sup>1</sup>, Michael Reineke<sup>1</sup>, Tina Kasper<sup>1</sup>,  
Jadran Vrabec<sup>2</sup>, Christian Hüppe<sup>3</sup>, Rainer Stamminger<sup>3</sup>, Heike Hölscher<sup>4</sup>, Ragnar Stoll<sup>4</sup>,  
Hendrik Wagner<sup>4</sup>, Ulrich Gries<sup>5</sup>, Wolfgang Becker<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, Universität Paderborn,  
Warburger Straße 100, 33098 Paderborn, Deutschland  
[andreas.paul@uni-paderborn.de](mailto:andreas.paul@uni-paderborn.de)

<sup>2</sup> Fachgebiet Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik, Technische Universität Berlin,  
Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin, Deutschland  
[vrabec@tu-berlin.de](mailto:vrabec@tu-berlin.de)

<sup>3</sup> Institut für Landtechnik - Haushalts- und Verfahrenstechnik, Universität Bonn,  
Nussallee 5, 53115 Bonn, Deutschland  
[stamminger@uni-bonn.de](mailto:stamminger@uni-bonn.de)

<sup>4</sup> BASF Polyurethanes GmbH, Elastogranstr. 60, 49448 Lemförde, Deutschland

<sup>5</sup> Secop GmbH, Mads-Clausen-Str. 7, 24939 Flensburg, Deutschland

<sup>6</sup> BSH Hausgeräte GmbH, Robert-Bosch-Str. 100, 89537 Giengen an der Brenz, Deutschland

Die für die Berechnung des Energieeffizienzindex von Haushaltskältegeräten benötigten Parameter werden durch Norm-Messungen im Neuzustand der Geräte bestimmt. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass durch verschiedene technische Alterungsmechanismen der Energieverbrauch über eine Produktlebensdauer von 18 Jahren um bis zu 33 % zunehmen kann. Ziel des vom BMWi geförderten Projekts ALGE war es, die verschiedenen Ursachen und Einflussgrößen für die Alterung von Haushaltskältegeräten zu ermitteln und eine Alterungsfunktion zu bestimmen, die den zeitlichen Verlauf des zunehmenden Energieverbrauchs beschreibt.

In diesem Projekt wurde das Alterungsverhalten von Haushaltskältegeräten durch 100 Normenergieverbrauchsmessungen an 31 real gealterten Geräten untersucht. Aus den gewonnenen Ergebnissen konnte eine Alterungsfunktion bestimmt werden, die den Anstieg des Energieverbrauchs beschreibt. Alle untersuchten Geräte wurden an der Universität Paderborn im Neuzustand vermessen und nach einer Laufzeit von bis zu 21 Jahren erneut geprüft. Bereits nach einem zweijährigen Betrieb konnte ein Mehrverbrauch von bis zu 11 % festgestellt werden. Bei einer durchschnittlichen Produktlebensdauer von Haushaltskältegeräten von ca. 16 Jahren steigt sich der Energieverbrauch um durchschnittlich 27 %.

Des Weiteren wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Systemkomponenten, wie Isolierung und Verdichter, hinsichtlich ihres Alterungsverhaltens untersucht. Bei dem im Gehäuse als Isolierung verwendeten PUR-Schaum konnte über einen Zeitraum von 31 Monaten ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von 19,5 W/(m·K) auf 24,5 W/(m·K) festgestellt werden. Zur Untersuchung der Alterung der Verdichter wurden zuvor auf einem Kalorimeterteststand vermessene Verdichter in Geräte eingebaut. Nach einem zweijährigen Betrieb wurden diese Verdichter wieder ausgebaut und erneut vermessen. Hierbei konnte keine Änderung des COP festgestellt werden. Darüber hinaus wurde der Einfluss des Verbraucherverhaltens analysiert. Hier zeigte sich, dass bis zu 33 % des Gesamtenergieverbrauchs nach einer mehrjährigen Nutzungsdauer verbraucherinduziert sein können.

III.01

## Green Deal, Taxonomie, ESG....: Nur Schlagworte oder tatsächlich ein Systemwandel?

Andrea Voigt

Danfoss Climate Solutions, Strategy & Sustainability, Nordborgvej 81, 6430 Nordborg

[Andrea.voigt@danfoss.com](mailto:Andrea.voigt@danfoss.com)

Der Green Deal der EU verankert Klimaneutralität bis 2050 im Gesetz und ist weltweit das wahrscheinlich umfassendste Regelwerk, um dem Klimawandel Einhalt zu gebieten, die Umwelt zu schützen und trotz allem oder gerade deswegen neue Möglichkeiten für die europäische Wirtschaft zu eröffnen. Zu den bekanntesten Maßnahmen zählen die Richtlinien für Gebäudeeffizienz, Energieeffizienz und Erneuerbare Energien. Natürlich auch der Emissionshandel und die F-Gase Verordnung, und noch einige mehr. Wie aber hängt all das zusammen? Katapultiert uns der Green Deal tatsächlich an die Spitze der Weltwirtschaft, oder ist eher das Gegenteil der Fall? Was hat es mit der sogenannten „Taxonomie“ auf sich – dem „grünen Finanzsystem“ der EU, das es Investoren erleichtern soll, Gelder nachhaltig anzulegen. Was verbirgt sich hinter dem neuen Schlagwort „ESG“, das sich inzwischen fast jedes große Unternehmen auf die Fahne schreibt? Dieser Vortrag spannt den Bogen vom Green Deal über die konkreten Auswirkungen auf die Kälte-Klimabranche bis hin zur Finanzierung mit dem Ziel, Bewusstsein zu schaffen für die neuen strategischen Herausforderungen für Unternehmen in Europa und im weltweiten Kontext.

III.02

## Elektronische Planungshilfe zur SN EN 378, Teile 1 und 3

Rolf Löhrer<sup>1\*</sup>, Silvan Steiger<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Schweizerischer Verband für Kältetechnik, Vorsitzender technische Kommission,  
Eichistrasse 1, CH-6055 Alpnach Dorf, Schweiz  
[tk@svk.ch](mailto:tk@svk.ch)

<sup>2</sup> Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering,  
Technikumstrasse 9, CH-8400 Winterthur, Schweiz  
[silvan.steiger@zhaw.ch](mailto:silvan.steiger@zhaw.ch)

Die EN 378 definiert für Kältesysteme unter anderem die Anforderungen an die maximale Kältemittelfüllmenge und die Sicherheitsausstattungen. Die zu treffenden Massnahmen sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Umsetzung der Norm ist anspruchsvoll und zeitintensiv. In einzelnen Bereichen lässt sie Interpretationsspielraum, welcher oftmals zu Fragen und Unsicherheiten führt. Bekannterweise ist die Anwendung der EN 378 freiwillig. Da sie jedoch fast immer Gegenstand von Werkverträgen ist und im Schadensfall auch als Stand der Technik herangezogen wird, hat dieses Regelwerk in der Branche Gesetzescharakter. Die Handhabung und rechtliche Einordnung der Norm ist teilweise auch für versierte Fachleute schwierig. Manche Akteure sind bei der Umsetzung der Norm verunsichert und treffen dadurch schwer nachvollziehbare Entscheide.

Die elektronische Planungshilfe zur SN EN 378, Teile 1 und 3 soll Unklarheiten beseitigen sowie die Anwendung der Norm vereinfachen. Gespeist mit den nötigen Daten zeigt die Planungshilfe auf einen Blick, ob der Einsatz einer Kältemaschine oder Wärmepumpe zulässig ist. Die farbliche Darstellung der Tabellen C.1 und C.2 nach SN EN 378-1 sowie die fortlaufende Neuberechnung lässt schnelle Variantenvergleiche zu. Erstellte Berechnungen können in Projekten gespeichert werden und sind so jederzeit wieder abrufbar. Mit der Planungshilfe lassen sich Reports erstellen. Diese geben neben der Bewertung nach SN EN 378 auch Auskunft zu schweizerischen Gesetzen und Richtlinien, welche die Norm teilweise übersteuern. Sogenannte Tooltips geben Hilfestellungen zu den Programmelementen und legen Interpretationsspielräume klar offen. Somit haben User alle nötigen

Informationen, um Entscheidungen zu treffen, gleichzeitig wird damit eine Vereinheitlichung im Umgang mit der Norm angestrebt.

Durch den serverbasierten Aufbau wird sichergestellt, dass alle User stets mit der aktuellen Normversion arbeiten. Schlussendlich sollen nicht nur Kältefachleute, sondern auch Vollzugsbehörden die Planungshilfe in ihrer täglichen Arbeit nutzen, was den Bewilligungsprozess beschleunigt.

Im Vortrag geben die Autoren einen Einblick in die Entwicklung der Planungshilfe und demonstrieren diese live.

**Stichwörter:**

EN 378, Planungshilfe, SVK, Norm

III.03

### ***Historischer Vortrag***

#### **Kältetechnische Meilensteine im Supermarkt**

**Bernd Heinbokel**

Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH, Sürther Hauptstraße 178, 50999 Köln  
[bernd.heinbokel@carrier.com](mailto:bernd.heinbokel@carrier.com)

III.04

#### **Praxiserfahrungen mit Schallmessungen an technischen Anlagen mit konstanten Schallemissionen**

**Dr.-Ing. Yves Wild, Gerd Schröder, M.Sc.**

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

Schallemissionen von Kälteanlagen, Wärmepumpen, Lüftungsanlagen, Rückkühlern etc. sind immer wieder Gegenstand von Diskussionen. Verschiedene technische Regelwerke enthalten Angaben zu maximal zulässigen Schallpegeln im Freien (TA Lärm) oder in Innenräumen (z. B. DIN EN 16798-1:2022-03 oder DIN 4109). Die hierin genannten Grenzwerte sind oft recht niedrig und sind in der Praxis daher häufig schwierig zu messen, da sich Störgeräusche durch Menschen, Tiere, Verkehr etc. kaum vermeiden lassen. Die zu messenden Schall- emissionen der genannten Anlagen sind dabei meist relativ konstant und stellen eine Art Grundrauschen dar.

In dem Vortrag wird ein praxisnahes Verfahren vorgestellt, mit dem sich solche Schallmessungen dennoch relativ einfach und zuverlässig durchführen lassen. Darüber hinaus wird auf einige der technischen Regeln sowie die Bewertung der Messergebnisse eingegangen.

**Stichwörter:**

Schallemissionen, Messung

### III.05

## Ultratieftemperatlagerung bis -110°C mit natürlichen Kältemitteln

**Manuel Mayr**

KTI-Plersch Kältetechnik GmbH, Carl-Otto-Weg 14/2 88481 Balzheim  
[Manuel.mayr@kti-plersch.com](mailto:Manuel.mayr@kti-plersch.com)

Zur Lagerung von pharmazeutischen Erzeugnissen wie der neuesten Generation der mRNA Impfstoffe oder von Medizinprodukten wie Blut- und Plasmaproben werden gekühlte Lagerräume mit Temperaturen von üblicherweise -70°C/-80°C benötigt. Zwischen -60 und -90 °C ist die optimale Temperatur, um den Covid-19-Impfstoff Comirnaty des Mainzer Pharmaunternehmens BioNTech bis zu einem halben Jahr zu lagern.

Aufgrund der tiefen Temperaturen kommen nur wenige Kältemittel für diese Anwendung in Betracht. Trotz eines GWP von 14800 ist das Kältemittel R23 noch immer von den Verwendungsverboten der F-Gase-VO 517/214 ausgenommen. Aufgrund der höchst klimaschädlichen Wirkung dieses Kältemittels und der zunehmenden Sensibilität von Unternehmen im Hinblick auf ihre gesellschaftliche Verantwortung ist davon auszugehen, dass sich zukünftig immer mehr Betreiber von Ultratieftemperaturlagern für neue Lösungsansätze interessieren werden.

Die KTI-Plersch Kältetechnik GmbH bietet seinen Kunden seit Kurzem eine alternative Lösung für die Tieftemperatlagerung bis -110°C an, unter Einsatz von ausschließlich natürlichen Kältemitteln. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Refolution Industrikälte GmbH, sowie der Secon GmbH und Mirai Intex s.r.o. ein Plug and Play Konzept eines Ultratieftemperaturlagers in einem Standard 40" Seefracht-Container realisiert. Der Lagerraum wird durch eine Kaltluftkältemaschine (R729 „Luft“) im offenen Kreislauf gekühlt. Es befindet sich kein klassischer Verdampfer im Lagerraum. Dem Lagerraum vorgeschaltet ist eine aktiv gekühlte Luftschieleuse, deren Temperatur bei -20°C konstant gehalten wird. Die wassergekühlte Kältemaschine R729 und die wassergekühlte subkritische R744 Kältemaschine sind in einem separaten Maschinenraum im Container untergebracht. Alle Antriebe sind drehzahlgeregelt für höchste Ansprüche an die Temperaturgenauigkeit.

Weitere hervorragende Merkmale sind die Ausführung der Isolierung mit Edelstahl-Sandwichpaneelen, die mechanische Abtauung des „SnowCatchers“ im Lagerraum ohne zusätzlichen Wärmeeintrag/Beeinträchtigung der Lagerraumtemperatur, sowie das Sicherheitskonzept mit Totmann-Schaltung.

Mit diesem Konzept steht eine umweltfreundliche, verlässliche und mobile Lösung für die Ultratieftemperatlagerung bis -110°C mit ausgereifter Technik zur Verfügung.

### III.06

## Kältetechnik in der Pharmaindustrie

### Herausforderungen im Zuge der Corona-Pandemie

**Dipl.-Ing. (FH) Christoph Wiemer**

L&R Kältetechnik GmbH & Co. KG, Hachener Str. 90a-c, 59846 Sundern  
[C.Wiemer@lr-kaelte.de](mailto:C.Wiemer@lr-kaelte.de)

Die Corona-Pandemie hat Vieles verändert und außerdem zum Umdenken in einigen altbekannten Anwendungen bewegt.

Wurde die Lieferkühlkette von Arzneimitteln und Impfdosen technologisch bisher eher stiefmütterlich behandelt, stiegen während der Pandemie die Ansprüche an Qualität und Quantität bei Transport und Lagerung enorm an.

Das bisher übliche Verfahren der Logistik mit Trockeneis ( $\text{CO}_2$ ) in der Kühlbox und die Lagerung in Labor-Tiefkühlschränken wurde mehr denn je in Frage gestellt.

Die Nachteile von Trockeneis sind: Sublimation (Erstickungsgefahr), Gasdruck, Energiebedarf zur Herstellung, Nachhaltigkeit etc. ...

Die Nachteile von Labor-Tiefkühlschränken sind: Vereisung, Energiebedarf, Qualifizierungsaufwand etc. ...

Moderne, zuverlässige und gleichzeitig mobile Systeme im großen Maßstab arbeiten ohne flüchtige (erstickende) Stoffe. Der ISO-Container (Seecontainer) ist eine in der Logistik seit vielen Jahren beliebte Transporthilfe. Der Container kann mit einzelnen Kartons aber auch mit ganzen Paletten beladen werden.

Die Vorteile dieses Systems sind: wenig Temperatureinfluss auf das Produkt, große Lagerkapazität, Energiebilanz, kaum Vereisungsscheinungen etc. ...

Zu beachten sind technische Aspekte wie: Wahl des Kältemittels, Ausfallsicherheit (Redundanz), Pharma-Anforderungen (GMP) etc. ...

Zusammenfassend betrachtet, kann man für bestimmte Anwendungen auf eine sinnvolle Alternative zurückgreifen, die im Grunde auf jahrzehntelang bewährte Kältetechnik setzt.

