



# Deutsche Kälte- und Klimatagung 2024

**Dresden**

**20. – 22. November 2024**

## **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 & Internationales Congress Center Dresden**

Devrientstraße 10-12 / Ostra-Ufer 2  
01067 Dresden  
T. +49 (0) 351 216 1070  
E. [meeting.dre@maritim.de](mailto:meeting.dre@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 1.....</b>	<b>10</b>
Kryotechnik	
<b>Arbeitsabteilung 2 .....</b>	<b>23</b>
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung 3 .....</b>	<b>38</b>
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung 4 .....</b>	<b>52</b>
Kälteanwendung	
<b>Arbeitsabteilung 5 .....</b>	<b>67</b>
Klimatechnik	
<b>Arbeitsabteilung 6 .....</b>	<b>75</b>
Wärmepumpenanwendung	

## **Hinweis:**

\* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

**S.01**

## **Thermografische Messungen an Haushaltskältegeräten mit Vakuumisolationspaneele**

**Emily Potthast<sup>1\*</sup>, Andreas Elsner<sup>1</sup>, Andreas Paul<sup>1</sup>, Tina Kasper<sup>1</sup>**

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

In Haushaltskältegeräten werden in den letzten Jahren immer häufiger Vakuumisolationspaneelle (VIP) eingesetzt. Hiermit ist es unter anderem möglich, dass die Geräte in die Energieeffizienzklassen A bis C klassifiziert werden können. Ein VIP besteht vereinfacht aus einer Schutzfolie, die nahezu gasdicht ist und einem Füllmaterial, welches für die Formstabilität im Vakuum zuständig ist. Aufgrund von technischen Alterungsprozessen kommt es mit der Zeit zu einem Anstieg des Innendrucks im VIP, wodurch die Wärmeleitfähigkeit des VIP steigt. Je nach Füllmaterial erfolgt dieser Alterungsprozess unterschiedlich schnell. Im Extremfall kann so ein neues Haushaltskältegerät der Energieeffizienzklasse A nach 1 bis 3 Jahren nur noch als Klasse D bis F eingestuft werden.

Innerhalb eines Forschungsprojekts wurden Haushaltskältegeräte mit VIP thermografisch untersucht. Im Rahmen dieser Studienarbeit wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, mit dem die zeitliche Veränderung von Wärmebrücken begutachtet werden kann und so Rückschlüsse auf den Effizienzverlust der Geräte möglich sind. Der Funktionsnachweises dieses Versuchsaufbaus wurden an einem Haushaltskältegerät mit künstlich gealterten Vakuumisolationspaneelen durchgeführt. Diese Arbeiten bieten zukünftig die Möglichkeiten Haushaltskältegeräten mit VIP bezüglich ihres Degenerationsverhaltens besser zu beurteilen.

**Stichwörter:**

Haushaltskältegeräte, Energieaufnahme, Alterung, Isolierung, Vakuumisolationspaneelle

**S.02**

## **Untersuchung nichtparametrischer Verfahren zur Prädiktion des Wärmeübergangs beim Blasensieden**

**Ziad Elekiaby\*, Hendrik Margraf, Andrea Luke**

Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Technische Thermodynamik,  
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland  
[ttk@uni-kassel.de](mailto:ttk@uni-kassel.de)

Verdampfungsprozesse sind in vielen Bereichen der Kälte- und Wärmepumpentechnik von hoher technischer Bedeutung. Verdampfer werden allerdings stets überdimensioniert, da die physikalischen Mechanismen besonders im Bereich des Blasensiedens aufgrund der vielen Einflussparametern noch nicht vollständig verstanden sind. Nichtparametrische Regression bietet eine vielversprechende Möglichkeit den Einfluss von mehreren Parametern auf eine unabhängige Variable zu modellieren, um so den Wärmeübergang zu berechnen.

In diesem Zusammenhang werden zunächst in einer Literaturrecherche geeignete nichtparametrische Modelle, die unter dem Oberbegriff „Maschinelles Lernen“ bekannt sind, eruiert. Am Fachgebiet für Technische Thermodynamik steht eine Datenbank mit experimentellen Daten zum Wärmeübergang beim Sieden in freier Konvektion von nahezu allen Kältemitteln und Heizflächenkonfigurationen zur Verfügung. In einem ersten Schritt müssen hieraus die Messwerte extrahiert werden, die im Bereich des Blasensiedens liegen. Hierfür wird eine bereits entwickelte Methode überprüft und ungeeignete Messreihen markiert. Die gefilterten und überprüften Daten bilden die Grundlage für das „Training“ der recherchierten Modelle zur Vorhersage des Wärmeübergangs. Im Rahmen einer zusätzlichen Sensitivitätsanalyse sollen die Eingangsgrößen und deren Anzahl variiert werden, um die Genauigkeit der Modelle weiter zu maximieren.

Die Modelle zur Vorhersage des Wärmeübergangskoeffizienten sollen anschließend bewertet und untereinander verglichen werden. Abschließend wird das Modell mit der höchsten Bestimmtheit mit der Korrelation für den Wärmeübergang beim Blasensieden in freier Konvektion aus dem VDI-Wärmeatlas verschiedener Auflagen verglichen.

**Stichwörter:**

Wärmeübergang, Blasensieden, Kältemittel Machine Learning, Kl

**S.03**

## **Experimentelle Untersuchung einer Thermischen Flüssigeiserzeugungsanlage**

**Zen Shalfeh**

TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen // Institut für Energietechnik  
Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
Münchener Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland  
[zshalfeh@drwild.de](mailto:zshalfeh@drwild.de)

Einer der Hauptfaktoren zur erfolgreichen Energiewende ist die effiziente Gestaltung von Energiespeichern. Für die Kältespeicherung bietet Eis den Vorteil einer höheren Speicherkapazität als Wasser. Eis kann das 8-fache mehr an Energie als Wasser in sich speichern. Eis ist anders als Wasser jedoch nicht pumpfähig. Flüssigeis ist eine Mischung aus Wasser und Eispartikeln, Flüssigeis ist eine Mischung aus Wasser und Eispartikeln, es verbindet Flüssigeis die Vorteile der hohen Speicherkapazität von Eis und die Pumpfähigkeit von Wasser.

Ein weiterer Hauptfaktor zur erfolgreichen Energiewende ist die Abwärmenutzung. Mithilfe von Absorptionskälteanlagen kann durch Abwärme Kälte bereitgestellt werden. Bisher sind die Kältenutztemperaturen von Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen aufgrund des Gefrierpunkts von Wasser auf ca. 4°C begrenzt. Um diesen Bereich zu erweitern und gleichzeitig ein transportfähiges Kälteträgermedium bereitzustellen, wurde eine Flüssigeisversuchsanlage mit thermischem Antrieb innerhalb des Projektverbundes SubSie (Sorptionsverdampfer für Siedetemperaturen unter 0°C) an ILK Dresden entwickelt. Durch Zugabe eines Additivs in den Verdampfer konnte der Gefrierpunkt des Wassers gesenkt bzw. angepasst werden. Ziel dieser Arbeit war es, die Machbarkeit der thermischen Flüssigeiserzeugung experimentell nachzuweisen.

Während der obengenannten Diplomarbeit konnte Flüssigeis thermisch erzeugt werden und die Funktionalität der Anlage nachgewiesen werden. Die Gefriertemperaturabsenkung erfolgte durch Zugabe von ca 2 M% Kaliumformiat in den Verdampfer. Es konnte dadurch gezeigt werden, dass das Stoffpaar Wasser-Lithiumbromid für einen Anwendungsbereich von unter 4 °C geeignet ist. Es konnte eine Kältemitteltemperatur von -1 °C erzielt werden. Die Kälteleistung dieser Anlage wurde mit Variation verschiedener Randbedingungen, wie der Heißwassereintritts-, Kühlwassereintritts- und Verdampfungstemperatur, vermessen. Die Anlage hatte eine Nennleistung von 15 kW bei einer Verdampfungstemperatur von 2 °C und 10 kW bei Verdampfungstemperatur von -0,85 °C. Heiz- und Kühlwassertemperaturen lagen bei diesen Messungen bei 80 °C und 27 °C.

Die Anlage hat Optimierungspotenzial hinsichtlich der Kristallisation der Wasser-LiBr-Lösung beim Herunterfahren der Anlage aufgezeigt. Dies wurde innerhalb dieser Arbeit optimiert. Durch diese Optimierung konnte die Anlage nach Durchführung der Experimente wesentlich schneller heruntergefahren werden.

**Stichwörter:**

Flüssigeis, Gefrierpunktabsebung, Kristallisationskonzentration von Wasser-Lithiumbromid-Lösung

## **Handling von Kryoproben**

### **Potentielle Überschreitungen kritischer Temperaturen**

**Magdalena Meyer zu Vilsendorf<sup>1\*</sup>, Tarek Deeb<sup>1</sup>, Manuela Nagel<sup>2</sup>, Johannes Schenkel<sup>3</sup>, Birgit Glasmacher<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> Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung,  
Corrensstraße 3, 06466 Seeland OT Gatersleben, Deutschland  
[nagel@ipk-gatersleben.de](mailto:nagel@ipk-gatersleben.de)

<sup>3</sup> Deutsches Krebsforschungszentrum, Cryopreservation W430,  
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Deutschland  
[j.schenkel@dkfz-heidelberg.de](mailto:j.schenkel@dkfz-heidelberg.de)

Die Sammlung und langfristige Erhaltung von Zellen, Geweben und reproduzierbaren Organen menschlicher, tierischer, pflanzlicher Herkunft sowie von Mikroorganismen bei ultra-niedrigen Temperaturen, i.d.R. < -150 °C ist fundamental für die gegenwärtige Forschung und den Gesundheits- und Biodiversitätssektor. Trotz sorgfältig angepasster Protokolle und geschultem technischen Personal führt das Handling und der Transfer der Proben aus und in den Lagertank zu einer konvektiven Wärmezufuhr und dementsprechend einer Temperaturveränderung in den Proben und damit zu einer Schädigung des Probenmaterials.

Diese Veränderungen variieren je nach Ausgangsbedingungen oder Probeneigenschaften wie beispielsweise der spezifischen Wärmekapazität. Die Temperaturänderung  $\Delta T$  in den Proben kann bei einem kontinuierlichen Wärmestrom  $Q$  und einer Zeitdauer  $\Delta t$  durch die Gleichung  $\Delta T = \frac{Q \cdot \Delta t}{m \cdot c_p}$  beschrieben werden, wobei  $m$  die Masse der Probe und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität darstellt.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Gemeinschaft Deutscher Kryobanken (GDK) wurde zunächst eine Umfrage zu Lagermethoden, -dauer und -bedingungen sowie den Zusammensetzungen der gelagerten Materialien erstellt. Die Ergebnisse wurden anschließend ausgewertet und repräsentative Szenarien reproduziert. Hierbei wurden zeitliche Temperaturgradienten in den verschiedenen Phasen des Handlings (Einlagerung, Lagerung, Auslagerung und Transport) erfasst und ausgewertet.

Dafür wurde eine im Institut für Mehrphasenprozesse entwickelte Messeinheit verwendet, in welche Thermoelemente zur Temperaturfassung integriert sind. Parallel wurde das Lagergut thermisch mithilfe der Dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) charakterisiert und Werte wie die Glasübergangstemperatur  $T_g$  ermittelt. Ziel dabei war es, mögliche Überschreitungen der  $T_g$  beim Handling zu identifizieren, um mögliche Schädigungen bzw. negative Einflüsse auf die Qualität des Lagerguts zu untersuchen.

**S.05**

## **Modellbildung und Simulation einer Wärmepumpe für einen multifunktionalen Hochtemperatur-Lernprüfstand**

**Gesina Hölscher<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Kompressionstechnik, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[gesina.hoelscher@ise.fraunhofer.de](mailto:gesina.hoelscher@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> Hochschule Flensburg, Energy and Life Science, Kanzleistraße 91–93, 24943 Flensburg, Deutschland

Die Bachelorarbeit untersucht die Modellierung und Simulation eines multifunktionalen Lernprüfstands für Hochtemperatur-Wärmepumpen, entwickelt im Projekt KETEC. Ziel ist es, verschiedene Verschaltungsoptionen in Epsilon® Professional zu modellieren, simulieren und analysieren: einen einfachen Kreis, einen Kreis mit Economizer-Wärmeübertrager, einen Kreis mit Flash Tank, einen Kreis mit zweifacher Quellenanbindung sowie die optionale Integration eines internen Wärmeübertragers und eines Unterkühlers. Modelliert wurden Wärmeübertrager und Verdichter nach Herstellerangaben und Annahmen. Die Simulationen analysieren Leistungszahlen, Massenströme und Druckgastemperaturen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Prüfstand erfolgreich in der Software abgebildet wurde, mit überwiegend plausiblen Ergebnissen. Bei zweistufigen Verdichtungen traten jedoch erhebliche Effizienzverluste auf, die noch durch Messungen validiert werden müssen. Identifizierte Maßnahmen zur Effizienzsteigerung umfassen die Minimierung der Überhitzung, den Einsatz eines Flash Tanks, eines internen Wärmeübertragers und/oder einer direkten Unterkühlung des Kältemittels.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Modellbildung, Simulation, Epsilon® Professional

**S.06**

## **Entwicklung eines Messverfahrens zur Massebestimmung von Kältemittel in Wärmeübertragern**

**Marc-Joachim Meyer**

Technische Universität Hamburg, Institut für technische Thermodynamik, Denickestr. 17, 21073, Deutschland  
[marc-joachim@hotmail.de](mailto:marc-joachim@hotmail.de)

Das Hauptziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung einer effektiven Messmethodik zur kontinuierlichen Bestimmung der Masse in Wärmeübertragern. Es wurde eine Methodik gewählt, welche im Wesentlichen die gesamte Masse des Wärmeübertragers mithilfe einer digitalen Waage aufzeichnet. Zur Validierung des Konzeptes wurde ein Teststand gebaut, an dem erste Messungen durchgeführt wurden. Im Rahmen der Arbeit wurden ausschließlich Kalibriergewichte verwendet um die Messabweichung des Teststandes zu bestimmen, in den Versuchen wurde kein Kältemittel verwendet. Bei den Messungen wurden mehrere Quellen für Messabweichung erkannt, allen voran die mit dem Wärmeübertrager verbundenen Leitungen, welche identisch mit in späteren Versuchen benötigten Kältemittel-Leitungen sind. Die ermittelte Messabweichung liegt bei bis zu 40 %, jedoch ist die Reproduzierbarkeit hoch und die Präzision akzeptabel. Durch Verwendung einer Kalibrierfunktion konnte die Messunsicherheit daher deutlich reduziert werden. Im Rahmen der gestellten Anforderung kontinuierliche Messungen zu ermöglichen, sind die Ergebnisse der durchgeführten Messungen als positiv zu bezeichnen. Die Messmethodik soll am Institut für Technische Thermodynamik in kommenden Versuchen zur Anwendung kommen.

**Stichwörter:**

Massebestimmung, Wärmeübertrager, kontinuierlich

**S.07**

## **CO<sub>2</sub>-Großwärmepumpen in der Fernwärme**

### **Auslegung und Untersuchung**

**Vinzent Querner**

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
01062 Dresden, Deutschland  
[Vinzent.Querner@mailbox.tu-dresden.de](mailto:Vinzent.Querner@mailbox.tu-dresden.de)

Wärmepumpen tragen in erheblichem Maße zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Der Einsatz regenerativer Energien für Wärmepumpen ermöglicht eine nachhaltige Gestaltung der Wärmeerzeugung. Inhalt dieser Arbeit ist die Untersuchung, Optimierung und Konzepterstellung einer transkritischen CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe (R-744) für die FernwärmeverSORGUNG von Trondheim und Nyhavna mit Meerwasser als Wärmequelle. Wichtige Optimierungsmaßnahmen wie ein interner Wärmeübertrager (IHX), Ejektoren sowie Entspannungsmaschinen werden einer detaillierten Analyse unterzogen. Der Einfluss dieser Komponenten auf das Gesamtsystem wird betrachtet und gegenübergestellt.

Im Sinne der Effizienzsteigerung erfolgt eine Ergänzung des Systems um eine Butanwärmepumpe (R-600). Es werden verschiedene Architekturkonzepte betrachtet, wobei die Butanwärmepumpe in allen Fällen ausschließlich der Optimierung des CO<sub>2</sub>-Systems dient. Die Auslegung und Recherche zu maßgeblichen Komponenten, darunter der Turboverdichter, der Gaskühler sowie der IHX werden vorgestellt.

Das entwickelte, optimierte, modular aufgebaute Gesamtsystemkonzept kann verschiedenste Lastfälle effizient abdecken.

**Stichwörter:**

Großwärmepumpe, natürliche Kältemittel, R-744, Fernwärme

**S.08**

## **Kältemittelkreisläufe im Off-Design**

### **Bewertung des Einflusses von Auslegungsentscheidungen auf Effizienz und Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen für die Fernwärmeverzeugung**

**Cedric Kötting**

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

Die Dekarbonisierung der Fernwärmeverzeugung ist ein notwendiger Schritt zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Einen Umsetzungspfad für diesen Prozess bietet eine Elektrifizierung der Fernwärmeverzeugung mittels Wärmepumpen, die durch regenerativ erzeugten Strom angetrieben werden. Verglichen mit fossilen Wärmeerzeugern weisen die Effizienz und die verfügbare Wärmeleistung einer Wärmepumpe jedoch eine starke Betriebsabhängigkeit auf. Diese Charakteristiken sind auf Wechselwirkungen im Kältemittelkreislauf zurückzuführen, welche durch das gewählte Kältemittel und die Dimensionierung der Kreislaufkomponenten beeinflusst werden.

Im Fokus dieser Arbeit stehen die Wechselwirkungen zwischen Kältemittelauswahl und Dimensionierung der Kreislaufkomponenten und wie sich diese Wechselwirkungen auf die Effizienz und die verfügbare Wärmeleistung von Wärmepumpen im gesamten Betriebsbereich auswirken. Dazu werden Wärmepumpen für die Kältemittel R134a, R290 und R717 in mehreren Auslegungspunkten dimensioniert und die Effizienzen und verfügbaren Wärmeleistungen im gesamten Betriebsbereich (Off-Design) mittels quasi-stationärer Simulationen ermittelt.

Der Vergleich zeigt, dass sich die Gradienten im Off-Design sowohl hinsichtlich der Effizienz als auch der verfügbaren Wärmeleistung in Abhängigkeit des Kältemittels und der Dimensionierung unterscheiden. Dabei werden nichtlineare und gegenläufige Trends identifiziert, welche die optimale Auslegungsentscheidung von Wärmepumpen erschweren.

Im Anwendungsszenario einer Energiezentrale eines Fernwärmennetzes verdeutlicht der Vergleich der dimensionierten Wärmepumpen die Komplexität der Auslegungsentscheidung. Gemessen am *COP* im Auslegungspunkt zeigt R717 einen Vorteil von ca. 10 % gegenüber R290. Bei kombinierter Betrachtung von Effizienz und verfügbarer Wärmeleistung im gesamten Off-Design halbiert sich der Vorteil auf ca. 5 % im Endenergieverbrauch. Die Ergebnisse der Arbeit unterstreichen, dass die Betrachtung des Off-Designs einer Wärmepumpe bereits in frühen Planungsphasen notwendig ist, um fundierte Auslegungsentscheidungen zu treffen. Insgesamt trägt die Arbeit zum besseren Verständnis der Auslegung von Wärmepumpen bei und somit zum effizienteren Ausbau dekarbonisierter FernwärmeverSORGUNGEN.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Kältemittelkreislauf, Auslegung, Fernwärme, Off-Design, Simulation

## 5.09

### Experimentelle Untersuchung des Hilfsgaskreislaufes einer Diffusions-Absorptionskältemaschine

**Louis Tafelmaier\*, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiopoulos**

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),  
Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart, Deutschland

[l.tafelmaier@web.de](mailto:l.tafelmaier@web.de)

Diffusions-Absorptionskältemaschinen (DAKM) stellen durch ihren ausschließlich thermischen Antrieb eine klimafreundliche Form der Kälteerzeugung dar und finden derzeit durch ihre geräuschlose Arbeitsweise vor allem in kleinen Leistungsbereichen in Minibars oder auch im Campingbereich Anwendung. In einer DAKM findet keine mechanische Verdichtung statt, stattdessen wird ein druckausgleichendes Hilfsgas (hier Helium) eingesetzt. Das Prinzip der Kältebereitstellung beruht im Prozess auf der Verdunstung von Kältemittel in die Hilfsgasatmosphäre.

Aus aktueller Forschung geht hervor, dass der Hilfsgasumlauf eine der limitierenden Größen für die Steigerung der Kälteleistung darstellt, was bisher den Einsatz auf dem Gebiet der Gebäudeklimatisierung verhindert. Darauf hinaus ist der Einfluss der Hilfsgasfüllmenge auf die Kälteleistung bisher unbekannt, ebenso wie der Einfluss der Hilfsgasfüllmenge auf den Hilfsgasumlauf.

Anhand einer Variation der Hilfsgasfüllmenge wird deren Einfluss auf die Kälteleistung in verschiedenen Betriebspunkten untersucht, wobei eine konsistente Abhängigkeit nachgewiesen und somit eine Forschungslücke geschlossen wird. Die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchung zeigen eine starke Abhängigkeit der Kälteleistung von der Hilfsgasfüllmenge, wobei sich eindeutige Optima der Kälteleistung ausbilden. Eine zu geringe Heliumfüllgasmenge wird dabei als kritischer identifiziert als eine zu hohe Hilfsgasfüllmenge, obwohl sich in beiden Szenarien geringere Kälteleistungen einstellen. Auch die Limitierung der Kälteleistung durch den Hilfsgasumlauf wird in diesem Zusammenhang experimentell gezeigt.

Durch die beschriebenen experimentellen Untersuchungen wird außerdem eine Abschätzung des Verdunsterpotenzials möglich, was die Differenz der Ammoniakpartialdrücke im angereicherten Hilfsgas zwischen realem und idealen Zustand beschreibt. Dabei werden steigende Verdunsterpotenziale bei steigenden Kälteleistungen identifiziert, was eine Steigerung der Kälteleistung bei erhöhter Effizienz des Verdunsters vermuten lässt.

Abschließend wird ein neuartiges Konzept zur Steigerung des Hilfsgasumlaufes vorgestellt, basierend auf der Überhitzung des armen Gases. Dieses Konzept wird hier zunächst anhand einer Simulation untersucht, deren Ergebnisse im Vortrag vorgestellt werden.

**Stichwörter:**

Diffusions-Absorptionskältemaschine, Hilfsgasfüllmenge, Ammoniak/Wasser/Helium, Verdunsterpotenzial, experimentelle Untersuchung

**S.10**

## **Trinkwassergewinnung mittels Adsorption aus der Atmosphäre**

**Johannes Müller<sup>\*1</sup> und Paul Kohlenbach<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Berliner Hochschule für Technik, Fachbereich VIII Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik  
[johannes.mueller@bht-berlin.de](mailto:johannes.mueller@bht-berlin.de)

Die Klimakrise führt zu einer Zuspitzung der bereits bestehenden Wasserknappheit, die in spezifischen Regionen und zu bestimmten Jahreszeiten auf allen Kontinenten zu beobachten ist. In erster Linie sind abgelegene trockene und arme Regionen ohne Wasserressourcen betroffen, jedoch sind auch in Ballungsräumen bestimmte soziale Schichten von der Wasserversorgung abgeschnitten.

Technologien zur Verbesserung der Klimaresilienz in diesen Regionen müssen daher wirtschaftlich günstig, effizient und praktikabel sein. Atmosphärische Wassergewinnungssysteme sind in der Lage, Wasser aus der Umgebungsluft auch bei niedriger Luftfeuchtigkeit zu adsorbieren. Die Wassergewinnung erfolgt häufig durch Adsorption. Im Gegensatz zu Konkurrenztechnologien wie energieintensiven Entsalzungsanlagen ist diese Methode der Wasserentnahme aus der Umgebungsluft standortunabhängig und mit niedrigem Energieverbrauch einsetzbar.

Trotz der Arbeit mehrerer Studien, ist die Vorhersagekraft der Gewinnungsrate, der Kosten und der Effizienz von atmosphärischen Wassergewinnungsanlagen aufgrund des Fehlens eines umfassenden Modells, welches das System aus Adsorber, Kondensator, Kollektor, Ventilator, Strömungspassagen und möglichen Regelungsstrategien physikalisch genau beschreibt, begrenzt. Das Ziel dieses Projekts ist die Erstellung eines entsprechenden Modells sowie die Einbindung globaler Klimadaten, um den Wasserertrag auf der Grundlage der lokalen Klimabedingungen, der Regelungsstrategie und des Adsorbermaterials zuverlässig vorhersagen zu können. Damit können Kosten für einen Liter Trinkwasser in allen Bereichen der Erde abgeschätzt werden und Optimierungsschnittstellen gefunden werden.

Der Vortrag stellt die Modellannahmen, erste Validierungen sowie Messergebnisse an einem Demonstrator zur atmosphärischen Wassergewinnung vor. Die Messungen wurden auf dem Prüfstand Künstliche Sonne der Berliner Hochschule für Technik durchgeführt.

**1.01**

## **Cryogenic structures with superconductors**

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

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

Cryogenic liquids as liquefied gases and other cold masses must be thermally insulated from ambient temperatures through supporting structure. The preservation of cryogenic liquids and keeping the cold mass temperature stable within a few Kelvins is a great engineering challenge. A cold mass of a superconducting magnet device of one ton, it is equivalent to the weight of 1.25 m<sup>3</sup> of LN<sub>2</sub>, 14.3 m<sup>3</sup> of LH<sub>2</sub>, or 8.3 m<sup>3</sup> of LHe<sub>2</sub>. Design and implementation of an efficient support structure is crucial to a perfect thermal insulation. Alternatively, we introduce and propose a high-efficient contact-free magnetic support structure to reduce and minimize the heat flow further while compensate static (tank) and dynamic (transportation) weights. We use the non-contact magnetic forces between high temperature superconductors (HTS) and permanent magnets (PM) to stabilize astronomical instruments, silicon wafers or a 6 m LN<sub>2</sub> and LH<sub>2</sub> prototype transfer line for the Kennedy Space Center (KSC). With the latter experiments one could obtain parameters for the future promising hydrogen technology LH<sub>2</sub> in storage and transportation. Depending on the configuration Maglev forces of a few thousand Newton's can be achieved.

**1.02**

## **Keramische Supraleiter als „Gamechanger“ auf dem Weg zum kommerziellen Kernfusionskraftwerk**

**Hans Quack**

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

Als im Jahre 1986 die keramischen Supraleiter entdeckt wurden, war das Sensationelle, dass diese Supraleiter Sprungtemperaturen oberhalb der Siedetemperatur von Stickstoff aufwiesen. Deshalb bekamen sie den Namen „Hochtemperatur-Supraleiter“. Die hochfliegenden Erwartungen erfüllten sich nur teilweise, weil die Leiterentwicklung wegen der Sprödigkeit des Materials schwierig, die Stromtragfähigkeit mäßig und das Material zunächst sehr teuer war. So kam es bisher nur zu wenigen Nischenanwendungen.

Inzwischen hat man erkannt, dass eine wichtige Eigenschaft der keramischen Supraleiter darin besteht, dass man damit Elektromagnete von extrem hoher Feldstärke erzeugen kann, deutlich höher als mit klassischen metallischen Supraleitern, aber unter der Bedingung, dass man die Magnete bei sehr tiefen Temperaturen betreibt. In Zukunft könnte man die keramischen Supraleiter als „Hochfeld-Supraleiter“ bezeichnen.

Sehr starke Magnete benötigt man bei Kernfusionsanlagen vom Typ „magnetischer Plasmaeinschluss“. Die Fortschritte bei der Leiter- und Magnetentwicklung sind so eklatant, dass sich in den letzten Jahren Risiko-finanzierte Startups gebildet haben, die die Entwicklung stürmisch vorantreiben. Sie wollen in diesem Jahrzehnt in Demonstrationsanlagen den energetischen Breakeven erreichen, und sie stellen die ersten kommerziellen Kernfusionskraftwerke in den 30er Jahren in Aussicht. Eine dieser Firmen ist CFS (Commonwealth Fusion Systems), die gerade die Demonstrationsanlage SPARC aufbaut.