### III.07

## Kältetechnik in der Gefriertrocknung

– state-of-the-art und aktuelle Trends –

Yannick Pruß

Refolution Industriekälte GmbH, Karpatenstraße 26, 76012 Karlsruhe  
[yannick.pruess@refolution.de](mailto:yannick.pruess@refolution.de)

Die Pharmaindustrie verwendet die Gefriertrocknung, um Arzneistoffe, die in Wasser nicht lange haltbar wären, zu trocknen. Vor der Einnahme werden die Medikamente wieder in Wasser aufgelöst (zum Beispiel Antibiotika und neuere biotechnologisch hergestellte Arzneistoffe).

Bei der Gefriertrocknung werden Produkte zunächst bei Umgebungsdruck eingefroren und anschließend in einem Hochvakuum getrocknet. Das Hochvakuum wird erreicht, indem die verdampfenden Gase im Vakuum nicht nur durch eine Vakuumpumpe abgeführt werden, sondern diese werden zusätzlich an einer tiefkalten Oberfläche (Kondensator) kondensiert. Die Vorteile des Gefriertrocknungsprozess (oder auch Lyophilisation) liegen darin, dass die getrockneten Produkte eine hohe Qualität und Reinheit aufweisen. Der Prozess ist energieintensiv, wobei der Großteil der Energie für die Kälteerzeugung benötigt wird. Nebenaggregate, wie z. B. Pumpen, Steuerung, etc., haben einen kleinen Anteil an dem Gesamtverbrauch. Das größte Einsparungspotential liegt bei dem Betrieb der Kälteanlage, welche effizient gestaltet werden sollte. Übliche Temperaturen, die die Kälteanlage erzeugen muss, sind  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $-63^{\circ}\text{C}$  bei den Stellplatten, um die Produkte einzufrieren und zwischen  $-70^{\circ}\text{C}$  und  $-85^{\circ}\text{C}$  im Eiskondensator, für die eigentliche Trocknung im Vakuum (Gefriertrocknung).

Bei der Gefriertrocknung verteilt sich die Energie wie es in etwa zu 10- 30 % der gesamten Energie bei Temperaturen von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $-63^{\circ}\text{C}$  benötigt, während 70- 90 % der gesamten Energie bei etwa  $-80^{\circ}\text{C}$  benötigt werden.

Bisher setzten Anlagenbauer auf die bewährte kältetechnische Lösungen von Booster Kompressoren und in weniger Fällen  $\text{LN}_2$  während aktuelle Trends in Richtung natürliche Kältemittel gehen. Der Vortrag behandelt state-of-the-art Technologien in der Gefriertrocknung und zeigt neue Trends für zukunftssichere Technologien auf wie z. B. brennbaren Kaskadentechnologien,  $\text{CO}_2$  und Kaltluftkältetechnik.

### III.08

## Trockeneisfreier Impfstofftransport

### Entwicklung und Test von Kältespeichermaterialien

**Henri Schmit<sup>1\*</sup>, Simon Pöllinger<sup>1</sup>, Christoph Rathgeber<sup>1</sup>, Stefanie Tafelmeier<sup>1</sup>, Peter Hoock<sup>1</sup>, Stefan Hiebler<sup>1</sup>  
Kerstin Müller<sup>2</sup>, Christian Hörl<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ZAE Bayern, Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching, Deutschland

[henri.schmit@zae-bayern.de](mailto:henri.schmit@zae-bayern.de)

<sup>2</sup> va-Q-tec AG, Alfred-Nobel-Str. 33, 97080 Würzburg, Deutschland

[Christian.Hoerl@va-q-tec.com](mailto:Christian.Hoerl@va-q-tec.com)

Einige Impfstoffe, die gegen COVID-19 entwickelt wurden, benötigen eine Lagertemperatur im Bereich von etwa -60 °C bis -70 °C. Für die Logistik ist die Einhaltung dieser Temperaturgrenzen eine große Herausforderung. Eine Temperierung mit Trockeneis ist aus Sicherheits- und Umweltschutzgründen kritisch zu sehen und in Frachtfahrzeugen stark reglementiert. Zur unterbrechungsfreien und energieeffizienteren Einhaltung der Kühlkette könnten stattdessen spezielle Transportbehälter mit Phasenwechselmaterialien (engl. Phase Change Materials, PCM) eingesetzt werden.

Um die vorgesehene Lagertemperatur einzuhalten, muss ein PCM mit einer Schmelztemperatur zwischen -60 °C und -80 °C gefunden werden, das in Ultratiefkühlschränken bei -80 °C bzw. -86 °C zuverlässig kristallisiert. Aufgrund der i. d. R. höheren volumetrischen Schmelzenthalpie liegt der Fokus auf wässrigen (eutektischen) Lösungen. Die aus einer Literaturrecherche hervorgegangen Kandidaten wurden zunächst im Labormaßstab via Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) untersucht. Aufgrund der geringen Probenmenge (ca. 10 mg) und der tiefen Temperaturen kristallisierte keiner der Kandidaten zuverlässig bei einer minimalen Temperatur von -90 °C. Für mehrere Kandidaten konnten passende Keimbildner ermittelt werden und somit die Kristallisation zuverlässig ausgelöst werden. Von den aussichtsreichsten Kandidaten wurden Proben in größerem Maßstab von ca. 80 g in einem Ultratiefkühlschrank (minimale Temperatur -85 °C) weiter untersucht. Zudem wurden thermische Zyklerversuche im gleichen Maßstab in einem Badthermostaten gefahren, um das Verhalten der Kandidaten unter wiederholtem Schmelzen und Kristallisieren zu analysieren. Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, dass ein Kandidat mit definierter Zusammensetzung, und einem geringen Anteil an Keimbildner, zuverlässig kristallisiert sowie ein Schmelzplateau bei ca. -67 °C aufweist.

Dieses PCM mit ca. -67 °C Schmelztemperatur wurde im nächsten Schritt in handelsüblichen Transportboxen der Firma va-Q-tec getestet. Dabei wurden 6 Kühlakkus mit jeweils ca. 1,75 kg PCM gefüllt und bei -82 °C vorgekühlt. Die leeren, mit den 6 kalten PCM-Kühlakkus ausgestattete Transportboxen, wurden einer Außen-temperatur von 30 °C ausgesetzt, wobei die Innentemperatur für deutlich über 40 Stunden unter -60 °C blieb. Bereits mit diesen, für weniger tiefe Temperaturen entwickelten Boxen, könnte vorgekühlte Fracht für ca. zwei Tage innerhalb der geforderten Lagertemperatur gehalten werden.

### III.09

## Kühlcontainer-Lösung für Krankenhäuser in Afrika –

### Kaskadenkälteanlage mit thermischem Eisspeicher

**Oliver Schmid<sup>1\*</sup>, Elena Melito<sup>1</sup>, Tobias Nitschke<sup>1</sup>, Philipp Benz<sup>1</sup>, Michael Kauffeld<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klimate- und Umwelttechnik,  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[michael.kauffeld@h-ka.de](mailto:michael.kauffeld@h-ka.de)

Laut Prognosen wird auf dem afrikanischen Kontinent voraussichtlich mehr als die Hälfte des weltweiten Bevölkerungswachstums zwischen 2015 und 2050 erwartet. Dem entgegen stehen die schlechte elektrische Infrastruktur und die Unzuverlässigkeit der Netze in vielen afrikanischen Ländern. Von diesem Umstand sind

insbesondere medizinische Einrichtungen wie Apotheken und Krankenhäuser betroffen. Jedoch sind eine zuverlässige Stromversorgung sowie eine saubere Trinkwasserversorgung für medizinische Einrichtungen Voraussetzungen für erfolgreiche Behandlungen.

Das Ziel des Forschungsprojektes „SophiA – Sustainable Off-grid solutions for Pharmacies and Hospitals in Africa“ bietet Lösungen für das o.g. Problem in Form von autarken und solarbetriebenen Container-Systemen. Das Projekt umfasst 13 europäische sowie afrikanische Projektpartner und wird im Rahmen des Förderprogramms Horizon 2020 von der europäischen Union gefördert (Grant Agreement No. 101036836).

Die skalierbaren, solarbetriebenen 40-Fuß Container stellen eine zuverlässige und nachhaltige Kühlung auf drei Temperaturniveaus sowie eine saubere Trinkwasserversorgung bereit. Die drei Temperaturniveaus werden durch nachhaltige Kälteanlagen mit umweltfreundlichen und natürlichen Kältemitteln erzeugt. Eine handelsübliche Tieftemperatur-Box mit Ethan ermöglicht eine Impfstoffkühlung bei -70 °C. Die Boxen sind in einem -30 °C kalten Container-Abschnitt aufgestellt, der von einer Kaskaden-Kälteanlage mit Propan und CO<sub>2</sub> gekühlt wird und für eine Lagerung von Blutplasma und proteinbasierten Medikamenten genutzt werden kann. Zudem kühlt die Kaskadenkälteanlage einen weiteren Abschnitt des Containers auf +5 °C für die Lagerung von Medikamenten und Lebensmitteln. Um die Energieeffizienz der Anlage zu erhöhen, ist die Kaskadenkälteanlage an einen Thermosiphon mit Eisspeicher gekoppelt. Die Kopplung ermöglicht eine Verflüssigung des CO<sub>2</sub> im Nacht-Betrieb ohne Betrieb der oberen Kaskadenstufe mit Propan. Darüber hinaus wird die Anlage mit einer intelligenten Regelung ausgestattet, die über Wettervorhersage-Funktionen das Energiemanagement optimal regelt.

Die Pufferung von Energie in Lithium-Ionen-Batterien wird weltweit standardisiert eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Energie in einem thermischen Speicher zu puffern. Thermische Speicher, wie beispielsweise Eisspeicher, haben einige Vorteile gegenüber Lithium-Ionen-Batterien. Sie besitzen neben weiteren Vorteilen unbegrenzte Ladezyklen und sind weder brennbar noch giftig. Im ersten Schritt werden die Versuchsanlage der Kaskadenkälteanlage sowie erste Ergebnisse präsentiert. Am Beispiel der Kaskadenkälteanlage für die SophiA-Container wird darüber hinaus die Eisspeicher-Technologie der Batterie-Technologie in Bezug auf die Gesamteffizienz des Systems gegenübergestellt.

**Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>-Propan-Kaskade, Thermosiphon-Technologie, natürliche Kältemittel, Ethan-Tiefkühlung

**III.10**

## **Energieverbrauch und Jahresarbeitszahl**

### **Messtechnische Erfassung des Energieverbrauchs und Ermittlung der Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Kälteanlage**

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

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

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

Im Zuge eines Forschungsprojektes wurden die Energieverbräuche (Gesamtsysteme) von verschiedenen gebauten Kälteanlagen messtechnisch erfasst und die Jahresarbeitszahlen (JAZ) ermittelt. Es werden die Ergebnisse der Messungen und Auswertungen einer Anlage vorgestellt und diskutiert.

Die Messtechnik für die Bestimmung der Energieverbräuche und der Jahresarbeitszahlen im eingebauten Zustand ist aufwendig. Es müssen dabei parallel die verschiedenen Subsysteme einer Kälteanlage gemessen und ausgewertet werden. Ebenso sind die jeweiligen Randbedingungen (Laststufe, Außentemperaturen, Massenströme etc.) zu erfassen und zu bewerten.

Arbeitszahlen (erzeugte Kälteenergie bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie) sind für die Bewertung von Kälteanlagen (Gesamtsysteme) aussagekräftiger als die alleinige Betrachtung von Leistungszahlen (EER) der Kältemaschine.

Für die Analyse wurden die elektrischen Energieverbräuche der Subsysteme (im Wesentlichen Pumpen und Rückkühler) und der EER (Energy Efficiency Ratio) bzw. die Leistungszahl in Abhängigkeit der Kältemaschinenstufe bzw. der Belastung der Kältemaschine im Teillastbetrieb sowie Arbeitszahlen (Tages- / Monats- / Jahresarbeitszahlen, Arbeitszahl bezogen auf die AT) ermittelt.

Es zeigt sich, dass neben den Kältemaschinen die Hydraulik des Gesamtsystems mit den Pumpen für Kalt- und Kühlwasser einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch (und damit auf die Jahresarbeitszahl) haben. Der Verbrauch der Rückkühlung (offener Kühltürme) hat im untersuchten System einen geringen Anteil am Gesamtverbrauch.

Eine Messung und die Ermittlung von Tages- und Stundenmittelwerten nur über bestimmte Zeiträume (z. B. eine Woche im Sommer, eine Woche im Winter/in der Übergangszeit) verringert den Aufwand für die Messung – allerdings ist auch damit zu rechnen, dass gewisse Abweichungen zum tatsächlichen Jahresverbrauch und zur Jahresarbeitszahl entstehen werden.

Es wird untersucht, welche Abweichung zum tatsächlichen Jahresverbrauch eine Hochrechnung auf Basis von Tages- und Stundenmittelwerten (die nur über einen bestimmten Zeitraum ermittelt wurden) aufweist bzw. welche Daten (Verbrauch bei verschiedene Lastzuständen / Außentemperaturen) und anlagentechnischen Merkmale (Regelkonzept – Pumpen starr/variabel, Betriebszeiten etc.) für eine derartige Hochrechnung zu berücksichtigen sind.

**Stichwörter:**

Kompressions-Kältemaschinen, Kälteanlagen, Arbeitszahlen, Jahresarbeitszahlen, Messdatenerhebung

### III.11

## Zentrale Fernkälteversorgung der SWM

### Umweltschonende Fernkälte wird für die Kühlung von Gebäuden immer wichtiger

Dr.-Ing Patrick Krystallas

[krystallas.patrick@swm-infrastruktur.de](mailto:krystallas.patrick@swm-infrastruktur.de)

Die SWM setzen Fernkälte ein, um Betriebe, Büros, Geschäfte und Wohngebäude zu kühlen. Gegenüber einer Eigenlösung wird mit Fernkälte die Versorgung wesentlich klimaverträglicher realisiert. Hierzu nutzen sie in der Münchner Innenstadt einen unterirdischen Stadtbach in Kombination mit hocheffizienten Kälteanlagen.

Fernkälte funktioniert nach dem Prinzip, dass Wasser zentral abgekühlt, über eine Rohrleitung an die Kunden geliefert und dort die Abwärme aufgenommen wird. Anschließend wird es über eine zweite, parallel verlaufende Leitung wieder der Kälteerzeugung zugeführt, effizient abgekühlt und den Kunden erneut zur Verfügung gestellt.

In den letzten Jahren liefen umfangreiche Maßnahme zur Erweiterung des Fernkälte-Innenstadtnetzes. Seit 2011 betreiben die SWM ein inzwischen etwa 22 Kilometer langes Fernkältenetz. In den Untergeschoßen des Stachusbauwerks befinden sich zwei Kältezentralen inkl. großen Eisspeichern, eine weitere am Odeonsplatz. Ca. 100 Kunden mit Hotels, Bürogebäuden, Warenhäusern sowie erste Wohngebäude sind im Zentrum unter Vertrag, weitere werden folgen, Tendenz stark steigend.

Neben dem wachsenden Kältenetz in der Innenstadt betreiben die SWM acht weitere Kältenetze im Stadtgebiet. Mit Grundwasser sorgen sie für ökologische Kälte, teils sogar per Wärmepumpe zur Wärmeversorgung!

Und weil die Nachfrage weiter wächst, sind zusätzliche Kälteanlagen und Netzausbauten schon in Planung.