Im Vortrag werden die Anforderungen von SPARC an die Kältetechnik im Temperaturbereich 7 bis 30 K beschrieben.

**1.03**

## **Stirling Kaltgasmaschinen, Einst und Jetzt**

**Roman Brüderl**

Historische Kälte- und Klimatechnik e.V., 80337 München

[bruederl@vhkk.org](mailto:bruederl@vhkk.org)

Die Entwicklung der Stirling Kaltgasmaschinen ermöglichte es ab den 50er Jahren einfache, platzsparende, beherrschbare und langlebige kryogene Anlagen zu bauen. Im Laufe der Zeit wurden diese linksläufigen Stirling Kryogeneratoren für viele Prozesse in der Kryotechnik eingesetzt. Es war nun für viele physikalische Institute möglich, Luft, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, He und H<sub>2</sub> zu verflüssigen. Der Beitrag behandelt die Anfänge bei der Fa. Philips in Eindhoven und gibt einen Überblick der damals ingenieurtechnischen Meisterleistung bei der Entwicklung dieser Anlagen. Noch heute laufen Anlagen aus den 60er Jahren auf der ganzen Welt, was die Langlebigkeit dieser Technik wider spiegelt. In den letzten Jahren gewinnt die Technik der Kryogeneratoren nach dem Stirling Prinzip wieder vermehrt an Bedeutung, da auf einfache Art und Weise CH<sub>4</sub> verflüssigt werden kann. Diese Verflüssigungsanlagen werden zur Gewinnung von Biomethan und zur Boil-off-Gas Verflüssigung auf Erdgastankern verwendet. Die Ausführungen stellen einen historischen Rückblick dar und sollen das Potential der Technik aufzeigen.

**1.04**

## **Kryostatdesign zur Untersuchung kryogener Spiegelaufhängungen für das Einstein Teleskop in GRAVITHELIUM**

**Xhesika Koroveshi<sup>1\*</sup>, Piero Rapagnani<sup>2</sup>, Steffen Grohmann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Karlsruhe Institute of Technology (KIT),

Institute of Beam Physics and Technology, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

Institute of Technical Thermodynamics and Refrigeration,

Organisational Unit: Refrigeration and Cryogenics, 76131 Karlsruhe, Germany

[xhesika.koroveshi@kit.edu](mailto:xhesika.koroveshi@kit.edu)

<sup>2</sup> Universita degli studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Fisica, I-00185 Roma, Italy

Das Einstein-Teleskop (ET) ist ein Gravitationswellendetektor der dritten Generation, der in Europa geplant ist und einen Niederfrequenz- (LF) und einen Hochfrequenz- (HF) Laserinterferometer kombiniert. Der kryogene Betrieb des ET-LF im Temperaturbereich von 10 K bis 20 K ist unerlässlich, um das thermische Rauschen der Spiegelaufhängungen zu unterdrücken, dass die Detektionsempfindlichkeit bei Frequenzen unterhalb von 10 Hz dominiert. Dies erfordert Aufhängungsmaterialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit und geringer mechanischer Dissipation bei kryogenen Temperaturen. Das Basiskonzept berücksichtigt derzeit zwei Aufhängungskonzepte, unter Verwendung von monokristallinen Aufhängungsfasern aus Silizium oder Saphir, und/oder ein dünnwandiges Titan-Aufhängungsrohr, das mit statischem He-II gefüllt ist.

Der mechanische Q-Faktor bietet Einblick in die dissipativen Mechanismen von Materialproben und deren Anwendbarkeit als kryogene Aufhängungen in Gravitationswellendetektoren. Er wird durch die Ringdown-Methode gemessen, indem die Aufhängungen zu Resonanzfrequenzen angeregt werden und die Abklingzeit analysiert wird. Zu diesem Zweck wird der GRAVITHELIUM Prüfstand entworfen, der Studien von verschiedenen Aufhängungsmaterialien und -geometrien im Originalmaßstab ermöglicht. Dies umfasst auch die Integration einer geräuschfreien He-II-Versorgung zur Untersuchung von Dissipationsmechanismen in der statischen He-II-Säule innerhalb der Aufhängungsrohre, was ein neues Forschungsfeld darstellt. Wir präsentieren das Konzept und den Designfortschritt des Vorhabens.

**1.05**

## **Kryonik: Science-Fiction von der Kryobiologie inspiriert**

**Willem F. Wolkers<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>\*</sup><sup>1</sup>Biostabilisierung Labor - Niedersächsisches Zentrum für Biomedizintechnik,

Implantatforschung und Entwicklung,

<sup>2</sup>Reproduktionsmedizinische Einheit der Kliniken,

Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Deutschland

[willem.frederik.wolkers@tiho-hannover.de](mailto:willem.frederik.wolkers@tiho-hannover.de)

Kryonik ist die Wissenschaft und Technologie des Einfrierens von Organen oder sogar ganzen Organismen bei extrem niedrigen Temperaturen, um sie in einem dauerhaften Ruhezustand zu erhalten. Das Ziel ist es, biologische Materialien so zu konservieren, dass sie in der Zukunft wieder aufgetaut und reanimiert werden können, ohne dass sie durch den Einfrierprozess beschädigt werden. Einige Befürworter der Kryonik glauben, dass es eines Tages möglich sein wird, verstorbene Menschen zu kryokonservieren und in der Zukunft wiederzubeleben. Es gibt derzeit keine veröffentlichten Fälle erfolgreicher Reanimation von komplexen Lebewesen, die kryokonserviert wurden. Zudem bestehen ethische und rechtliche Probleme wie der Status der kryokonservierten Personen und es fehlt bislang an klaren rechtlichen Rahmenbedingungen. Das Einfrieren von tot erklärten Menschen wird in den USA bereits seit mehreren Jahrzehnten praktiziert und hat in jüngster Zeit auch in Deutschland und Europa für Aufsehen gesorgt. Mehrere „Patienten“, ein Begriff, der von Anhängern dieses Konzepts verwendet wird, werden derzeit in großen Flüssigstickstoffbehältern gelagert. Das Konzept der Kryonik war immer schon Gegenstand zahlreicher Fantasy- und Science-Fiction-Filme. In der Realität aber, wird die Kryokonservierung nur bei einzelnen Zellen, wie Spermien, Blutzellen, Stammzellen, und kleinere Gewebe erfolgreich verwendet. Je größer die zu konservierende Biomasse, desto komplexer wird der Abkühlungsprozess. Verschiedene Zellen benötigen zellspezifische Abkühlraten um das Einfrieren überleben zu können. Schon bei komplexeren Systemen wie Geweben, Organen oder gar ganzen Organismen wird das zum Problem. Je größer das Volumen und komplexer die Zusammensetzung eines Organismus oder Organs ist, desto schwieriger ist es, eine homogene Abkühlrate einzuhalten. Alternativ kann auch die Vitrifikation, also die eisfreie Kryokonservierung, eingesetzt werden. Für die Vitrifizierung werden jedoch sehr hoch konzentrierte toxische Kryokonservierungsmittel benötigt. Bisher ist es nur gelungen, die Niere eines Nagetiers erfolgreich einzufrieren und wieder aufzutauen. Das Einfrieren (und Auftauen) von ganzen Organen menschlicher Größe wird aktuell erforscht. In diesem Vortrag werden die Herausforderungen und Grenzen der Kryokonservierung von Zellen, Gewebe und Organen diskutiert.

**1.06**

## **Abkühlungsdynamik von Tröpfchen während der Solid-Surface-Vitrification**

**Dejia Liu<sup>1,2</sup>, Harriette Oldenhof<sup>1,2</sup>, Xing Luo<sup>3</sup>, Tobias Braun<sup>1,2</sup>, Harald Sieme<sup>2</sup>, Willem F. Wolkers<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup>Biostabilisierung Labor - Niedersächsisches Zentrum für Biomedizintechnik,

Implantatforschung und Entwicklung

<sup>2</sup>Reproduktionsmedizinische Einheit der Kliniken,

Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Hannover, Deutschland

<sup>3</sup>Institut für Thermodynamik, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

[willem.frederik.wolkers@tiho-hannover.de](mailto:willem.frederik.wolkers@tiho-hannover.de)

Solid-Surface-Vitrification kann durch das Auftragen von Tröpfchen einer Probe, z. B. Zellen in einer Konservierungslösung, auf eine vorgekühlte Metalloberfläche erreicht werden. Diese Methode wird verwendet, um höhere Abkühlraten und damit höhere Überlebensraten nach dem Einfrieren und Auftauen zu erreichen, verglichen mit dem Eintauchen von Proben in flüssigen Stickstoff. In dieser Studie wurden numerische Simulationen von Solid-Surface-Vitrification durchgeführt, indem die Abkühlungsdynamik von Tröpfchen von Kryoprotektiva (CPA)-Lösungen modelliert wurde. Es wurde angenommen, dass die abgesetzten Tröpfchen einen zylindrischen unteren Teil und einen halb-ellipsoiden oberen Teil annehmen. Materialeigenschaften für

die Wärmeübertragungssimulationen, einschließlich Dichte, Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, wurden aus der Literatur entnommen und mittels polynomialer Anpassung extrapoliert. Der Einfluss des CPA-Typs, d. h. Glycerin (GLY) und Dimethylsulfoxid (DMSO), der CPA-Konzentration und der Tropfengröße auf die Abkühlungsdynamik wurde bei verschiedenen CPA-Massenanteilen und Temperaturen im Bereich von  $-190$  bis  $25$  °C simuliert. Die Wärmekapazität zeigt einen Spitzenwert während des Wasser-zu-Eis-Phasenübergangs, der mit zunehmender CPA-Konzentration allmählich abnimmt, während die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender CPA-Konzentration abnimmt. Glycerin-Lösungen kühlen schneller ab als DMSO-Lösungen, und die Abkühlraten steigen mit abnehmender CPA-Konzentration. Experimentelle Bestimmungen der Abkühlungskurven zeigen, dass bei Proben, die nicht vitrifizieren, die anfängliche Abkühlungsrate während des Wasser-zu-Eis-Phasenwechsels verzögert wird. Einfrierversuchen mit menschlichen roten Blutkörperchen (RBCs) zeigen nur sehr geringe Hämolsraten (einen Maß für das Überleben der Zellen) mit GLY oder DMSO als Schutzmittel und erstaunlicherweise ermöglichen die hohe Abkühlraten auch Überleben, d.h. geringe Hämolyse, ganz ohne Kryoprotektiva.

## 1.07

### Semipassive Kryokonservierung

#### Ein neuartiges semipassives Verfahren zum kontrollierten Einfrieren im Rahmen der Kryokonservierung

Tarek Deeb<sup>1,2\*</sup>, Michael Handler<sup>3</sup>, Daniel Baumgarten<sup>3</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Mehrphasenprozesse,  
An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland

[deeb@imp.uni-hannover.de](mailto:deeb@imp.uni-hannover.de)

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

<sup>3</sup> UMIT TIROL, Institut für Elektrotechnik und Biomedizinische Technik,  
Eduard-Wallnöfer-Zentrum 1, 6060 Hall in Tirol, Österreich  
[michael.handler@umit-tirol.at](mailto:michael.handler@umit-tirol.at)

Die Kryokonservierung spielt in verschiedenen Bereichen, unter anderem in der regenerativen Medizin und bei zellulären Therapien, eine wesentliche Rolle. Die Wahl einer geeigneten Kühlrate beim Einfrieren ist entscheidend für die Minimierung des Zellverlusts und die Optimierung der Therapiewirksamkeit. Bei der kommerziellen Kryokonservierung werden hauptsächlich zwei Kühlmethoden angewandt: Passive Kühlgeräte regulieren die Abkühlungsgeschwindigkeit, indem sie isolierte Alkoholbäder oder thermisches Isoliermaterial innerhalb eines Tiefkühlschranks verwenden, während aktive Kühlgeräte in der Regel verdampfenden Flüssigstickstoff zur kontrollierten Abkühlung in die Probenkammer pumpen. Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Entwürfe einer hybriden Methode zu untersuchen, bei der eine kalte Umgebung durch einen mechanischen Tiefkühlschrank gewährleistet sowie die Wärmeabfuhr durch thermoelektrische Elemente gesteuert wird. Die Entwürfe sollen verschiedene Kühlprotokolle und Überwachungsmöglichkeiten für den Kühlprozess bieten. Die Hauptblöcke der geplanten Prototypen sind die Stromversorgung und die Steuereinheit, die außerhalb der kalten Umgebung funktionieren, sowie die Probenkammer, die unter anderem aus Probenhaltern, einem Füllmedium, Isolierung und Peltier-Elementen besteht. Mit Hilfe von Computersimulationen werden die Auswirkungen verschiedener Konstruktionsparameter (z. B. Geometrie, Materialien der Komponenten, Wärmeübertragung durch Peltier-Elemente) auf die Temperaturfelder im Hinblick auf eine effiziente Wärmeübertragung innerhalb der Geräte und kontrollierte Temperaturprofile in den gelagerten Proben analysiert und optimiert. Verschiedene Typen von Kühlkörpern zur Wärmeableitung der thermoelektrischen Elemente werden untersucht. Prototypen werden verwendet, um die durchgeführten Optimierungsschritte und in-silico-Modelle zu überprüfen. Erste Simulationen zeigen realistische Temperaturverteilungen und liefern wertvolle Erkenntnisse für das Design von Prototypen zur effektiven und effizienten Temperaturkontrolle. Simulierte/aufgezeichnete Temperaturprofile in und in der Nähe der Zielproben dienen als nützliche Indikatoren für die Optimierung von Setups und Protokollen. Diese Studie soll Grundstein für eine neue Generation von Kühlgeräten sein, die flexiblere und zuverlässigere Kryokonservierungsprotokolle ermöglichen und gleichzeitig die hohen Kosten der LN2-Infrastruktur vermeiden.

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, Kontrolliertes Einfrieren, Peltier-Elemente, Simulation.

**1.08**

## **Kryokonservierung mittels Air Flow-Verfahren**

**Ricarda Brunotte<sup>1\*</sup>, Christina Winkler<sup>1</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1</sup>**

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

Blut muss nach der Entnahme mit gerinnungshemmenden und haltbarkeitsverlängernden Substanzen stabilisiert werden, um eine generelle Lagerung in 500 ml Beuteln bei Temperaturen von Kühlschranktemperatur (4 °C) bis zu -196 °C in LN2 zu ermöglichen und eine möglichst hohe Überlebensrate nach dem Auftauen zu gewährleisten. Die Nachteile dieser Beutel sind eine ungleichmäßige Wärmeleitung und -übertragung aufgrund des ungünstigen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses.

In dieser Studie wird ein Konzept für die tröpfchenbasierte Kryokonservierung von Schweine-Vollblut mittels Air Flow-Verfahren erarbeitet. Schweineblut ähnelt in vielen Eigenschaften dem Humanblut. Die Tropfen weisen ein sehr gutes Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis mit einhergehender erhöhter Wärmeabfuhr auf. Die Düse des Verfahrens umfasst eine Druckluftkammer, in welche ein Gasstrom  $\dot{V}_L$  mit hoher Geschwindigkeit eingeleitet wird. Gleichzeitig wird ein Fluidstrom  $\dot{V}_B$  durch eine Kanüle gegeben. Bei Überwindung der Oberflächenspannung bilden sich Mikrotröpfchen aus. Diese Tröpfchen fallen aufgrund der Schwerkraft in einen speziellen Auffangbehälter, der mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist. Die Erzeugung von Mikrotropfen ist abhängig von eingestellten Parametern wie  $\dot{V}_L$ ,  $\dot{V}_B$ , Kanülenabstand  $d$  und Sprühhöhe  $h$ . Die Ergebnisse zeigen eine Ausbildung von Mikrobluttröpfchen in Abhängigkeit des Sprühbildes und -flusses. Das Auftreffen der Bluttropfen auf flüssigem Stickstoff konnte mittels Highspeed Kamera aufgenommen und charakterisiert werden. Mit diesem Wissen sollen ungünstige Faktoren während des Einfriervorgangs nachfolgend eliminiert werden.

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, Air Flow-Verfahren, Mikrobluttröpfchen, Wärmeübertragung

**1.09**

## **Controlled Rate Freezing von Multiwellplatten**

**Holger Reinsch**

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[holger.reinsch@ilkdresden.de](mailto:holger.reinsch@ilkdresden.de)

Auch mehr als 50 Jahre nach der Formulierung der 2-Faktoren-Hypothese durch Peter Mazur [DOI: [10.1016/0014-4827\(72\)90303-5](https://doi.org/10.1016/0014-4827(72)90303-5)] bleibt die Kryokonservierung biologischer Proben mittels Controlled Rate Freezing ein spannendes Thema. Mit der fortschreitenden Prozessautomatisierung gewannen im Laufe der letzten 10 Jahre Packmittelsysteme für hohe Probenzahlen, wie CryoTube Racks und Mikroplatten zunehmend an Bedeutung. Insbesondere wenn hohe Abkühlraten erforderlich sind, stellt die Kryokonservierung von 24 bis 96 Proben in einem gemeinsamen Trägersystem jedoch hohe Anforderungen an die Präzision und Reproduzierbarkeit des Einfrierprozesses.

Mit Konvektions- und Konduktionseinfriergeräten sind zwei Geräteklassen verfügbar, die große individuelle Vorteile und Nachteile aufweisen. Mit der Entwicklung eines Racksystems für die Kryokonservierung von Multiwell- und Mikroplatten in LN2-betriebenen Konvektionseinfriergeräten und seine Optimierung für hohe Gefrierraten ist es gelungen, die Vorteile beider Geräteklassen zu vereinen. Bei der synchronen Kryokonservierung eines subzellulären Therapeutikums in der 96-Well Mikroplatte wird auf allen Probenpositionen eine konstante Abkühlrate von

35 K/min ( $\pm 10\%$ ) erreicht und gehalten. Dies ermöglicht die kontrollierte Kryokonservierung hoher Probenzahlen mit einer Abkühlgeschwindigkeit, die der von Snap Freezing-Prozessen in flüssigem Stickstoff entspricht.

## 1.10

### Modern Cryogenic Valves – design Considerations with focus on liquified Hydrogen and Helium

Leire Colomo, Ander Gabirondo <sup>1)</sup>

1) AMPO Poyam Valves, ES- 20213 Idiazabal, Gipuzkoa, Spain  
[lcolomo@ampo.com](mailto:lcolomo@ampo.com)

Cryogenics with the gases like helium, hydrogen and sometimes also with neon, nitrogen, or air gain today more attraction as enablers for new green technologies in the energy sector as well as further industrial areas as in chemistry, semiconductor, steel and glass production etc.

Cryogenic helium in all stages is used to cool superconducting devices allows efficient high energy research and fusion research. Liquefied hydrogen is a high dense energy vector and could be at the same cooling superconducting cables and power devices. Neon seems a potential candidate to enable highly efficient cryogenic processes. Subcooled liquefied nitrogen is used to cooling high temperature superconductor cables and devices in the power system. The cryogenic process of liquefying and warming up air is used to store fluctuating production renewable power.

Consequently, valve industry face techno-economic complex challenges to answer the demands of this expanding sectors that will play an essential role the upcoming decades.

This paper describes identified techno and economic challenges for a modern cryogenic valve. Focus is on applications in liquified hydrogen but also considerations regarding the special requests for helium are highlighted. Some key design topics are Thermal efficiency.

Flexibility to absorb thermal contractions in the connection piping.

Interior and exterior tightness

Valve flow capacity

Precise flow control

Flexible actuating system with low energy consumption

Suitable for industrial serial manufacturing processes

**Keywords:**

Valves, Liquid Helium, Liquid Hydrogen, Low Heat Load, Fine Flow Control, Innovative Flex

## 1.11

### Thermodynamik des druckgetriebenen Flüssigwasserstofftransfers vom Tankwagen zum Empfängertank

Christian Wolf<sup>1,2</sup>, Alexander Alekseev<sup>1,2</sup>, Sebastian Rehfeldt<sup>1</sup>, Harald Klein<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Department of Energy and Process Engineering, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching  
[christian.georg.wolf@tum.de](mailto:christian.georg.wolf@tum.de)

<sup>2</sup> Linde GmbH, Dr.-Carl-von-Linde-Str. 6-14, 82049 Pullach

In der gesamten Flüssigwasserstofflieferkette, von der Erzeugung des Wasserstoffmoleküls bis zur Ankunft des ersten Flüssigkeitstropfens bei der Anwendung, schmerzen Ineffizienzen und Verluste in den letzten Gliedern dieser Kette mitunter am meisten. Das liegt einerseits am, entlang der Lieferkette ansteigenden, ökonomischen

Wert des Flüssigwasserstoffs. Andererseits führt die Tatsache, dass in die Atmosphäre verlorener Wasserstoff als sekundäres Treibhausgas wirkt, zur Notwendigkeit, diese Emission zu vermeiden.

Der Großteil des heute erzeugten Flüssigwasserstoffs wird per Tankwagen von den Verflüssigern zu den Empfängertanks der Abnehmer transportiert. Die *Abtankung* des Tankwagens, also der Flüssigwasserstofftransfer vom Tankwagen zum Empfängertank, ist eines der zentralen und zudem letzten Glieder in der Flüssigwasserstofflieferkette. In den meisten Fällen erfolgt dieser Transfer druckgetrieben. Mittels einer Druckaufbaueinheit wird der Tankwagendruck über den Druck des Empfängertanks erhöht und anschließend während der Abtankung gehalten. Eine Modellierung dieser Prozesse, kombiniert mit Messdaten an Tankwagen im Betrieb, ermöglicht Einblicke in die thermodynamischen Vorgänge während der Abtankung und erlaubt Einschätzungen über ihre Effizienz.

In diesem Beitrag werden der Flüssigwasserstofftransfer vom Tankwagen zum Empfängertank erklärt und die dabei auftretenden thermodynamischen Phänomene erläutert. Anhand der Abtankung kann die Bedeutung der Transferprozesse für die gesamte Flüssigwasserstofflieferkette gezeigt werden. Daraus erwachsen Möglichkeiten zur Erhöhung der Effizienz und Verminderung der Wasserstoffverluste bereits in der heutigen, aber vor allem in einer zukünftigen Flüssigwasserstoffinfrastruktur.

## 1.12

### **Thermodynamische Modellierung und Simulation der LH<sub>2</sub>-Betankung**

**Alexander Trattner<sup>1,2</sup>, Franz Winkler<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> HyCentA Research GmbH

[trattner@hycenta.at](mailto:trattner@hycenta.at)

<sup>2</sup> Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, TU Graz

(VORTRAG ist auf der Tagung in Dresden ausgefallen)

Die Dekarbonisierung des Mobilitätssektors ist ein wichtiger Schritt zur Erreichung der Klimaziele. Eine vielversprechende Lösung ist die Verwendung von Wasserstoff als grüner, erneuerbarer Kraftstoff, der in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt werden kann. Aufgrund der geringen volumetrischen Speicherdichte von Wasserstoff ist die Speicherung unter Umgebungsbedingungen jedoch eine Herausforderung. Unter den verschiedenen Wasserstoffspeichertechnologien bietet flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) sowohl eine hohe gravimetrische als auch eine hohe volumetrische Energiedichte, was ihn zu einer attraktiven Option für eine Vielzahl von Anwendungen macht. Die niedrigen Temperaturen von etwa 20 K führen jedoch zu einer unvermeidlichen Wärmezufuhr aus der Umgebung, was zu Verlusten führt. Der verdampfte Wasserstoff wird durch ein Boil-Off-Ventil entlüftet, um einen Druckanstieg zu vermeiden. Ein 0D-Simulationsmodell zur Berechnung dieser Verluste während der LH<sub>2</sub>-Befüllung wird vorgestellt und anhand experimenteller Daten validiert. Durch Variation der Parameter werden die Auswirkungen der Betriebsbedingungen auf die Rückgas- und Boil-off-Verluste ermittelt.

## 1.13

### **Auslegung, Bau und Betrieb von Offshore-LNG-Transferleitungen**

**J. Essler\*, E. Sattler, M. van Meel**

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

[Juergen.Essler@brugg.com](mailto:Juergen.Essler@brugg.com)

Flüssiges Erdgas (LNG) wird international als Energieträger für den Übergang in eine CO<sub>2</sub> neutrale Energiewirtschaft betrachtet. Anlagen für die Handhabung von flüssigem Erdgas sind nicht neu und werden in größerem Stil seit den 1960er Jahren betrieben. Die weltweit gehandelten Mengen an flüssigem Erdgas steigen.

Da flüssiges Erdgas als ein Energieträger für einen Übergangszeitraum angesehen wird ist er gerade heute sehr wichtig. Eine entscheidende Rolle bei der Investitionsentscheidung ist heute der Faktor Zeit bis zu einer Inbetriebnahme einer Export- bzw. Importanlage. Eine der größten Hürden bei der zeitlichen Planung spielen hier die notwendigen Genehmigungen entsprechende Hafenanlagen bauen zu dürfen. Die schneller zu realisierende Alternative zu festen Hafenlagen sind entweder schwimmende Anlagen in Hafennähe oder direkt die Verflüssigung und Speicherung in Offshore Anlagen.

In dieser Veröffentlichung werden die Aspekte der Auslegung, des Baus und des Betriebes von LNG-Transferschläuchen für flüssiges Erdgas an einem konkreten Beispiel dargestellt. Es handelt sich um eine LNG-Transferleitung, welche eine Verflüssigungseinheit auf einer Offshore Plattform mit einem schwimmenden Lager (LNG-Tankschiff) verbindet. Der Abstand zwischen Plattform und Schiff beträgt ca. 150 m und die Leitung hat eine Gesamtlänge von 220 m. Der verfügbare Innendurchmesser für den kontinuierlichen Transfer von etwa 420 m<sup>3</sup>/h an LNG beträgt 195 mm. Die Transferleitung ist vollständig vakuumisiert, ist kontinuierlich am Stück gefertigt und hängt in einer Kettenlinie teilweise unter Wasser zwischen der Plattform und dem Schiff. Die Transferleitung bewegt sich permanent in Abhängigkeit des Wetters, der Wellenbewegung, der vor Ort herrschenden Strömung sowie den Bewegungen der Plattform und des Schiffes. Die ausgelegte Lebensdauer in dem vor Ort befindlichen Bewegungsspektrum beträgt 5 Jahre. Für diese Anwendung gelten hohe Sicherheitsanforderungen an die Auslegung und an die qualitätssichernden Maßnahmen in der Fertigung.

Es wird der Rohraufbau, die prinzipiellen Auslegungsschritte, der Fertigungsablauf, der Transport und die ersten Betriebserfahrungen gezeigt.

Die Auslegung ist grundsätzlich auch für den Einsatz mit flüssigem Wasserstoff tauglich. Im letzten Kapitel werden die notwendigen Schritte erklärt, um dieses Design auch für den zukünftigen Einsatz mit flüssigem Wasserstoff zu qualifizieren.