### III.12

## Effizienzsteigerung von Kälteversorgungssystemen

– mit Hilfe modell-basierter Optimierung

Jörg Bentz<sup>\*1</sup>, Johannes Klüglich<sup>2</sup>, Christian Schweigler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule München, CENERGIE –Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere,  
Lothstraße 34, 80335 München  
[joerg.bentz@hm.edu](mailto:joerg.bentz@hm.edu)

<sup>2</sup> Trane Klima- und Kältetechnisches Büro GmbH, Pionierstraße 3, 82152 Krailling

Steigende Energiepreise bedeuten höhere Kosten für den Betrieb von Energieversorgungssystemen. Hersteller von Systemkomponenten arbeiten unter Nachdruck daran die Effizienz ihrer Geräte zu steigern und gleichzeitig für einen flexiblen Einsatz vorzubereiten. Ein abgestimmter Einsatz der Systemkomponenten mit Blick auf die Effizienz des gesamten Anlagenverbundes ist entscheidend, um die Betriebskosten des Systems zu reduzieren.

Um alle Optimierungspotentiale eines Kälteversorgungssystems ausschöpfen zu können ist es wichtig, die Betriebscharakteristiken der Komponenten zu kennen und mit Hilfe theoretischer Modelle zu beschreiben. Damit kann das Zusammenspiel der Komponenten im System simuliert und darauf aufbauend optimiert werden. Dieses Vorgehen erfordert jedoch eine eingehende Analyse der eingesetzten Anlagentechnik zur Entwicklung der theoretischen Modelle, so dass die Betrieboptimierung speziell in kleineren Kälteversorgungssystemen nicht zur Anwendung kommt.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung des Softwarewerkzeugs ENOS vorgestellt, mit welchem die Optimierung von Kälteversorgungssystemen im laufenden Betrieb erheblich erleichtert werden kann. Die Software beinhaltet eine umfangreiche Modellbibliothek mit den gängigsten Systemkomponenten, eine Softwareumgebung zur schnellen Modellierung des Anlagenaufbaus und einen Rechenkern zur Durchführung der Betrieboptimierung. Der Optimierungsprozess beginnt mit der Modellierung und Simulation der Systemkomponenten basierend auf den zugrundeliegenden wärmetechnischen Funktionsprinzipien. Dabei wurde die Komplexität der Modelle so weit wie möglich reduziert, um den Konfigurationsaufwand zu reduzieren und gleichzeitig eine ausreichend genaue Abbildung der Betriebscharakteristik zu gewährleisten. Mit Hilfe einer Simulation der Anlagenfunktion unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen werden die Modelle dann in eine Polynomialrepräsentation überführt, welche leichter vom Optimierungskern verarbeitet werden kann und eine spätere automatisierte Anpassung an die reale Betriebscharakteristik ermöglicht.

Durch Anwendung der Modelle innerhalb der Simulation und Vergleich mit den realen Betriebsdaten ist es dann möglich das Betriebsverhalten des Systems genau zu untersuchen und a priori Optimierungspotentiale aufzuzeigen, die durch eine Veränderung der Betriebsstrategie erschlossen werden können. Im laufenden Betrieb des Kälteversorgungssystems verarbeitet der Optimierungskern die aktuellen Systemdaten und liefert als Optimierungsergebnis Vorgaben für Schaltzyklen und Sollwerte, mit welchen für jeden Zeitschritt der effizienteste Betriebszustand eingestellt werden kann. Hierfür wird ein gemischt-ganzzahliger nichtlinearer Optimierungskern eingesetzt, der sowohl diskrete Schaltzustände als auch kontinuierlich gemessene Betriebswerte verarbeiten kann. Die Wirkung des Optimierungssystems ENOS wird anhand von Betriebsergebnissen eines Kälteversorgungssystems eines Klinikgebäudes vorgestellt.

#### Stichwörter:

Betrieboptimierung, Modellierung, Simulation

### III.13

## Optimierungsbasierte Entwicklung einer Betriebsstrategie für R744 Kälteanlagen mit R718 Unterkühler

Jana Friese<sup>1\*</sup>, Andreas Schulte<sup>1</sup>, Florian Hanslik<sup>2</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland

[ja.friese@tu-braunschweig.de](mailto:ja.friese@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup>Efficient Energy GmbH, Hans-Riedel-Str. 5, 85622 Feldkirchen, Deutschland

[florian.hanslik@efficient-energy.de](mailto:florian.hanslik@efficient-energy.de)

Kälteanlagen mit R744 sind der Standard für die Kälteerzeugung im Supermarkt geworden. Dies gilt auch für Aufstellungen in warmen Klimazonen. Aufgrund des transkritischen Betriebes nimmt allerdings die Effizienz für R744 mit steigenden Umgebungstemperaturen stärker ab als für vergleichbare synthetische Kältemittel. Es existiert eine Vielzahl von verschiedenen Technologien zur Steigerung der Effizienz z. B.: Ejektor, Parallelverdichter oder mechanische Unterkühlung. Bei der Wahl des Kältemittels für einen mechanischen Unterkühler gibt es eine breite Auswahl an Möglichkeiten. Eine Wahl kann dabei das natürliche Kältemittel Wasser (R718) sein.

Wird ein R718 Unterkühler in einer R744 Kälteanlage betrieben ist eine optimierte Betriebsstrategie für beide Systeme notwendig, um die bestmögliche Gesamteffizienz zu erreichen. Dabei ist sowohl der R718 Kreislauf, als auch der R744 Kreislauf in die Optimierung einzubeziehen.

Es wird ein Prozess zur optimierungsbasierten Entwicklung einer Betriebsstrategie vorgestellt. Es werden die relevanten Stell- und Regelgrößen ermittelt und eine Betriebsstrategie anhand von Simulationsmodellen erzeugt.

#### Stichwörter:

Supermarkt, R744, R718, Optimierung

### III.14

## Löslich oder mischbar? – Die Crux mit der Effizienzberechnung

### Das 1x1 zum Verständnis thermodynamischer Daten von Kältemittel-Öl-Gemischen

Steffen Feja

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

[steffen.feja@ilkdresden.de](mailto:steffen.feja@ilkdresden.de)

Für einen effizienten Betrieb von Kältemaschinen und Wärmepumpen ist es wichtig, die Betriebszustände der Maschinen zu kennen und zu verstehen. Für die Berechnung dieser Betriebszustände werden die thermodynamischen Daten der Betriebsstoffe benötigt. Meist wird nur der Betriebsstoff Kältemittel betrachtet. Dies ist insofern logisch, da die Berechnungen naturgemäß eine nicht geringe Komplexität aufweisen. Gerade bei Kältemittel-Gemischen nimmt die Komplexität der Berechnungen gefühlt exponentiell mit der Anzahl der Gemischkomponenten zu. Jedoch ist eine richtige Beschreibung der Betriebszustände, zum Beispiel unter dem Gesichtspunkt einer Vorausberechnung der Effizienz eines Kreislaufes, nur im Zusammenspiel mit den anderen Betriebsstoffen möglich. Vorrangig zu nennen ist hierbei das Schmiermittel der Kompressoren, das sogenannte Kältemaschinenöl.

Für die Beschreibung der thermodynamischen Daten der Kältemittel-Kältemaschinenöl-Gemische (kurz: KMÖG) bedienen sich die Fachkräfte der Kältetechnik, des Ingenieurwesens, der Physik und der Chemie etc. unterschiedlicher Begrifflichkeiten. Auch die Darstellung und sprachliche Beschreibung von thermodynamischen Phänomenen wird je nach Berufsgruppe anders gelehrt und demzufolge auch angewandt. Begriffe, wie

Löslichkeit, Mischbarkeit, Druck, Dampfdruck, Sättigungsdampfdruck, Dichte, spezifisches Volumen etc. werden in verschiedenen Kontexten gleichermaßen genutzt. Dies kann zu Missverständnissen bei der Vermittlung von Wissen führen. Ein bekanntes Beispiel ist die Darstellung von exothermen bzw. endothermen Prozessen. Eine exotherme Reaktionsenthalpie ist mit dem Vorzeichen minus (-) behaftet, da das System Energie abgibt. In Darstellungen von Wärmeflüssen, zum Beispiel bei Messungen mit der DSC<sup>1</sup>, werden exotherme Prozesse jedoch meist nach oben, also in Plusrichtung (+) im Diagramm dargestellt, um zu symbolisieren, dass der Sensor Wärme aufgenommen hat. Zeichnet man diese Energieabgabe in die negative Richtung, wird die Grafik zum besseren Verständnis mit der Bemerkung „exo down“ versehen.

Ein weiteres Problem der Beschreibung des Verhaltens von KMÖG in Kreisläufen ist das Fehlen fundierter Gleichungen und ausreichender Messdaten. Selbst die Daten der Randphasen – Kältemittel und Öl – sind meist unzureichend oder gar nicht bestimmt. Man bedient sich dann mit Annahmen von Randbedingungen und der Ableitung der Daten ähnlicher Stoffe, welche im letzten Jahrtausend vermessen wurden. Das dies nicht zum Ziel führen kann, entdeckten nicht nur unsere Altvorderen, sondern kann in der einschlägigen Literatur fast täglich aufs Neue nachgelesen werden.

Der Vortrag beschäftigt sich mit der Verwendung von Begrifflichkeiten in der Thermodynamik und mit der Beschreibung thermodynamischer Phänomene und der Daten von KMÖG. Dabei wird speziell auf Verständnisprobleme bei der Beschreibung von Vorgängen innerhalb von Kreisläufen mit natürlichen Kältemitteln, wie zum Beispiel Propan, eingegangen. Es wird ein kurzer Einblick gegeben, warum die exakte Beschreibung bzw. Vorausberechnung von Kälte- und Wärmepumpenkreisläufen, zum Beispiel in Bezug auf die Ermittlung der Energieeffizienz, anhand abgeleiteter Daten mit den bisher bekannten Mitteln zum Scheitern verurteilt ist und daher eine exakte Messung, sowie die richtige Beschreibung einzelner Gemischgrößen zwingend erforderlich wird. An Beispielen wird auf die benötigte und derzeit erreichbare Genauigkeit bei der Ermittlung thermodynamischer Daten eingegangen.

**Stichwörter:**

Begriffe, thermodynamische Daten, Dampfdruck, Dichte, Löslichkeit, Mischbarkeit, Viskosität, Kompressionskälteanlage, KMÖG, Propan, CO<sub>2</sub>, Ammoniak, HFKW (R134a)

### III.15

## Modulares Wärmepumpensystem für Fahrzeuge

Dr. Kemal-Edip Yıldırım

Pepper Motion GmbH, Experte Thermomanagement, HVAC, Innovationen,  
Alemannenstraße 14, 85095 Denkendorf, Deutschland  
[dr.key@web.de](mailto:dr.key@web.de)

Die Temperierungen der verschiedenen Klimabereiche von Fahrzeugen, wie Fahrerarbeitsplatz, Kabine, Boden, Windschutzscheibe, etc. erfordern hohe Flexibilität hinsichtlich der geforderten Leistungen und des Temperaturniveaus. In den elektromotorisch angetriebenen Fahrzeugen werden die Klimasysteme zu Thermomanagementsystemen zur Steigerung der Effizienz und Reichweite ausgebaut, wodurch die Anforderungen an die Flexibilität und damit auch an die Komplexität erheblich steigen, da die Hochvoltkomponenten sich in unterschiedliche Temperaturbereichen wohl fühlen und Leistungsniveaus in wechselnden Zeitrahmen bzw. zu wechselnden Zeitpunkten anfordern. Dazu kommen zusätzlich Anforderungen bei der Vorkonditionierung der Kabine und der elektrischen Komponenten sowie der Ladevorgänge. Die Bedienung all dieser vielfältigen Anforderungen aus einem System ist entsprechend sehr komplex und erfordert einen sehr hohen Regelungsgrad.

Ein aus Teilsystemen aufgebautes modulares Wärmepumpen- bzw. Thermomanagementsystem erfüllt alle Anforderungen bedarfsgerecht und vereinfacht deutlich die Regelungsvorgänge. Zudem bietet ein modulares System noch weitere Vorteile. Die Module können nah an die jeweiligen Bedarfe angebunden werden, was die Integration des Systems in den Fahrzeugen vereinfacht. Es gibt verschiedene Fahrzeugausrüstungen, -klassen und -typen. Durch die Anzahl der Module kann das Wärmepumpen- bzw. Thermomanagement im jeweiligen

<sup>1</sup> DSC: Differential Scanning Calorimetry – Verfahren zur Bestimmung von Enthalpie, Wärmekapazitäten, Umwandlungstemperaturen etc.

Fahrzeug bedarfsgerecht appliziert werden. Somit kann ein modulares Konzept die System- und Komponentenvarianten reduzieren. Zudem bietet ein modulares System Vorteile hinsichtlich Fehleridentifizierung und Reparatur aufgrund seiner Einfachheit.

Die Module können miteinander vorteilhaft verbunden werden, um die Flexibilität und Effizienz zu erhöhen. Die Kältekreisläufe haben optimale Arbeitsbereiche hinsichtlich der Effizienz. Im Teillast kann sich das Gesamtsystem im weniger effizienten Bereich befinden. In solchen Fällen kann durch Abschaltung einzelner Module die Gesamteffizienz des Systems erhöht werden. Zusätzlich kann durch diese bedarfsgerechte Abschaltung der Module die Lebensdauer der Komponenten erhöht werden.

### III.16

## **Elektrischer Kältemittelverdichter für mobile Anwendung**

### **– Experimentelle NVH Untersuchungen –**

**Florian Wieschollek<sup>1\*</sup>, Pascal Prüß<sup>1</sup>, Tobias Walter<sup>2</sup>, Robin Langebach<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Pierburg GmbH, Alfred-Pierburg-Str. 1, 41460 Neuss  
[Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com](mailto:Florian.Wieschollek@de.rheinmetall.com)

<sup>2</sup>Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klimate und Umwelttechnik  
[Robin.Langebach@h-ka.de](mailto:Robin.Langebach@h-ka.de)

Kältemittelkompressoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge müssen eine Reihe an bekannten und einer Vielzahl an neuen Anforderungen erfüllen. Bekannt ist hierbei die Kühlung des Innenraums im klassischen AC-Modus und die Konditionierung der Batterien, um deren Leistung zu optimieren. Neben den genannten Anforderungen stehen zusätzlich eine kompakte Bauweise, ein geringes Gewicht, eine hohe Effizienz und ein gutes NVH-Verhalten im Fokus der Entwicklung. Insbesondere das NVH-Verhalten rückt durch teils erheblich geringere Geräuschemissionen der Antriebsaggregate in Elektro- oder Hybridfahrzeugen in den Vordergrund. Akustisch behagliche Geräuschemissionen auf einem Minimum sind ebenso wichtig wie die Reduktion von Schwingungsanregungen in die Struktur, welche vom Fahrer und weiteren Insassen als störend empfunden werden können. Im Rahmen der Veröffentlichung sollen wichtige Anforderungen an einen elektrisch angetriebenen PKW-Klimaverdichter mit Blick auf das NVH-Verhalten vorgestellt und diskutiert werden. Darüber hinaus wird eine Prüfumgebung für NVH-Untersuchungen beschrieben und erste Messergebnisse vorgestellt.

**Stichwörter:**

PKW, Klimaverdichter, NVH, experimentelle Untersuchungen, Akustik, Schwingungen

## Schwingungsanalyse bei der Fehlererkennung: Chancen, Grenzen und Ausblick

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

Dr. Christian Ellwein

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, 74670 Forchtenberg  
[Christian.Ellwein@kriwan.de](mailto:Christian.Ellwein@kriwan.de)

Viele Fehler und Schäden an rotierenden Maschinen wie Verdichtern oder Pumpen zeigen sich schon in einem frühen Stadium an geänderten Geräuschen beim Betrieb. Erfahrene Fachkräfte sind seit langem in der Lage, entstehende Fehler akustisch zu identifizieren. Die Schwingungsanalyse oder Vibrationsmessung, also das automatisierte Überwachen von Körperschall oder Luftschall einer Maschine, hat das Potential, die Maschinenüberwachung deutlich voranzubringen. Am Smartphone und zunehmend auch im Auto ist die Spracheingabe inzwischen weit verbreitet und zeigt das Potential akustischer Analysen eindrucksvoll auf. Trotzdem haben sich akustische oder schwingungstechnische Überwachungssysteme noch nicht weit etabliert. In diesem Vortrag werden Chancen und Grenzen der Vibrationsmessung an rotierenden Maschinen dargestellt und ein Ausblick in die Zukunft gewagt.

#### *Chancen*

Es scheint unzweifelhaft, dass Informationen über entstehende Fehler im akustischen Fingerabdruck oder dem Schwingungssignal einer Maschine vorliegen, weil wir als Mensch mit entsprechender Erfahrung in der Lage sind, verschiedene Fehlerbilder zu unterscheiden.

Durch die enorme Entwicklung in Bezug auf Rechenleistung und verfügbaren Speicher ist auch die Digitalelektronik heute sehr leistungsfähig. Die Zerlegung eines Schwingungssignals in einzelne Frequenzen ist heute gut berechenbar. Neuronale Netze zur Identifikation von Fehlern und Künstliche Intelligenz haben eine große Leistungsfähigkeit.

Für ein vollständiges Umsetzen von Predictive Maintenance als Wartungskonzept von Maschinen ist die Schwingungsanalyse ein wichtiger Baustein, weil sie Fehler potentiell früher als andere Verfahren erkennen kann.

#### *Grenzen*

In vielen Fällen ist heute noch individuelles Anpassen der Schwingungsüberwachung an eine bestimmte Applikation nötig. Das „Lernen“ funktioniert noch nicht immer einfach als plug&play. Dieser notwendige Einsatz von Experten vor Ort verhindert eine breite Skalierung. Aktuell werden nur ein Bruchteil der gelieferten Verdichter und Pumpen mit Vibrationsüberwachung ausgerüstet.

#### *Ausblick*

Potential für die Optimierung der Schwingungsüberwachung liegt sicher in der *Sensor-Fusion*, d. h. in der Kombination verschiedener Sensoren. Wenn die Leistungsaufnahme oder Drehzahl einer Pumpe oder eines Verdichters bekannt sind, können die zugehörigen Schwingungssignale wesentlich genauer analysiert werden.

Es ist zu prüfen, ob die weithin verwendete Fast Fouriertransformation (FFT) wirklich der beste Weg ist, um die Spektralkomponenten eines Schwingungssignals zu identifizieren. KRIWAN untersucht hier neuartige Ansätze der Frequenzanalyse.

III.18

## Niedrig GWP Kältemittel in der Gewerbe-Kälte –

### Effizienzsteigerung durch Anlagenoptimierung

Dominic Düing<sup>1\*</sup>, Hans-Dieter Küpper<sup>2</sup>, Arnd Lagies<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Chemours Deutschland GmbH, Dornhofstraße 34, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland

[dominic.dueing@chemours.com](mailto:dominic.dueing@chemours.com)

[hans-dieter.kupper@chemours.com](mailto:hans-dieter.kupper@chemours.com)

[arnd.lagies@chemours.com](mailto:arnd.lagies@chemours.com)

Die Kälte-, Klima- und Wärmepumpenbranche ist aufgrund zunehmender Umweltschutzanforderungen seit Jahren in einem stetigen Wandel. Die F-Gase-Verordnung gibt sowohl die Richtung als auch die Herausforderungen vor, denen sich die Industrie in den kommenden Jahrzehnten stellen muss. Kältemittel, Anlagenkomponenten und Systeme haben sich bereits an die neuen Anforderungen angepasst und werden dies auch weiterhin tun. Alternative Anlagenkonzepte basierend auf R-744, R-290 und HFO Kältemitteln werden in Zukunft immer mehr zum Tragen kommen und die noch bestehenden FKW Systeme mittelfristig ablösen. Bei der Auswahl der besten Technologie sollten neben dem GWP des Kältemittels vor allem die indirekten Emissionen berücksichtigt werden.

Diese Präsentation bezieht sich auf Anwendungen in der Gewerbe-Kälte und gibt einen Einblick in zahlreiche Anlagenkonfigurationen und Systemparameter für verschiedene niedrig GWP Kältemittellösungen. Die Ergebnisse zeigen welchen ökonomischen und ökologischen Einfluss die Auswahl des Kältemittels, die Systemparameter und die jeweilige Anlagenkonfiguration haben. Weitere effizienzsteigernde Maßnahmen wie bspw. Wärmerückgewinnung oder Unterkühlung werden erörtert und ausgeführte Anlagenbeispiele vorgestellt.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Lebenszykluskosten, CO<sub>2</sub> Reduktion, A2L, HFO, Kältemittel, Wärmerückgewinnung, Unterkühlung, Optimierung

III.19

## CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen und Wärmepumpen mit Ejektoren

### Erfahrungsbericht aus der Praxis

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

<sup>1</sup> Frigo Consulting AG, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz

[j.schoenenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schoenenberger@frigoconsulting.ch)

[m.decasper@frigoconsulting.ch](mailto:m.decasper@frigoconsulting.ch)

[m.baertsch@frigoconsulting.ch](mailto:m.baertsch@frigoconsulting.ch)

Im Jahre 2013 erfolgte die Inbetriebnahme der ersten CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Ejektoren in einem Supermarkt in der Schweiz. Seither gewinnen CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen und Wärmepumpen mit Ejektoren zunehmend an Bedeutung. Die Einbindemöglichkeiten von Ejektoren in solchen Systemen sind vielfältig. Einzelne Einbindungsarten haben sich in der Praxis stärker etabliert als andere. Grundsätzlich ermöglichen die Ejektoren, bislang ungenutztes Potential (Drosselverluste) in eine Vorverdichtung oder Druckerhöhung umzuwandeln und dadurch die Gesamteffizienz des Systems zu steigern. Mit der alleinigen Einbindung von Ejektoren in CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen oder Wärmepumpen ist es jedoch noch nicht getan. Die Erfahrung zeigt, dass bislang ungenutztes Potential auch nur dann in einen vollumfänglichen, energetischen Vorteil (Nutzen) umgewandelt werden kann, sofern die einzelnen Systemabschnitte aufeinander und deren Anwendung abgestimmt sind. Besonderen Fokus gilt dabei der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen oder Wärmepumpen mit Ejektoren. Es werden etablierte

Einbindungsmöglichkeiten von Ejektoren erläutert und auf deren Besonderheiten, insbesondere in Punkt Mess-, Steuer- und Regelungstechnik im Zusammenhang mit den Ejektoren eingegangen.

**Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>, R744, Kälteanlage, Wärmepumpe, Ejektor, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

**III.20**

## **Holzpelletbetriebene Absorptionskälteanlage**

**Manuel Kausche<sup>1\*</sup>, Martin Helm<sup>1</sup>, Manuel Riepl<sup>1</sup>, Wolfgang Aich<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ZAE Bayern e.V., Bereich *Energiespeicherung – Arbeitsgruppe Wärmetransformation*,  
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching, Deutschland  
[Manuel.Kausche@ZAE-Bayern.de](mailto:Manuel.Kausche@ZAE-Bayern.de)

<sup>2</sup> HDG Bavaria GmbH, Siemensstr. 22, 84323 Massing, Deutschland

Im vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens „BioWap“ (FKZ 03KB127) entwickelte das ZAE Bayern zusammen mit dem Kesselhersteller HDG Bavaria GmbH das Funktionsmuster einer mittels holzartiger Biomasse (Pellets, Hackschnitzel) direkt befeuerten Sorptionskälteanlage (Lithiumbromid & R718) mit 55 kW<sub>th</sub> Leistung.

Die hocheffiziente direkte Kopplung eines neuartigen Hochtemperaturdesorbers mit integriertem Brennraum und einer zweistufigen rohrbündelbasierten kompakten Absorbereinheit zeigt im Laborbetrieb einen brennstoffbezogenen Wirkungsgrad zur Kältebereitstellung BUE<sub>cool</sub> von 1,0. Im Vergleich zur konventionellen hydraulischen Kopplung von Biomassekessel und einstufiger Absorptionskälteanlagen ( $BUE_{cool} \approx 0,65$ ) verbessert sich dieses Verhältnis aus nutzbarer Kälteleistung zu eingesetzter Brennstoffenergie bei vergleichbarem Anlagenaufwand um den Faktor 1,5. Mit einer Temperaturspreizung von 4 K wurden Kaltwasser-Eintrittstemperaturen zwischen 15 und 8 °C vermessen und dabei Rückkühltemperaturen zwischen 38 und 43 °C für eine trockene Rückkühlung in gemäßigten Breiten realisiert. Das interne Wärmeverhältnis der AKM erreichte hierbei einen sehr guten Wert von  $\zeta_{cool} = 1,24$ . Ökonomische Betrachtungen attestieren dem Systemkonzept zudem eine wirtschaftliche Anwendbarkeit und Marktchance.

**III.21**

## **Verwässerte Effizienz**

### **Warum die Wasserseite eine Wärmepumpe oder einen Kaltwassersatz „schlecht machen“ kann und Lösungsbeispiele aus der Praxis**

**Jörg Saar**

Danfoss GmbH, Offenbach, Carl-Legien-Straße 8, 63073 Offenbach, Deutschland  
[joerg.saar@danfoss.com](mailto:joerg.saar@danfoss.com)

Für die Auslegung und normgerechte Messung von Wärmepumpen und Kaltwassersätzen wird eine gute und bedarfsgerechte Versorgung des verbraucherseitigen Wärmeträgermediums Wasser angenommen.

Die Realität weicht jedoch leider oftmals deutlich von dieser Annahme ab. Wenn Wärmepumpen oder Kaltwassersätze nicht die erwarteten Leistungen und Effizienzen erreichen, lässt sich die Ursache häufig in der Hydraulik – also in der Wasserverteilung auf der Verbraucherseite – finden.

Der Aufgabe Wasser in der richtigen Menge zur richtigen Zeit an richtigen Ort zur Verfügung zu stellen wird nicht immer eine angemessene Bedeutung zugeschrieben. Pumpe einschalten und hoffen, dass alle Verbraucher wie Heizkörper oder Fan Coils schon irgendwie mit der richtigen Wassermenge versorgt werden, ist eine durchaus anzutreffende Herangehensweise. Bleiben dann im Gebäude Heizkörper zu kalt oder werden Räume nicht

ausreichend gekühlt, ist die Erhöhung der Förderleistung von regelbaren Pumpen ein beliebter Lösungsversuch. Neben einem unnötig hohen Energiebedarf für die Pumpe, wird jedoch in der Regel sehr viel energetisches Optimierungspotential nicht ausgeschöpft, da die Ursache nicht behoben wird. In vielen Fällen tritt im Teillastbetrieb, der einen erheblichen Teil der Betriebszeit ausmacht, sogar eine Verschlechterung der Gesamteffizienz der Anlage auf. Der Hauptgrund für die niedrige Systemeffizienz liegt meist in den durch die schlechte Wasserversorgung verursachten ungünstigen Betriebsdaten der Kälteanlage.

Positiv formuliert: eine gute verbraucherseitige Wasserversorgung ist eine Grundvoraussetzung für einen effizienten Betrieb von Wärmepumpen und Kaltwassersätzen.

Dieser Vortrag legt die Gründe dar, warum mit einer dynamisch abgeglichenen Hydraulik optimale Betriebsergebnisse erreichbar sind, erklärt dabei auch was eine dynamisch abgeglichene Hydraulik ist und mit welchen Maßnahmen diese erreichbar ist.

An Praxisbeispielen wird aufgezeigt welche Verbesserungspotentiale durch die im Vortrag aufgezeigten Lösungen erreicht werden. Messdaten von teilweise bereits seit Jahren in Betrieb befindlichen Anlagen lassen erkennen, dass etliche Anlagen ihre Auslegungsdaten bisher nicht erreichten, was jedoch durch einen nachträglichen dynamischen Abgleich der Hydraulik bei sehr attraktiven Amortisationszeiten ermöglicht wurde.

### III.22

## Subatmosphärische Kühlung von Rechenzentren mit Wasser

Bodo Burandt<sup>1\*</sup>, Mathias Safarik<sup>1</sup>, Andreas Hantsch<sup>2</sup>, Conrad Wächter<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Cloud&Heat Technologies GmbH, Königsbrücker Str. 96, 01099 Dresden  
[andreas.hantsch@cloudandheat.com](mailto:andreas.hantsch@cloudandheat.com)

Rechenzentren haben einen hohen Elektroenergiebedarf, erzeugen Wärme und brauchen Kühlung. Sie wandeln 100 % des IT-Stromes in Wärme um. Die Leistungsdichte der Racks und der installierten Chips wächst stetig. Es wird von einer Leistungssteigerung von derzeit 350 W auf 1.000 W und mehr pro Chip ausgegangen. Die Wärmeabfuhr ist mit Luftkühlung nicht mehr zu realisieren. Eine direkte Flüssigkeitskühlung ist erforderlich.

Wasser ist ein idealer Wärmeträger mit nur einem Nachteil, es ist elektrisch leitend. Damit den Betreibern die Angst vor dem Kühlmedium Wasser genommen wird, erfolgt der Betrieb des Wasserkühlsystems bei einem Druck unter dem Umgebungsdruck, so dass bei einem Leck keine Flüssigkeit austritt. Es wird ein System der subatmosphärischen Kühlung inklusive einer Absicherung, dass kein Kühlmedium bei einem Leck austritt vorgestellt. Die Ergebnisse der praktischen Untersuchungen der subatmosphärischen Einphasenkühlung eines Racks sowie die Beherrschung von simulierten Lecks werden dargestellt.

Bei den hohen Energiedichten der Chips stößt auch die Einphasenflüssigkeitskühlung an seine Grenzen. Somit ist ein Übergang auf die subatmosphärische Zweiphasenkühlung logisch. Durch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie wird deutlich weniger Wasser im Umlauf des Systems benötigt. Erste Ergebnisse der Tests der subatmosphärischen Zweiphasenflüssigkeitskühlung mit Wasser werden erläutert.

### Stichwörter:

Flüssigkeitskühlung, Wasser, subatmosphärisch, Zweiphasenkühlung

## Simulationsgestützte Entwicklung eines Algorithmus zur Optimierung von Durchflussregelungen in Wasserkreisläufen

Babak Mohajer<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Belimo Automation AG, Brunnenbachstrasse 1, 8340 Hinwil, Schweiz  
[babak.mohajer@belimo.ch](mailto:babak.mohajer@belimo.ch)

In dieser Arbeit wurde die simulationsgestützte Performance eines Algorithmus für Ventile mit Regelkugelhahn in deren Öffnungsphase untersucht. Ziel dieser Arbeit war zu zeigen, ob eine modellbasierte Entwicklung eines Regelungs-Algorithmus für Anlagen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden möglich und verifizierbar ist.

Der Einsatz vom Regelkugelhahn zur dynamischen Regelung von Durchflüssen ist in der HLK Branche zentral. Die charakteristische Durchflusskennlinie des Kugelventils sorgt für hohe Regelstabilität und optimales Regelverhalten über den gesamten Regelbereich. Im Gegensatz zu Hubventilen, welche im Öffnungspunkt einen sprunghaften Anstieg des Durchflusses aufweisen, können mit dem Regelkugelhahn auch kleine Durchflüsse präzise geregelt werden.

Die Herausforderung bei der Regelung ist, die Regelgüte bei hoher Reaktivität über den gesamten Regelbereich zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus entwickelt, der sich aufgrund der individuellen Ventilcharakteristik und den spezifischen Anwendungsfall adaptiert.