**Stichwörter:**

Transferleitung, Flüssiges Erdgas, LNG

**1.14**

## **Flüssigwasserstoff in der Luftfahrt**

**S. Vagts\*, V. Baumbach**

**Airbus Commercial**, Hamburg, Hein-Saß-Weg 24, 21129 Hamburg  
[steffen.vagts@airbus.com](mailto:steffen.vagts@airbus.com)

Airbus setzt sich stark dafür ein, die Dekarbonisierung des Luft- und Raumfahrtsektors voranzutreiben. Um eine neue und nachhaltige Zukunft zu gestalten, untersucht Airbus im Rahmen seines ZER0e-Vorprogramms die Machbarkeit wasserstoffbetriebener Flugzeuge. Diese Präsentation untersucht die Zeitskalen, die zur Verwirklichung einer CO<sub>2</sub>-neutralen Luftfahrt erforderlich sind, und gibt eine Einführung in die Physik von Wasserstoff und seine Auswirkungen auf das Flugzeugdesign auf hohem Niveau. Auf einer detaillierteren Ebene werden auch wasserstoffspezifische Herausforderungen wie das Cleanliness Management berücksichtigt und die Kompetenzen und Kooperationen erörtert, die zur Bewältigung dieser technischen Herausforderungen erforderlich sind

## 1.15

# Aufbau und Inbetriebnahme des ESS-Kryostaten

## zur Versorgung der Flüssigwasserstoff-Moderatoren

Yannick Beßler<sup>1</sup>, Eberhard Rosenthal<sup>1</sup>, Ghaleb Natour<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Forschungszentrum Juelich GmbH, Central Institute of Engineering, Electronics and Analytics – Engineering and Technology (ZEA-1), Wilhelm-Johnen-Strasse, 52428 Juelich  
[y.bessler@fz-juelich.de](mailto:y.bessler@fz-juelich.de)

<sup>2</sup>ISF Faculty of Mechanical Engineering, RWTH Aachen University, 52062 Aachen, Germany

Die Europäische Spallationsneutronenquelle ESS soll die leistungsstärkste beschleunigergetriebene Neutronenquelle der Welt werden. Die ESS befindet sich gegenwärtig in der Bauphase und soll ab 2025 den Teillastbetrieb aufnehmen, ab 2026 soll der erste Nutzerbetrieb erfolgen. Eine Schlüsselkomponente einer Neutronenquelle ist der so genannte kalte Moderator. Dieser wird bei der ESS mit flüssigem Parawasserstoff, bei etwa 20 K Temperatur und 10 bar Druck, betrieben und soll die durch die Spallation freigewordenen schnellen Neutronen auf das geforderte niedrige Energieniveau abbremsen (moderieren). Darüber hinaus muss der Wasserstoff die durch die Teilchenwechselwirkungen freiwerdende Energie abführen. Zur Versorgung der kalten Moderatoren ist am ZEA-1 in Zusammenarbeit mit der TU Dresden ein Kryostat entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen worden. Dieser Beitrag behandelt den Aufbau und Inbetriebnahme dieses Kryostaten für die ESS.

## 1.16

# Erzeugung von „grünem“ Flüssigstickstoff

F. Herzog<sup>1</sup>, A. Schlotmann<sup>1</sup>, S. Corvey<sup>1</sup>, T. Evison<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Messer SE & Co. KGaA, Kleinewefersstr. 1, 47803 Krefeld, Germany  
[friedhelm.herzog@messer-group.com](mailto:friedhelm.herzog@messer-group.com)

Zur Dekarbonisierung der europäischen Industrie werden große Mengen von „grünem“ Wasserstoff benötigt, der teilweise in flüssiger Form über LH2-Terminals importiert wird. Dort lagert dieser bei einer Temperatur von -253°C (20 K). Über kryogene Pumpen wird das Flüssiggas dann auf Druck gebracht, mittels Wärmezufuhr regasifiziert und anschließend in ein Rohrleitungsnetz eingespeist. Dabei geht die Kälte des flüssigen Wasserstoffs – und somit erneuerbare Energie – nutzlos verloren.

Diese Kälte lässt sich jedoch nutzen, um mit sehr geringem energetischem Aufwand Stickstoff zu erzeugen. Der Stickstoff wird dabei aus der Luft gewonnen und anschließend verflüssigt. Die Wasserstoffkälte kann dann einen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Luftzerlegungsprozesses leisten. Hauptsächlich dient sie jedoch zur Verflüssigung des Stickstoffs, dem Prozessschritt mit dem höchsten Energiebedarf. Die Stickstoff-Kondensation kann dann praktisch ohne Zufuhr von Fremdenergie erfolgen.

Der Stickstoff-Kondensator kann jedoch nicht direkt mit dem Wasserstoff gekühlt werden, da dessen Temperatur deutlich kälter ist als die Stickstoff-Gefriertemperatur. Um das Einfrieren des Stickstoffs zu vermeiden wird ein zusätzlicher Apparat installiert, der die Temperatur des Kühlwasserstoffs auf einen Wert oberhalb des N2-Gefriepunktes von -210°C (63 K) erhöht, ohne dass dabei Kälte verloren geht. Auf diese Weise lässt sich die Wasserstoffkälte für die N2-Verflüssigung maximal ausnutzen und ein Einfrieren des Verflüssigungsapparates wird vermieden.

### Stichworte:

Flüssigwasserstoff, Dekarbonisierung, Energieeffizienz, Regasifizierung, Stickstoffverflüssigung,

1.17

## Süchtig nach Helium: NMR-Spektroskopie

Dirk Bockelmann

Abteilung NMR-basierte Strukturbiologie, MPI für  
Multidisziplinäre Naturwissenschaften, 37077 Göttingen  
[dibo@mpinat.mpg.de](mailto:dibo@mpinat.mpg.de)

Die NMR-Spektroskopie ist eine essentielle Forschungstechnik für die Ermittlung der dreidimensionalen Struktur von biologischen und chemischen Substanzen auf molekularer Ebene. Hierbei werden supraleitende Magnete mit einer Feldstärke von bis zu 28.2 Tesla eingesetzt. Ohne die kontinuierliche Versorgung mit flüssigen Helium wäre der Betrieb der NMR-Spektrometer undenkbar. Der Beitrag stellt einige Ergebnisse aus der aktuellen Forschung am MPI unter Einsatz der NMR-Spektroskopie vor. Zudem wird die derzeitige Versorgung der Spektrometer mit Helium und dessen Recycling über eine Kooperation mit der Georg August Universität Göttingen beschrieben. Es wird auch auf derzeitige Fortschritte im Magnetdesign und den dadurch reduzierten Heliumverbrauch eingegangen.

1.18

## Herausforderungen an die Kälte- und Kryotechnik im internationalen Beschleunigerzentrum FAIR

Marion Kauschke

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt  
[M.Kauschke@gsi.de](mailto:M.Kauschke@gsi.de)

Kurzfristig in Dresden mit Vortrag eingesprungen – keine Kurzfassung verfügbar

1.19

## Strömungssimulationen an thermischen Schilden

Moritz Kuhn

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[moritz.kuhn@ilkdresden.de](mailto:moritz.kuhn@ilkdresden.de)

In der Tieftemperaturtechnik sind die Temperaturdifferenzen meist so groß, dass keine Kältemittel eingesetzt werden können, die in dem betreffenden Temperaturbereich einem Phasenwechsel (flüssig/dampfförmig) unterliegen. Meist werden kryogene Fluide verdampft, eine exakte Temperaturregelung über einen weiten Bereich ist jedoch sehr komplex. Für die Temperierung einer Simulationskammer wurden mittels numerischer Simulation (CFD) Wärmeübertragerplatten ausgelegt, die eine optimale Verteilung des Kälteträgers über die Fläche ermöglichen, um so eine hohe Temperaturhomogenität bei geringem Druckverlust zu erreichen. Dabei wird eine Temperiereinheit so gesteuert, dass ein Temperaturbereich von -170 bis +150°C abgedeckt werden kann, bei identischem Strömungsverhalten über den gesamten Bereich innerhalb der Wärmeübertragerplatten. Mit dem System kann eine Kälteleistung von 10 kW übertragen werden. Das Design der Wärmeübertragerplatten und die Ergebnisse aus der Strömungssimulation werden bei dem Vortrag vorgestellt.

## 1.20

# Industrielles Kühlsystem für ein 15 km langes 110 kV HTS-Kabelsystem

Lutz Decker<sup>1)</sup>, Alexander Alekseev<sup>2)</sup>

1) Linde Kryotechnik AG, 8422 Pfungen, Schweiz

2) Linde AG, 82049 Pullach

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

Im Auftrag der Stadtwerke München wurde die Möglichkeit untersucht, eine Hochspannungsverbindung (400-500 MVA / 110 kV) auf der Basis eines HTS-Kabels über eine Länge von 15 km, aufgeteilt in drei Segmente, zu errichten.

Die Ergebnisse der Studie für ein industrielles Kühlsystem zur Kühlung dieser HTS-Verbindung werden hier vorgestellt. Fünf verschiedene Verfahrenskonzepte werden entwickelt und verglichen. Dem Stand der Technik werden innovative Lösungen gegenübergestellt. Die Bewertung erfolgt anhand der Effizienz und einer Analyse der technischen Risiken. Ein Redundanzkonzept zeigt Maßnahmen auf, um die ständige Verfügbarkeit der HTS-Anlage zu gewährleisten. Aufgrund des großen Kältemittelvolumens und der geringen abzuführenden spezifischen Wärme verhält sich das System sehr träge, so daß genügend Zeit zur Verfügung steht, um „normale“ Unterbrechungen, z.B. durch kurzzeitige Stromausfälle, zu kompensieren, ohne die Funktion der Anlage zu beeinträchtigen. Mit dem vorgeschlagenen Verfahrenskonzept wird ein sehr guter Wirkungsgrad erreicht. Bei konservativ abgeschätzten Wärmelasten am Kryostaten ist der spezifische Gesamtverlust deutlich geringer als bei einer konventionellen Ausführung einer 110-kV-Verbindung.

Über die nächsten Schritte wird entschieden, sobald die Ergebnisse des Baus und Betriebs einer kurzen (150 m) Kabel-Teststrecke vorliegen (Beginn des Dauertests: November 2024).

## 1.21

# Stickstoffunterkühlung mittels tiefesiedender Gemische

Steffen Klöppel<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),  
Äußere Oybiner Straße 14/16, 02763 Zittau  
[steffen.kloppel@dlr.de](mailto:steffen.kloppel@dlr.de)

Infolge der zunehmenden Elektrifizierung von Mobilität und Wärmebereitstellung werden zukünftig hohe Übertragungsleistungen benötigt. Mit ihren kompakten Abmessungen sind Leistungskabel mit Hochtemperatursupraleitern ein möglicher Problemlöser, insbesondere im Innenstadtbereich. Um den supraleitenden Zustand aufrecht zu erhalten, wird üblicherweise unterkühlter flüssiger Stickstoff eingesetzt, der seinerseits wiederum gekühlt werden muss.

Aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten ist die Kälteerzeugung selbst mit einer idealisierten Kälteanlage energieintensiv. Reale Kälteprozesse erreichen nur einen Bruchteil des idealen Wertes. Kälteanlagen, die den linksläufigen Brayton-Prozess abbilden, erreichen unter Umständen hohe exergetische Wirkungsgrade. Bei den für die Stickstoffunterkühlung benötigten kleinen Temperaturspannen fallen diese jedoch aufgrund bestimmter Randeffekte stark ab.

Ein neuartiges Kreislaufkonzept erlaubt es die Temperaturspannen der Kälteerzeugung und -nutzung voneinander zu entkoppeln und somit bei vergleichbarem anlagentechnischem Aufwand den Wirkungsgrad der Kälteerzeugung zu steigern.

### Stichwörter:

Stickstoffunterkühlung, Gemischkreisläufe, Kryogene Kälteerzeugung

1.22

## Optimierung einer Gemischkältekaskade für Zwischenkühlstationen des supraleitenden Kabels SuperLink

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)

In München soll ein 15 km langes supraleitendes Kabel ins 110 kV Netzes integriert werden. Um einen sicheren und ökonomischen Betrieb zu gewährleisten, werden mehrere effiziente Zwischenkühlstationen entlang des Kabelverlaufs benötigt. Innerhalb des SuperLink-Projekts werden daher auch Next-Generation-Kälteanlagen entwickelt.

Als Alternative zu mit Helium oder Neon betriebenen Brayton-Kühlern werden kryogene Gemischkältekreisläufe als kompakte und ökonomische Option untersucht. Die Zusammensetzung der weitsiedenden Gemische wird spezifisch eingestellt, um die Kühlbedarfe des supraleitenden Kabels abzudecken. Während die Verwendung von Hochsiedern im Prozess die spezifische Kälteleistung erhöht, ist deren Einsatztemperaturbereich durch die Gefahr des Ausfrierens begrenzt. Daher wird ein Kaskadenprozess vorgeschlagen. Die Vorkühlstufe wird hierbei mit einem Gemisch aus Stickstoff und brennbaren Kältemitteln betrieben, die Hauptstufe für  $T < 70$  K mit Stickstoff, Sauerstoff und Neon. Zur Optimierung der Betriebsbedingungen (Gemischzusammensetzung, Drücke, Vorkühltemperaturen) in dem großen Parameterraum wird ein genetischer Optimierungsalgorismus verwendet.

### Stichwörter:

Gemischkältekreisläufe, Systemoptimierung

1.23

## Flüssigluft-Energiespeicherung für kältetechnische Applikationen

Modellbasierte Ermittlung geeigneter Applikationen  
anhand deren Lastprofileigenschaften

Philipp Stahl<sup>1\*</sup>, Thomas Lex<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät Maschinenbau,  
Galgenbergstraße 30, 93053 Regensburg, Deutschland  
[philipp.stahl@oth-regensburg.de](mailto:philipp.stahl@oth-regensburg.de)

Bei der Umstellung der Energiegewinnung auf erneuerbare Energien spielen effektive Methoden zur Speicherung von volatiler Energie eine entscheidende Rolle. Eine vielversprechende Möglichkeit hierfür stellt die in diesem Beitrag behandelte Flüssigluft-Energiespeicherung (Liquid Air Energy Storage) dar.

Diese Technologie verwendet überschüssigen Strom, um Umgebungsluft durch einen entsprechenden Prozess zu verflüssigen. Die flüssige, tiefkalte Luft wird so lange in einem Kryotank gelagert, bis Strombedarf herrscht. Zur Ausspeicherung wird die Luft regasifiziert, wodurch diese elektrische Energie über einen Clausius-Rankine-Prozess bereitgestellt. Häufig behandeln Untersuchungen hinsichtlich Liquid Air Energie Storage die Technologie ausschließlich als Speichermethode für elektrische Energie. Da beim Verdampfen und ersten Erhitzen der Luft ausgehend vom flüssigen Zustand eine Wärmesenke bis in den Tieftemperaturbereich von unter -150 °C entsteht, bietet sich die Möglichkeit einer Integration in das Gesamtenergiesystem von einer großen Bandbreite

an kältetechnischen Applikationen. Neben der Funktion als elektrischer Speicher kann der Prozess der Flüssigluft-Energiespeicherung dabei an einen kältetechnischen Prozess der Applikation gekoppelt werden, um diesen mit der entstehenden Wärmesenke zu unterstützen und damit den Energiebedarf der Applikation zu senken. Zudem wird beim Verflüssigen der Luft Kompressionswärme frei, welche ebenfalls bei der Applikation genutzt werden kann, wodurch eine vollständige Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung ermöglicht wird.

Im vorliegenden Beitrag wird das Potenzial eines Liquid Air Energy Storage Prozesses konzipiert als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels Sensitivitätsanalysen untersucht. Unter anderem werden dabei verschiedene Temperaturniveaus, auf welchen der Prozess thermisches Potenzial durch Wärmesenken und -quellen bereitstellen kann, analysiert. Außerdem werden unterschiedliche Verhältnisse zwischen elektrischem und thermischem Energiebedarf von potenziellen Applikationen betrachtet. Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen lassen sich Anforderungen an Lastprofile von möglichen Applikationen ableiten und diese dadurch zielgerichteter ermitteln. Als Grundlage für die Analyse wird ein thermodynamisches Modell des Prozesses erstellt.

**Stichwörter:**

Flüssigluft-Energiespeicherung, kältetechnische Applikationen, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Modellierung, Tieftemperaturtechnik

## 2.01

### Gemischkondensation von Propan/Butan im Rohrbündel

Julius V. W. Kühl<sup>1\*</sup>, Jochen Dietl<sup>2</sup>, Jean El-Hajal<sup>2</sup>, Achim Gotterbarm<sup>2</sup>,  
Michael H. Rausch<sup>1</sup>, Tobias Klein<sup>1</sup> und Andreas P. Fröba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Advanced Optical Technologies – Thermophysical Properties (AOT-TP),  
Department Chemie- und Bioingenieurwesen (CBI) und  
Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT),  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen

<sup>2</sup>Wieland-Werke AG, Ulm

[tobias.klein@fau.de](mailto:tobias.klein@fau.de)

Als Ersatz für Arbeitsfluide mit einem hohen Treibhauspotenzial (global warming potential, GWP), wie es die immer noch häufig verwendeten Fluorkohlenwasserstoffe aufweisen, sind Kohlenwasserstoffgemische aus Alkanen mit einem niedrigen GWP eine vielversprechende Alternative. Im Fall von zeotropen Kohlenwasserstoffgemischen kann jedoch bei der Kondensation der entsprechende Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{\text{kond}}$  aufgrund der bevorzugten Kondensation der höher siedenden Komponente deutlich geringer sein als für die reinen Substanzen.

Im vorliegenden Beitrag werden experimentelle Ergebnisse für  $\alpha_{\text{kond}}$  von reinem Propan und *n*-Butan sowie deren zeotropen Gemischen an horizontalen Einzelrohren und in Rohrbündeln vorgestellt. In dem verwendeten Apparat wird der Einfluss des Rohrbündeleffekts auf  $\alpha_{\text{kond}}$  experimentell simuliert, indem die obere Rohrreihe des Rohrbündelkondensators zusätzlich mit Kondensat beaufschlagt wird, was die Nachbildung von Rohrbündeln mit bis zu 40 Reihen ermöglicht. Dabei wird die Beeinflussung von  $\alpha_{\text{kond}}$  durch die Rohreigenschaften systematisch untersucht. Hier stehen das Rohrmaterial sowie die Geometrie und Oberflächenstruktur einschließlich Rippenhöhe und Rippendichte im Vordergrund. Im Fokus steht dabei jeweils ein Vergleich des Verhaltens der reinen *n*-Alkane und ihrer Gemische. Durch den Vergleich von  $\alpha_{\text{kond}}$  für Rohre gleicher Geometrie aus Kupfer und einer Kupfer-Nickel-Legierung wird der Beitrag der Wärmeleitfähigkeit der Rippen zum gesamten Wärmeübergang analysiert. Zusätzlich wird ein analytisches Modell angewendet, um die Beiträge der Rippenspitze, der Rippenflanke und des Kanals zwischen den Rippen zum Wärmeübergang sowie den Einfluss der thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids auf  $\alpha_{\text{kond}}$  zu untersuchen.

## 2.02

### Mit dem Kältemittel Wasser bis -13 °C – Labormessungen und Betriebserfahrung

Manuel Kausche<sup>1\*</sup>, Manuel Riepl<sup>1</sup>

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

Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser und wässriger Lithiumbromidlösung lassen sich auch unter 0 °C zur Kältebereitstellung einsetzen, wie bereits 2023 vorgestellt. Hierfür wird beispielsweise das Kältemittel Wasser im Verdampfer mit Lithiumbromid angereichert, also Salz aus dem Absorber hinzudosiert. Bei einer Salzkonzentration von ca. 21% lässt sich damit eine Vorlauftemperatur bis -13 °C bereitstellen.

Im vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben „GALuWap“ (FKZ 03EN2005) wurde eine modifizierte Absorptionskältemaschine ausführlich bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt vermessen. Ermittelte Leistungen, Wärmeübergang und Effizienz werden in diesem Beitrag vorgestellt. Ein ausführlicher Bericht über die Erfahrungen im Betrieb sowie zum Regelungskonzept geben Einblicke in die Besonderheiten bei niedrigerem

Gefrierpunkt. Zudem werden potentielle Anwendungen bei Temperaturen um -5 °C und einer Kälteleistung bis 30 kW vorgestellt, wobei Abwärmenutzung vorausgesetzt und robuster Betrieb zu diskutieren ist.

## 2.03

### **Sekundärkreis zur Leistungs- und Effizienzsteigerung**

**M. Bacht, A. Luke<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Ecooltec GmbH | Zinkhüttenstr. 7 | 45473 Mülheim a.d.Ruhr  
[m.bacht@ecooltec.com](mailto:m.bacht@ecooltec.com)

<sup>2</sup> IfT | Universität Hannover

Die Entwicklungen in der Kälte- und Wärmepumpentechnik zeichnen seit längerem ein klares Bild: Vermeidung der F-Gase als Kältemittel.

Dies betrifft auch die Kühlkette von Lebensmitteln und hier besonders den typischerweise F-Gasebasierten Kühltransport von Waren, da er, wie alle mobilen Anwendungen, stark anfällig für Kältemittelleckagen ist.

Im Vortrag werden Möglichkeiten vorgestellt, von den hervorragenden Stoffeigenschaften der Kohlenwasserstoffe als Kältemittel zu profitieren und gleichzeitig einen risikoarmen und zuverlässigen Betrieb der Anlagen durch den Einsatz von Sekundärkreisläufen zu gewährleisten. Bei dem Einsatz des Sekundärkreises ergeben sich durch den überfluteten Betrieb der Wärmeübertrager energetische Vorteile gegenüber der Trockenexpansion, die sich mit sinkender Kühlraumtemperatur zunehmend positiv auf die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Gesamtanlage auswirken.

Der besondere Schwerpunkt dieses Vergleichs liegt auf der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Thermosiphonprozesses als Sekundärkreislauf mit dem Ziel, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck heutiger mobiler Kälteanlagen deutlich zu reduzieren und gleichzeitig eine Verbesserung der energetischen Effizienz und Leistung des Gesamtsystems zu erreichen.

**Stichwörter:**

Transportkälte, natürliche Kältemittel, Thermosiphon, Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid

## 2.04

### **Heat exchanger Technology advancement and market status: A review**

**Ali Nour Eddine<sup>1</sup>, Tim Kroeger<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Eurovent Certita Certification, Technical Department, 34 Rue Laffitte, 75009, Paris, France  
[aa.nour-eddine@eurovent-certification.com](mailto:aa.nour-eddine@eurovent-certification.com)

<sup>2</sup> Eurovent Certita Certification, R&D  
[t.kroeger@eurovent-certification.com](mailto:t.kroeger@eurovent-certification.com)

The heat exchanger is a key component in HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) systems that plays a pivotal role in managing temperature, humidity, and indoor air quality. Any improvement in heat transfer results in enhancement in overall performance of the device. Hence various studies have investigated the heat exchanger with respect to improving energy efficiency, durability, and reliability of HVAC systems. The research study covered in this review investigates the technological progress in the heat exchangers field such as the use of advanced materials, coatings, geometrical shapes and controlled turbulent flow. The study also analyses the financial and operating constraints that hamper achieving optimum heat exchanger performance.

The result of this study is summarised in a table presenting the improvement in the heat transfer coefficient and an estimation of the impact of price per cm<sup>2</sup> of each of the innovative technologies used. Eurovent Certita

Certification is a third-party certification company that tests and verifies HVAC systems that covers 73 % of the European market. The results of this study are verified using data from a large number of certified heat exchangers. Moreover, a large number of non-certified performances are present in the market promising a heat transfer coefficient that cannot be reached with the technology used. The results of this study provides a simple tool for end users to distinguish between promised performances and what is scientifically and technologically achievable.

**Keywords:**

Heat Exchanger, Advanced Technologies, Market Data

2.05

## **Neue innovative Kältemaschinenöle für Kohlenwasserstoff-Kältemittel,**

### **z. B. Propan, Butan Anwendungsbeispiele und Erfahrungen**

**Wolfgang Bock, Thorsten Loh**

FUCHS LUBRICANTS GERMANY GmbH, Friesenheimer Straße 19, 68169 Mannheim  
01062 Dresden, Deutschland  
[wolfgang.bock@fuchs.com](mailto:wolfgang.bock@fuchs.com)

Im Vortag werden neue innovative Kältemaschinenöle auf Basis von polaren ausgewählten Grundölen vorgestellt. Die besonderen Eigenschaften dieser neuen Kältemaschinenöle auf Bezug der Mischbarkeit, Löslichkeit, Verdünnung und Mischreibungsverhalten mit Kohlenwasserstoff-Kältemittel (z. B. Propan, Butan etc.) werden aufgezeigt und diskutiert. Es werden Anwendungsbeispiele der neu entwickelten Kältemaschinenöle für Kohlenwasserstoff Anwendungen diskutiert und vorgestellt.

Weiterhin werden wichtige Hinweise für Konstrukteure und Anlagenbetreiber gegeben, die den Umgang und Einsatz von diesen neuen speziellen PAG basierten Kältemaschinenölen Typen im praktischen Einsatz mit Kohlenwasserstoff-Kältemittel zeigen.

#### **Ausführliche Beschreibung des Vortrages**

Kohlenwasserstoff-Kältemittel als natürliches Kältemittel gewinnen zunehmend an Bedeutung.

Sie haben in Bezug auf ihre Umweltrelevanz große Vorteile gegenüber fluorierten Kältemitteln. Typische Vertreter wie z. b. Propan – R290, Propylen – R1270, Isobutan – R600a haben eine hohe thermische Beständigkeit, sind chemisch stabil und zeigen eine gute Materialverträglichkeit.

Der Hauptvorteil liegt jedoch in einem sehr niedrigen Global Warming Potential (GWP) von 3 bis 6. Kohlenwasserstoff-Kältemittel zeigen eine gute Mischbarkeit mit konventionellen eingesetzten Kältemaschinenöl Typen. Sowohl mit Mineralöl als auch mit synthetischen Schmierstoffen, wie PAO oder Polyolester werden über einen weiten Temperaturbereich homogener Mischungen gebildet.

Die Löslichkeit der Kohlenwasserstoffe in Mineralölen und anderen konventionellen Kältemaschinenölen ist relativ groß, dass zu einer starken Verdünnung und damit starken Viskositätsabsenkung des Öl-Kältemittelgemisches führen. Dies kann zu Verschleißproblemen führen.

Spezielle polare Kältemaschinenöle auf Basis ausgewählter Polyalkylenglycole zeigen eine definierte, kontrollierte Kältemittelbeschaffenheit und Löslichkeit. Durch definierte spezielle Additivsysteme wird ein unkontrolliertes Aufschäumen der gelösten Kohlenwasserstoffe im Öl verhindert. Die speziell entwickelten Anti-Wear Extreme Pressure Additive verhindern bei Kältemittelverdünnung den Verschleiß, der tribologisch relevanten Stellen im Verdichter, wie z. b. Lager, Kolben, Ventile. Der Vortrag dient zur Vorstellung von neu entwickelten polaren Kältemaschinenölen, welche für den Einsatz im Kohlenwasserstoff-Kältemittel, wie z. B. Propan R290 und R600a, entwickelt wurden. Es zeigt die Unterschiede zu konventionellen Kältemaschinenölen und die Besonderheiten, in Bezug auf die Löslichkeit, Mischungslückenverhalten und Verdünnung unter Berücksichtigung des Verhaltens des Öles im Kältemittelverdichter auf.

2.06

## Adaptive Fluidgemische in reversiblen Wärmepumpen – Organic Rankine Cycle Prozessen

Maximilian Weitzer\*, Jürgen Karl

Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU),  
Fürther Straße 244f, 90429 Nürnberg, Deutschland  
[maximilian.weitzer@fau.de](mailto:maximilian.weitzer@fau.de)

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien erfordert nicht nur größere Energiespeicherkapazitäten, sondern auch eine Verlagerung der benötigten Speicherdauer von Stunden- zu Tages- oder Wochenspeichern. Carnot-Batterien, die auf reversiblen Wärmepumpen – Organic Rankine Cycle Prozessen basieren, sind eine thermomechanische Energiespeichertechnologie, die solche Speicherdauern ermöglicht. Das Funktionsprinzip beruht auf einer Hochtemperatur-Wärmepumpe, die überschüssiger elektrische Energie in Wärme umwandelt, welche einem thermischen Energiespeicher zugeführt wird. Die thermische Energie kann bei Bedarf durch den reversiblen Betrieb der Wärmepumpe als Organic Rankine Cycle (ORC) wieder in elektrische Energie umgewandelt werden. Zur Verbesserung der Effizienz solcher reversiblen Prozesse werden im Rahmen dieser Arbeit adaptive zeotrope Fluidgemische untersucht. Der Temperaturlgleit zeotroper Fluidgemische kann Exergieverluste bei der Wärmeübertragung verringern. Zusätzlich ermöglicht der Temperaturlgleit eine aktive oder passive Anpassung der Gemischzusammensetzung. Damit ermöglichen adaptive Fluidgemische die Anpassung der Fluideigenschaften an die Betriebsbedingungen reversibler Prozesse, wodurch höhere Wirkungsgrade erreicht werden können. Neben Prozesssimulationen werden in dieser Arbeit erste Versuchsergebnisse mit Fluidgemischen an einer reversiblen Wärmepumpen-ORC-Anlage (15 kW<sub>el</sub> / 9 kW<sub>el</sub>) vorgestellt. Um das Potential der Gemischangepassung zu untersuchen, werden adaptive Fluidgemische anhand einer Fallstudie quantitativ bewertet.