Mit Hilfe einer multiphysikalischen Modellierungs- und Simulationsplattform konnte nachgewiesen werden, dass der Algorithmus in verschiedenen Anlagen und Einsatzbereichen funktionsfähig ist. Die Reaktionsfähigkeit des Ventils steigert sich mithilfe dieses Ansatzes in der Öffnungsphase um bis zu 80 %. Diese Verbesserung konnte an einer Prüfstandanlage verifiziert werden.

**Stichwörter:**

Modellbasierte Entwicklung, Simulationsgestützter Regler-Design, Optimierungs-Algorithmus, Regelkugelhahn

## IV.01

# Stand der Technik von Haushaltswärmepumpen in Europa

## Eine Breitenauswertung

Thore Oltersdorf\*, Björn Nienborg, Hannes Fugmann

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

Wärmepumpen nehmen eine tragende Rolle bei der Dekarbonisierung der Gebäudewärme ein. Dies spiegelt sich in kontinuierlich steigenden Verkaufszahlen sowie einer zunehmenden Anzahl an Herstellern und Produkten auf dem Markt wider. Bedingt durch dieses Wachstum einerseits und externe Randbedingungen wie zum Beispiel der F-Gase-Verordnung andererseits befindet sich die Branche in einem starken Wandel, der sich auch in den angebotenen Geräten ausdrückt.

Um einen Überblick über den Entwicklungsstand aktuell verfügbarer Haushaltswärmepumpen zu erlangen, nutzen wir frei verfügbare Anlagenübersichten (Förderlisten für Wärmepumpen wie z. B. den Listen der BAFA sowie Produktdatenbanken wie z. B. der Datenbank von HP Keymark) und Installationsanleitungen für eine Breitenauswertung von mehreren tausend, marktverfüglichen Wärmepumpenmodellen. Dieser hat eine vergleichende Bewertung relevanter, technischer Parameter wie Effizienz, Schallleistungspegel, Kältemitteltyp und Kältemittelfüllmenge, usw. zum Ziel.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Stand der Technik, Effizienz, Füllmenge, Schallleistungspegel

## IV.02

# Fernwärmeverzeugung mit Ammoniak-Großwärmepumpen

## Stadtwerke Rosenheim

David Corteletti\*, Dominik Morawetz

Projekt - Management, Johnson Controls IREF Technical Realization & Process Industries,  
G. Daimler Str. 8; 68165 Mannheim  
[david.corteletti@jci.com](mailto:david.corteletti@jci.com)

Zur Dekarbonisierung und für den Wandel von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern hat Johnson Controls für Stadtwerke Rosenheim drei Großwärmepumpen im Jahr 2021/22 geplant und geliefert, um die Verbraucher nachhaltig mit Fernwärme zu versorgen. Durch die Installation sparen die Stadtwerke Rosenheim pro Wärmepumpe mit einer jährlich angestrebten Wärmeerzeugung von 6200 MWh ca. 880 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr ein. Die Inbetriebnahme der ersten Wärmepumpe erfolgte im März 2022.

Bei diesem Projekt wird klimaschonend bis zu 88°C Fernwärme durch insgesamt drei 2-stufige Ammoniak-Wärmepumpen erzeugt. Dabei dient der durch Rosenheim fließende Mühlbach als Wärmequelle. Diese Wärme wird anschließend über einen Zwischenkreislauf an die Großwärmepumpe übertragen. Die Heizleistung je Großwärmepumpe beträgt 1,5 MW.

Im Vortrag werden neben der Vorstellung der Großwärmepumpen zur Erzeugung von Fernwärme auch der Aufbau der Sekundärsysteme Glykol/Bachwasser & Fernheizwasser erläutert.

**IV.03**

## **Hochtemperatur-Wärmepumpen in Deutschland –**

### **Marktübersicht, Umsetzungsbeispiele, Forschungsprojekte**

**Dr. Stefan Henninger<sup>1\*</sup>, Hannah Teles de Oliveira<sup>1</sup>, Sebastian Benkert<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Wärme- und Kältetechnik, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[stefan.henninger@ise.fraunhofer.de](mailto:stefan.henninger@ise.fraunhofer.de)

Die Reduktion von Treibhausgasen und die effizientere Nutzung fossiler Energieträger sind von großer Bedeutung zur Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung. Gleichzeitig sind der Verbrauch und die Preisentwicklung von Erdgas in den letzten Monaten sowohl im privaten wie auch insbesondere im industriellen Umfeld aktuell ein drängendes Thema. Neben den Kosten ist die große geopolitische Abhängigkeit nicht nur politisch, sondern auch wirtschaftlich mit hohen Risiken verbunden. Bedingt hierdurch ist der Bedarf nach Informationen von technischen Alternativen, Beispielen und aktuellen Umsetzungen enorm gestiegen. Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) sind für die Bereitstellung von Prozesswärme wie auch Prozessdampf eine mögliche technische Alternative zu den üblichen Verbrennungsprozessen. Ziel dieses Beitrages ist es, Informationen zu industriellen HTWP darzulegen, um die Integration dieser in Deutschland voranzutreiben.

Im Rahmen einer aktuellen Studie wurden weltweit bislang über 40 Systeme von 32 unterschiedlichen Herstellern identifiziert, die Prozesswärme ab 100 °C bereitstellen können. Die Technologien erstrecken sich über einen sehr breiten Leistungsbereich. Die meisten dieser Systeme sind Kompressionswärmepumpen, aber auch thermische Wärmepumpen, mechanische Brüdenverdichter und Sondersysteme wurden berücksichtigt. Insgesamt weisen die Systeme sehr unterschiedliche technologische Reifegrade, vom Prototyp bis hin zur Marktreife auf. Obwohl mehr als ein Viertel der identifizierten Hersteller ihren Hauptsitz in Deutschland haben, sind Umsetzungsbeispiele innerhalb von Deutschland in diesem Temperaturbereich noch rar. Dennoch können die aufgeführten Beispiele als Referenzen für zukünftige Projekte dienen. Außerdem laufen derzeit mehrere Forschungsprojekte in Deutschland, die sich mit HTWP auseinandersetzen, um den technologischen Reifegrad zu erhöhen und Lösungen für Prozess-Integrationen zu erarbeiten.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpen, Marktübersicht, Integration, Umsetzungsbeispiele

**IV.04**

## **KETEC Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik**

### **Vorstellung des Konzeptes**

**Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>, Markus Richter<sup>1</sup>, Olaf Hempel<sup>2</sup>, Mathias Safarik<sup>2</sup>,  
Stefan Henninger<sup>3</sup>, Peter Schossig<sup>3</sup>, Hans-Martin Henning<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik (TUCtt),  
09107 Chemnitz, Deutschland  
[thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de)

<sup>2</sup> Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden (ILK)  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)  
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Im Rahmen dieses Beitrags wird das Konzept der Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik KETEC vorgestellt, welches die Professur Technische Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz, das Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden und das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme durchführen. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierte Verbundprojekt umfasst die Planung und den Aufbau einer technischen Plattform. Nach der Inbetriebnahme bietet diese Plattform vielfältige Möglichkeiten, Grundlagen und Techniken im Bereich der Kälte- und Energietechnik zu erforschen bzw. weiterzuentwickeln. Die Arbeiten werden vor allem durch die Erfordernisse des Klimaschutzes und der Energiewende motiviert. Aber auch neue Ansätze im Bereich der Bildung und Digitalisierung beeinflussen die Konzeption.

Das Verbundvorhaben besteht aus 13 Teilprojekten, die sich mit folgenden Themen beschäftigen: grundlegende Untersuchung von Kältemitteln und Kälteträgern sowie deren Einsatzmöglichkeiten, Verfahren zur Erzeugung, Speicherung und Verteilung von pumpbaren Stoffsystmen mit Wassereis, Rückkühlung von Kältemaschinen, Speicherung thermischer Energie (Wärme- und Kältespeicher), Wärmepumpen mit relativ hohen Temperaturen, Wärmerückgewinnung (z. B. aus Rechenzentren), Optimierung des Systembetriebs zum Kühlen und Heizen, Einsatz moderner mathematischer Methoden, Entwicklung neuer Lern- und Ausbildungsmethoden. Insgesamt kann eine Vielzahl verschiedener Aufgabenstellungen untersucht werden (z. B. Funktion einzelner Komponenten, Wirken der Komponenten im System). Das Alleinstellungsmerkmal der Plattform ist, dass die Verschaltung mehrerer Komponenten geplant ist. Dieser Ansatz ermöglicht systemtechnische bzw. komplexe Untersuchungen und Optimierungen, wobei reale und virtuelle Elemente kombiniert werden können.

Der grundlegende und spezielle Wissensgewinn dient der Kompetenzerhaltung bzw. der Steigerung der wissenschaftlichen und industriellen Wettbewerbsfähigkeit. Die Forschenden, Mitarbeitenden und Studierenden sollen auf akademischem Niveau qualifiziert und in die Lage versetzt werden, zukünftige Aufgaben in der Tiefe und Breite zu lösen. Für jedes fachliche Thema, das auf der Forschungsplattform behandelt wird, besteht ein spezielles Interesse der Industrie. Entsprechende Firmen sind deshalb in die fachlichen Themen eingebunden. Hier wird eine kurz- und mittelfristige Überführung in Produkte, Dienstleistungen usw. angestrebt.

#### IV.05

## Integration von Experimenten ins Wärmepumpensystemdesign

### Optimale Auslegung und experimentelle Bewertung von Wärmepumpensystemen als Wegbereiter für einen emissionsarmen Gebäudebestand

Christian Vering\*, Felix Freischlader, Dirk Müller

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

Wärmepumpensysteme stellen im Gebäudesektor eine Schlüsseltechnologie zur Abkehr von fossilen Brennstoffen in der Wärmeversorgung dar. Zur optimalen Gebäudeversorgung muss ein Wärmepumpensystem optimal ausgelegt und betrieben werden. Auslegung und Betrieb hängen inherent voneinander ab, was die Ermittlung der optimalen Systemkonfiguration (Wärmepumpe, Zusatzheizer, thermische Speicher) und der optimalen Betriebsstrategie (Kältekreisregler, Systemregler) erschwert. In Vorstudien konnte gezeigt werden, dass es mit Hilfe der simulationsbasierten Optimierung möglich ist, Wärmepumpensysteme für Bestandsgebäude optimal auszulegen und zu betreiben. Eine experimentelle Absicherung der Auslegungsoptimierung ist bisher nicht erfolgt.

In diesem Beitrag werden experimentelle Studien in die Auslegungsoptimierung von Wärmepumpensystemen integriert, um getroffene Annahmen zu verifizieren. Die Experimente werden in einer Hardware-in-the-Loop Umgebung durchgeführt, in der Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln untersucht werden können. Für den Anwendungsfall dient eine Propanwärmepumpe mit einer nominellen Heizleistung von 8 kW (A-2W55). Zur Bewertung der Wärmepumpenauslegung wird die Propanwärmepumpe in unterschiedlichen Szenarien vermessen, um den Einfluss der Unter- und Überdimensionierung auf Zielmetriken herauszustellen. Als

Zielmetriken werden abhängig vom Interessensvertreter der SCOP (Energetik, Hersteller) und spezifische Kosten für Wärme (Ökonomie, Nutzer) [in ct pro kWh] gewählt.

Die Messungen unterstreichen, dass eine Unter- oder Überdimensionierung von Wärmepumpensystemen erheblichen Einfluss auf die Energetik und Ökonomie der Wärmepumpe nimmt. Während eine Überdimensionierung dazu führen kann, dass der SCOP in Teillast maximiert (+15 %) wird und die spezifischen Heizkosten aufgrund der zu hohen Investition bis zu 30 % steigen, kann eine Unterdimensionierung den Zusatzheizereinsatz zur Folge haben, die den SCOP reduziert (-30 %) und die spezifischen Heizkosten moderat erhöht (+15 %). Energetik und Ökonomie haben abhängig von der Gebäudeleistung ihre Optima an unterschiedlichen Stellen und können somit nicht gleichzeitig optimiert werden, ohne in der jeweils anderen Zielmetrik einen Kompromiss einzugehen. Insgesamt können die Wärmepumpensysteme alle untersuchten Gebäude auch bei hohen Vorlauftemperaturen (70 °C) versorgen, was das Potential zur Ablösung des Heizkessels in Bestandsgebäuden unterstreicht.

**Stichwörter:**

Wärmepumpen im Bestand, brennbare Kältemittel, Minimale Kosten, Minimale Emissionen, Maximaler SCOP

#### IV.06

## Feldstudie zur Effizienzanalyse von Wärmepumpen im EFH-Bestand

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

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Solare Energiesystems ISE, Gruppe Gebäudesystemtechnik,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg  
[danny.guenther@ise.fraunhofer.de](mailto:danny.guenther@ise.fraunhofer.de)

Seit einigen Jahren wird der Wärmepumpentechnologie eine Schlüsselrolle für die Umsetzung der Wärme wende eingeräumt. In diversen Studien über zweckmäßige Technologie-Ausbaupfade im Wärmesektor wird hervorgehoben, dass sich der Einsatz von Wärmepumpen keineswegs auf den Neubaubereich beschränken darf. Mit Blick auf den Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung könnte dieses Ergebnis nun auch Eingang in die Gesetzgebung finden. Demnach (und dem Koalitionsausschuss am 24.03.2022) sollte ab Anfang 2024 jede neu eingebaute Heizung möglichst 65 % Erneuerbare Energien nutzen, womit Wärmepumpen auch bei Altbauten deutlich in den Fokus rücken, wo deren Anteil aktuell noch gering ist. Die Hemmnisse sind divers und reichen von der komplexeren Ausgangssituation (Gebäudeheizlast, Art und Dimensionierung der Wärme übergabesysteme, bestehende Wärmeerzeuger usw.) die eine aufwendigere Planung nach sich zieht bis hin zu teils grundlegenden Vorbehalten auf Seiten der Planer und Installateure.

Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „WPsmart im Bestand“ (FKZ: 03ET1272A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wpsmart-im-bestand.html>) wurde der unter ökologischen Gesichtspunkten zweckmäßige Einsatz von Wärmepumpen im EFH-Bestand im Rahmen einer breit angelegten Feldstudie demonstriert. Im BMWK-geförderten Nachfolgeprojekt „WP-QS im Bestand“ (FKZ: 03EN2029A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-qs-im-bestand.html>) wird die Messung unter Berücksichtigung weiterer Forschungsfragen (u. a. Schallbelastung durch Außenluft-Wärmepumpen und PV-Eigenstromnutzung) fortgeführt. Der Hauptfokus liegt weiterhin auf der Analyse von Effizienz und Betriebsverhalten unter Berücksichtigung der jeweils individuellen Voraussetzungen. Bis voraussichtlich Ende 2023 werden bis zu 80 Wärmepumpen (ca. 1/3 aus „WPsmart im Bestand“ mit teils neuen Wärmepumpen und ca. 2/3 neue Messobjekte) untersucht. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen werden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und sind in Gebäuden der Baujahre 1850 bis 2001 installiert. Der Zustand der Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert und als Wärmeübergabesysteme werden Heizkörper, Flächenheizungen oder Kombinationen aus beiden eingesetzt. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe oder Ventilator) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. In den Hydraulikkreisen der Wärme-

quelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet.

Der Konferenzbeitrag umfasst die erste Effizienzanalyse für die Auswerteperiode Juli 2021 bis Juni 2022. Dabei stehen die Jahresarbeitszahlen und die direkt quantifizierbaren Effizienzeinflüsse, wie die Systemtemperaturen und die erforderlichen Hilfsenergien, im Vordergrund. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der Baulter der Gebäude sowie den installierten Wärmeübergabesystemen präsentiert. Die Analyse der energetischen Qualität der Gebäude sowie die vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen wird zum Zeitpunkt der Konferenz noch nicht abgeschlossen sein. Eine Abgrenzung zu den Ergebnissen aus „WPsmart im Bestand“ erfolgt u. a. durch die Untersuchung von Wärmepumpen gemäß Stand der Technik (vorher von 2006 bis 2017).