2.07

## Thermische Beanspruchung von Arbeitsmedien:

Auswirkungen des Betriebes einer Hochtemperatur-Wärmepumpe  
auf Kältemaschinenöle und Kältemittel

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

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

Durch die fortschreitende Dekarbonisierung des Wärmesektors gewinnen Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) immer weiter an Bedeutung. Die hohen Prozesstemperaturen im Wärmepumpenkreislauf gehen mit hohen Anforderungen an Materialien und Arbeitsmedien einher. Im Fokus stehen dabei die Verdichtereinheit sowie Belastungen des verwendeten Kältemittels (KM) und Kältemaschinen-Öls. Im Hinblick auf die Arbeitsmedien stehen synthetische (HCFOs, HFOs) oder natürliche KM zur Verfügung, im Bereich der Öle werden überwiegend Polyolester(POE)-Öle verwendet.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht das in einer 35 kW-Versuchsanlage verwendete POE-Öl, welches Druckgas-temperaturen von bis zu 155 °C ausgesetzt ist. Für die Systemauslegung sind verlässliche Daten für Dichte und dynamische Viskosität von besonderem Interesse. In dieser Studie wird die Dichte in der flüssigen Phase in dem Dichte-Messgerät DMA4200M der Firma Anton Paar nach dem Biegeschwinger-Prinzip gemessen. Die Viskosität wird mit dem Rheometer MCR102 derselben Firma in einer Druckkapsel mit einem Doppelpaltpresssystem bestimmt.

Die beiden Systeme sind mit einem Drucksystem verbunden, sodass auch Kältemittelproben, ohne in die Gasphase überzugehen, vom einen ins andere System mithilfe einer Hubkolbenpumpe transportiert werden können.

Zunächst wurden die Dichte und die Viskosität vom reinen Öl als Kontrollmessung ermittelt. Dabei wurden die Temperatur zwischen 30 °C und 150 °C und der Druck von 1 bar bis 15 bar variiert. Es ist zu beobachten, dass die Dichte mit steigender Temperatur linear mit einer relativen Abweichung von 0,01 % zu den Herstellerangaben bei 30 °C abnimmt. Die Viskosität hingegen zeigt einen stark exponentiellen Trend und bei 30 °C eine dynamische Viskosität von 138 mPas, bei 130 °C nur noch etwa 5 mPas, die relative Abweichung zu den Herstellerangaben liegt hier bei 5,6 %. Ausgehend von diesen Null-Messungen werden nun Proben aus der Öl-Rückführung der Versuchsanlage entnommen und untersucht. Dabei wird in einem weiterführenden Schritt festgestellt, ob die Unterschiede in Dichte und Viskosität auf eine Öl-Kältemittel-Mischung oder chemische Reaktionen, wie Zerfallsprozesse oder Rekombinationen durch die hohen Temperaturen, zurückzuführen sind.

**Keywords:**

POE-Öle, Stoffdatenmessung, Dichte, Viskosität, Hochtemperatur-Wärmepumpe

## 2.08

# Bringen neuartige Öle einen Vorteil für Kältemaschinen und Wärmepumpen?

– Eine Betrachtung aus thermodynamischer Sicht –

Steffen Feja, Christian Hanzelmann

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[steffen.feja@ilkdresden.de](mailto:steffen.feja@ilkdresden.de)

Für die Kälte- und Wärmepumpenbranche stellt sich seit jeher die Frage nach dem für jede Anwendung richtigen Arbeitsstoff, bezeichnet als Kältemittel. Hat man den in Hinsicht seiner thermodynamischen, umweltrelevanten, preislichen und sicherheitstechnischen (und ggf. weiterer) Eigenschaften „optimalen“ Arbeitsstoff (ggf. auch ein Stoffgemisch) gefunden, geht es neben der Auswahl der Komponenten für die zukünftige Maschine auch an die Auswahl des „optimalen“ Schmierstoffes.

Mit der Einführung der chlor- und bromfreien FKW und HFKW um das Jahr 1990 wurde gleichzeitig auch der Einsatz von synthetischen Schmiermitteln in der Kältetechnik üblich, da diese in Ihren Anfängen doch sehr teuren Öle, deutliche thermodynamische und chemische Vorteile gegenüber den damals verbreiteten Mineralölen aufwiesen. Inzwischen wurden weitere Kältemittel entwickelt, aber auch die schon bekannten „alten“ fluorfreien Kältemittel rückten wieder stärker in den Fokus der Überlegungen. Die am Markt nunmehr etablierten neuen synthetischen Schmiermittel wurden jetzt auch für diese Kältemittel getestet und meist als vorteilhaft für viele Anwendungen befunden.

Schon in 2002 kategorisierte Fahl, J. (2002) die Schmieröle für Kältemaschinen in vier Hauptkategorien mit 3-4 Untergruppen, wobei auch in den Untergruppen noch verschiedene chemische Strukturen und Synthesewege der Stoffe vereint sind. Zusätze, sogenannte Additive, welche in verschiedenen Konzentrationen und Zusammensetzungen den Ölen beigemengt werden können, um die Eigenschaften zu verändern, erschweren die Auswahl eines „optimalen“ Schmierstoffes weiter. Zudem ist die Entwicklung von Ölen mit verbesserten Eigenschaften aufgrund eines sich stetig verändernden Marktes, auch aufgrund klimapolitischer Maßnahmen, nie abgeschlossen.

Der Vortrag beschäftigt sich mit neuen Ideen für Formulierungen von Kältemaschinen- bzw. Wärmepumpenölen. Es werden für einige, sich derzeit im Entwicklungsstadium befindliche Öle Vergleiche mit am Markt verfügbaren Ölen gezeigt. Aus den gemessenen thermophysikalischen Eigenschaften - vor allem Dichte, Phasenverhalten, Dampfdruck und Viskosität - der Gemische mit den Arbeitsstoffen werden Schlussfolgerungen bezüglich der Vorteile und Nachteile der neu entwickelten Öle abgeleitet. Die Vergleiche erfolgen vorrangig anhand der Druck-Viskositäts-Temperatur-Konzentrationsdiagramme der Gemische (den sogenannten Daniel Plots), welche messtechnisch gewonnen wurden bzw. in der Literatur vorliegen.

**Stichwörter:**

Synthetische Kältemaschinenöle, Kältemittel, Propan (R290), Kohlendioxid (R744), R1233zd(E), Thermophysikalische Eigenschaften, Dichte, Phasenverhalten, Viskosität, Dampfdruck.

**Literaturverzeichnis**

Fahl, J., 2002. Entwicklung und Erprobung von Schmierölen für Kälte- und Klimasysteme mit CO<sub>2</sub> als Arbeitsstoff. Dissertation Bochum.

**2.09**

## **OilMixProp 1.0: Thermophysical Properties of Oils and Mixtures**

**A Software Package for User-Defined Oils, Common Fluids, and Their Mixtures**

**Xiaoxian Yang<sup>1</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)

This work presents OilMixProp 1.0 (oil mixture properties), which could be the first software package capable of calculating all the core thermophysical properties of fluids, including user-defined oils. All the properties needed for thermodynamic cycle analysis are included. More than 600 pure fluids are available, and users can define their oil by determining its fluid constants using embedded fitting tools (see fundamentals: Ind. Eng. Chem. Res. 2023, 62, 18736–18749). Analogously, but in some aspects better than the *refpropm* function (Matlab interface of NIST's REFPROP 10.0 database), the *oilpropm* function was developed as the interface for thermophysical property calculations. Various input combinations (e.g., temperature and pressure, pressure, and enthalpy) are available to satisfy the needs of thermodynamic cycle analysis. Sophisticated outputs are designed to deliver complete information (phases and properties in each phase) or selected information. The package is written in Matlab and is free for academic institutions.

**Keywords:**

OilMixProp, thermophysical properties, oil, mixture, flash algorithm

**2.10**

## **NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Absorptionswärmetransformator – Erhöhung der Betriebsstabilität**

**Luisa Haak\*, Adrian Vollmer, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiopoulos**

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

Absorptionswärmetransformatoren sind thermische Energiewandler, welche Wärme von einem mittleren Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau, das Nutztemperaturniveau, anheben. Dazu wird ein Teil der Wärme auf niedrigem Temperaturniveau abgeführt. Die Antriebsenergie beschränkt sich weitestgehend auf die auf mittlerem Temperaturniveau zugeführte Wärme. Der Strombedarf hingegen ist sehr gering. So werden Absorptionswärmetransformatoren beispielsweise als Alternative zu Hochtemperaturkompressionswärm-

pumpen diskutiert. In diesem Zusammenhang stellen sie eine vielversprechende Technologie für die Dekarbonisierung der Industrie dar.

In diesem Beitrag wird der Prototyp eines NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Absorptionswärmetransformators mit einer Nutzwärmeleistung von ca. 10 kW vorgestellt. Erste Messergebnisse zeigen, dass der Prozess sehr sensibel auf niederdruckseitige Druckschwankungen reagiert. Dies wird darauf zurückgeführt, dass prozessbedingt sowohl die arme Lösung als auch das Kältemittel als nahezu gesättigte Flüssigkeit auf der Saugseite von Lösungs- bzw. Kältemittel-pumpe vorliegen. Daher tritt infolge geringster Druckabsenkungen in den Pumpen Kavitation auf und die Förderung von Lösung sowie Kältemittel bricht infolgedessen ein.

Kavitation stellt nicht nur eine Herausforderung in Bezug die Betriebsstabilität dar, sondern reduziert auch die Lebensdauer der Pumpen. Um Kavitation zu vermeiden werden Maßnahmen zur Unterkühlung von Kältemittel und armer Lösung auf der Saugseite der Pumpen umgesetzt. Anschließend wird die erzielte Unterkühlung gemessen und der Einfluss auf die Betriebsstabilität gezeigt.

**Stichwörter:**

Absorption, Wärmetransformator, Ammoniak/Wasser, Kavitation

## 2.11

### Absorptionswärmepumpe Erster und Zweiter Art

#### Theoretische und Praktische Überlegungen zur Umsetzbarkeit einer Umschaltbaren Anlage

**Ludwig Irrgang<sup>1\*</sup>, Severin Brunner<sup>1</sup>, Christopher Schifflechner<sup>1</sup>, Hartmut Spliethoff<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme,  
Boltzmannstr. 15, 89747 Garching, Deutschland  
[ludwig.irrgang@tum.de](mailto:ludwig.irrgang@tum.de)

Aufgrund der saisonalen Schwankungen im Wärme- und Kältebedarf in Deutschland bieten umschaltbare, den Absorptionswärmepumpenprozess der ersten und zweiten Art vereinende Anlagen, Vorteile in Bezug auf Investitionskosten und Anlagenauslastung. Sie können sowohl im Sommer zur Kältebereitstellung als auch im Winter zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Die Anwendung einer solchen Anlage für die Geothermie im Süddeutschen Molassebecken wird daher am Lehrstuhl für Energiesysteme der Technischen Universität München experimentell untersucht. In dieser Arbeit werden die Errichtung des Prüfstands sowie die besonderen Herausforderungen für eine solche Anlage dargestellt. Neben den internen Prozessanpassungen, die für einen wechselnden Betrieb erforderlich sind, wird auch auf die externe Hydraulik und die Herausforderungen bei der Umschaltbarkeit zwischen den beiden Prozessen eingegangen. Verschiedene Lösungsansätze werden verglichen und mögliche innovative Ansätze zur Umsetzung des Konzepts werden vorgestellt.

**Stichwörter:**

Absorption, Wärmepumpe, Kältemaschine, Wärmetransformator, Geothermie

## 2.12

# Alternative Sorptionsmittel für Absorptionswärmepumpen

## Stoffeigenschaften von IL und DES im Vergleich mit LiBr

Michael Wernhart<sup>(a1)</sup>, René Rieberer<sup>(a1)</sup>, Paul Demmelmayer<sup>(a2)</sup>, Marlene Kienberger<sup>(a2)</sup>,  
Markus Damm<sup>(b)</sup>, Roland Kalb<sup>(b)</sup>, Mike Otto<sup>(c)</sup>, Christian Kemmerzehl<sup>(c)</sup>

<sup>(a1)</sup> TU Graz, Institut für Wärmetechnik Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010, Austria  
[michael.wernhart@tugraz.at](mailto:michael.wernhart@tugraz.at)

<sup>(a2)</sup> TU Graz, Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik  
Graz, Inffeldgasse 25/C, 8010, Austria

<sup>(b)</sup> proionic GmbH, Raaba-Grambach, Parkring 18/H, 8074, Austria

<sup>(c)</sup> EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld, Römhild, Oberes Tor 106, 98630, Germany

Absorptionswärmepumpen (AWP) ermöglichen die Nutzung von Abwärme, z. B. aus der Industrie. In AWP wird meist das Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid ( $H_2O/LiBr$ ) aufgrund der hohen latenten Wärme von Wasser und seiner niedrigen Sättigungsdrücke eingesetzt. Jedoch kann das Sorptionsmittel LiBr bei hohen Antriebstemperaturen zu Problemen wie Korrosion und Kristallisation führen.

Aus diesem Grund werden im Rahmen des Projekts "AbSorbEnt" alternative Sorptionsmittel wie ionische Flüssigkeiten und stark eutektische Lösungsmittel entwickelt und deren Einsatz in Absorptionswärmepumpen bei Temperaturen des Wasser/Sorptionsmittel-Gemischs zwischen 30 °C und 200 °C bzw. bei Drücken zwischen 10 mbar und 1,4 bar analysiert und bewertet.

In diesem Konferenzbeitrag werden experimentelle Ergebnisse ausgewählter Sorptionsmittel hinsichtlich Kinetik und thermodynamischer Eigenschaften (z. B. Lösungswärme, Gleichgewichtseigenschaften) präsentiert und mit LiBr verglichen.

### Stichwörter:

Stark eutektische Lösungsmittel, Ionische Flüssigkeiten, Lithiumbromid, AWP

## 2.13

# Partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher

## Experimentelle Untersuchung des Kristallisierungs- und Auflösungsverhaltens wässriger LiBr-Lösung zur Anwendung in einem Absorptionskältespeicher

Dieter Preßl<sup>1\*</sup>, Leon Haffner<sup>1</sup>, Tobias Schubert<sup>1</sup>, Eberhard Lävemann<sup>1</sup>

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

Um die angestrebten Klimaziele erreichen zu können, muss die Energieeffizienz in allen Anwendungsbereichen deutlich gesteigert werden. Dies erfordert u. a. die vermehrte Nutzung industrieller Abwärme, die nach wie vor in großem Umfang ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Eine etablierte Technologie für die Nutzung industrieller Abwärme im Bereich von ca. 100 °C sind Absorptionskältemaschinen auf Basis des Stoffpaars  $H_2O/LiBr$ , die in Kühl- und Klimatisierungsanwendungen über 0 °C eingesetzt werden. Sie sind bisher jedoch nur dann wirtschaftlich einsetzbar, wenn Abwärmeaufkommen und Kältebedarf deckungsgleich sind. Dies ist in Praxis jedoch häufig nicht der Fall. Um dennoch eine Absorptionskältemaschine einsetzen zu können, müsste sie um einen thermischen Energiespeicher erweitert werden, um Abwärmeaufkommen und Kältebedarf zeitlich

voneinander entkoppeln zu können. Verfügbare sensible und latente thermische Energiespeicher erreichen im beschriebenen Anwendungsfall jedoch nur geringe Energiespeicherdichten von deutlich weniger als 100 kWh/m<sup>3</sup>, was derartige Systeme in letzter Konsequenz in den meisten Fällen unwirtschaftlich macht.

Eine vielversprechende Alternative stellt ein sogenannter Absorptionskältespeicher dar, bei dem die Absorptionskältemaschine um einen Speicherbehälter zur Bevorratung einer größeren Menge der wässrigen LiBr-Lösung erweitert wird. Diese dient dabei nicht nur als Sorbens, sondern auch als Speichermedium. Absorptions- und Desorptionsprozess können beim Absorptionskältespeicher unabhängig voneinander ablaufen. Bei einem Kältebedarf läuft der Absorptionsprozess ab, der dem Entladevorgang des Speichers entspricht. Dabei absorbiert die LiBr-Lösung Wasserdampf und verdünnt sich. Ist Abwärme verfügbar, läuft der Desorptionsprozess und damit der Ladevorgang des Speichers ab. Die zuvor verdünnte Salzlösung wird wieder aufkonzentriert, indem ein Teil des enthaltenen Wassers desorbiert wird. Grundsätzlich korreliert die Energiespeicherdichte eines Absorptionskältespeichers mit der Differenz des Salzmassenanteils von verdünnter und konzentrierter Lösung. Aufgrund der begrenzten Löslichkeit von LiBr in Wasser erscheint es interessant, zur Steigerung der Energiespeicherdichte einen Großteil der konzentrierten Lösung zyklisch in LiBr-Monohydrat umzuwandeln, das einen sehr hohen Salzmassenanteil besitzt. Wir bezeichnen ein derartiges System als partiell kristallisierenden Absorptionskältespeicher, den wir in einem laufenden Forschungsvorhaben bis TRL 4 entwickeln wollen. Die angestrebte, auf das Speichermaterial bezogene Energiespeicherdichte beträgt 250 kWh/m<sup>3</sup>.

Da über das Kristallisierungs- und Auflösungsverhalten wässriger LiBr-Lösung in der Literatur sehr wenig bekannt ist, untersuchen wir dieses derzeit intensiv experimentell im Hinblick auf den intendierten Speicherprozess. Die ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend bezüglich der technischen Umsetzung des Speichers. Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe an einem Teststand mit 10 Liter wässriger LiBr-Lösung erreichten wir spezifische Auflöseraten von 1-4 MW/m<sup>3</sup> Speichervolumen. Dies sollte auch sehr hohe Entladeleistungen, wie sie im industriellen Umfeld erforderlich sein können, ermöglichen. Derzeit läuft eine zweite Versuchsreihe zur Bestimmung der spezifischen Kristallisierungsrate, um analog eine Aussage zu möglichen Ladeleistungen des Speichers treffen zu können. Die Ergebnisse sollten uns bis zur Tagung vorliegen und sollen dann ebenfalls vorgestellt werden.

**Stichwörter:**

Energiespeicher, LiBr, Absorptionskältespeicher, Kristallisation, Auflösung

## 2.14

# Modellierung von Wasser-Dampf-Ejektoren für Hochtemperatur-Wärmepumpen

Omar Abu Khass<sup>1\*</sup>, Steffen Klöppel<sup>1</sup>, Panagiotis Stathopoulos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Abteilung Hochtemperatur-Wärmepumpen,  
03046/02763 Cottbus/Zittau, Land  
[omar.abukhass@dlr.de](mailto:omar.abukhass@dlr.de)

Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP), die natürliche Kältemittel wie Wasser verwenden, können Prozesswärme bis zu 160°C erzeugen und bieten damit eine vielversprechende Lösung zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse. Das Erreichen solcher Temperaturen erfordert jedoch fortschrittliche Kompressoren-technologie, was zu komplexen Designs führt und oft den Einsatz mehrerer Kompressoren erfordert. Diese Studie untersucht die Integration von Zweiphasen-Ejektoren in Rankine-Kreislauf-basierten HTWP, um das System zu vereinfachen und gleichzeitig seine Effizienz zu erhalten. Die Ejektoren wirken als sekundärer Kompressionsmechanismus und ermöglichen eine Mischung des Kondensats mit überhitztem Dampf, um diesen zu entwärmten und gleichzeitig den Druck zu erhöhen. Ein Vergleich der Kreislaufleistung im Vergleich zu herkömmlichen Systemen erfolgt durch thermodynamische Modelle und ein 1D-Ejektormodell. Die Ergebnisse zeigen, dass Ejektoren HTWP-Systeme vereinfachen, die Kompressionsleistung und die Stufenanzahl reduzieren und den COP bei ein- und zweistufigen Rankine-Kreislauf-basierten HTWP verbessern können.

**Stichwörter:**

Zweiphasen-Ejektor, Mathematische Modellierung, Wärmepumpe, Dampfkompression

2.15

## Transiente Simulation eines R-744 Systems zur Abkühlung von Luft auf bis zu -50 °C

Melanie Cop\*, Yixia XU, Christiane Thomas

TU Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, 01062 Dresden

[melanie.cop@tu-dresden.de](mailto:melanie.cop@tu-dresden.de)

[yixia.xu@tu-dresden.de](mailto:yixia.xu@tu-dresden.de)

[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

Umweltpfuskammern (ETC) sind integrale Testeinrichtungen für verschiedene Industriezweige wie Fahrzeugtechnik, Leistungselektronik und Materialprüfung. Die Suche nach umweltfreundlichen und energieeffizienten Alternativen zu den bisher verwendeten HFKWs (z. B. R-23) ist im Gange. Um natürliche Kältemittel wie R-744 in diesem Sektor zu etablieren und einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, wurde eine Umweltpfuskammer mit einem mehrstufigen R-744-System unter Verwendung eines instationären Simulationsansatzes untersucht. Das Testsystem ermöglicht eine schnelle Abkühlung von bis zu 15 K/min bei einer Ziellufttemperatur von bis zu -50 °C.

Das vorgeschlagene Simulationsmodell deckt die dynamischen Wechselwirkungen der Schlüsselkomponenten wie Verdichter, Verdampfer und Expansionsventile ab. Besondere Aufmerksamkeit wird der Luft in der Kammer gewidmet, wobei die maximale Abkühlrate berücksichtigt wird. Darüber hinaus wird in der Studie die Anwendung fortschrittlicher Regelungsstrategien untersucht, um die festgelegten Abkühlraten und die Effizienz der Kälteanlage zu verbessern.

**Stichwörter:**

Tiefkühlung, natürliche Kältemittel, dynamische Last, Regelung, Abkühlrate

2.16

## Optimierte Vorhersage der Kältemittelfüllmenge in Prozess-Simulationen

Tim Rudzik\*, Max Kunath, Yixia Xu, Christiane Thomas

Technische Universität Dresden,  
Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
01062 Dresden, Deutschland  
[tim.rudzik@tu-dresden.de](mailto:tim.rudzik@tu-dresden.de)  
[max.kunath1@tu-dresden.de](mailto:max.kunath1@tu-dresden.de)  
[yixia.xu@tu-dresden.de](mailto:yixia.xu@tu-dresden.de)  
[christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

Prozesssimulationen rücken bei der Konzeptionierung und Auslegung von kältetechnischen Anlagen und Wärme-pumpen vermehrt in den Fokus der Entwicklung. Insbesondere erweist sich die simulative Untersuchung der Kältemittelfüllmenge aufgrund des Einsatzes brennbarer Kältemittel wie Propan als zunehmend wesentlich.

Ein wichtiger Einfluss auf die Kältemittelfüllmenge in den Anlagenkomponenten ist der Geschwindigkeitsschlupf zwischen Gas und Flüssigkeit, welcher jedoch in gängigen Simulationstools häufig keine Berücksichtigung findet. Unterschiedliche Geschwindigkeiten zwischen den beiden Phasen führen jedoch zu einer Ansammlung von flüssigem Kältemittel. Eine Berücksichtigung des Schlupfes führt zu einer Erhöhung der berechneten Füllmenge, die für einen optimalen Anlagenbetrieb erforderlich ist.

In dieser Arbeit werden Implementierungsansätze zur Berücksichtigung des Geschwindigkeitsschlupfes in eine bestehende Modelica-Bibliothek – der TIL-Suite – vorgestellt, um deren Einfluss auf das Systemverhalten anhand

eines Wärmepumpenmodells zu untersuchen. Dabei werden verschiedene Schlupfmodelle miteinander verglichen, wobei Randbedingungen wie Heizleistung und Kältemittel variiert werden.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Berücksichtigung des Schlupfes in der Prozesssimulation einen wesentlichen Einfluss auf das Systemverhalten und den Kältemittelbedarf ausübt.

**Stichwörter:**

Modelica, Prozess-Simulation, Schlupfmodel, Void Fraction, Wärmepumpe

**2.17**

## Potential des Rekuperativen Zweiphasen-Prozesses

### Gegenüberstellung mit WP-Bestandstechnologien

**Benedikt G. Bederna<sup>1\*</sup>, Max Friedemann<sup>1</sup>, Veith N. Kaspar<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>**

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

Das kürzlich an der TU Dresden entwickelte Konzept eines rekuperativen Zweiphasen-Kreisprozesses bietet das theoretische Potential, die Exnergieverluste einer isenthalpen Drosselung in Wärmepumpenprozessen zu vermeiden und damit den COP zu erhöhen. Am Beispiel einer Hochtemperaturwärmepumpe mit einem Hub > 100 K soll dieses Potential quantifiziert werden. Dem neuartigen Prozess wird dabei der Stand der Technik in Form eines zweistufigen Clausius-Rankine-Prozesses mit Zwischendampfeinspritzung gegenübergestellt. Um den verzerrenden Einfluss auszugleichen, der durch die unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften der jeweiligen Arbeitsfluide verursacht würde, werden beiden Prozesse in ihrem thermodynamischen Optimum betrachtet. Dies erfolgt durch die Nutzung eines jeweils bestmöglichen Pseudoarbeitsfluides, welches das Ergebnis einer gleichzeitigen Kreisprozess- und Arbeitsfluidoptimierung ist. Hierfür werden PC-SAFT-Zustandsgleichungen verwendet. Detaillierte Aussagen zum Vergleich der Prozesse werden auf Basis einer Exergieanalyse getätigt. Darüber hinaus wird das Potential der technischen Umsetzbarkeit im Kontext der laufenden experimentellen Arbeiten eingeordnet. Der Fokus liegt einerseits auf dem Rekuperationseffekt, wie er durch ein asymmetrisches Gemisch ermöglicht wird, und andererseits auf den Vorteilen eines Phasenwechsel für die Realisierung einer isothermen Verdichtung. Konkret kommen die asymmetrischen Gemische Propan-Dodekan und Isobutan-Nonan zu Einsatz.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpen, Rekuperativer Zweiphasen-Kreisprozess, Isotherme Verdichtung, Inverse Arbeitsfluidoptimierung

## Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung

### Untersuchungen einer offenen Prozessführung

Dimitri Nefodov<sup>1</sup>, Haochen Wang<sup>1</sup>, Falko Wusterhausen<sup>1</sup>, Markus Richter<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>

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

Ein aktuelles Problem ist der globale Klimawandel. Die Folgen führen seit mehreren Jahren u. a. zur Verschlechterung von Schneebedingungen in tieferen Lagen. Damit ist ein massiver wirtschaftlicher Einbruch bei beispielsweise Skitourismus verbunden. Um dem entgegenzuwirken, kommen technischen Schneeeerzeuger in Schigebieten zum Einsatz.

Im Rahmen des Projektes KETEC (Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik) [1] wurden mehrere Konzepte zur Umsetzung von offenen Kaltgasverfahren erarbeitet [2], [3]. Diese Verfahren verwendet u. a. Luft als natürliches Kältemittel und erlaubt Einsatz bei technischen Anlagen zur z. B. Schnee- und Eisproduktion in Schigebieten (vgl. mit [4]). Der Ansatz sieht eine mehrstufige Verdichtung mit Zwischenkühlung vor. Bei gleichzeitiger Nutzung der anfallenden Abwärme für die Wärmeversorgung lassen sich die niedrigen Leistungszahlen des Kaltgas-Prozesses steigern.

Die vorliegende Arbeit behandelt mögliche Umsetzungsvarianten sowie den Einfluss von relevanten Parametern, wie z. B. die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Verdichtungsenddruck, etc. Die Simulation des Systems erfolgt mit der Software EBSILON®Professional [5].

Die Ergebnisse bestätigen, dass die gekoppelte Kälte- und Wärmeproduktion zielführend ist. Die Stromversorgung soll möglichst mit erneuerbarem Strom (lokale PV- bzw. Windkraftanlagen) erfolgen. Die erreichbaren Temperaturen hängen in erheblichem Maße von den verwendeten Entspannungsorganen sowie dem Temperatur- und Druckniveau ab. Die Nutzung einer Turbine in Kombination mit einem Generator hat sich als vorteilhaft erwiesen. Besonders großes Anwendungspotenzial für dieses System sehen die Autoren in der Tourismus-, Pharma- und Chemieindustrie.