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Bestandsgebäude, Feldtest, Effizienz

## IV.07

### Mehrquellenwärmepumpensystem im Feldtest

#### Betriebsanalyse eines Mehrquellenwärmepumpensystems mit den Quellen Erdreich und Außenluft im Mehrfamilienhausbestand

Jakob Metz<sup>1\*</sup>, Danny Günther<sup>1</sup>, Constanze Bongs<sup>1</sup>

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

Während Wärmepumpen (WP) in neuen Einfamilienhäusern inzwischen die dominierenden Wärmeerzeuger sind, sind sie in Mehrfamilienhäusern (MFH) deutlich unterrepräsentiert. Zentrale quellenseitige Hemmnisse im innerstädtischen Kontext sind die geringe Flächenverfügbarkeit bei Erdreich-WP sowie die Vorgaben der TA Lärm bei Außenluft-WP. Zugleich besteht mit einem Anteil von 82 % im Jahr 2021 (BWP e.V. 2022) ein deutscher Trend hin zu den bzgl. Investitionskosten günstigeren aber weniger effizienten Außenluft-WP (mittlere JAZ im Bestand von 3,1, Erdreich-WP: 4,1 (Günther et al. 2020)).

Im BMWi geförderten Projekt „HEAVEN“ (FKZ: 03ET1540B, [www.lowex-bestand.de/index.php/heaven-viessmann](http://www.lowex-bestand.de/index.php/heaven-viessmann)) wird die kombinierte Nutzung dieser Wärmequellen mittels Erdwärmesonden (EWS) und Luft/Sole-Wärmeübertrager (LWÜT) als Quelle für eine Sole-WP-Kaskade untersucht, um die beschriebenen Nachteile zu kompensieren. Durch eine Teillastdimensionierung der EWS entsprechend der Flächenverfügbarkeit und eine flexible Kompensation der verminderten geringeren Kälteleistung mittels LWÜT kann die vorteilhafte Quelle Erdreich auch im MFH Bestand nutzbar gemacht und die Investitionskosten reduziert werden. Eine Kombination der Vorteile beider Quellen führt zu stabilen und relativ hohen Primärtemperaturen. Neben den spezifischen Vorteilen jeder Quelle werden durch hydraulische Kopplung der Quellen weitere Synergien erschlossen: Die Abtauung des LWÜT mittels EWS sowie die Regeneration des Erdreichs über Außenluft.

Seit November 2021 ist das neu entwickelte Mehrquellen-Wärmepumpensystem in Betrieb und beheizt ein 1995 teilsaniertes MFH mit 30 Wohneinheiten in Karlsruhe-Durlach. Die Normheizlast (-12°C) beträgt 74 kW zuzüglich 10 kW zur Bereitung von Trinkwarmwasser (TWW). Die installierte WP-Kaskade hat 42 kW und 29 kW Heizleistung bzw. 34 kW und 23 kW Kälteleistung bei B0/W35. Ein 40 kW Lamellen-Rundrohr-WÜT sowie ein 30 kW EWS-Feld dienen als Quellen. Ferner unterstützt ein 100 kW Gaskessel bivalent-teilparallel bei der TWW-Bereitstellung sowie bei der Spitzenlastdeckung im Raumheizmodus.

Die Wärmepumpenanlage wird seit Inbetriebnahme mit dem Ziel der quellen- wie senkenseitigen Betriebsanalyse und Optimierung detailliert messtechnisch untersucht. Der Konferenzbeitrag umfasst die Auswertung der ersten Betriebsphase. Es wird zunächst auf fehlerhafte Betriebssituation und die damit verbundenen Optimierungspotentiale der senkenseitigen Regelung eingegangen. Im Zuge dessen konnte der Beitrag des Gasheizkessels von 25 % auf 15 % reduziert und die Arbeitszahl durch Reduktion der Heizkurve um 8 % verbessert

werden. Darüber hinaus erfolgt eine Betrachtung typischer quellenseitiger Betriebssituationen (WP-Betrieb, Regeneration, Abtäufung) im Jahresverlauf mit Blick auf die thermischen Leistungen, Energiemengen und Temperaturen der Wärmequellen Erdreich und Außenluft.

**Quellen**

BWP e.V. (2022): Pressemitteilung | Starkes Wachstum im Wärmepumpenmarkt. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/details/starkes-wachstum-im-waermepumpenmarkt/#content>, zuletzt aktualisiert am 20.01.2022, zuletzt geprüft am 28.04.2022.

Günther, Danny; Wapler, Jeannette; Langner, Robert; Helmling, Sebastian; Miara, Marek; Fischer, David et al. (2020): Wärmepumpen in Bestandsgebäuden. Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "WPsmart im Bestand". Abschlussbericht. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Freiburg.

## IV.08

### **Wärmepumpe mit integriertem Latentwärmespeicher**

#### **Flexibilität für den Einsatz im smart grid**

**Michael Barton\*, Christian Schweigler**

CENERGIE - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere  
Hochschule München, Lothstraße 34, 80335 München, Deutschland  
[michael.barton@hm.edu](mailto:michael.barton@hm.edu)

Um die Klimaschutzziele im Bereich der Wärmeversorgung von Wohngebäuden zu erreichen, muss zum einen der Energiebedarf durch Wärmeschutzmaßnahmen verringert werden und zum anderen die Energiebereitstellung mit hoher Effizienz und unter bestmöglichlicher Nutzung regenerativer Quellen erfolgen.

Entsprechend dem steigenden volatilen Angebot von Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen ist es erforderlich die Verbraucher zu flexibilisieren. Dazu wurde eine Wärmepumpe mit integriertem Latentwärmespeicher entwickelt. Latentwärmespeicher sind durch die Aufnahme großer Wärmemengen innerhalb eines engen Temperaturintervalls ideal für die Kopplung mit Wärmepumpen geeignet. Zudem wurde der Latentwärmespeicher so in den internen Kreislauf der Wärmepumpe integriert, dass während der Speichernutzung keine Erhöhung des Druckhubs erforderlich ist, um einen negativen Einfluss auf die Arbeitszahl zu vermeiden.

Mit einer Pilotanlage wurde das neuartige Konzept umgesetzt. Das Betriebsverhalten und die Funktion als flexible Last im Stromnetz wurden unter Laborbedingungen und in der praktischen Anwendung erprobt und analysiert. Das Funktionsprinzip und die Versuchsergebnisse werden vorgestellt. Die Analyse der Daten liefert Aussagen zur Energieeffizienz, ausgedrückt durch eine Variation des COP während des Speichereinsatzes, und gibt so eine Einschätzung des Potentials für den netzdienlichen Einsatz.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Latentwärmespeicher, Energiewende, Wärmeversorgung

## Flexibilität durch Wärmepumpenintegration

### Analyse eines virtuellen Batteriekonzepts für eine Papierfabrik

Sophie Knöttner<sup>1\*</sup>, Anton Beck<sup>1</sup>, Julian Unterluggauer<sup>1</sup>, Franz Helminger<sup>1</sup>,  
Stefan Puschnigg<sup>2</sup>, Johannes Lindorfer<sup>2</sup>, Dana Hellkamp<sup>3</sup>, Rainer Häring<sup>4</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria

[sophie.knoettner@ait.ac.at](mailto:sophie.knoettner@ait.ac.at)

<sup>2</sup> Energieinstitut an der Johannes-Kepler-Universität Linz, Altenberger Strasse 69, 4040 Linz, Austria

<sup>3</sup> Institute of Machine Tools and Production Technologies (IWF), Chair of Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig, Germany

<sup>4</sup> UPM GmbH, Georg-Haindl-Straße 5, 86153 Augsburg, Germany

Das Verständnis und die Forderung nach Flexibilität der Energiebereitstellung und dem -verbrauch industrieller Produktionssysteme haben sich in den letzten Jahren verändert. Die Entwicklung führte von einem Wunsch nach Flexibilität als zusätzliche, vorteilhafte Eigenschaft hin zu einem Bedarf an Flexibilität als Schlüsselkriterium für einen erfolgreichen Geschäftsbetrieb [1]. Gleichzeitig sind sowohl Möglichkeit als auch Gründe industrielle Flexibilität zu nutzen und zu valorisieren zahlreich. Möglichkeiten bieten u.a. Anlagen mit großem Betriebsbereich und hoher Lastwechselfähigkeit, Energieträgerwechsel durch Substitution der verwendeten Energieumwandlungsanlage, zeitliche Verschiebung von Produktion oder Energieerzeugung/-bezug in Kombination mit Energiespeichern. Gründe für die Bereitstellung industrieller Flexibilität können u.a. folgende sein: schnell wechselnde Anforderungen von Kundenseite bezüglich Produkttyp oder -menge, fluktuierende Verfügbarkeit und Preise von unterschiedlichen Energieträgern, große schwer prognostizierbare Schwankungen im Energiebedarf des Produktionsprozesses oder auch monetäre Anreize für die Bereitstellung von Services für elektrische Netze

Zur Analyse von verschiedenen Flexibilitätsoptionen, die u. a. von Pierri et al. [2] analysiert wurden unter veränderbaren Rahmenbedingungen wurde im Zuge des Projekts BAMBOO<sup>1</sup> ein Modell einer Papierfabrik als „Virtuelle Batterie“ erstellt. Dabei werden folgende Konzepte verglichen und in einem mathematischen Optimierungsmodell abgebildet: das Zusammenspiel von betrieblichen Flexibilitäten (angepasster Betrieb von Produktionsanlagen sowie bestehende Erzeugungsanlagen) sowie die Möglichkeiten durch Investitionen in neue, flexible Energieversorgungsanlagen, wie industrielle, dampferzeugende Wärmepumpen, Elektroboiler und Energiespeicher.

In diesem Beitrag werden vor allem die Implikationen der Integration von dampferzeugenden, industriellen Wärmepumpen in die „Virtuelle Batterie“ analysiert. Es werden zum einen die betrieblichen Möglichkeiten und Vorteile, wie Kostenreduktion oder Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks durch die Nutzung der Flexibilität der „Virtuellen Batterie“ hinsichtlich der Integration von Wärmepumpen analysiert. Darüber hinaus wird untersucht welche unterstützenden Maßnahmen Wärmepumpen in einer solche Virtuellen Batterie beispielsweise für lokale Verteilnetze bereitstellen kann. Dazu werden die Bezugsmöglichkeiten von Strom aus Photovoltaikanlagen im Zuge von Power-Purchase-Agreements unter verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen, sowie mit und ohne Wärmepumpenintegration analysiert und verglichen.

<sup>1</sup> Das Projekt BAMBOO – Boosting new Approaches for flexibility Management By Optimizing process Off-gas and waste use wird von der Europäischen Union im Rahmen des Forschungs- und Innovationsprogramms Horizon 2020 unter der Finanzhilfevereinbarung Nr. 820771 finanziert.

#### Stichwörter:

Dampferzeugende Wärmepumpe, Papierfabrik, Industrielle Flexibilität, Optimierung

#### Literaturverzeichnis

- [1] Golden, William; Powell, Philip (2000): Towards a definition of flexibility: in search of the Holy Grail? In: Omega 28 (4), S. 373–384. DOI: 10.1016/S0305-0483(99)00057-2.

[2] Pierri E., Hellkamp D., Thiede S. and Herrmann C. (2021) Enhancing Energy Flexibility through the Integration of Variable Renewable Energy in the Process Industry, Procedia CIRP, volume 98, pp- 7-12, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.12.001>.

#### IV.10

## Bewertung von Hochtemperaturwärmepumpen zur Erzeugung von Prozessdampf

Christoph Höges<sup>1,\*</sup>, Christian Vering<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

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

Weltweit müssen Treibhausgasemissionen reduziert werden, um die Klimaziele bis 2045 erreichen zu können. Ein entscheidender Bereich ist in diesem Kontext die emissionsarme Bereitstellung von Prozesswärme mit Temperaturen oberhalb von 80 °C. Dabei wird in vielen industriellen Prozessen Prozessdampf auf niedrigen Druckniveaus (< 2 bar) benötigt. Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) stellen hierbei eine vielversprechende Technologie zur Dekarbonisierung der Industrie dar. HTWPs sind allerdings bisher nur wenig erforscht und deren Leistungsfähigkeit ist sensitiv gegenüber dem verwendeten Kältemittel, dem eingesetzten Kreislaufschema und den vorliegenden Betriebsbedingungen. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag das theoretische Potential von HTWP zur Prozesswärmeverzeugung bewertet. Zu diesem Zweck wird zunächst eine Fluidauswahl durchgeführt. Hierbei werden markterhältliche Kältemittel nach ihrer Eignung für Hochtemperaturanwendungen sowie ihres ökologischen Einflusses (Treibhauspotential<150) bewertet und entsprechend selektiert. Insgesamt erfüllen 15 Kältemittel die ökologischen Anforderungen. Von den identifizierten Kältemitteln haben allerdings viele Moleküle eine Doppelbindung und weisen damit eine niedrigere chemische Stabilität auf, was die Notwendigkeit für Langzeitstudien aufdeckt. Anschließend werden die identifizierten Kältemittel in fünf Kreislaufkonfigurationen berechnet. Innerhalb der Berechnung wird ein Verdichtermodell verwendet, welches fluid- und betriebspunktabhängige Verdichterwirkungsgrade bestimmt. Der Anwendungsfall ist die Erwärmung und Verdampfung von flüssigem Wasser von 80 °C auf Prozessdampf bei 120 °C. Insgesamt weist Ammoniak (R717) mit Leistungszahlen von bis zu 6,0 die höchsten Effizienzen auf. R717 führt allerdings zu sehr hohen Verdichteraustrittstemperaturen. Diese können zwar durch alternative Kreislaufkonfigurationen reduziert werden, überschreiten allerdings immer noch die maximalen zulässigen Temperaturen vieler Verdichterschmierstoffe. Folglich sollten ölfreie Alternativen wie Turboverdichter verwendet werden. Insgesamt zeigt das Kreislaufschema mit Dampfeinspritzung in Kombination mit einem internen Wärmeübertrager für alle Fluide die höchsten Effizienzen im Vergleich zu allen anderen Kreislaufschemen.

**Stichwörter:**

Wärmepumpen, Hochtemperatur, Prozessdampf, Low-GWP

#### IV.11

## Marktpotentialabschätzung dampferzeugender Hochtemperatur-Wärmepumpen bis 150°C

Bernd Windholz<sup>1,\*</sup>, Sophie Knöttner<sup>1</sup>, Paula Schmidberger<sup>1</sup>, Franz Helminger<sup>1</sup>

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

Wärmepumpen werden in naher Zukunft vermehrt eine Rolle in industriellen Prozessen spielen. Für niedrige und mittlere Temperaturniveaus in Industrieprozessen werden Wärmepumpenanwendungen bis zum Jahr 2050 laut Prognosen 30 % des totalen Wärmebedarfs abdecken. [1] Durch das Nutzbarmachen von Nieder-

temperaturabwärme wird dieser Technologie großes Potential zugeschrieben, um zukünftige Energieeffizienzbestrebungen und Dekarbonisierungsziele umzusetzen. Entwicklungsstrategien auf europäischer Ebene gehen klar in die Richtung, fossile Energieträger wie z. B. Gas, durch erneuerbare (elektrische) Energieträger zu substituieren. Jüngste politische Geschehnisse verstärken das Bestreben zusätzlich, größere energiewirtschaftliche Unabhängigkeit auf nationaler sowie internationaler Ebene zu erlangen.