#### Stichwörter:

Schnee, Erzeugung, Verfahren, natürliche Kältemittel, EBSILON®Professional

#### Literaturverzeichnis

- [1] Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: [www.ketec.online](http://www.ketec.online). Internetseite zum Verbundvorhaben 03.02.2024.
- [2] Urbaneck, T.; Richter, M.: Verfahren zur Abkühlung mindestens eines Kältemittels und/oder mindestens eines Kälteträgers in einem offenen Prozess. DE 20 2022 107 105, Gebrauchsmusteranmeldung vom 20.12.2022, Eintragung am 08.03.2023.
- [3] Urbaneck, T.; Richter, M.: Verfahren zur Abkühlung mindestens eines Kältemittels und/oder mindestens eines Kälteträgers in einem offenen Prozess. DE 10 2022 134 154.2, Patentanmeldung vom 20.12.2022
- [4] Matthes, M.; Rausendorf, J.; Richter, M.; Urbaneck, T.: Vorstellung eines neuartigen Verfahrens zur Erzeugung von Eisbrei auf der Basis eines dispergierbaren Zweistoffsystems, Teil 1. ki – Kälte-, Luft- und Klimatechnik Hüthig 59. Jg. (2023) Heft 8-9 S. 44-47. – ISSN 1865-5432
- [4] STEAG Energy Services GmbH, 2024. EBSILON Professional 16.04.

2.19

## Analyse des Cleaning-in-Place Systems einer Molkerei zur Optimierung der Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe

Manuel Verdnik\*, Fabian Eder, Philipp Eliskases, René Rieberer

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

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

Ungenutzte Abwärme von Kälteanlagen birgt Potentiale zur Wärmerückgewinnung und entsprechenden Energieeinsparungen. Wenn die Abwärme aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus nicht direkt genutzt werden kann, ermöglichen (Hochtemperatur)Wärmepumpen deren Anhebung auf ein für Prozesswärme nutzbares Temperaturniveau.

Die betrachtete Add-on Wärmepumpe (WP) hebt die Abwärme einer Ammoniak-Kälteanlage (Kaltwassertemperatur ca. 1°C) eines Molkereibetriebes auf ein Temperaturniveau von bis zu 90 °C, um die in Speichern befindlichen Reinigungsflüssigkeiten (Säure und Lauge) eines Cleaning-in-Place (CIP) Systems zu erwärmen. Nach Entnahme aus dem Speicher wird derzeit die jeweilige Reinigungsflüssigkeit während des Reingungsvorganges in einem geschlossenen Kreis ohne Durchströmung des Speichers in einem separaten Wärmeübertrager mittels Dampf erwärmt, um die notwendige Temperatur zu halten.

Im Rahmen dieser Arbeit werden aus Messdaten des CIP-Systems Lastkurven für ausgewählte Reinigungszyklen abgeleitet. Mittels Simulation wird untersucht, welche Einsparungspotentiale zu erwarten sind, wenn der Speicher auch während des Reingungsvorganges durchströmt und dadurch ein größerer Anteil des Wärmebedarfes durch die WP gedeckt wird. Dazu werden vereinfachte Simulationsmodelle der Kälteanlage und der WP genutzt, um in transienten Simulationen Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb zu untersuchen.

**Stichwörter:**

R717, Prozesswärme, Speicher, modellbasierte Analyse

2.20

## Dynamic operation and leakage study on heat pump utilizing high-glide mixtures

Leon P. M. Brendel\*, Cordin Arpagaus, Stefan S. Bertsch

OST – Eastern Switzerland University of Applied Sciences, Institute for Energy Systems

[Leon.brendel@ost.ch](mailto:Leon.brendel@ost.ch)

High-glide mixtures in heat pumps improve the COP in certain operating conditions, which are predominantly found in industrial applications. This was theoretically and experimentally confirmed in various studies, always focusing on the steady-state performance. This study extends previous research by experimentally investigating dynamic changes of operating conditions. Both the absolute source inlet and sink outlet temperature as well as the temperature differences across the heat exchangers are changed following a 2 hour long predetermined transient test path. The mixtures compared against pure fluids have better average COPs over the 2 hour long measurement period. A composition shift as the operating conditions changed was not observable. An additional study simulated leakage of about 20 % of the charge over a 3 hour time window during operation of the machine. The change in the composition was small. In a similar test but with the heat pump at standstill, the composition shift was measured to be larger. The study adds confidence into the use of high-glide mixtures in real-world applications.

**Stichwörter:**

high-glide mixtures, high-temperature heat pump, dynamic, transient, composition changes, performance

2.21

## Demonstrator dispersionsbasierter Eisbreierzeugung

### Vorstellung einer Versuchsanlage zur Erzeugung von Eisbrei mittels eines neuartigen Verfahrens

**Manuel Matthes<sup>1</sup>, Jonathan Rausendorf<sup>1</sup>, Markus Richter<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Chemnitz, Professur für Technische Thermodynamik  
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz  
[thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de)  
[manuel.matthes@mb.tu-chemnitz.de](mailto:manuel.matthes@mb.tu-chemnitz.de)

Systeme mit Eisbrei besitzen in der Regel eine spezifisch größere Kälteleistung bzw. eine höhere Energiespeicher-dichte ggü. Systemen mit Kaltwasser. Weiterhin ist Eisbrei ein ökologischer Kälteträger, wenn umweltfreundliche Additive zum Einsatz kommen. Viele verschiedene Verfahren zur Eisbreierzeugung wurden bereits entwickelt. Jedoch bestehen diverse Limitierungen, aufgrund deren sich der Eisbrei, trotz seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten, bisher kaum in der Praxis durchsetzen konnte. Ein neuartiger Ansatz besteht in der Erzeugung einer Gas-Wasser-Dispersion unter hohem Druck und deren anschließender Entspannung, wobei grundsätzlich verschiedene Kälteeffekte auftreten und zur Eisbildung genutzt werden können. Nach der erfolgreichen Herstellung von Eisbrei in experimentellen Voruntersuchungen mit diesem Verfahren ist hierfür nun der Machbarkeitsnachweis in einem Demonstrator zu erbringen. Im Ergebnis dieser Arbeit wurde eine Versuchsanlage geplant, welche die Eisbreierzeugung mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel in einem kontinuierlichen, geschlossenen Prozess ermöglicht. Der im Aufbau befindliche Demonstrator stellt die Überführung des theoretischen Verfahrens in die praktische Umsetzung dar, wobei der Zweck der Anlage in der Nachweisführung und der messtechnischen Untersuchung liegt.

**Stichwörter:**

Eisbrei, Ice Slurry, Dispersion, Gas, Demonstrator

2.22

## Wasser-in-Öl-Dispersionen für Kälteanwendungen

### Potentiale zur Kältespeicherung und -transport

**Moritz Kick<sup>1\*</sup>, Stefan Gschwander<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[moritz.kick@ise.fraunhofer.de](mailto:moritz.kick@ise.fraunhofer.de)

Wasser-in-Öl-Phasenwechsel-Dispersionen ("Phase Change Slurries", PCS) können große Mengen von Kälte in sensibler und latenter Form unter 0 °C speichern und transportieren, wofür der Gefrierpunkt des Wassers abgesenkt wird. Diese Gefrierpunktserniedrigung wird durch das Auflösen von Zusatzstoffen, wie z. B. Salz, im Wasser erreicht. PCS werden durch Dispergieren des Wassers in Öl mittels Rotor-Stator- oder Ultraschall hergestellt. Die Dispersion wird mit einem oder mehreren Tensiden stabilisiert. Selbst nach dem Gefrieren des Wassers bleibt die PCS aufgrund der kontinuierlichen Ölphase flüssig. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität des Wassers im Vergleich zum Öl sowie durch die Nutzung der Schmelzwärme des Wassers bzw. einer Wasser-Salzmischung besitzen die PCS eine deutlich höhere Speicherkapazität als das reine Öl.

Die theoretische Analyse zeigt, dass Wasser in Öl PCS die Wärmekapazität von reinem Öl übertreffen, weil die spezifische Wärmekapazität des Öls (~2 kJ/kg K) im Vergleich zu Wasser oder einer Salz-Wassermischung (ca. 3,4 bis 4,18 kJ/kg K) gering ist. Die erreichbare Speicherkapazität des PCS ist stark von der dispergierten Wassermenge abhängig. Darüber hinaus kann der Phasenwechsel durch eine geeignete Wasser-Salzmischung auf eine bestimmte Anwendungstemperatur angepasst werden, so dass der Gefrier- und Schmelzprozess zusätzlich zur sensiblen Wärmespeicherung genutzt werden kann.

In diesem Beitrag werden theoretisch die Speicherkapazitäten von Wasser in Öl Dispersionen mit dem reinen Öl verglichen und eine erste Kostenanalyse durchgeführt, sowie Ergebnisse von einer im Labormaßstab hergestellten Dispersionen präsentiert. Die Ergebnisse einer PCS mit 20 Vol.-% Wasser in der Ölphase bestätigen die die theoretischen Analysen und zeigen auch experimentell die Erhöhung der Speicherkapazität von 17 kJ/l beim reinen Öl auf 70 kJ/l (im 10 K Temperaturintervall mit Phasenwechsel) nach dem Dispergieren des Wassers sowie eine gute Stabilität bei der Lagerung und unter thermomechanischer Belastung.

**Stichwörter:**

Phase Change Slurry, Dispersion, Latentwärmespeicher, Kältespeicher

**2.23**

## **Optimierte Temperaturschichtung durch poröses Medium**

### **Numerische Untersuchung eines Kältespeichers**

**Sebastian Gamisch<sup>1\*</sup>, Parshva Atulbhai Parekh<sup>1</sup>, Stefan Gschwander<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland

[sebastian.gamisch@ise.fraunhofer.de](mailto:sebastian.gamisch@ise.fraunhofer.de)

In flüssigkeitsbasierten Kältespeichern ist eine ausgeprägte thermische Schichtung entscheidend für die Effizienz des Speichers. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse einer Simulationsstudie zur Ausbildung der Schichtung bei der Nutzung eines Rohrdiffusors in Kombination mit einem porösen Medium präsentiert. Um den Einfluss des porösen Mediums zu untersuchen, wird ein zweidimensionales numerisches Strömungsmodell des Speichers eingesetzt. Die Dicke der Übergangsschicht zwischen dem warmen oberen und dem kalten unteren Teil, die sogenannte Thermokline, wird zur Bewertung der Schichtung verwendet. Im Beitrag werden verschiedene Anordnungen und Konfigurationen des porösen Mediums sowie der Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Dicke der Thermokline dargestellt. Als Speichermedium wird Wasser und alternativ dazu ein Phasenwechselfluid (engl. phase change slurry, PCS) verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem porösen Medium das Mischvolumen am Einlass des Speichers begrenzt werden kann. Bei Wasser als Speichermedium und einer schrägen Anordnung kann die Dicke der Thermokline im Vergleich zum Speicher ohne poröses Medium um bis zu 42 % reduziert werden.

**Stichwörter:**

Numerische Strömungssimulation, Kältespeicher, Thermokline, Schichtung, poröses Medium

### 3.01

## Die optimale Überhitzung?

### Regelansatz für einfache transkritische Kältemaschinen

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)

Bei einfachen transkritischen Kältemaschinen, bestehend aus Verdichter, Gaskühler, Drossel und Verdampfer, sowie optional einem inneren Wärmeübertrager, ergibt sich der Hochdruck im Anlagenbetrieb mit konstantem Überhitzungswert durch die Anlagenfüllmenge und die inneren- und äußeren Betriebsparameter. Dieser, sich einstellende Hochdruck entspricht nicht notwendigerweise dem, für den Betriebspunkt optimalen Hochdruck.

Im transkritischen Kältemaschinenbetrieb existieren zwei optimale Hochdruckkurven. Der Hochdruck für maximale Kälteleistung, sowie der Hochdruck für eine maximale Leistungszahl. Bei einfachen Anlagen mit einem überhitzungsabhängigen Hochdruck konkurriert die Überhitzungsregelung mit einer Regelung auf einen optimalen Hochdruck. In Bezug auf die Überhitzung lässt sich ein globales Optimum bestimmen, um Kälteleistung oder Leistungszahl zu maximieren.

Die Überhitzungsabhängigkeit des optimalen Hochdrucks wird untersucht und dargestellt. Zunächst wird eine Regelschleife zur Einstellung der optimalen Überhitzung für die Maximierung der Leistungszahl aufgezeigt. Eine angepasste Regelschleife berücksichtigt einen maximalen Leistungsbedarf bei der höchsten, zu erwartenden Gaskühleraustrittstemperatur. Die Funktionalität des Regelkonzepts wird durch Messdaten nachgewiesen.

#### Stichwörter:

Überhitzung, optimaler Hochdruck, CO<sub>2</sub>, mobile Kälte, natürliche Kältemittel

### 3.02

## Efficiency Improvement of Transcritical CO<sub>2</sub> Refrigeration System using Rotary Pressure Exchanger

Neelesh N. Sarawate, Ph.D.

Energy Recovery Inc., 1717 Doolittle Drive, San Leandro, CA 94577, USA  
[NSarawate@energyrecovery.com](mailto:NSarawate@energyrecovery.com)

This paper highlights application of a rotary gas pressure exchanger (PX) to increase efficiency of transcritical CO<sub>2</sub> refrigeration systems. It uses high pressure discharge of the condenser/gas cooler as a motive fluid to compress the low-pressure flash gas with minimal external energy input, thus reducing the power consumption of the main compressor. PX simultaneously expands the high-pressure supercritical/liquid CO<sub>2</sub> into a two-phase CO<sub>2</sub> ready for heat absorption, thus also emulating the functionality of a typical high-pressure expansion valve. PX can be utilized in various architectures or configurations in a typical transcritical CO<sub>2</sub> system. High pressure inlet comes from the gas cooler outlet, and source of low-pressure inlet can be designed as per the architecture needs. Systems have been designed where the low pressure source can come from flash gas in the receiver, or from a bypass line from a heat-exchanger that is utilized to lower the enthalpy at high-pressure inlet. System modeling involves calculation of thermodynamic states at various nodes of the systems satisfying mass and energy balances, along with estimation of various key parameters such as flow-rates, compressor work, receiver quality, etc. Assumptions associated with modeling an ideal PX are presented, which include constraints on mass flow arising from internal physics of the pressure exchanger and density ratio between low-pressure inlet and

high-pressure inlet ports. System of equations is solved for PX based system as well as baseline high pressure valve (HPV) based system to illustrate increase in Coefficient of Performance (COP) and reduction in compressor power over a wide range of temperatures and pressures. In-house laboratory test setup simulating a refrigeration loop is described, where the system is tested from evaporator loads ranging from 60 to 100 kW and gas cooler inlet temperatures from around 20 C to 40 C. Control system to maintain desired system parameters is also briefly described. Performance (or COP) of PX based system is measured as a function of low-pressure inlet volumetric flow to duct length ratio (termed as “travel distance”). These tests are utilized to find an operating setpoint to maximize COP for given inlet conditions. Both modeling results and experimental data shows that the COP lift of PX based system increases with increasing temperatures, highlighting its benefit for systems that operate in transcritical range.

### 3.03

## Experimentelle Untersuchung eines neuartigen Ejektor-Unterkühlungssystems

**Dominik Herden<sup>1\*</sup>, Yixia Xu<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Felix Pfeiler<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>compact Kältetechnik GmbH, Dieselstraße 3, 01257 Dresden, Deutschland

Um die Effizienz von transkritischen R-744-Kältesystemen zu erhöhen, werden häufig Ejektoren eingesetzt, die einen Teil der Expansionsverluste zurückzugewinnen. Gegenwärtige R-744-Ejektorsysteme sind jedoch auf niedrige bis mittlere Druckhöhe beschränkt, was das Risiko einer geringeren Effizienz, Strömungsablösung und Rückströmung während des Ejektorbetriebs außerhalb der Auslegungsbedingungen mit sich bringt.

Diese Herausforderungen und die Komplexität der Regelungsstrategie in Ejektorsystemen haben bisher die Akzeptanz und damit einen breiten Einsatz der Technologie verhindert. Um die Herausforderungen zu minimieren, wurde ein neuartiger Ejektorkreislauf mit einem zusätzlichen Unterkühlungswärmeübertrager entwickelt. Der Hauptaspekt besteht darin, einen Ejektor mit einem sehr hohen Druckhub (20 bar) bei gleichzeitig hoher Effizienz zu konstruieren, der einen sicheren Betrieb sowohl im Auslegungspunkt als auch unter varierten Betriebsbedingungen gewährleistet. In dieser Arbeit wird ein Ejektor vorgestellt, der mit einem bestehenden numerischen Auslegungstool ausgelegt, gefertigt und in einem R-744-Prüfstand mit Unterkühlungswärmeübertrager integriert wurde.

Der optimierte Ejektor-Unterkühlungskreislauf wurde mit zwei verschiedenen Referenzsystemen verglichen: einem mit Flash-Gas-Bypass (FGB) und einem mit Flash-Gas-Kompressor (FGC), die beide keinen Ejektor enthalten. Die Ergebnisse zeigen, dass der optimierte Ejektor-Unterkühlungskreislauf eine Effizienzsteigerung von bis zu 40 % gegenüber dem FGB-System und von bis zu 17 % gegenüber dem FGC-System erzielte.

### Stichwörter:

Transkritisches R-744-System, Ejektor, Zweiphasen-Ejektor, Kohlendioxid, Unterkühlung, Rückgewinnung von Expansionsarbeit, natürliche Kältemittel

### 3.04

## R744-Kälteanlage mit modularem R290-Unterkühler

### Erste Ergebnisse eines Feldversuchs

Gerhard Pertiller<sup>1\*</sup>, René Rieberer<sup>1</sup>,  
Leopold Schöffl<sup>2</sup>, Alexander Kotenko<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> HAUSER Kühlmöbel und Kältetechnik GmbH, Am Hartmayrgut 4-6, 4040 Linz, Österreich

Im Handel und in der Industrie gewinnen R744-Kälteanlagen immer mehr an Bedeutung, diese weisen bei hohen Außentemperaturen (ab ca. 27 °C) eine transkritische Betriebsweise auf. Dabei kommt es zu einer deutlichen Erhöhung des Flashgasanteiles bei der Drosselung, wodurch der Aufwand für die Verdichtung steigt und sich eine stark von der Außentemperatur abhängige Effizienz ergibt. Damit die erforderliche Kälteleistung auch bei hohen Außentemperaturen erreicht wird, müssen Feldanlagen entsprechend groß dimensioniert werden. Um die Effizienz und Leistung von R744-Kälteanlagen in trans-kritischer Betriebsweise zu verbessern, stellt eine mechanische Unterkühlung mittels R290-Unterkühlmodulen eine vielversprechende Lösung dar. Ziel ist es, durch die zusätzliche Unterkühlung vor der Drosselung, den Flashgasanteil bei hohen Außentemperaturen zu reduzieren und damit eine kompaktere Dimensionierung der R744-Anlage zu ermöglichen. Dadurch können die Investitions- sowie die Betriebskosten reduziert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „SEPCOO“ wurde ein modular aufgebauter R290-Unterkühler entwickelt und optimiert, sowie mit Hilfe des Simulationswerkzeuges Modelica/Dymola und der TIL-Bibliothek eine skalierbare Betriebsstrategie entworfen, welche das Zu- bzw. Abschalten der füllmengenminimierten Module des R290-Unterkühlers in Abhängigkeit vom Betriebszustand der R744-Kälteanlage regelt. Zur Evaluierung der Eignung des Konzepts der mechanischen Unterkühlung im Feldbetrieb wurde für den Sommer 2024 ein R290-Unterkühler, bestehend aus zwei Modulen, in einer R744-Gewerbekälteanlage nachgerüstet. Die Erfassung und Auswertung der umfangreichen Messdaten erfolgt im laufenden Betrieb. Im vorliegenden Beitrag werden die Grundlage des Konzeptes sowie die Erkenntnisse aus dem Feldversuch präsentiert.

#### Stichwörter:

CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, Propan-Unterkühler, Feldversuch, Betriebsstrategie, Simulation

### 3.05

## Leistungssteigerung hybrider Wärmeübertrager durch Optimierung der Lamellengeometrie

Dominik Prager

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund  
[dominik.prager@thermofin.de](mailto:dominik.prager@thermofin.de)

Hybride Rückkühler und Verflüssiger werden in Zeiten steigender Strom- und Energiepreise für einen effizienten Prozess immer wichtiger. Durch die Verdunstung von Wasser wird latent Wärme abgeführt, was wiederum eine geringere Leistung der Ventilatoren erfordert. Werden diese Aspekte geschickt kombiniert, ist es möglich, ein kompaktes und optimiertes Gerät zu produzieren.

Der Einsatz von Wasser geht allerdings immer mit zusätzlichen Verpflichtungen einher. Um Ausbrüche der Legionelle zu verhindern, müssen verschiedenste Restriktionen eingehalten werden. Unter anderem ist es notwendig darauf zu achten, dass kein Wasser in Tropfenform durch den Luftvolumenstrom aus den Ventilatoren in die Umgebung ausgetragen wird. Durch die Entwicklung eines neuen Designs der Wärmeübertragerlamelle ist es

gelungen, diese Grenzluftgeschwindigkeit, auch *Tropfenmitrissgeschwindigkeit*, zu erhöhen. Dies wurde durch umfangreiche Messungen, welche unter anderem vorgestellt werden, untersucht und verifiziert. Somit ist es möglich, auch bei besonders kleinen Platzverhältnissen ein leistungsstarkes System auf den Markt zu bringen.

### 3.06

## Modellierung der Bereifung von Luft/Wasser-Wärmepumpen

### Modellierung der Bereifung/Vereisung des Verdampfers bei Luft/Wasser-Wärmepumpen im Rahmen von digitalen Zwillingen

**Lars Schinke<sup>1</sup>, Joachim Seifert<sup>1</sup>, Lars Haupt<sup>1</sup>, Thomas Hackensellner<sup>2</sup>, Andreas König-Haagen<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik  
[joachim.seifert@tu-dresden.de](mailto:joachim.seifert@tu-dresden.de)

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

(Vortrag ist in Dresden ausgefallen)

Die Bereifung/Vereisung (Eiswachstum) von Verdampfern bei Luft/Wasser-Wärmepumpen ist Gegenstand von zahlreichen Forschungsaktivitäten im In- und Ausland. Bei einer Vielzahl der Analysen steht die Optimierung der Abtauung der gebildeten Eisschicht (Reduktion von Abtauzyklen) im Fokus der Betrachtungen. Im Rahmen dieses Beitrages werden Berechnungsmodelle zur Beschreibung der Bereifung/Vereisung vorgestellt und verglichen. Anschließend wird gezeigt, wie diese Modelle in die Struktur eines Digitalen Zwillinges überführt und zur Anwendung gebracht werden. Die Validierung der Modelle wird anhand von Messdaten dokumentiert. In einem zweiten Teil des Beitrages wird das Projekt PIEZOdevICE vorgestellt, welches auch Alternativen zur Optimierung der Abtauung zum Inhalt hat. Bei diesen soll die Bereifung und damit das Eiswachstum auf den Lamellen des Verdampfers aktiv verhindert werden. Hierzu werden im Projekt die zwei Strategien Oberflächenbeschichtung/-strukturierung und Bauteilanregung mittels Schwingungen verfolgt. Beide Ansätze finden in anderen Anwendungen erfolgreich Einsatz und die Übertragbarkeit auf einen Lamellen-Rohrbündel-Wärmeübertrager wird analysiert.

### 3.07

## Energieeffizienz beim Abtauen von Luftkühlern

### Ein Vergleich zwischen zwei Heizstableistungen in Luftkühlern für gewerbliche Kälteanwendungen basierend auf experimentellen Daten

**Osama Aljolani\*, Siegfried Ortmeier, David Gomse, Federico Lonardi, Norbert Schneider, Stefan Ziegler**

Kelvion Germany GmbH, Forschung & Innovation (F&I), Kühler Weg 1, 82065 Baierbrunn, Deutschland  
[osama.aljolani@kelvion.com](mailto:osama.aljolani@kelvion.com)

Niedrig-GWP Kältemittel sind ein wichtiger Baustein der Bemühungen, Treibhausgase zu reduzieren und den Klimawandel zu bekämpfen. Jedoch sind viele dieser alternativen Kältemittel giftig oder brennbar. Um einen Luftkühler für brennbare Kältemittel zuzulassen, muss sichergestellt werden, dass der Luftkühler keine Entzündungsgefahr darstellt. Die elektrischen Heizelemente sind in diesem Zusammenhang eine Schlüsselkomponente, da sie sehr hohe Oberflächen-Temperaturen erreichen können.

Diese Studie bezieht sich auf den Einsatz von Tieftemperatur-Luftkühlern für brennbare Kältemittel mit elektrischer Abtauung. Wir stellen einen umfassenden Vergleich zwischen zwei verschiedenen Heizstableistungen für einen kompakten Rippenrohr-Wärmeübertrager vor, der von Kelvion für gewerbliche Kältesysteme entwickelt und hergestellt wird. Konkret werden Messungen bei zwei gängigen Kühlbedingungen durchgeführt. Auf

der Grundlage einer detaillierten Analyse der Ergebnisse werden die beiden Heizstäbe unter technischen, energetischen und zeiteffizienten Aspekten verglichen.

**Stichwörter:**

Treibhausgase, Kältetechnik, Luftkühler, Brennbare Kältemittel, Elektrische Abtauung, Experimentelle Daten

**3.08**

## Intelligente Abtausysteme – Nutzen und Aufwand

Eric Gerstenberger

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund  
[eric.gerstenberger@thermofin.de](mailto:eric.gerstenberger@thermofin.de)

Beim Einsatz lamellierter Wärmeübertrager in Kühlhäusern bzw. im Betrieb als Wärmepumpen-Verdampfer sind regelmäßige Abtauungen nötig, um die Leistung im Kühlbetrieb aufrecht zu erhalten. Um möglichst viel Energie einzusparen und nicht unnötige Abtauwärme in den Kühlraum abzugeben, ist ein optimaler Zeitpunkt sowie Dauer der Abtauung zu wählen. Da dies von vielen Parametern (Türöffnungen, Betriebsdauer Verdampfer, Temperatur und Verpackung der Ware, Verdampfertyp, ...) abhängt, wird meist keine klare Aussage getroffen.

Anhand typischer Praxisbeispiele werden Nutzen und Aufwand intelligenter Abtausysteme gegenübergestellt. Zusätzlich wird auf die korrekte Art und Weise der Abtauung eingegangen werden, um eine maximale Anlageneffizienz zu erreichen.

**3.09**

## Luft- und Temperaturverteilung in Kühlräumen

Julius Heik

thermofin GmbH, Am Windrad 1, 08468 Heinsdorfergrund  
[julius.heik@thermofin.de](mailto:julius.heik@thermofin.de)

Der Einsatz von Kältemittelverdampfern zur effektiven Klimatisierung großer Kühlräume und Lager erfordert die Untersuchung und Beurteilung verschiedenster Konzepte der Luftströmungsführung um die notwendigen Randbedingungen wie Temperaturniveau und Luftfeuchtigkeit einzuhalten. Die Beurteilung, ob ein genutzter Ventilator für die notwendige Luftverteilung geeignet ist, geschieht häufig anhand der spezifischen Wurfweite. Diese gibt die Entfernung vom Ventilator an, bis zu der der isotherme Freistrahl auf eine festgelegte Grenzgeschwindigkeit abgebremst wird. Standortspezifische Faktoren wie Raumgeometrie, effektive Luftabkühlung, die thermischen Randbedingungen und Strömungseffekte wirken sich in der Regel sehr viel stärker auf die effektive Raumkühlung als die Wurfweite des verwendeten Ventilators aus.

Durch thermofluiddynamische Simulationen können zuverlässig Luftgeschwindigkeiten und Temperaturverteilungen für den spezifischen Anforderungsfall bestimmt werden, wodurch detaillierte Aussagen über das Raumklimatisierungskonzept abgeleitet werden können.

Anhand verschiedener Randbedingungen werden Simulationen vorgestellt, welche diesen Sachverhalt veranschaulichen. Damit soll verdeutlicht werden, dass insbesondere in kritischen Fällen besser die Einzelfälle zu prüfen sind, anstatt idealisierte Kennwerte zur Entscheidungsfindung heranzuziehen.

### 3.10

## Dampfeinspritzung mit natürlichen Kältemitteln

### Systemsimulationsorientierte Kompressormodellierung

Dr.-Ing. Arne Heinrich<sup>1\*</sup>, Nils-Henning Framke<sup>1</sup>, Marek Lehocky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gamma Technologies GmbH, Danneckerstr. 37, 70182 Stuttgart, Deutschland  
[a.heinrich@gtisoft.com](mailto:a.heinrich@gtisoft.com)

Natürliche Kältemittel für Wärmepumpen sind entscheidend, da sie umweltverträglicher und weniger klimaschädlich sind als synthetische Kältemittel. Die fortlaufende Optimierung ist erforderlich, um ihre Effizienz zu steigern, Sicherheitsstandards zu erhöhen und die Abhängigkeit von umweltschädlichen Alternativen zu verringern. 1D Systemsimulationen werden hierbei weiterhin eine wichtige Rolle spielen, um diese Systeme auszulegen, zu optimieren oder um verschiedenen Layouts zu testen. Eine effiziente Methode zur Erhöhung des COP ist die Verwendung von Dampfeinspritzverdichter.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Modellierungsstrategie für Verdichter mit Dampfeinspritzung für die Verwendung in 1D Systemsimulation, implementiert in der kommerziellen Software GT-SUITE. Dazu werden zunächst verschiedene Modellierungsansätze vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung untersucht bewertet. Die Bewertung erfolgt dann anhand eines Vergleichs mit Referenzdaten aus der Simulation detaillierter Verdichtermodelle mit Dampfeinspritzung sowohl für die Komponente Verdichter als auch ein Gesamtsystem.

#### Stichwörter:

Kompressor, Dampfeinspritzung, Natürliche Kältemittel, 1D System Simulation, Methodik

### 3.11

## Polynomgleichung zur Darstellung drehzahlabhängiger Verdichter-Leistungsdaten

Gerhard Frei<sup>1\*</sup>, Mihaela Frei<sup>1</sup>,  
Christian Hanzelmann<sup>2</sup>, Matthias Böhm<sup>2</sup>, Jan Hauptmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> COOLPLAN, Ingenieurbüro für Kältetechnik, Trimburgstraße 2, 81249 München, Deutschland  
[frei@coolplan.eu](mailto:frei@coolplan.eu)

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

Die neue EU-F-Gas-Verordnung 2024/573 leistet einen bedeutenden Beitrag zur weiteren Reduzierung der Kältesystememissionen und zur Steigerung der Nutzung alternativer Kältemittel. Um Kälteanlagen effizienter in Teillast betreiben zu können, wird vielfach auf eine Verdichter-Leistungsregelung zurückgegriffen. Prinzipiell gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Verdichter-Leistungsregelung, wobei der Einsatz von frequenzgeregelten Verdichtern bei Systemen mit alternativen Kältemitteln häufig anzutreffen ist. Die Norm DIN EN 12900:2013 definiert für Verdränger-Kältemittel-Verdichter die Nennbedingungen, Toleranzen und die Darstellung der Leistungsdaten. Sie stützt sich auf Daten aus Prüfungen gemäß DIN EN 13771-1:2017. Hersteller nutzen zur Darstellung der unterschiedlichen Parameter bei einer festen Drehzahl eine Polynomgleichung dritten Grades mit zehn Regressionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur am saugseitigen Taupunkt und der Verflüssigungstemperatur am druckseitigen Taupunkt. Ein mathematisches Modell zur Darstellung von drehzahlabhängigen Verdichter-Leistungsdaten über den gesamten Verdichter-Anwendungsbereich ist in der Norm noch nicht beschrieben.

In diesem Beitrag wird ein drehzahlabhängiges mathematisches Modell zur präzisen Darstellung der Parameter Kältemittelmassenstrom, Verdichterkälteleistung, Leistungsaufnahme und Verdichtungsendtemperatur über den gesamten Anwendungsbereich dargestellt. Die Validierung erfolgt anhand von Prüfstandsdaten, ermittelt im

Testzentrum PLWP am ILK Dresden. Der minimale Standardfehler liegt bei -2,44 % für den Parameter Verdichtungsendtemperatur. Der maximale Standardfehler liegt bei 2,74 % für den Parameter Kältemittelmassenstrom, welcher mit 0,72 % die höchste Standardabweichung darstellt. Eine Vergleichsberechnung der Parameter auf Grundlage des Norm-Modells für feste Drehzahl und des neuen drehzahlabhängigen Modells wird vorgestellt. In zukünftigen Studien sollen weitere R-290 Verdichter untersucht werden. Für Demonstrationszwecke wird das Modell in eine webbasierte Anwendung integriert.

**Stichwörter:**

R-290, Prüfstand, Messung, Modellierung, Polynomfunktion, drehzahlabhängige Verdichter-Leistungsdaten

### 3.12

## Improvem Analyse und Bewertung eines Schraubenverdichtermodells

### Einsatz eines semi-physikalischen Schraubenverdichtermodells in der Auslegungsoptimierung von Wärmepumpen zur Fernwärmeerzeugung

Anna Halle<sup>1\*</sup>, Christian Vering<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.On Energieforschungscenter, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustr. 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de)

Die effiziente Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfordert effiziente Ersatztechnologien wie Wärmepumpen. Wärmepumpen können effizient betrieben werden, indem bereits in der Auslegung der gesamte Betriebsbereich betrachtet wird. Dadurch können für einen Anwendungsfall u. A. Kältemittel und Verdichtertyp optimal gewählt werden. Die Bestimmung der optimalen Systemauslegung ist aufgrund der großen Anzahl möglicher Kältemittel und Verdichter komplex. Aktuell werden zur Handhabung der Komplexität in der Auslegung häufig vereinfachende Heuristiken eingesetzt, wodurch die optimale Auslegung nicht garantiert ist.

Zur Identifikation der optimalen Auslegung, sind modellbasierte Auslegungsmethoden geeignet. Dazu werden Prozessmodelle der Einzelkomponenten (u. A. des Verdichters) benötigt. Für den Einsatz in der Auslegungsoptimierung eignen sich semi-physikalische Modelle, da sie durch die Abbildung der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge über einen weiten Betriebsbereich der Wärmepumpe eingesetzt werden können.

In diesem Beitrag wird ein bestehendes semi-physikalisches Modell für einen offenen Schraubenverdichter für R134a analysiert und bewertet. Zuerst wird die numerische Stabilität der Ergebnisse geprüft. Anschließend wird die Übertragbarkeit des Modells auf andere Kältemittel untersucht. Anhand dieser Ergebnisse wird das Modell bezüglich der Eignung als Verdichtermodell in der Systemauslegung bewertet.

Als Fallstudie wird eine Wärmepumpe zur Fernwärmeerzeugung vorgestellt und die Leistung der Wärmepumpe verschiedener Kältemittel mit Hilfe einer Fluid-Screening-Methode bewertet. Die Entwicklung dieses Verdichtermodells trägt zur Entwicklung effizienter Fernwärmennetze und damit langfristig zur Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung bei.

**Stichwörter:**

Schraubenverdichter, Semi-physikalisch Modell, Fernwärme, Wärmepumpe

**3.13**

## **Transcritical CO<sub>2</sub> compressors up to 160 hp: design challenges and lab testing**

**Giacomo Pisano**

OFFICINE MARIO DORIN S.p.A., Compiobbi (FI), Italy, +393929900339  
[g.pisano@dorin.eu](mailto:g.pisano@dorin.eu)

CO<sub>2</sub> has nowadays become the mainstream refrigerant choice for various refrigeration domains thanks to its benign environmental characteristics (GWP = 1) and its favorable performance levels in several applications; this is progressively leading to both a lower usage of high GWP refrigerants and a sensible energy expenditure reduction in several industrial sectors.

However, specific components and appropriate system design are mandatory when approaching CO<sub>2</sub> technology, this due to the unique thermodynamic characteristics of this refrigerant. In particular, CO<sub>2</sub> trans-critical compressors have to be engineered on purpose with a “from scratch” approach, this ending up in the introduction of many technical solutions pertaining to the automotive sector (e.g. combustion engines).

This work deals with and describes the challenges, the technical developments and inherent qualification laboratory testing involved with the design of CO<sub>2</sub> trans-critical compressors with displacements up to 100 m<sup>3</sup>/h and 160 hp motor power, specifically engineered for industrial refrigeration applications. In fact, trans-critical CO<sub>2</sub> compression involves a variety of challenges, including but not limited to very large differential pressures, severe tribology criticalities, increased discharge temperatures, demanding internal oil management and containment: clearly the importance of these issues is amplified when approaching the design of large scale industrial compressors, so therefore the inherent design solutions in place and the relevant qualification tests criteria are depicted in the course of this paper.

**3.14**

## **Design and testing of small-scale highspeed oil-free turbo compressor for R290 refrigerant applications**

**Ahmet Çoksen<sup>1\*</sup>, Luis Eric Olmedo<sup>1</sup>, Dr. Mihai B. Dobrica<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Pre-Development & Tech. & Innovation Management,  
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland  
[Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com](mailto:Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com); [luiseric.olmedo@de.ebmpapst.com](mailto:luiseric.olmedo@de.ebmpapst.com);  
[mihai.b.dobrica@de.ebmpapst.com](mailto:mihai.b.dobrica@de.ebmpapst.com)

The compressors typically used in Vapor-Compression refrigeration cycles necessitate oil as a lubricant. However, shifting to an oil-free refrigerant system offers significant advantages compared to systems with notable oil circulation rates (OCR). To improve performance, reliability, and to overcome challenges of oil-dependent systems, ebm-papst has developed a turbo compressor solution based on gas-lubricated bearing technology. This study focuses on the design, development, and testing phases of a small-scale (~3 kW<sub>e</sub>) high rotational speed (up to 240 krpm) demonstrator compressor for R290 refrigerant applications. Key design challenges are highlighted, as well as the results from the experimental testing presented to validate performance and functionality of compressor together with the high-speed in-house inverter. The results from the test data show good agreement with the numerical predictions. Considering the benefits of such compact, efficient, and oil-free compressor, it can be a key solution towards an advancement of the HVAC systems.

**Keywords:**

Turbo compressor; Oil-free; High Speed; Heat pump system; HVAC system; Refrigerant compressor

**3.15**

## **Flüssigkeitseinspritzung bei Hubkolbenverdichtern**

### **Einfluss des Einspritzdrucks und Auswirkungen auf den isentrop-isothenmen Gütegrad**

**Jonas Schmitt\*, Robin Langebach**

Hochschule Karlsruhe, The Schaufler Foundation - Professur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik  
[jonas.schmitt@h-ka.de](mailto:jonas.schmitt@h-ka.de)

Für den Kaltdampfkompressionsprozess ist die isentrope (adiabate) Verdichtung als Vergleichsprozess etabliert. Bei Kältemitteln mit anterogradem Verlauf der Taulinie, z. B. R717 und R744, ist die Verdichtungsendtemperatur bei isentroper Verdichtung allerdings erheblich höher als die Verflüssigungstemperatur. In vorangegangenen Veröffentlichungen konnte bereits rechnerisch gezeigt werden, dass durch die gesteuerte Einbringung von flüssigem Kältemittel in den Arbeitsraum die Temperatur im Verdichtungsverlauf reduziert werden kann. Bei geeigneten Kältemitteln, insb. R32, R717 und R718, können dadurch die Verdichtungsarbeit reduziert und die Systemeffizienz gesteigert werden. Zusätzlich ist durch die reduzierte Verdichtungsendtemperatur eine Erweiterung der Verdichtereinsatzgrenzen, insb. bei R717, zu erwarten. Insbesondere für Hubkolbenverdichter stellt dieser Einspritzvorgang eine technische Herausforderung dar.

Bei der Einspritzung wird durch eine Hochdruckpumpe ein Teilmassenstrom flüssigen Kältemittels am Verflüssigerauslass angesaugt und auf ein Druckniveau oberhalb des Verflüssigungsdrucks gefördert. Der Teilmassenstrom wird über ein Einspritzventil pro Zylinder dem Arbeitsraum zugeführt, dessen Öffnung in Abhängigkeit des Kurbelwinkels gesteuert werden kann. Der Hochdruck am Pumpenauslass hat dabei einen erheblichen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Einspritzrate sowie auf die Zerstäubungsgüte. In dieser Veröffentlichung soll deshalb insbesondere der Einfluss des Hochdruckniveaus auf den Temperaturverlauf und die zu erwartende Effizienzsteigerung betrachtet werden.

Die sog. isentrop-isotherme Verdichtung hat sich im Vergleich zur isentropen Verdichtung als geeigneter zur Bewertung der Verdichtung mit Einspritzung erwiesen. Die isentrop-isotherme Verdichtung ist eine zweistufige Verdichtung, die bis zum Erreichen der Verflüssigungstemperatur isentrop (adiabat) und danach isotherm verläuft. Sie folgt damit dem thermodynamisch idealen Carnot-Prozess. Die Bewertung der Verdichtung mit Einspritzung anhand des isentrop-isothenmen Gütegrades im Vergleich zu herkömmlichen Bewertungsverfahren wird diskutiert.

**Stichwörter:**

Kältemitteleinspritzung, isotherme Verdichtung, Hubkolbenverdichter

**3.16**

## **NVH Untersuchungen von Flüssigkeitsschlägen bei Hubkolbenverdichtern**

**Franz Joseph Pal<sup>1\*</sup>, Leonard Kneflowski<sup>1</sup>, Ullrich Hesse<sup>2</sup>, Robin Langebach<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, The Schaufler Foundation - Professur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klima 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-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
Institut für Energietechnik

Kältemittelverdichter sind im Allgemeinen darauf ausgelegt, rein gasförmiges Kältemittel zu verdichten. In der gängigen Praxis wird seitens der Anlagenbauer sorgsam darauf geachtet, dass flüssige Kältemittelanteile nicht

bis in den Verdichter bzw. den Arbeitsraum vordringen. Gelangen unerwünschte Anteile von flüssigem Kältemittel jedoch in den Verdichter, kann eine Auswaschung des Öls in den Lagern die Folge sein. Dringen die Anteile bis in den Arbeitsraum vor, sind mechanische Schäden am Verdichter zu erwarten. In diesem Zusammenhang ist das Phänomen der Flüssigkeitsschläge zu nennen, welches in der Regel die Verdichtung eines zweiphasigen Kältemittelgemisches beschreibt und durch hohe Zylinderdrücke und akustisch wahrnehmbare Geräusche charakterisiert werden kann. Die Praxis hat dabei gezeigt, dass Hubkolbenverdichter in einem besonderen Maße anfällig für Beschädigungen durch Flüssigkeitsschläge sind.

Zur Untersuchung der akustischen Veränderungen für den Eintrag von flüssigem Kältemittel wurde ein Prüfstand aufgebaut, mit dessen Hilfe flüssiges Kältemittel in den Verdichter eingebracht oder der Dampfmassengehalt im Ansaugzustand variiert werden kann. Um Korrelationen zwischen den Beschleunigungen am Verdichter und den Einträgen des Kältemittels in den Arbeitsraum herstellen zu können, wurden die momentane Leistungsaufnahme, der Druck in den Arbeitsräumen sowie dessen Drehzahl aufgenommen. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die Amplitudenspektren für Flüssigkeitseinträge betrachtet und in Relation zu den thermodynamischen und elektrischen Größen des Verdichters gesetzt.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Flüssigkeitsschlag, Dampfmassengehalt, NVH, Zustandsüberwachung

**3.17**

## **Frequenzumrichter für Rotating Equipment**

**Dr.-Ing. Christian Ellwein**

Kriwan Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, DE - 74670 Forchtenberg  
[christian.ellwein@kriwan.de](mailto:christian.ellwein@kriwan.de)

Rotating Equipment wie Verdichter, Pumpen und Ventilatoren spielen eine zentrale Rolle in der Infrastruktur unserer Gesellschaft und stehen für einen großen Teil unseres Strombedarfs. Kälte, Klima, Wärme, Wasser und Abwasser, aber auch viele chemische und industrielle Prozesse und die Landwirtschaft hängen von diesen Maschinen ab. Dadurch steigt die Bedeutung energiesparender Lösungen in diesem Sektor. In diesem Vortrag werden neue Möglichkeiten vorgestellt, wie Frequenzumrichter auf die aktuellen Herausforderungen angepasst werden können. Folgende Produkteigenschaften spielen in Zukunft eine größere Rolle:

- Notlaufeigenschaft im Fehlerfall: Rotating Equipment muss bei vielen Fehlern nicht zwingend sofort abgeschaltet werden. Während bestimmter Situationen (Erntezeit in der Kältetechnik, Hochsommer in der Klimatechnik, Starkregen in Abwassersystemen) ist es besser, die Maschinen in einem Notbetrieb laufen zu lassen
- IP Grad des Gehäuses: vielfach sind Außenaufstellungen beim Rotating Equipment gefordert. Durch höhere Schutzklassen beim Gehäuse kann ggfs. auf einen teuren Schaltschrank verzichtet werden
- Höhere zulässige Umgebungstemperatur: Durch den fortschreitenden Klimawandel steigen im Sommer die realen Umgebungstemperaturen. Das hat Auswirkungen auf die geforderten zulässigen Einsatzgrenzen von Frequenzumrichtern
- Möglichkeit, Motor und Maschinenparameter herstellerspezifisch abzulegen und so die Inbetriebnahme zu erleichtern: die Inbetriebnahme ist ein kritischer Vorgang. Durch Vorauswahl von Parametern lässt sich die Inbetriebnahme deutlich vereinfachen

### 3.18

## Inline oil property sensor tested in high-temperature heat pump

Leon P. M. Brendel\*, Cordin Arpagaus, Stefan S. Bertsch

OST – Eastern Switzerland University of Applied Sciences, Institute for Energy Systems

[Leon.brendel@ost.ch](mailto:Leon.brendel@ost.ch)

Industrial heat pumps gradually push the limiting upper operating temperatures higher. The high temperatures put greater strain on the lubricant needed in the compressor. It is hence important to monitor the oil quality in regular intervals to ensure the longevity of the compressor. An improvement to regular oil sampling would be inline oil quality sensors, which could measure certain oil properties continuously and alert the user upon the identification of anomalies. A newly developed sensor is analyzed which measures simultaneously the viscosity, electric conductivity and permittivity of the oil. It was installed in the oil return line between the oil separator and the compressor. In the first part of this study, the repeatability of the measurements was tested across several synthetic and hydrocarbon refrigerants, the former tested with a POE oil, the latter tested with a PAG oil. Collected measurements are shown and discussed with the operation principles, ease of use and other aspects of the sensor. Future work will investigate whether the sensor could also detect alterations of properties which are not directly measured but linked to the three measured properties.

**Stichwörter:** oil-quality, high-temperature heat pump, viscosity, performance, degradation, inline, in situ

### 3.19

## Leckagedetektion mit Vibrationssensoren

Tim Klebig\*, Luca Hummel, Jonas Klingebiel, 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)

Die steigende Nachfrage nach Wärmepumpen führt zu Engpässen bei der Installation und Wartung. Gleichzeitig steigt die Zahl der Serviceanfragen durch die wachsende Zahl der in Betrieb befindlichen Wärmepumpen, die Verschleiß und Alterung unterliegen. Um eine Verlagerung von Engpässen von der Installation zur Wartung zu vermeiden, ist es heute dringend erforderlich, den Wartungsaufwand zu minimieren. In diesem Kontext werden Methoden der automatisierten Fehlerdetektion eingesetzt, um abnormales Systemverhalten zu identifizieren, bevor ein ineffizienter Betrieb oder Schäden auftreten.

Die Anwendung automatisierter Fehlerdetektion erfordert geeignete Messverfahren und Auswertungsmethoden. Ein häufig auftretender Fehler ist Kältemittelleckage, die über einen längeren Zeitraum zu einer Reduktion von Leistung und Effizienz von Wärmepumpen im Betrieb führt. Die Detektion von Leckagen basiert in der Regel auf Prozessparametern, die eine Erkennung des Fehlers nur dann ermöglichen, wenn nahezu kein Reservoir im Sammler mehr vorhanden ist. In diesem Beitrag wird eine auf Vibrationsmessungen basierende Methode vorgestellt, die eine nicht-invasive Messung des Sammlerfüllstands ermöglicht und somit eine frühzeitige Detektion von Kältemittelleckagen erlaubt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird eine Luft-Wasser-Propan-Wärmepumpe verwendet, um Methoden zur Füllstandsanzeige zu bewerten. Die Verwendung von Vibrationssensoren erweist sich in diesem Kontext als überlegen, was die frühzeitige Erkennung von Leckagen betrifft. Dies ebnet den Weg zu verbesserten Wartungsprozessen.

**Stichwörter**

Wärmepumpe, Prüfstand, Kältemittel, Leckage, Fehlerdetektion, Vibrationssensoren

### 3.20

## Update zur EU Cyber-Security Gesetzgebung

Dr.-Ing. Christian Ellwein

Kriwan Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, DE - 74670 Forchtenberg  
[christian.ellwein@kriwan.de](mailto:christian.ellwein@kriwan.de)

Seit geraumer Zeit arbeitet die EU an einem Gesetzespaket zur Regelung der Cyber-Security von Maschinen, Anlagen und Geräten im Consumer-Bereich. Diese Gesetzgebung (beispielsweise die NIS2 Direktive oder der Cyber-Resilience-Act) hat sich in den vergangenen 1 – 2 Jahren erheblich verändert und wird auch Auswirkungen auf die Kälte- und Klimatechnik und die hier eingesetzten Komponenten haben. Beim ASERCOM (Association of European Refrigeration Components Manufacturers) beobachten wir diese Entwicklung und bewerten mögliche Auswirkungen auf unsere Branche.

In diesem Vortrag wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Bedrohungslage und der regulatorischen Veränderungen und die ASERCOM Einschätzung der Auswirkungen auf HVAC/R gegeben. Es werden auch Handlungsanregungen für den sicheren Einsatz von Kälte- und Klimaanlagen im Feld zusammengefasst. Die Cyber-Security gewinnt erheblich an Bedeutung, weil in den vergangenen Jahren viele bedeutende Unternehmen durch Cyber-Angriffe erheblich geschädigt wurden. Ebenso wird die Haftung auf Geschäftsleitungsebene verschärft, so dass neben den finanziellen und geschäftlichen Risiken auch persönliche Risiken auftreten.

Kurz werden auch die wichtigsten Normen, insbesondere die ISO 27001 und die IEC 62443 vorgestellt, die – nach heutigem Stand – eine Umsetzung und Erfüllung der EU-Gesetzgebung ermöglichen.

### 3.21

## Einfluss externer Prozessfluidzufuhr auf die Effizienz von Mehrphasenpumpen

Oliver Obst\*, Marian Lottis, Andrea Luke

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

In vielen Energiewandlungs- und verfahrenstechnischen Prozessen müssen mehrphasige Fluide gefördert werden. Mit herkömmlichen Pumpen oder Kompressoren ist dies nicht möglich, daher müssen die mehrphasigen Systeme in der Regel aufwendig thermisch getrennt werden. Zu dessen Vermeidung und damit zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Schonung von Ressourcen werden zur Förderung von mehrphasigen Gas-/Flüssigkeitsmischen Mehrphasen-Schraubenspindelpumpen eingesetzt. Diese spezielle Bauart einer Verdrängerpumpe fördert nicht nur mehrphasige Systeme sondern auch kurzzeitig solche mit hohen Gasanteilen von 90 % und kurzzeitig 100 %. Sie werden u. a. zur Effizienzsteigerung in Kalt dampfprozessen eingesetzt, da die Druckerhöhung an das jeweilige Kältemittel angepasst werden kann und keine hohen Überhitzung notwendig ist. Schraubenspindelpumpen bestehen aus achsparallel angeordneten, miteinander kämmenden Spindeln, die in Kombination mit dem Gehäuse eine Reihe geschlossener Kammern bilden. Diese werden durch die Drehbewegung der Spindeln von der Einlass- zur Auslassseite geschoben. Im Falle einer degressiven Spindelsteigung wird das Kammervolumen in Richtung Druckseite kontinuierlich kleiner. Die konstruktiv bedingten Spalte zwischen den Spindeln und dem Gehäuse werden von der geförderten Flüssigkeit abgedichtet. Steigt der Gasanteil, dichtet die verbleibende Flüssigkeit die Spalte nicht mehr hinreichend genug ab und die Förderleistung sinkt, während die thermische Belastung steigt. Die externe Einspritzung von Prozessflüssigkeit reguliert zum einen das Thermomanagement der Mehrphasenpumpe (Kühlung) und zum anderen verbessert sie die Spaltabdichtung in der Förderkammer (Effizienz). Am Fachgebiet für technische Thermodynamik ist eine Anlage im Technikumsmassstab aufgebaut, um die mehrphasige Förderung z. B. durch externe Flüssigkeitszufuhr zu optimieren. Im Inneren der Maschine sind zur Analyse der Thermo- und Fluidodynamik eine Vielzahl an Druck-

und Temperatursensoren installiert. Diese dienen dazu, die Druck- und Temperaturprofile entlang des Druck-erhöhungsprozesses sowohl axial als auch azimutal aufzulösen.

Die externe Prozessfluideinspritzung in die Schraubenspindelpumpe mit degressiver Spindelsteigung wirkt dem Absinken der Förderleistung bei hohen Gasgehalten entgegen und erhöht sowohl den volumetrischen als auch den isothermen Wirkungsgrad. In Experimenten werden für eine degressive Förderschraube Einspritzposition, Einspritzvolumenstrom, Drehzahl, Differenzdruck als auch Gasgehalt variiert, um den Einfluss der Prozessfluid-zufuhr auf das Förderverhalten herauszuarbeiten. Die druckseitige Einspritzung weist in den experimentellen Untersuchungen das höchste Verbesserungspotential auf. Dieses Ergebnis wird anhand gemessener lokaler Zustandsgrößen ( $p, T$ ) bestätigt.

**Stichwörter:**

Mehrphasenpumpe, hohe Gasgehalte, externe Einspritzung, degressive Spindelsteigung

### 3.22

## Modellbasierte Kältekreislauf-Optimierung mit R-454C

### – Leistungs- und Effizienzsteigerung mit Hilfe Thermodynamischer Modelle

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

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

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

Getrieben durch Energieeffizienz-Forderungen und gesetzliche Vorgaben wie die F-Gas Verordnung suchen Hersteller und Betreiber von Kälteanlagen nach alternativen Kältemittel Lösungen. HFO basierende niedrig-GWP Kältemittel können helfen, die System Effizienz zu steigern und die CO<sub>2</sub> Emissionen zu reduzieren. Das A2L klassifizierte Kältemittel R-454C mit GWP 148 erfüllt die Anforderungen der F-Gas Verordnung bei hoher Anlageneffizienz und bei hohem Sicherheitsniveau.

Der Aufwand für die Anpassung der Kälteanlage 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 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

## **Niedrig GWP-Kältemittel für verschiedene Anwendungen**

**Felix Flohr, Christian Macri**

Daikin Chemical Europe GmbH, Düsseldorf  
[felix.flohr@daikinchem.de](mailto:felix.flohr@daikinchem.de)

Mit der neuen EU F-Gas Verordnung, die seit dem 11.03.2024 gültig ist, sind die Reduktionsziele für treibhauswirksame F-Gase nochmals verschärft worden. Rein rechnerisch muss, bei gleichbleibendem Verbrauch an Kältemitteln, der durchschnittliche GWP-Wert weit unter den häufig verwendeten GWP-Grenzwert von 150 gedrückt werden. R-290 und R-744 werden vermehrt verbaut, sind aber nicht in allen Anwendungsbereichen aus Sicherheits- bzw. Themophysikalischen-Gründen einsetzbar. Mit dem Molekül R-1132(E) ergeben sich neue Möglichkeiten für Kältemittel unter den genannten Randbedingungen, niedriges GWP, geringe Brennbarkeit und geeignete Thermodynamik für den Einsatz im Kälte-, Klima-, Wärmepumpenbereich. Der Vortrag wird kurz auf die gültige Gesetzeslage eingehen und Bereiche identifizieren, in denen ein Ersatz mit R-290 und R-744 schwierig ist. Die Vorstellung des Moleküls R-1132(E) und dessen Verwendung in Gemischen für die stationären Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen wird im Hauptteil abgehandelt. Ein Ausblick auf etwaige neue Regulierungen und deren Konsequenzen bildet den Abschluss des Vortrages.