Was die europäische Industrie betrifft, spielt Niedertemperatur-Prozesswärme einen wesentlichen Anteil am Energieverbrauch. Etwa 30% der Prozesswärme liegen dabei in einem Temperaturbereich unter 200°C. Als Wärmeträgermedium für die Produktionsprozesse (z. B. Trocknung-, Sterilisation- und Kochen) wird in sehr vielen Fällen Dampf eingesetzt. Der Einsatz von Dampf ist nicht nur praktisch gut erprobt, sondern auch als umwelttechnisch unbedenklich einzustufen. [2]

Ergebnisse aus bereits durchgeföhrten Potentialanalysen [3,4] lassen Potentiale in ausgewählten Produktionsbereichen (Lebensmittel, Papierindustrie, Holzwerkstoffindustrie, etc.) erkennen.

In dieser Marktpotentialabschätzung für dampferzeugende Wärmepumpen werden Daten aus Top-Down Studien mit einem Bottom-Up Ansatz verglichen. Hierfür werden länderspezifische Produktionsmengen aus Statistik-Datenbanken [5] und prozessspezifische Dampfbedarfsmengen für die Produktion ausgewählter Produkte herangezogen.

## Referenzen

- [1] I.E.A. IEA, Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector (2021).
- [2] I.E.A. IEA, HEATING AND COOLING facts and figures: The transformation towards a low-carbon Heating & Cooling sector (2017).
- [3] G. Kosmadakis, Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries, Applied Thermal Engineering 156 (2019) 287–298.
- [4] A. Marina, S. Spoelstra, H.A. Zondag, A.K. Wemmers, An estimation of the European industrial heat pump market potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews 139 (2021) 110545.
- [5] Database - Production - Eurostat, 2022, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>, accessed 31 March 2022.

## Stichwörter:

Marktstudie, Dampferzeugung, Dekarbonisierung, Hochtemperatur-Wärmepumpen

## IV.12

# Laständerungen bei dampferzeugenden Wärmepumpensystemen

## Effizienz- und Kostenaspekte bei kombinierten Open- & Closed-Loop-Wärmepumpensystemen zur Dampfbereitstellung

Johannes Riedl<sup>1\*</sup>, Franz Helminger<sup>1</sup>, Felix Hubmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien, Austria

[Johannes.Riedl@ait.ac.at](mailto:Johannes.Riedl@ait.ac.at)

Dampf gilt als einer der wichtigsten Energieträger und Reaktanten in der Prozessindustrie. Industrielle Hochtemperaturwärmepumpen sind im Sinne der Energieeffizienz und Dekarbonisierung hervorragend dazu geeignet, ungenutzte Abwärme zu dieser Form der Prozessenergie aufzuwerten. Die Weiterentwicklung von Wärmepumpen zur Dampferzeugung [1] und eine Renaissance der mechanischen Brüdenverdichtung (Open loop oder mechanical vapor recompression - MVR) zeigen diesen Umstand auf. Neben der direkten Dampferzeugung auf das gewünschte Dampfdruckniveau durch eine Closed Loop-Hochtemperaturwärmepumpe, kann laut IPCC [2], S. 1876, 1897 & 1899, eine Kombination von Closed Loop- und Open Loop (MVR)-Systemen effizienter sein und die höheren Investitionskosten innerhalb weniger Jahre amortisieren [3].

Um das gesamte Wärmepumpensystem zur Dampferzeugung optimal dem Industrieprozess anzupassen und eine erfolgreiche ökonomische Implementierung in Industrieprozesse zu ermöglichen [4], sind neben den Investitions- und Betriebskosten sowohl die Einsatzgrenzen von Auslegungsbetriebspunkten als auch Teillastverhalten von MVR-Technologien sowie Kompensationsmöglichkeiten bei Teillastbetrieb zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag werden sowohl wesentliche Aspekte von dampferzeugenden Wärmepumpensystemen diverser Konfigurationen mit Lastschwankungen bzw. im Teillastbetrieb bei unterschiedlichen Betriebsparametern als auch ihre Auswirkungen auf Anlagendesign & -betrieb diskutiert.

#### Literaturverzeichnis

- [1] F. DI(FH) Helminger, Steam generating heat pumps: Upcoming technology for heat recovery, Nürnberg, 2021.
- [2] IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926
- [3] F. DI(FH) Helminger, Steam from waste heat: Costs of ways for steam generation, Kopenhagen, 2022.
- [4] S. DI Dr. Dusek, Efficient integration of steam generating heat pumps by adapting to industrial process needs, Kopenhagen, 2022.

#### Stichwörter:

Dampferzeugung, Industrie-Wärmepumpen, Mechanical Vapor Recompression, Laständerungen

## IV.13

### Industriewärmepumpe zur direkten Dampferzeugung

Tim Hamacher<sup>1\*</sup>, Andreas Mück<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SPH Sustainable Process Heat GmbH, Zur Kaule 1, 51491 Overath, Deutschland  
[tim.hamacher@spheat.de](mailto:tim.hamacher@spheat.de)

In industriellen Prozessen wird Wärme häufig in Form von Sattdampf benötigt. Kompressionswärmepumpen eignen sich auf Grund ihres thermodynamischen Prozesses ideal Abwärme wieder in hochwertigen Sattdampf zu überführen. Vorteil gegenüber Dampfverdichtern ist die Fähigkeit den Phasenwechsel effizient durchzuführen. SPH hat eine industrielle Hochtemperaturwärmepumpe entwickelt, die in der Lage ist, Sattdampf bis ca. 6 bar absolut (ca. 160°C) zu erzeugen. Hierfür wird ein selbstentwickelter Hochleistungskolbenkompressor genutzt, welcher extra für Hochtemperaturanwendungen mit HFO Kältemitteln, wie z. B. R1336mzz-Z oder R1233zd, entwickelt wurde.

Es werden hier Laborergebnisse vorgestellt und Einblicke in die ersten realisierten industriellen Anwendungen im Bereich Lebensmittel- und Kunststoffindustrie gegeben.

#### Stichwörter:

Industriewärmepumpe, Hochtemperaturwärmepumpe, Dampf, HFO

## IV.14

### Erstellung eines Benchmarks für Propan Wärmepumpen

#### Füllmengenreduzierter Propan-Wärmepumpen für Sole-Wasser Anwendung

Timo Methler<sup>1\*</sup>, Theresa Paul<sup>1</sup>, Clemens Dankwerth<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[timo.methler@ise.fraunhofer.de](mailto:timo.methler@ise.fraunhofer.de)

Auf Grund der F-Gase-Verordnung müssen Kältemittel in Zukunft ein geringes Global Warming Potential (GWP) aufweisen. In der Wärmepumpenbranche ist insbesondere Propan inzwischen als ein Kältemittel akzeptiert, dass langfristig die Ansprüche der F-Gase-Verordnung abdeckt und einen effizienten Betrieb ermöglicht. Ziel des vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben LC150 („low charge 150 g“) ist die mit Wärmepumpenherstellern und -zulieferern abgestimmte Entwicklung eines standardisierten und kältemittelreduzierten Kältekreises mit dem Arbeitsfluid Propan. Die geringe Füllmenge und die Integration von für die Fertigung

großer Stückzahlen relevanter Randbedingungen soll den Basis für eine breite Einsetzbarkeit dieses Kältekreises ermöglichen und so den erforderlichen starken Ausbau der Technologie im Gebäudesektor, aber auch in der Industrie unterstützen.

Der hier eingereichte Beitrag wird Ergebnisse einer breiten Komponentenvermessung zeigen und diskutieren. Fokus der Vermessung ist die Bewertung einer Vielzahl von Komponenten hinsichtlich Effizienz und Füllmenge, insbesondere letzteres ist für Kältekreise mit geringen Füllmengen bisher nicht zuverlässig möglich. Die in dem Projekt LC150 breit angelegte Messung verwendet hierfür den Ansatz einer Kältekreis-Kreuzevaluation, bei dem durch den schrittweisen Austausch lediglich einzelner Komponenten und den Abgleich mit Simulationen, Aussagen sowohl für die Einzelkomponente als auch für die gesamte Kältekreiskonfiguration möglich sind.

Die untersuchten Kältekreise der Messkampagne wurden als kompakte Einheiten mit zwei Plattenwärmeübertragern aufgebaut und decken Heizleistungen bis 12 kW ab. Untersucht wurden eine große Anzahl unterschiedlicher marktverfügbarer Verdichter (drei Hersteller/ sechs verschiedene Modelle) und Wärmeübertrager (sechs Hersteller / 18 verschiedene Modelle). Die vielversprechenden Ergebnisse (COPs >4,2 für den Betriebspunkt B0/W35 und 150 g) der unterschiedlichen Konfigurationen werden hinsichtlich der Füllmenge, der Effizienz und Jahresarbeitszahl diskutiert und es wird ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben.

**Stichwörter:**

Propan, Wärmepumpe, Füllmengenreduktion, F-Gase-Verordnung

**IV.15**

## **Risikoanalyse für Wärmepumpen mit R290, Entwicklung einer Risikomatrix als Akzeptanzkriterium**

**Holger König<sup>1\*</sup>, Th. Hackensellner<sup>2</sup>, Georg Jager<sup>2</sup>**

<sup>1\*</sup> ref-tech engineering, holger.Koenig@ref-tech.de, Lindau, Germany

<sup>2</sup> Glen Dimplex Deutschland GmbH, Kulmbach, Germany

Wärmepumpen aus dem Hause Glen Dimplex (GDD) mit R290 als Kältemittel wurden bereits von mehr als 15 Jahren in den Markt eingeführt.

Im Rahmen einer aktualisierten und verallgemeinerten Risikoanalyse wurden Risiken bei Leckagen von R290 im Normalbetrieb als auch bei fehlerhaften Betrieb sowie bei menschlichem Versagen und unsachgemäßer Verwendung systematisch untersucht.

In diesem Paper wird die Vorgehensweise zur Ermittlung von Risiken diskutiert und die praktischen Grundlagen hierzu dargelegt. Hierbei werden die verwendeten Kriterien zur Beurteilung von risikobehafteten Ereignissen vorgestellt und ein Vergleich zu anderen bekannten Risiken gegeben. Die Erfahrungen aus dem Betrieb und Service an R290-Anlagen und auch an Anlagen, welche mit HFC betrieben wurden, wurden als Basis für neue und für R290 optimierte Wärmepumpen herangezogen.

Es wird eine Risikomatrix als Akzeptanzkriterium für tolerierbare Risiken, basierend auf der technischen Risikoformel: Ereignisschwere und Ereignishäufigkeit, zur Anwendung bei Wärmepumpen mit R290 vorgeschlagen. Das Akzeptanzkriterium für ein tolerierbares Risiko ermöglicht eine zielorientierte Maßnahmenentwicklung und Überprüfung der Wirk- und Kosteneffizienz von Sicherheitseinrichtungen im geplanten und tatsächlichen Einsatz. Damit etabliert sich die Risikoanalyse als ein wichtiges Werkzeug zur Entwicklung von innovativen Lösungen.

Abschließend wird an verschiedenen Beispielen gezeigt, dass Risiken beim Einsatz von R290 in Wärmepumpen klein und insbesondere handhabbar sind.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Risikoanalyse, Akzeptanzkriterien, tolerierbares Risiko, R290, brennbare Kältemittel

IV.16

## Reversible CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe für Grossgebäude

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

<sup>1</sup> Frigo Consulting AG, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz

[m.decasper@frigoconsulting.ch](mailto:m.decasper@frigoconsulting.ch)

[j.schoenenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schoenenberger@frigoconsulting.ch)

[m.baertsch@frigoconsulting.ch](mailto:m.baertsch@frigoconsulting.ch)

CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen gelten in Schweizer Supermärkten als Stand der Technik. Die Abwärme dieser Anlagen wird neben der Erwärmung des Brauchwarmwassers auch des Öfteren für die Gebäudeheizung verwendet. Um Grossgebäude zuverlässig und fossilfrei mit Wärme zu versorgen, können zusätzlich separate Wärmepumpen eingesetzt werden, welche in einer reversiblen Ausführung auch gerade die Klimatisierung des Gebäudes sicherstellen. Im vorgestellten Projekt wurden die bestehenden Öl-Heizungen und die Klimatisierung eines Einkaufszentrums durch zwei reversible Luft/Wasser CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen mit einer Nenn-Heizleistung von insgesamt 1.1 MW und einer Klimaleistung von 1.3 MW ersetzt. Dieses System wurde im Jahr 2019 entwickelt, gefertigt, vor Ort installiert und im Herbst 2019 in Betrieb genommen. Fortan wurde der Betrieb während rund zwei Jahren begleitet und Betriebsoptimierungen und regelungstechnische Anpassungen durchgeführt. Basierend auf den Messdaten von Herbst 2020 bis Herbst 2021 erfolgte eine detaillierte Auswertung vom Betrieb, mit besonderem Fokus auf die Energieeffizienz. Nebst dem grundsätzlichen Anlagenbeschrieb werden in der Präsentation dieses Projekts die Resultate dieser Auswertung aufgezeigt sowie gesammelte Erfahrungen erläutert.

**Stichwörter:**

Reversible CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe, Heizen und Kühlen, R744-Wärmepumpe, Effizienzsteigerung, Natürliche Kältemittel, Ejektor

IV.17

## Industriewärmepumpen – aktuelle Marktsituation und Perspektiven

Steffen Klein

COMBITHERM GmbH, Friedrichstraße 14-16, 70736 Fellbach

[s.klein@combitherm.de](mailto:s.klein@combitherm.de)

Die Wärmewende und die damit verbundene Dekarbonisierung bringt Wärmepumpen in den Fokus der industriellen Wärmeerzeugung. Da über die Hälfte des Endenergieverbrauchs der Industrie für die Bereitstellung von Prozesswärme benötigt wird, ergibt sich für industrielle Großwärmepumpen ein großes Potenzial. Die Marktteilnehmer von Betreiber- und Herstellerseite suchen nach Wegen, die notwendige Transformation technisch und organisatorisch zu bewältigen. Der Vortrag zeigt den aktuellen Stand und die Schwierigkeiten dieses Prozesses aus verschiedenen Blickwinkeln. Mit Hilfe von realisierten Praxisbeispielen, Software-Tools und strukturierten Strategien zur Marktentwicklung kann die Umsetzung von strombasierter Wärmeerzeugung beschleunigt und optimiert werden. Dargestellt werden der Stand der Technik bis Heißwasser-Temperaturen von 100 °C und mögliche Wege zur Dampferzeugung bis 160 °C. Ein Schlüssel hierfür sind neuartige Kältemittel und optimierte Komponenten des Kältekreislaufs.

IV.18

## Stationäre Leistungsdaten aus instationären Messungen: Hochtemperaturwärmepumpe

**Leon P. M. Brendel<sup>1</sup>, Cordin Arpagaus<sup>1</sup>, Dennis Roskosch<sup>2</sup>, André Bardow<sup>2</sup>,  
Stefan S. Bertsch<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>OST - Ostschweizer Fachhochschule – Buchs SG, Schweiz

<sup>2</sup>Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich, Schweiz

Die Messung der Heizleistung und des COPs von Kaltdampfanlagen und Wärmepumpen benötigt einen erheblichen Zeitaufwand. Bei der Kontrolle von gefertigten Komponenten mit hohen Stückzahlen oder im frühen Entwicklungsstadium von Systemen ist diese Zeit oft nicht gegeben oder wird zum limitierenden Faktor. Auch im akademischen Betrieb beschneiden die langen Testzeiten die Gesamtzahl an Messungen und parametrischen Studien. In dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, welche den COP einer Hochtemperaturanlage als Funktion des Temperaturlifts aus instationären Messdaten berechnen kann und die vorher gemessenen stationären Arbeitspunkte exakt abbildet. In 1 Stunde effektiver Messzeit konnten so die stationären Daten aus mehrtägigen Messungen abgebildet werden. Der Prüfling war eine mit R1336mzz(E) betriebene Wasser-Wasser Wärmepumpe mit ca. 10 kW Heizleistung, Quelleneintrittstemperaturen im Bereich 30 - 40°C und Senkenaustrittstemperaturen im Bereich 70 - 130°C. Könnte diese Methode etabliert werden, so wären im akademischen und industriellen Forschungs-, Entwicklungs-, und Prüfprozess weitaus mehr Messreihen möglich, welche wichtige Informationen über die Prüflinge liefern könnten. Die Methode ist vielversprechend, benötigt aber noch Validierung auf anderen Prüfständen und könnte mit hinterlegten Modellen noch verbessert werden.

**Stichworte:** Hochtemperaturwärmepumpen, Leistungsmessung, stationär, instationär

IV.19

## Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen in erneuerbare Energiesysteme

**Jaromir Jeßberger<sup>1</sup>, Florian Heberle<sup>1</sup>, Dieter Brüggemann<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Lehrstuhl für technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT), Zentrum für Energietechnik (ZET),  
Universität Bayreuth, Prof.-Rüdiger-Bormann-Strasse 1, DE-95447 Bayreuth  
[jaromir.jessberger@uni-bayreuth.de](mailto:jaromir.jessberger@uni-bayreuth.de)

Die globale Erwärmung zu stoppen, ist eine der größten Aufgaben der heutigen Zeit. Doch noch immer spielen erneuerbare Energiequellen im Wärmesektor mit etwa 21 % in 2018, eine untergeordnete Rolle, wobei dieser Sektor über 50 % des Endenergieverbrauchs in Europa ausmacht (World Energy Council 2020). Um thermische Energie nachhaltig und ressourcenschonend bereitzustellen, ist die Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) in erneuerbare Energiesysteme ein vielversprechender Ansatz. Potenzielle Anwendungsbereiche sind geothermische Systeme oder Nutzung von Abwärme industrieller Prozesse. Ziel ist es durch Einsatz der HTWP, eine nachhaltige Spitzenlastdeckung zu gewährleisten, die thermische Leistung unterschiedlicher Systeme zu steigern oder Vorlauftemperaturen anzuheben.

Die Integration in genannte Systeme erfordert Flexibilität und gute Teillasteigenschaften, um beispielsweise Spitzenlasten oder schwankende Bedarfe auf Grund von Temperaturschwankungen oder Produktionsengpässen energieeffizient ausgleichen zu können. Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Untersuchung des Teillastverhalten einer HTWP im Labormaßstab. Die Ergebnisse dienen als Basis für unterschiedliche Anwendungsfälle in den genannten Bereichen, um allgemeingültige Empfehlungen für den Teillastbetrieb und die Integration in genannte Systeme abzuleiten. Die Versuchsanlage ist eine HTWP mit einer thermischen Leistung von 35 kW

und einer Vorlauftemperatur von bis zu 105 °C. Als Arbeitsmedium wird das Kältemittel R1233zd(E), mit niedrigem Treibhauspotential (GWP) und Ozonabbaupotential (ODP), verwendet. Parallel zum Aufbau des Teststandes, wurde ein quasi-stationäres Simulationsmodell in ASPEN Plus V10 im On- und Off-Design aufgebaut, welches mit dem Versuchsstand validiert und als Basis für erste thermoökonomische Analysen verwendet wird.

Im Auslegungspunkt konnte ein Coefficient of Performance (*COP*) zwischen 4,08 und 4,23 bei einem Temperaturhub zwischen 36,95 °C und 38,78 °C erreicht werden. Die Untersuchungen im Teillastbetrieb zeigen, dass mit steigender Verdichter Leistung der *COP* fällt und der Temperaturhub steigt. Weiterhin werden experimentelle Messreihen sowohl auf System- als auch auf Komponentenebene analysiert. Der Fokus liegt hier bei auf dem Teillastverhalten, der maximal möglichen Vorlauftemperatur, sowie bestimmten, für Anwendungsfälle wichtigen, Betriebspunkten. Des Weiteren werden in weiterführenden Arbeiten alternative Kältemittel untersucht, sowie Dichte-, Viskositäts- und gaschromatographische Messungen durchgeführt, um die Auswirkung des Hochtemperaturbetriebs auf Arbeitsmittel und Öl zu untersuchen.

#### Literaturverzeichnis

World Energy Council (2020): Der europäische Wärmemarkt: Überblick und Herausforderungen. World Energy Council. Online verfügbar unter <https://www.weltenergierat.de/publikationen/energie-fuer-deutschland/der-europaeische-waermemarkt-ueberblick-und-herausforderungen/>, zuletzt geprüft am 09.03.2022.

## IV.20

### Hochtemperaturwärmepumpe mit großem Temperaturhub

Christian Schlemminger<sup>1\*</sup>, Madita Kruse<sup>1</sup>, Michael Bantle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SINTEF Energi AS, Kolbjørn Hejes Vei 1B, NO-7465 Trondheim, Norwegen

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

Thermische Prozesse in der Nahrungsmittelindustrie sind oftmals eine Kombination aus Erwärmung und Abkühlung/Gefrierung eines Produktes. Prozesskühlung wird dabei meistens mittels einer Wärmepumpe erzielt, während für die Prozesswärme oftmals eine fossile Energiequelle genutzt wird. Kombinierte Wärmepumpensysteme, die sowohl Prozesskühlung als auch Prozesswärme liefern, bieten die Möglichkeit Primärenergie und CO<sub>2</sub>-emissionen einzusparen.

Im vorliegenden Fall wurde eine Propan-Butan-Wärmepumpe weiterentwickelt, welche an der Wärmequelle Prozesskühlung in der Form von Wasserglykol mit einer Temperatur von -20 °C liefert und an der Wärmesenke Heißwasser mit 120 °C bereitstellt. Der bewusste Einsatz von natürlichen Kältemitteln ermöglicht das Vermeiden zukünftiger welcher der Einsatz von synthetischen Kältemitteln mit sich führen kann.

Eine 30 kW<sub>th</sub>-Demonstrationsanlage wurde unter variierenden Betriebsbedingungen getestet. Die Messergebnisse wurden herangezogen um ein numerisches Modell basierend auf Modelica/Dymola und der TIL-Bibliothek zu validieren. Das Modell wurde herangezogen um die Dimensionierung und Betriebsverhalten von Komponenten wie z. B.: Verflüssiger, Verdampfer, Kaskadenwärmeübertrager und Kompressoren näher zu untersuchen. Des Weiteren wurde die Verteilung von Kältemittelverteilung im System untersucht.

Die durchgeführten Experimente zeigen eine kombinierte Leistungszahl der Wärmepumpe von 2,2 bei einem Wasserseitigen Temperaturhub von -20 °C auf 120 °C. In welcher die wasserseitigen Wärmeverluste bereits berücksichtigt wurden. Temperaturdifferenzen auf Quellen- und Senkenseite waren mit 5K und 20K moderat. Dies bedeutet, dass für 1 kW elektrische Energie Prozesswärme von 1,3 kW bei 120 °C bereit wurde und gleichzeitig Prozesskühlung von 0,86 kW bei -20 °C erzielt wurde. Der kombinierte Carnot-Wirkungsgrad der Demonstrationsanlage lag somit bei circa 48 %. Das Energiesparpotenzial gegenüber einer herkömmlichen Prozesskühlung mit einem kombinierten Warmwasserboiler liegt bei 37 %.

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

**Stichwörter:**

Propan-Butan-Kaskade, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Tiefkühlung, Gefrieren, Heißwasser, Natürliche Kältemittel

IV.21

### ***Historischer Vortrag***

## **Rückblick zur Wärmepumpenentwicklung**

Warum sich Wärmepumpen nur in Krisenzeiten entwickelt haben

Rainer M. Jakobs, DMJ Beratung, Breuberg

[Dkv.jakobs@dkv.org](mailto:Dkv.jakobs@dkv.org)

IV.22

## **Hochtemperaturwärmepumpen bis zu 250°C Ergebnisse einer thermodynamischen Machbarkeitsanalyse**

Johannes Riedl<sup>1\*</sup>, Reinhard Jentsch<sup>1</sup>, Verena Sulzgruber<sup>1</sup>, Dr. Julian Unterluggauer<sup>1</sup>

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

Elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen haben sich als geeignet erwiesen, um in Industrieprozessen Wärme auf nachhaltige und effektive Weise bereitzustellen. Einzelne Hersteller bieten diese klassischen Hochtemperaturwärmepumpen mit Vorlauftemperaturen bis 165°C an [1]. Verschiedene Projekte mit Demonstrationsanlagen auf TRL7 zeigen die technische Machbarkeit von Nutzungstemperaturen bis etwa 155°C [2, 3]. Eine Steigerung der technisch realisierbaren Nutzungstemperaturen erhöht das Umsetzungspotenzial, sie birgt jedoch Problemstellungen hinsichtlich Verdichtertechnologie, Kältemittel und Kreislaufdesign [4, 5]. Außerdem ist mit einer Steigerung des Temperaturhubs zwischen Wärmequellentemperatur und Wärmenutzungstemperatur zu rechnen. Bei steigendem Temperaturhub sinkt die Wärmepumpeneffizienz, für einen wirtschaftlichen Betrieb muss diese jedoch ausreichend hoch sein. Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz, die bisher wenig beachtet wurden, rücken in den Vordergrund.

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse einer thermodynamischen Machbarkeitsanalyse sowie Untersuchung der optimalen Betriebsparameter für ein Kompressionswärmepumpenkonzept präsentiert, welches Nutzungstemperaturen bis zu 250°C ermöglicht.

### **Literaturangaben**

- [1] IEA International Energy Agency: Annex 58: High-Temperature Heat Pumps - Task 1: Technologies. State of the art and ongoing developments for systems and components.  
<https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>, abgerufen am: 22.09.2022
- [2] Villanueva, J. A. u. Meneghelli, V.: Boosting Industrial Flexibility. <http://bambooproject.eu/>, abgerufen am: 10.03.2022
- [3] AIT Austrian Institute of Technology GmbH: DryFiciency, 2020. <https://dryficiency.eu/>, abgerufen am: 01.11.2021
- [4] Hochtemperaturwärmepumpen bis zu 250°C. Eine Konzeptstudie und EU-Forschungsvorhaben, Helminger, F., Unterluggauer, J., Riedl, J., Lauermann, M., Jentsch, R. u. Geyer, J., Dresden 2021

- [5] Screening for new future-proof refrigerants for high-temperature heat pumps, Pachai, A. C., Arpagaus, C. u. Hafner, A., Dresden 2021

**Stichwörter:**

Hochtemperaturwärmepumpen, Konzeptstudie, Machbarkeitsanalyse, Nutzungstemperaturen bis 250°C

IV.23a

## Anlagenüberwachung von Wärmepumpen

### Automatisierte Identifikation von Betriebszuständen in Wärmepumpensystemen

Thomas Storek<sup>1\*</sup>, Jonathan Kriwet<sup>1</sup>, Alexander Kümpel<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

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

Gebäudeenergiesysteme (GES) haben hohes Einsparungspotenzial hinsichtlich ihres Primärenergiebedarfs und ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen. Neben der Integration effizienterer und erneuerbarer Anlagentechnik ist der effiziente Anlagenbetrieb ein Schlüssel zur Nutzung dieses Potenzials.

Aktuelle Studien zeigen, dass etwa 40 bis 70 % heutiger GES nicht optimal betrieben werden. Durch die Integration von Monitoringsystemen werden gleichzeitig immer mehr Betriebsdaten gesammelt und gespeichert. Die manuelle Datenauswertung für die Betriebsoptimierung ist jedoch zeitaufwändig und erfordert ein hohes Maß an Expertenwissen. Eine automatisierte Analyse der Datensätze hingegen ermöglicht es Systemintegratoren bei der Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung mit intelligenten Energiedienstleistungen, wie z. B. Fehlerdiagnose, zu unterstützen.

Ein entscheidender Schritt, um das Verhalten von Anlagen zu analysieren, ist die Identifikation expliziter und impliziter Betriebszustände. Dieser Beitrag stellt daher eine modellbasierte Methode zur automatisierten Detektion von Betriebszuständen und deren Kausalzusammenhänge vor.

Die Methode wird anhand von Betriebsdaten einer realen Wärmepumpe evaluiert. In einem ersten Schritt erkennt sie ohne vorherige Kenntnis der Anlage auch bei verrauchten Messdaten mit 77 % Genauigkeit die unterschiedlichen Betriebsmodi und deren Wechsel. Die erreichten Ergebnisse sind hierbei besser als die der ausgewählten Vergleichsalgorithmen, die ihrerseits eine umfangreiche Datenvorverarbeitung und Filterung erfordern. In einem zweiten Schritt werden aus den erkannten Zuständen kausale, für den Menschen nachvollziehbare Regeln für Moduswechsel abgeleitet. Durch die vorgeschlagene Methode kann der Anlagenbetrieb zukünftig überwacht und fehlerhafte oder suboptimale Betriebsweisen automatisiert identifiziert werden.

*Wir danken für die finanzielle Unterstützung durch das BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz), Förderkennzeichen 03ET1495A.*

**Stichwörter:**

Gebäudeautomation, Inbetriebnahme, Maschinelles Lernen, Systemidentifikation

IV.23b

## Bewertung und Verbesserung der Regelung einer RLT-Anlage

Felix Stegemerten<sup>1\*</sup>, Marwa Maghnie<sup>1</sup>, Alexander Kümpel<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen  
[felix.stegemerten@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:felix.stegemerten@eonerc.rwth-aachen.de)

Der Betrieb von Gebäudeenergiesystemen und deren Komponenten kann durch eine gut eingestellte Regelung effizienter gestaltet werden. In der Praxis werden Regler jedoch häufig ohne ausreichende Tests in Betrieb genommen, wodurch eine verringerte Energieeffizienz im Betrieb des jeweiligen Systems resultieren kann. Insbesondere der hohe Aufwand, der mit umfassenden Tests verbunden ist, sorgt für die seltene Bewertung und anschließende Verbesserung der Regler. Um das Testen von Reglern zu erleichtern, wird in dieser Arbeit eine cloudbasierte Testplattform vorgestellt und erweitert, welche eine einfache und schnelle modellbasierte Bewertung und Verbesserung von Reglern ermöglicht.

Für die Reglerbewertung kommunizieren die Regler über eine Cloud-Plattform mit einer virtuellen Regelstrecke des zu untersuchenden Systems. Die Tests der Regler erfolgen anhand einer Testmethodik, welche, nach initialen Angaben durch den Nutzer, eine automatisierte Bewertung des Betriebs ermöglicht. Dabei wird das System in unterschiedlichen Szenarien untersucht und die Regelqualität anschließend ausgewertet. Das Modell der Regelstrecke erlaubt zusätzlich die Bestimmung eines optimalen Regelverhaltens und somit einer Referenz, welche eine Einordnung der Testergebnisse ermöglicht. Mithilfe von Verbesserungsregeln aus der Fachliteratur und der Hinzunahme des optimalen Regelverhaltens werden Verbesserungen für unterschiedliche Reglertypen abgeleitet.

Die Testmethodik wird an der Regelung einer raumluftechnischen Anlage (RLT) angewandt. Dazu werden die Anlage und die jeweiligen Regler in Modellen abgebildet und anschließend getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass der Betrieb einzelner Regler Abweichungen vom angedachten Sollwert aufweist. Diese Abweichungen beeinflussen den Betrieb der gesamten Anlage, wodurch Energieeinsparpotential verloren geht. Die aus der Methodik abgeleiteten Verbesserungen werden auf die reale Anlage übertragen und sorgen für eine erhöhte Regelqualität und Energieeffizienz im Betrieb.

**Stichwörter:**

Reglerbewertung, Reglerverbesserung, raumluftechnische Anlage, Automatisierung, Cloud