## 4.01

### **Finanzmärkte statt Gesetzgebung:**

#### **Wer hält tatsächlich die Fäden in der Hand?**

**Andrea Voigt**

VP, Head of Global Public Affairs & Sustainability, Danfoss Climate Solutions  
Nordborgvej 81, 6430 Nordborg  
[Andrea.voigt@danfoss.com](mailto:Andrea.voigt@danfoss.com)

Die meisten Gesetzesvorhaben, die sich aus dem EU Green Deal ergeben, sind inzwischen abgeschlossen. Die Vorbereitungen für die Wahlen zum neuen EU Parlament im Juni und zur neuen EU Kommission Ende des Jahres laufen bereits auf Hochtouren. Zum Zeitpunkt der DKV Konferenz wissen wir dazu mehr, es zeichnet sich aber bereits heute schon klar ab, dass sich der Schwerpunkt in Europa – und weltweit – von Umwelt hin zu Industrie- und Handelsthemen verschiebt. Deutlicher Indikator hierfür ist zum Beispiel die „Antwerp Declaration for a European Industrial Deal“, inzwischen unterzeichnet von fast 1000 Unternehmen. Nachhaltigkeit bleibt dennoch auf der Tagesordnung, aber mit ganz neuen Treibern, die diese Verschiebung widerspiegeln. Dazu zählt zum Beispiel die nunmehr verpflichtende Berichterstattung für die meisten Unternehmen zu Emissionen, Lieferketten und verschiedenen weiteren Faktoren, die für weitreichende Transparenz sorgt. Eine Transparenz, die vor allem den Finanzmarkt von Investoren über Banken bis hin zu Versicherungen interessiert. Die Kälte- Klimabranche ist davon direkt betroffen, das Bewusstsein hierfür fehlt jedoch häufig – insbesondere bei KMUs. Dieser Vortrag gibt einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen EU Green Deal, Nachhaltigkeit und Finanzmärkten anhand aktueller Fälle aus der Öffentlichkeit und stellt einen direkten Bezug zur Branche her. In einem nächsten Schritt werden konkrete Beispiele präsentiert, wie sich Unternehmen auf diese Veränderungen vorbereiten, welche Herausforderungen sich daraus ergeben und wie diese in Chancen umgewandelt werden können.

## 4.02

### **Mehrwert und Nachhaltigkeit durch Einbindung „cloudbasierter“ künstlicher Intelligenz (KI) in der Kältetechnik**

**Jens Altrogge**

Johnson Controls Systems & Service GmbH, Ahrensburger Straße 1, 30659 Hannover  
[jens.altrogge@jci.com](mailto:jens.altrogge@jci.com)

Mit der Möglichkeit des Sammelns von historischen Datenpunkten in Clouds „OpenBlue“ und diese nutzbar zu machen mit künstlicher Intelligenz (KI) ist eine offene neue Ausgangssituation.

Die bestehenden und zukünftigen Herausforderungen, des Betreibens, proaktiv angehen zu können.

Losgelöst von heutigen Automatisationsstationen von Industrie- und Gebäudetechnik, die reaktiv arbeiten, kommen wir mit diesen Lösungen in den proaktiven Ansatz.

Die neuen Möglichkeiten von der Planungsphase über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht.

Durch das Kombinieren umfassenden kältetechnischen Knowhow nun mit Datenpunkten, die von Tausenden von Kältemaschinen auf der ganzen Welt gesammelt werden und fortschrittliche Analysen, Regeln und definierten Algorithmen stehen uns Ansätze zur Verfügung wie:

- Digitale Zwillinge zum Soll/Ist-Vergleich und der betriebswirtschaftlichen Optimierung von einzelnen Kälteerzeugungen ganzer Zentralen inkl. Peripherie
- Energie- Kostenoptierung über vorrauschaende Punkte wie Prozessdaten oder Klimaeinwirkungen sowie Energieeinkauf.
- Reduktion von Ausfallzeiten durch vorbeugende Instandhaltung
- Proaktive Wartung und Materialmanagement
- Anlagen Fernüberwachung
- Losgelöste und kundenspezifische Dashboards statt ortgebundener Visualisierungen

Konnektivität ist das Schlüsselwort für neue Kommunikationsansätze.

**Stichwörter:**

Nutzung künstlicher Intelligenz zur Erhöhung der Energieeffizienz, Ressourcen-Effizienz, Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit durch vorbeugende Instandhaltung, Anlagen-Fernüberwachung

**4.03**

## **Untersuchung der Öl-Kältemittel Interaktionen in Wärmepumpen: Vom Fluid bis zur Anlage**

**Katharina Stöckel<sup>1\*</sup>, Tim Rudzik<sup>1</sup>, Anna Halle<sup>2</sup>, Yixia Xu<sup>1\*</sup>, Christian Vering<sup>2</sup>,  
Valerius Venzik<sup>3</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik  
[katharina.stoeckel@tu-dresden.de](mailto:katharina.stoeckel@tu-dresden.de), [tim.rudzik@tu-dresden.de](mailto:tim.rudzik@tu-dresden.de),  
[yixia.xu@tu-dresden.de](mailto:yixia.xu@tu-dresden.de), [christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
[anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de), [cvering@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:cvering@eonerc.rwth-aachen.de), [dmueller@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:dmueller@eonerc.rwth-aachen.de)

<sup>3</sup> Viessmann Climate Solution SE  
[drvnv@viessmann.com](mailto:drvnv@viessmann.com)

Der größte Absatzmarkt von Wärmepumpen in Deutschland ist der Bereich der Ein- und Mehrfamilienhäuser. Im Zuge der Umstellung der Neuanlagen auf Low-GWP-Kältemittel, wie z. B. Kohlenwasserstoffe, ist eine Anpassung der Anlagen notwendig, um einen effizienten und sicheren Betrieb sicherstellen zu können. Kohlenwasserstoffe können unter den Randbedingungen von Wärmepumpen in Gebäuden effizient betrieben werden, unterliegen aufgrund ihrer Brennbarkeit allerdings speziellen Sicherheitsmaßnahmen wie der Füllmengenbeschränkung. Durch eine Reduktion der Kältemittelfüllmenge können die sicherheitstechnischen Herausforderungen herabgesetzt werden. Ein Großteil des Kältemittels, insbesondere bei Kohlenwasserstoffen, ist im Kältemaschinenöl gelöst. Ziel eines aktuellen Forschungsvorhabens ist es, durch eine gezielte Anpassung des Schmierstoffs die Kältemittellöslichkeit zu verringern, wodurch die Kältemittelfüllmenge der Anlage ohne Änderung an den Komponenten herabgesetzt werden kann.

Neben der Stoffdatenuntersuchung verschiedener Kältemittel- Schmierstoff-Kombinationen werden ebenfalls die Auswirkungen der Schmierstoffanpassung auf den einzelnen Komponenten des Kältemittelkreislaufs untersucht. Innerhalb dieser Arbeit werden das Kältemittel R-290 und zeotrope Gemische mit R-600a fokussiert. Die Ergebnisse der Stoffdatenuntersuchungen werden (u. a. Mischungslücken, Daniel-Plots, Wärmeleitfähigkeit) in entsprechende Zustandsgleichungen eingebunden und bilden die Basis für die Modellierung einzelner Anlagenkomponenten. Ein weiteres Ziel besteht darin, am Verdichteraustritt eine Trennung des Schmierstoffs vom Kältemittel durch ein entsprechendes Ölabscheiderkonzept zu realisieren, womit die Effizienz der Wärmeübertrager erhöht wird. Im Zuge dessen werden systematische Untersuchung von marktverfügbareren Komponenten mittels Verdichterprüfständen sowie eines modularen Wärmepumpenprüfstandes durchgeführt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpen, Füllmenge, Propan, zeotrope Gemische, Stoffdaten, Schmierstoff, Löslichkeit, Ölabscheider

## Korrosionsschäden durch diffusionsoffene Anschlussschläuche

### Schadensbeispiele und Vermeidung

Mani Zargari<sup>1\*</sup>, Yves Wild<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SIZenergie+, Energie- und Qualitätsmanagement, Hamburger Str. 277 38114 Braunschweig, Deutschland  
[mani.zargari@stw.de](mailto:mani.zargari@stw.de)

<sup>2</sup> Dr-Ing. Yves Wild Ingenieurbüro GmbH, Klopstockstraße 21 22765 Hamburg, Deutschland  
[ywild@drwild.de](mailto:ywild@drwild.de)

Auch wenn Wässer für geschlossene Heiz- und Kühlkreisläufe die Vorgaben der VDI 2035 bzw. der VDI 6044 erfüllen, besteht ein hohes Korrosionsrisiko durch eindringenden Sauerstoff. Neben betrieblichen Ursachen sind diffusionsoffene Anschlussschläuche der häufigste Grund für den Sauerstoffeintrag und daraus resultierenden Korrosionsschäden. Obwohl beide genannten Normen auf die erforderliche Diffusionsdichtigkeit der Komponenten gemäß DIN 4627 verweisen, werden in der Praxis häufig diffusionsoffene Schläuche vorgefunden, die aus Unkenntnis oder uneindeutigen Herstellerbezeichnungen verbaut werden. Das Schadensausmaß kann erheblich sein.

Es wurde der Permeationskoeffizient eines Hydraulikschlauches mit Silikoninliner bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Der Hersteller gibt an, dass dieser Schlauch neben der Verwendung in Trinkwasserinstallationen auch für Heiz- und Kühlsysteme geeignet sei. Der Permeationsversuch dieses Schlauches hat ergeben, dass der Schlauch eine ca. 370-fach höhere Sauerstoffdiffusionsrate aufweist als die DIN 4726:2017-10 für Rohre der Fußbodenheizung vorschreibt.

Vergleichbare Messungen wurden an einem Panzerschlauch desselben Herstellers mit EPDM-Inliner durchgeführt. Die Permeationsrate für Sauerstoff ist bei diesem Material deutlich niedriger, aber immer noch deutlich höher als zulässig. Hier wurden die Vorgaben der DIN 4726:2017-10 „nur“ etwa um den Faktor 70 überschritten.

Um Korrosionsschäden durch diffusionsoffene Schläuche zu vermeiden, sind verschiedene Maßnahmen möglich. Hierzu zählen z. B. ein Qualitätsmanagement bei Planung, Ausführung und Instandhaltung. Der durch das SIZenergieplus herausgegebene Leitfaden zur korrosionssicheren Inbetriebnahme und Betrieb von geschlossenen Wasserkreisläufen bildet hierzu eine Grundlage. Auch wäre eine deutliche Kennzeichnungspflicht von Hydraulikschläuchen zur Sauerstoffdichtigkeit zielführend.

#### Stichwörter:

Sauerstoffdiffusion, Korrosion, DIN 4726

## 4.05

# Server mit direkter Flüssigkeitskühlung

## Experimentelle Untersuchung des thermischen und elektrischen Verhaltens

Maximilian Stahlhut<sup>1</sup>, Markus Sekulla<sup>1</sup>, Peter Großöhme<sup>2</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik,  
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland  
[thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de)

<sup>2</sup>Megware Computer Vertrieb und Service GmbH, Nordstraße 19, 09247 Chemnitz, Deutschland

In Europa entfallen aktuell ca. 2 Prozent des Strombedarfs auf den Betrieb von Rechenzentren. Speziell in Deutschland lag die IT-Anschlussleistung im Jahr 2020 bei über 2000 MW. Für die kommenden Jahre wird ein weiteres Wachstum prognostiziert. Die dabei erzeugte Wärme erfordert eine kontinuierliche Abfuhr durch das Kühlsystem. Die Direktflüssigkeitskühlung stellt hierbei eine effiziente Methode dar, bei der das Kühlmedium, meist Wasser, mittels Rohrleitungen auf dem Server unmittelbar zu den IT-Komponenten geleitet wird. Im Vergleich zur Kühlung mit Luft erlaubt dies höhere Kühltemperaturen auf Grund einer besseren Wärmeübertragung. Die maximale Kühlaustrittstemperatur bei der Direktflüssigkeitskühlung liegt laut Literaturangaben zwischen 45...70 °C. Flüssigkeitsgekühlte Rechenzentren bieten somit verschiedene Möglichkeiten zur Abwärmenutzung, beispielsweise für Gebäudeheizungen, Nah- und Fernwärmesysteme sowie den Antrieb von Sorptionskältemaschinen. Für die effiziente Einbindung der Rechenzentrumsabwärme ist es jedoch notwendig, die Wechselwirkung unterschiedlicher Kühlbedingungen mit dem IT-System zu berücksichtigen. Die Untersuchung der Wärmenutzung von flüssigkeitsgekühlten Rechenzentren erfordert deshalb eine geeignete Modellierung des thermischen und elektrischen Verhaltens der Server. Daher wird in dieser Arbeit das Betriebsverhalten von Servern mit Direktflüssigkeitskühlung unter verschiedenen Kühlbedingungen mittels praktischer Untersuchungen charakterisiert. Ein Testaufbau erfasst dabei die Messdaten aus dem IT- und Kühlbetrieb von 10 flüssigkeitsgekühlten Servern unter reproduzierbaren Lastbedingungen, wobei die Eintrittstemperatur des Kühlkreislaufs zwischen 25 und 50 °C variiert und für drei Temperaturspreizungen (5,0 K; 7,5 K; 10,0 K) gemessen wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass es in dem untersuchten Temperaturbereich zu keiner Einschränkung des IT-Betriebs kam (z. B. durch Reduktion der Taktfrequenz der CPUs). Die maximale mittlere Kühltemperatur wurde in dieser Konfiguration durch die flüssigkeitsgekühlten Netzteile mit 58 °C vorgegeben. Eine Erhöhung der mittleren Kühltemperatur von 30 °C auf 50 °C hat zu einem Anstieg des Strombedarfs um 8,5 % geführt. Die abgeführte Wärme der Flüssigkeitskühlung reduziert sich auf Grund zunehmender Wärmeverluste über das Gehäuse um 14,6 %. Diese Erkenntnisse wurden in ein Simulationsmodell überführt. Dieses Modell soll im Anschluss die Abwärmenutzung von flüssigkeitsgekühlten Rechenzentren abbilden.

### Stichwörter:

Rechenzentrum, Abwärmenutzung, Flüssigkeitskühlung, Experiment, Modellierung

## 4.06

# Kompressionswärmepumpe mit Lösungsmittelkreislauf (R717/R718)

J.Y. Bressand

Johnson Controls Industriekälte  
[Jeanyves.bressand@jci.com](mailto:Jeanyves.bressand@jci.com)

Keine Kurzfassung verfügbar.

4.07

## Systematische energetische Betriebsoptimierung von Kälteanlagen am Beispiel einer Feldanlage

**M.Sc. Johannes Spangler\*, M.Sc. Sebastian Haußer, Prof. Dr.-Ing. Martin Becker**

Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach, Deutschland  
[spangler@hochschule-bc.de](mailto:spangler@hochschule-bc.de); [hausser@hochschule-bc.de](mailto:hausser@hochschule-bc.de); [becker@hochschule-bc.de](mailto:becker@hochschule-bc.de)

Zum Erreichen der Klimaschutzziele in Deutschland ist im Energiesektor neben der Bereitstellung von regenerativer elektrischer Endenergie eine effiziente Energienutzung notwendig. Da Kälteanlagensysteme zu ca. 14 % des elektrischen Endenergiebedarfs beitragen, gilt es auch diese möglichst energieeffizient zu betreiben. Neben einer systematischen Bewertungsmethodik der sich im Betrieb einstellenden Energieeffizienz (vgl. VDMA 24247-7) ist eine strukturierte und möglichst automatisierte Analyse von Messdaten essentiell. Auf einer derartigen Grundlage aufbauend, können zielgerichtet energetische Optimierungsvorschläge eines betrachteten Kälteanlagensystems ermittelt werden. Darüber hinaus kann nach einer Umsetzung einer entsprechenden Maßnahme diese auf die gewünschte Wirksamkeit überprüft werden.

Am Beispiel eines realen indirekten industriellen Kälteanlagensystems zur Herstellung von Verpackungsmaterialien wurde eine energetische Bewertung im Betrieb nach VDMA 24247-7 durchgeführt. Die in Abhängigkeit von verschiedenen Bilanzräumen gebildeten Energieeffizienzkennzahlen (TCOP und TEPF) und weitere im Betrieb erfasste Messgrößen wurden systematisch ausgewertet. Eine detailliertere Analyse ergab, dass zum Beispiel eine saisonale Umstellung der Pumpen im Kühl- und Kaltwasserkreis die Energieeffizienz des Systems verbessern könnte. In dem Beitrag werden die methodische Vorgehensweise sowie die Verbesserung der Energieeffizienz nach Umsetzung der Maßnahmen unter Berücksichtigung der Vergleichbarkeit der Effizienzkennzahlen vorgestellt und diskutiert.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Optimierung, VDMA 24247-7, Feldanlage, Datenauswertung

4.08

## Clever: Wärmepumpen-Kaskade für Heiz- und Kühlprozesse

**Wie ein Unternehmen der Milchindustrie viel Strom, Gas, CO2, Geld und Platz spart**

**Christian Wehling<sup>1</sup>, Karsten Uitz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Alfa Laval Mid Europe GmbH, Hamburg  
[ludwig.irrgang@tum.de](mailto:ludwig.irrgang@tum.de)

<sup>2</sup>Simaka Energie- und Umwelttechnik GmbH, Argenbühl  
[k.uitz@simaka.de](mailto:k.uitz@simaka.de)

Überall, wo Milch und Molke verarbeitet werden, entsteht ein konstant hoher Bedarf an Heiz- und Kühlenergie. Das Erhitzen ist gesetzlich vorgeschrieben, um Milch sowie Molke von Bakterien zu befreien. Eine rasche Kühlung ist nötig, um die Proteine und andere wichtige Bestandteile der Milch zu erhalten. Der Kunde – ein führendes Unternehmen in der Milch- und Molkenverarbeitung – suchte nach Möglichkeiten, seine sensiblen Produktionsprozesse effizienter und nachhaltiger zu gestalten. In Zusammenarbeit mit der Firma Simaka Energie- und Umwelttechnik wurde eine ebenso schlagkräftige wie innovative Lösung entwickelt: Durch das Installieren von drei Wärmepumpen-Kaskaden konnte der bisherige Energieverbrauch in drei Anwendungsbereichen insgesamt um rund 68 Prozent reduziert werden.

Bisher wurden die energieintensiven Prozesse des Heizens und Kühlens durch separate Maschinen abgedeckt: eine strombetriebene Kühlmaschine und ein gasbetriebenes Dampfregister. Jetzt übernimmt jeweils eine kaskadierte Wärmepumpe diese beiden Aufgaben und sorgt für eine ebenso effiziente wie gradgenaue Temperierung der verschiedenen Produkte. Wichtiger Baustein in dieser nur selten realisierten und überdies erfreulich platz- und kältemittelparen Lösung ist eine neuartige Wärmetauscher-Konzeption von Alfa Laval, die für diese Anwendung entwickelt wurde.

Die Ergebnisse sind beeindruckend: Das Unternehmen spart durch die Installation der drei neuen Wärmepumpen jährlich rund 6.500.000 kWh an Strom und Gas. Je nach Entwicklung der Energiepreise liegt der ROI bei etwas mehr als drei Jahren. On top zahlt der Kunde künftig weniger CO2-Abgaben und kann bei seinen Abnehmern mit einem niedrigen CO2-Wert seiner Produkte werben.

Diese innovative Lösung ist nicht nur für die Milchverarbeitungsindustrie relevant, sondern auch für andere energieintensive Branchen wie die Chemie-, Pharma-, Lebensmittel-, Papier- und Automobilindustrie.

#### 4.09

## Sonnenstrom für frische, kalte Milch

### Kältespeicherung mit Flüssigeis zur Steigerung der PV-Eigenstromnutzung in der Milchviehhaltung

Sirko Kamusella\*, Lutz Richter, Mathias Safarik, Marcus Honke

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[sirko.kamusella@ilkdresden.de](mailto:sirko.kamusella@ilkdresden.de)

Die Gestehungskosten für selbsterzeugten PV-Strom liegen inzwischen auch für gewerbliche Kunden deutlich unter den Kosten für den Strombezug aus dem Netz. Gleichzeitig ist die Vergütung für ins Netz eingespeisten PV-Strom signifikant geringer als die Kosten für den Strombezug. In vielen Kälteversorgungsanlagen kann ein thermischer Speicher dazu beitragen, die Eigenverbrauchsquote des selbst erzeugten Stroms zu steigern und den Netzbezug zu senken.

Im Rahmen des BMBF-geförderten Projektes KETEC wird u.a. ein Vakuum-Flüssigeiserzeuger mit einer Leistung von 80 kW entwickelt, mit dem Ziel, die effizienten und flexiblen Vakuum-Flüssigeis-Kältespeicher zukünftig auch in mittelgroßen Kälteversorgungsanlagen einbinden zu können.

Die wirtschaftlichen und energetischen Auswirkungen der Nutzung eines oder mehrerer 80 kW Flüssigeiserzeuger in einer thüringischen Milchviehanlage mit 1.300 Kühen wurde mit Hilfe einer dynamischen Simulation des Energiesystems am Standort untersucht. Es besteht insbesondere aus einer 2.200 kW PV-Anlage sowie einer Biogasanlage mit Wärmebedarf zur Fermenterheizung, der zukünftig mittel Wärmepumpe bzw. Wärme-Kälte-Kopplung gedeckt werden soll. Durch ein geeignetes Anlagenkonzept sollen die betriebseigenen BHKWs entlastet werden, um die Menge an aufbereitetem Biomethan zu erhöhen.

Der größte Kältebedarf entsteht jeweils während der Melkzeiten (4:00-11:00, 16:00-23:30) zur schnellen Abkühlung der Milch. Ein Großteil des Melkzeitraums liegt nicht in der Tageszeit hoher PV-Erträge, so dass ein Kältespeicher geeignet erscheint. Es wurden insgesamt 120 verschiedene Systemvarianten betrachtet und dabei (u. a.) folgende Parameter variiert: Anzahl Eiserzeuger, Eisspeichergröße, Heizspeichergröße, maximalen Wärmepumpenkondensationstemperatur, etc.

In der wirtschaftlich günstigsten Systemkonfiguration wird eine Amortisation nach 3,7 Jahren erreicht.

4.10

## Verringerung der Geräuschemission in einem Scroll-Kompressor für Kraftfahrzeuge

Robin Langebach<sup>1\*</sup>, Tobias Pfliehinger<sup>1</sup>, Alexej Pogorelov<sup>2</sup>, Alexander Meka<sup>2</sup>, Jean Kübbeler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, The Schaufler Foundation - Professur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik  
[Robin.Langebach@h-ka.de](mailto:Robin.Langebach@h-ka.de)

<sup>2</sup> Rheinmetall, Division Power Systems, Alfred-Pierburg-Straße 1, D-41460 Neuss, Germany

Die batteriebetriebene Elektromobilität hat ihren Status als Schwellenmarkt verlassen und gewinnt weltweit erhebliche Marktanteile. Kältemittelkompressoren für Elektro- und Hybridfahrzeuge müssen eine Reihe an bekannten und einer Vielzahl an neuen Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen unter anderem 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. Daher spielt die Optimierung des Kompressors hinsichtlich seines Geräusch-, Vibrations- und Härteverhaltens (NVH) zur Erfüllung der Komfortansprüche der Kunden eine zentrale Rolle im Entwicklungsprozess von Kompressoren und thermischen Systemen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Analyse des Geräuschemissionsverhaltens, insbesondere der Hochdruckpulsationen, des Luftschalls und der Körperschallschwingungen eines Scrollverdichters. Das Minderungspotential der genannten Größen wird anhand verschiedener Schalldämpferkonstruktionen in der Druckkammer untersucht. Hochdruckpulsationsmessungen an der Druckleitung des Verdichters werden mit Messungen des Schalldruckpegels verglichen. Eine Korrelation zwischen beiden Größen wird durchgeführt und ausgewertet.

**Stichwörter:**

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

4.11

## Analysis of Alternative Refrigerants for Electric Vehicles Heat Pumps

### Refrigerant technology for high-efficient and high-performant BEV thermal management systems

Christian Macri<sup>1</sup>, Álvaro De LeónFehler! Textmarke nicht definiert., Felix FlohrFehler! Textmarke nicht definiert.

Daikin Chemical Europe GmbH, Düsseldorf, Germany  
[christian.macri@daikinchem.de](mailto:christian.macri@daikinchem.de)

The amount of sold battery electric vehicles (BEV) will further grow in future vehicle fleets in all relevant global markets. For BEVs, the climate control and the driving range are crucial criteria in the ongoing electrification of automobiles. In this regard, the thermal management system has a very significant impact on the overall energy efficiency and thus available range especially at severe weather conditions.

Both the system architecture and the refrigerant are designed to achieve high cooling and heating performance while maintaining high efficiency and thus low energy consumption. Existing refrigerants in the market are not fulfilling either regulatory or performance requirements. Therefore, the interest in alternative fluids recently increased. The alternative refrigerant R-474A based on the molecule R-1132(E) achieved top performance for

both parameters in various system and vehicle tests. An own-built energy efficiency tool confirms a reduction of CO<sub>2</sub> equivalent (CO<sub>2</sub>eq) emissions at certain ambient temperature conditions.

The study is analyzing the performance and efficiency of the refrigerant alternatives R-474A compared to the existing state of the art technology under different ambient temperature conditions in steady and dynamic states. The investigations consist of both physical testing and simulation. The results of the most recent investigations and the study will be presented at the conference. Refrigerant blends with R-1132(E) that are outside the PFAS scope conclude the presentation.

**Keywords:**

Vehicle efficiency, Thermal management system, Alternative refrigerant, BEV, Energy efficiency, MAC, Heat pump

**4.12**

## **Refit of cooling units in maritime applications**

### **Holistic refrigerant change concept on basis of a real cruise ship refurbishment**

**Benedict Holbein**

MAC Hamburg GmbH, Schlossstraße 8E, 22041 Hamburg

[benedict.holbein@mac-hamburg.com](mailto:benedict.holbein@mac-hamburg.com)

The F-gases regulation renewal and the refrigerant phase down represents a big challenge over all markets. However, the exchange in the maritime sector, especially for passenger ships the constraints provide additional barriers.

The number of existing cooling units for air conditioning and provision cooling in the ship sector goes beyond hundred thousands, while most of them are equipped with F-gases such as R134a and R4xx series. Since the usual operation time of a ship is around 30 years, the demand for refurbishment of existing units is huge. On the other hand the conditions for ships with class regulation, extreme ambient conditions and strongly limited space restrictions make refits complex.

The paper describes a complete concept from calculation and dimensioning over logistic processes and installation to a commercial evaluation for the refit of existing provision cooling units in cruise ships from R4xx refrigerants to R290 (propane).

On basis of an ongoing overall cruise ship refurbishment project with over 200.000 GT, two systems are investigated.

Besides the restricted space for de-construction and installation works, the restrictions regarding modification of the location as well as the widespread dimensions of the distribution system to the cold stores make the situation complicated.

The concept covers refit of a normal cooling system with around 500 kW as well as a freezing system with around 100 kW, where in addition a system change from direct expansion to a secondary cycle is required. Therefore, besides the dimensioning and construction of the units themselves, the complete distribution system is modified and the machine room is adjusted according to existing and assumed classification regulations. In addition it presents an approach how to adjust the system and decentral equipment such as air coolers in cold stores with a minimized effort to allow a commercially feasible realization on operating cruise ships. The concept

Based on the current time schedule the refit is estimated to be realized within 2025.

4.13

## Klimatisierung von elektrischen Personenkraftwagen mit R744

Florian Wieschollek<sup>1\*</sup>, Kadir Dursun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hanon Systems Deutschland, Thermal Management, 50170 Kerpen, Deutschland  
[fwiesch1@hanonsystems.com](mailto:fwiesch1@hanonsystems.com)

<sup>2</sup> Hanon Systems Deutschland, System Development, 50170 Kerpen, Deutschland  
[kdusrun@hanonsystems.com](mailto:kdusrun@hanonsystems.com)

In den letzten Jahren ist der Markanteil der elektrischen und teilelektrischen Fahrzeuge kontinuierlich gestiegen. In diesen Fahrzeugen spielt das Thermal Management eine besondere Rolle, um den elektrischen Antriebsstrang optimal nutzen zu können. Das Thermal Management ist deutlich umfangreicher und komplexer als in Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor. Neben den Komponenten des Antriebs sollte auch der Hochvoltspeicher im jeweils optimalen Temperaturbereich zwischen 20-40°C betrieben werden.

Das Kühlen der Fahrzeugkabine erfolgt bei hohen Umgebungstemperatur mit dem klassischen Kältemittelkreislauf. Dieser Kreislauf wird häufig mit entsprechenden Komponenten zur einer Wärmepumpenschaltung erweitert. Dadurch wird die Kabine bei nur begrenzter Abwärme aus den Antriebskomponenten effizient geheizt. Bei herkömmlichen Verbrennern sind die Architekturen der Kühl- und Kältemittelkomponenten häufig getrennt aufgebaut. Dagegen ist es bei elektrischen Fahrzeugen notwendig, diese Komponenten optimal aufeinander abzustimmen.

Derzeit wird für das großflächig eingesetzte Kältemittel R1234yf aufgrund des von der EU initiierten Prozesses zum PFAS Verbot nach Alternativen gesucht. Potenzielle Kandidaten sind natürliche Kältemittel. Für den Einsatz bei tieferen Umgebungstemperaturen bietet sich das Kältemittel R744 an. Die Firma Hanon hat Komponenten und Kreislaufschaltungen für das Kältemittel R744 entwickelt. Diese sind bereits seit 2020 im Serieneinsatz. Systeme und Komponenten werden ständig weiterentwickelt.

In diesem Vortrag werden Lösungen und deren technische Umsetzung präsentiert.

### Stichwörter:

Automobil, Klimatisierung, natürliche Kältemittel, R744

4.14

## Klimatische Einflüsse auf das Thermomanagement batterieelektrischer Fernbusse

Jan Friedrich Hellmuth<sup>1\*</sup>, Andreas Schulte<sup>1</sup>, Markus Pollak<sup>2</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1,2</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[jan.hellmuth@tu-braunschweig.de](mailto:jan.hellmuth@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup> TLK-Thermo GmbH, Rebenring 31, 38106 Braunschweig, Deutschland

Bei batterieelektrischen Bussen hat das Thermomanagement einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch und damit auf die Reichweite des Fahrzeugs. Das Thermomanagement von elektrifizierten Fernbussen muss konkurrierende Ziele wie Fahrgast- und Fahrerkomfort, minimale Degradation der Batterie und Energieverbrauch erfüllen. Dies macht das Design des Thermomanagement-Systems zu einer Herausforderung. Zentrale Komponente des Thermomanagement-Systems ist die umschaltbare Wärmepumpe, die zum Heizen und Kühlen der Kabine sowie zum Kühlen der Batterie eingesetzt wird.

Für die Auslegung des Thermomanagements, die Auswahl eines geeigneten Kältemittels und einer geeigneten Topologie wird ein physikbasiertes Gesamtfahrzeugmodell in einem ganzheitlichen Ansatz verwendet, der verschiedene Querkopplungen im System sowie die Randbedingungen der realen Anwendung berücksichtigt. Dabei werden verschiedene natürliche Kältemittel für das Thermomanagement-System untersucht.

Die Auswertung erfolgt für verschiedene internationale Routen und Klimabedingungen. Dabei werden auch zukünftige Klimawandelszenarien berücksichtigt. Für die Topologien werden verschiedene Maßnahmen zur Effizienzsteigerung betrachtet.

**Stichwörter:**

BEV, Thermomanagement, Wärmepumpe, Fahrzeugklimatisierung, Batterie, Klimawandel

**4.15**

## **Simulation eines neuartigen Konzeptes für Pkw-Schwingkolbenverdichter mit Mitteldruckeingang**

**Dr.-Ing. Rico Baumgart, Dipl.-Ing. Jörg Aurich, Dipl.-Ing. Rico Resch**

IAV GmbH, 09120 Chemnitz, Germany, Tel: +49 371 23734918  
[rico.baumgart@iav.de](mailto:rico.baumgart@iav.de)

Moderne Elektrofahrzeuge verfügen z. T. über sehr komplexe Thermomanagementsysteme, welche üblicherweise aus einem Kältemittelkreislauf und mehreren Kühlmittelkreisläufen bestehen. Auf diese Weise wird neben der Temperierung der Fahrgastzelle auch die Kühlung von verschiedenen Fahrzeugkomponenten sichergestellt. Hierzu zählen z. B. die Batterie, die Leistungselektronik und der Traktionsmotor.

Diese Komponenten weisen jedoch zum Teil sehr unterschiedliche Kühlleistungs- und Temperaturanforderungen auf. Mit den heutigen Pkw-Kältemittelkreisläufen kann jedoch nur ein Niederdruck- und damit ein Niedertemperaturniveau realisiert werden, wodurch Kompromisse bzgl. der Verdampfungstemperatur eingegangen werden müssen.

Für ein effizientes Thermomanagement wäre es daher wesentlich besser, wenn mit dem Kältemittelkreislauf zusätzlich auch ein Mitteldruckniveau bzw. Mitteltemperaturniveau dargestellt werden könnte. Dies ist jedoch mit den heute verfügbaren Pkw-Kältemittelverdichtern nicht möglich, da diese lediglich über einen Niederdruck- und einen Hochdruckanschluss verfügen.

Aus diesem Grund hat IAV ein Konzept für einen R744-Kältemittelverdichter mit Mitteldruckeintritt entwickelt, welcher auf einem konventionellen Schwingkolbenverdichter basiert. Schwingkolbenverdichter haben sich bereits außerhalb der Automobilindustrie bewährt und zeichnen sich im Vergleich zu den heute üblichen Pkw-Scrollverdichtern u. a. durch eine kostengünstige Herstellbarkeit sowie eine gute Haltbarkeit aus.

Im Beitrag wird zunächst der Aufbau und das Funktionsprinzip dieses speziellen Verdichters mit Mitteldruckeingang eingehend erläutert. Anschließend folgt eine kurze Vorstellung des Simulationsmodells, welches der Konzeptionierung und Optimierung des Verdichters zugrunde lag. Hierbei wird vor allem auf die Modellierung verschiedener Detailprozesse, wie die Mitteldruckgaszuführung, die Ventildynamik sowie die inneren Leckage- und Rückströmungen näher eingegangen. Im Anschluss daran werden anhand von Simulationsergebnissen die Prozesse im Verdichter detailliert diskutiert. Hierbei wird auch aufgezeigt, welche Mitteldruckmassenströme und Kälteleistungen mit dem hier vorgestellten Konzept erzielt werden können. Nachfolgend soll ein technischer Lösungsvorschlag für eine kompakte Mehrzylinderanordnung (>3) präsentiert werden, mit der sich geringe Massenstromschwankungen und damit niedrige Druckpulsationen erzielen lassen. Abschließend wird ein Ausblick auf die weiteren anstehenden Entwicklungsschritte sowie die dabei zu erwartenden Herausforderungen gegeben.

## 4.16

# Vergleich und Bewertung von Kältemittelkreisläufen mit Mitteldruckniveau für Elektrofahrzeuge

Dipl.-Ing. Jörg Aurich, Dr.-Ing. Rico Baumgart

IAV GmbH, 09120 Chemnitz, Germany, Tel: +49 371 23734917  
[joerg.aurich@iav.de](mailto:joerg.aurich@iav.de)

Für eine flächendeckende Verbreitung und Akzeptanz von Elektrofahrzeugen stellen neben dem gewohnten thermischen Komfort in der Fahrgastzelle vor allem die Reichweite und eine kurze Ladezeit die entscheidenden Schlüsselfaktoren dar.

Moderne Elektrofahrzeuge sind zumeist mit Thermomanagementsystemen ausgestattet, welche im Wesentlichen aus einem Kältemittelkreislauf und mindestens einem Wasserkreislauf bestehen. Diese Kreisläufe sind mittels Chiller thermisch miteinander gekoppelt.

Im Niederdruckzweig des Kältemittelkreislaufes durchströmt das Kältemittel parallel den Verdampfer zur Kühlung der Fahrgastzelle sowie den Chiller zur Temperierung der Batterie und ggf. weiterer Komponenten. Die heutigen Systeme im Fahrzeug verfügen jedoch nur über einen Niederdruckzweig, wodurch auch nur eine Kältemitteltemperatur für alle zu kühlenden Bauteile zur Verfügung steht. Allerdings unterscheiden sich die Temperaturanforderungen für die Fahrgastzelle und die Fahrzeugkomponenten mitunter erheblich, wodurch hinsichtlich der Verdampfungstemperatur Kompromisse eingegangen werden müssen.

Dieses Problem könnte mit einem zweiten Niederdruckniveau gelöst werden, in dem ein Teilmassenstrom des Hochdruckkältemittels auf einen Mitteldruck und damit auf eine mittlere Verdampfungstemperatur entspannt und dem Chiller zugeführt wird. Dies erfordert jedoch einen speziellen Kältemittelverdichter mit Mitteldruckeingang, welcher derzeit bei IAV Gegenstand von Entwicklungsarbeiten ist.

Im Beitrag werden zunächst verschiedene in Frage kommende Kreislauftopologien mit Mitteldruckeingang mit den heute üblichen Systemen verglichen. Dabei werden die Vor- und Nachteile der Systeme anhand von Simulationsergebnissen detailliert aufgezeigt und bewertet. Zusätzlich werden in den Vergleich auch etablierte Kreislauftypen wie z. B. Flash Tank, Economizer oder Liquid Injection aufgenommen, die eine effiziente Nutzung des Mitteldruckeingangs auch dann ermöglichen, wenn nur Chiller oder Verdampfer aktiv sind. Die Untersuchungen werden für verschiedene Umgebungsbedingungen durchgeführt, wobei auch Optimierungspotentiale der einzelnen Systeme herausgestellt werden. Abschließend wird ein Ausblick auf die weiteren Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten gegeben.

## 4.17

# Ergebnisse und Optimierung der SophiA-Kälteanlage

**Feldtest und Laborergebnisse der dreistufigen Kälteanlage  
mit horizontalem Naturumlaufverdampfer**

Oliver Schmid<sup>1\*</sup>, Michael Kauffeld<sup>1</sup>

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

Das SophiA Projekt (Sustainable Off-grid solutions for Pharmacies and Hospitals in Africa) hat zum Ziel afrikanische Krankenhäuser in abgelegenen Regionen mit einer nachhaltigen und vollautarken Kälteanlage auszustatten. Die Anlage wird in einem 40 Fuß Container verbaut und mit 24 kW<sub>p</sub> PV-Paneele betrieben. Sie stellt Lagermöglichkeiten bei den Temperaturniveaus +5 °C, -30 °C und -70 °C zur Verfügung. Dies wird durch eine dreistufige Kälteanlage erreicht. In der ersten Stufe kommt Propan zum Einsatz. Ein CO<sub>2</sub> Naturumlaufverdampfer

ermöglicht den Wärmestrom aus dem Container zum Propan-Verdampfer. Eine weitere CO<sub>2</sub> Anlage verflüssigt in einem Eisspeicher und sorgt für die Kälteleistung des -30 °C Raumes. Im -30 °C ist eine Tiefkühltruhe aufgestellt, die mit dem Kältemittel Ethan betrieben wird und Temperaturen von -75 °C erreicht. Die Anlage wurde im gleichen Maßstab im Labor aufgebaut. Die Laborergebnisse weichen auf Grund baulicher Differenzen von den Messergebnissen des Kühlcontainers ab. Dieses Manuskript zeigt die Feld- und Laborergebnisse, sowie die Optimierung der Laborkälteanlage.

**Stichwörter:**

Natürliche Kältemittel, Naturumlaufverdampfer, solare Kühlung, Autarkie, Eisspeicher

**4.18**

## **Modellbasierte Untersuchung von Kälteanlagenkonzepten für die Vorkühlung von Wasserstoff bei Betankungsvorgängen**

**Henrik Waßmuth<sup>1\*</sup>, Steffen Heinke<sup>1</sup>, Andreas Schulte<sup>1</sup>, Nicholas Lemke<sup>1</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

[h.wassmuth@tu-braunschweig.de](mailto:h.wassmuth@tu-braunschweig.de)

Bei derzeit typischen Tankstellenstellenkonzepten für die Betankung mit gasförmigem Wasserstoff werden für einen schnellen und sicheren Tankvorgang Kälteanlagen zur Vorkühlung des Wasserstoffs eingesetzt. Beim Betankungsvorgang strömt Wasserstoff aufgrund von Druckunterschieden aus den tankstellenseitigen Speichertanks in das Fahrzeugspeichersystem über. Durch den Joule-Thomson-Effekt und der Kompression des Wasserstoffs im Fahrzeugtank kommt es dabei zu einem signifikanten Temperaturanstieg. Ohne die vorherige Vorkühlung des Wasserstoffs auf Temperaturen von bis zu -40 °C wäre die Einhaltung der Betriebsgrenzen des Fahrzeugtanks (<85 °C) bei gleichzeitig akzeptablen Betankungsdauern nicht gewährleistet.

Im Allgemeinen charakterisiert sich die Wasserstoffvorkühlung insbesondere durch hohe und gleichzeitig beim Betankungsvorgang variierende Kälteleistungen, eine relativ große Temperaturdifferenz zwischen Wärmeaufnahme (Wasserstoff) und Wärmeabgabe (Umgebung) sowie eine starke Temperaturänderung des Wasserstoffs im Zuge der Abkühlung. Unterschiedliche Verkehrsmittel erfordern zudem verschiedene Vorkühltemperaturen, da sich die Anforderungen an die Betankungsdauer unterscheiden.

In dieser Studie werden die Anforderungen an die Kältetechnik zur Wasserstoffvorkühlung aufgezeigt sowie unterschiedliche Kälteanlagenkonzepte modellbasiert untersucht. Dafür werden insbesondere für das Kältemittel R744 effizienzsteigernde Kältekreislaufvarianten sowie der Einsatz thermischer Speicher in Form eines zusätzlichen Kälteträgers betrachtet und bewertet. Ebenso findet ein Vergleich zu weiteren Kältemitteln und Kältemittelgemischen statt.

**Stichwörter:**

Wasserstofftankstelle, Wasserstoffvorkühlung, R744, natürliche Kältemittel, Energiebedarf

**4.19**

## **Kühlsysteme im Supermarkt**

### **Energetischer Vergleich von steckerfertigen und zentralgekühlten**

**Manuel Diem<sup>1</sup>, Christian Stahel<sup>1\*</sup>, Mirco Ganz<sup>1</sup>, Silvan Steiger<sup>1</sup>, Frank Tillenkamp<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Institut für Energiesysteme und Fluid-Engineering, Technikumstrasse 9, 8400 Winterthur, Schweiz

[christian.stahel@zhaw.ch](mailto:christian.stahel@zhaw.ch)

Kühlmöbel für Supermärkte haben eine Energieetikette, welche unter anderem jeweils die Effizienzklasse (A – G) sowie eine jährliche Verbrauchsangabe zum jeweiligen Kühlmöbel angibt. Diese Angaben eignen sich jedoch nicht, um ein steckerfertiges Kühlmöbel mit einem zentralgekühlten Kühlmöbel zu vergleichen. Dies liegt an der Prüfnorm, welche einerseits steckerfertige und nicht steckerfertig Kühlmöbel in der Beurteilung unterscheidet und andererseits die Kühlmöbel bei fixen Umgebungsbedingungen prüft, und somit keine saisonalen Unterschiede berücksichtigt. Weiterhin wird für die Energieetikette nur das Kühlmöbel untersucht. Dabei wird aber nicht berücksichtigt, welchen Einfluss der Wärmeeintrag oder der Wärmeentzug auf das Raumklima im Supermarkt hat. Das Ziel der Studie ist ein energetischer Vergleich von steckerfertigen und zentralgekühlten Kühlsystemen mit Berücksichtigung des ganzen Supermarktbetriebs und den unterschiedlichen klimatischen Bedingungen anhand der Jahreszeiten.

Dafür wurden drei unterschiedliche Supermarkt-Varianten untersucht: Ein Supermarkt mit ausschliesslich konventionellen steckerfertigen Kühlmöbel, welche alle einen effektiven Wärmeeintrag haben. Ein zweiter Supermarkt mit hybriden steckerfertigen Kühlmöbel. Diese können die Abwärme entweder über einen Sekundärkreis an die Umgebung abgeben oder bei Bedarf direkt in den Ladebereich eintragen. Der dritte Supermarkt hat eine zentrale Kälteversorgung für die Kühlmöbel mit einer CO<sub>2</sub>-Kältemaschine, welche eine Wärmenutzung integriert hat. Für alle Varianten wurde der Supermarktbetrieb über ein Jahr simuliert und der Bedarf an elektrischer Energie berechnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass das effizienteste Kühlsystem für einen Supermarkt eine zentrale Kälteversorgung ist, da die Kälteerzeugung meistens effizienter ist als bei steckerfertigen Kühlmöbeln und weil die Wärme bei der Erzeugung ebenfalls genutzt werden kann (mit einer CO<sub>2</sub>-Booster Kältemaschine). Der Supermarkt, welcher nur mit konventionellen steckerfertigen Kühlmöbel ausgerüstet ist, hat einen um 29.5% - 44.4% höheren Strombedarf im Vergleich zu einem Supermarkt mit einem zentralgekühlten Kühlsystem. Unter anderem deshalb, da bei dieser Variante ein hoher Klimatisierungsbedarf entsteht. Hybride steckerfertige Kühlsysteme sind deutlich effizienter als konventionelle steckerfertige Kühlsysteme, da die Wärme an die Aussenluft abgegeben wird und nur bei Bedarf in den Supermarkt geht. Verglichen mit dem zentralgekühlten Kühlsystem benötigt der Supermarkt mit einem hybriden steckerfertigen Kühlsystem 9.4% - 12.8% mehr Strom.

**Stichwörter:**

Supermarkt Kühlsysteme, Steckerfertige Kühlmöbel, Zentralgekühlte Kühlmöbel, CO<sub>2</sub>-Kältemaschine

## 4.20

# CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mit Energie-Transfer-System

## Erfahrungsbericht aus der Praxis

Jonas Schönenberger <sup>1\*</sup>, Erik Wiedenmann <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)

[e.wiedenmann@frigoconsulting.ch](mailto:e.wiedenmann@frigoconsulting.ch)

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

Im Herbst 2022 ging in einem Cash und Carry Markt im Raum Zürich eine energiesparende Weltneuheit in Betrieb. In die, im Rahmen einer Erneuerung installierte CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, wurde ein Energie-Transfer-System integriert. Das letztere wandelt Hochtemperatur-Abwärme der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mittels eines Rankine-Kreisprozesses in nützliche Kälte um und entlastet dabei wiederum die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage. Das ETS wurde entwickelt, gebaut und vor Ort in die neu installierte CO<sub>2</sub>-Kälteanlage integriert. Im Anschluss an die Installation wurde die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage zusammen mit dem ETS in Betrieb genommen. Seither werden Betriebserfahrungen und Messdaten gesammelt und der Betrieb und das System wird laufend optimiert. Aktuell erfolgt eine detaillierte Untersuchung des Gesamt-Systems in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie. Das Konzept vom ETS ist nicht zuletzt deshalb vielversprechend, da es auch losgelöst von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen, Hochtemperatur-Abwärme aus beliebigen Prozessen in nützliche Kälte umwandeln vermag.

Dieser Beitrag ist die Fortsetzung, der an der DKV-Tagung 2023, präsentierte ersten Feldanlage. In der Zwischenzeit wurde das System basierend auf wertvollen Betriebserfahrungen weiterentwickelt und weitere Feldanlagen

in Betrieb genommen. Darüber hinaus werden Ergebnisse einer detaillierten Untersuchung in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie präsentiert.

**Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>, R744, Kälteanlage, Energie-Transfer-System, Rankine, Exergie

**4.21**

## **Steigerung der Energieeffizienz einer Molkerei**

### **Energieflussanalyse und theoretische Bewertung der Integration einer Hochtemperaturwärmepumpe**

**Lukas Köster<sup>1\*</sup>, Jan Bengsch<sup>1</sup>, Eirik Starheim Svendsen<sup>1</sup>,  
Armin Hafner<sup>2</sup>, Kristina Norne Widell<sup>1</sup>, Sigmund Jenssen<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> SINTEF Ocean, Brattørkaia 17 C, 7010 Trondheim, Norwegen  
[lukas.koester@sintef.no](mailto:lukas.koester@sintef.no)

<sup>2</sup> Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,  
Kolbjørn Hejesvei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen

<sup>3</sup> CadioAS, Terminalen 6, 7080 Heimdal, Norwegen

Die Pasteurisierung ist ein energieintensiver Prozess in Molkereien, der hohe Temperaturen erfordert, die häufig mit Öl-, Gas- oder elektrischen Dampferzeugern erreicht werden. Der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTHP) kann stattdessen die Energieeffizienz bei Pasteurisierung, Sterilisierung und CIP (Cleaning in Place) verbessern. In der aktuellen Anlage einer norwegischen Molkerei decken mehrere CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen die Kühllast und erzeugen gleichzeitig 65 °C heißes Wasser. Das Heißwasser wird gespeichert und für Prozesswärme, CIP und als Speisewasser für die Dampferzeugung durch einen elektrischen Dampfkessel verwendet. Für die Raumheizung wird Fernwärme eingesetzt. Werden höhere Temperaturen benötigt, wird Dampf erzeugt und über einen Wärmetauscher Heißwasser mit einer Temperatur von bis zu 96 °C erzeugt. Für diese Dampferzeugung werden 37-41 % des Primärenergiebedarfs der Anlage benötigt. In dieser Studie wird das Potenzial für den Einsatz von HTHP auf Basis natürlicher Kältemittel untersucht, um die Energieeffizienz durch den Ersatz des elektrischen Dampferzeugers zu erhöhen.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Pasteurisierung, natürliche Kältemittel, CO<sub>2</sub>

**4.22**

## **Thermische Energiespeicher in der Lebensmittelindustrie**

### **Dimensionierung und technisch-wirtschaftliche Bewertung anhand von Energielastprofilen**

**Jan Bengsch<sup>1\*</sup>, Lukas Köster<sup>1</sup> Eirik Starheim Svendsen<sup>1</sup>,  
Kristina Norne Widell<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>, Sigmund Jenssen<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> SINTEF Ocean, Brattørkaia 17 C, 7010 Trondheim, Norwegen  
[jan.bengsch@sintef.no](mailto:jan.bengsch@sintef.no)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, Sem Sælands vei 11, 7465 Trondheim, Norwegen

<sup>2</sup> Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,  
Kolbjørn Hejesvei 1B, 7491 Trondheim, Norwegen

<sup>3</sup>CadioAS, Terminalen 6, 7080 Heimdal, Norwegen

In der Lebensmittelindustrie, insbesondere in der Molkereiindustrie, werden große Mengen an Wärmeenergie auf unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt. Der Wärmebedarf ist an den Produktionsplan gebunden und schwankt im Tagesverlauf. Daher sind Lösungen gefragt, die einen Teillastbetrieb und hohe Spitzenlasten im Kältesystem vermeiden. Dies führt nicht nur zu einer Überdimensionierung der erforderlichen Komponenten (z. B. Kompressoren), sondern auch zu einer kürzeren Lebensdauer dieser sowie zu hohen Spitzenlaststrompreisen. Durch die Integration eines thermischen Energiespeichers (TES) können Angebot und Nachfrage nach thermischer Energie entkoppelt werden, wodurch Lastspitzen vermieden, und ein stabilerer Betrieb des Kältesystems gewährleistet wird. Gleichzeitig sorgen TES für stabile und niedrige Temperaturen und damit für Lebensmittelqualität und -haltbarkeit. Gegenstand dieser Fallstudie ist eine Molkerei in Zentralnorwegen, in der integrierte CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen zur Deckung der wichtigsten Heiz- und Kühllasten eingesetzt werden. Die Studie konzentriert sich auf die Verbesserung des derzeitigen Betriebs des CO<sub>2</sub>-Systems durch die Implementierung eines kalten TES mit einem Phasenwechselmaterial. In diesem Beitrag wird ein Python-Algorithmus vorgestellt, der die Prozessdaten (stündlicher thermischer Energiebedarf und Strompreis) einer Molkerei verwendet, um die Auswirkungen der Einführung von TES in Bezug auf die Senkung der Betriebskosten und die Energieeinsparung vorherzusagen. Der Algorithmus verwendet eine Optimierungsmethode zur Auswahl und Dimensionierung der kostenoptimalen Größe des TES in Form von Pillow-Plates Wärmeübertrager.

**Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, Energieeffizienz, Lebensmittelverarbeitung, Kalter thermischer Energiespeicher (CTES), Natürliche Kältemittel

4.23

## Modellbasierte Leistungsanalyse eines transkritischen kombinierten CO<sub>2</sub>-Heiz- und Kühlkreislaufs für eine Schulkantine in Indien

Marco Bless<sup>(a)</sup>, Krzysztof Banasiak<sup>(a)</sup>, Armin Hafner<sup>(b)</sup>, Vinod Laguri<sup>(c)</sup>, Pramod Kumar<sup>(c)</sup>

(a) SINTEF Energy Research, Trondheim, 7034, Norway

[marco.bless@sintef.no](mailto:marco.bless@sintef.no)

(b) Norwegian University of Science and Technology, Fachbereich Energie- und Verfahrenstechnik  
Trondheim, 7034, Norway

(c) Indian Institute of Science, Fakultät für Maschinenbau, Bangalore, 560012, India

Zur Demonstration und Förderung natürlicher Kältemittel für den zukünftigen HVAC&R-Sektor in Indien wird eine transkritische CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe mit einer Leistung von 140 kW bei der Akshaya Patra Stiftung in Bangalore, Indien, installiert. Die Einheit wird teile die Heizlast, sowie die Kühllast abdecken, die für Schulküchen typisch ist. Um die Leistung des Systems sowohl bei Nennbedingungen als auch bei Teillast zu untersuchen und zu analysieren, wird die Wärmepumpe mit Dymola/Modelica modelliert.

Die Simulation arbeitet mit Wasser als Wärmequelle und -senke mit Rücklauf- und Vorlauftemperaturen von 15/8°C bzw. 24/87°C. Das System ist als CO<sub>2</sub>-Booster der zweiten Generation konfiguriert und verfügt optional über eine ejektorgestützte Betriebsweise. Es besteht aus einer zweistufigen Kälteanlage mit einem Niedertemperaturverdampfer bei 37,5 bar und einem Mitteltemperaturverdampfer bei 42,5 bar. Auf der Hochdruckseite wird das CO<sub>2</sub> auf 122,6 bar verdichtet. Eine erste kombinierte Leistungszahl wird auf 4,9 geschätzt.

**Stichworte:**

Kohlendioxid, Booster-System, kombiniertes Heizen und Kühlen, Wärmepumpe, Kältetechnik, Ejektor.

## 5.01

# **KUEHASystem - SmartSim – Webtool zur Abschätzung der Kühlwirkung von Freien Heizflächen**

**Andrea Meinzenbach, Dr. Alf Perschk, Dr. André Kremonke**

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen / Institut für Energietechnik

Professur für Gebäudeenergiotechnik und Wärmeversorgung

Tel.: 0351-463 33130

[Andrea.Meinzenbach@tu-dresden.de](mailto:Andrea.Meinzenbach@tu-dresden.de)

Im Rahmen des KUEHASystem-Projektes<sup>1</sup> mit dem Schwerpunkt zu Untersuchungen bzgl. des Kühlens mit Freien Heizflächen soll eine interaktive Webplattform namens SmartSim entstehen. Derzeitige Planungswerzeuge verfügen über eher eingeschränkte Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Kühlwirkung Freier Heizflächen insbesondere mit dem Hintergrund des Einsatzes von Radiatoren mit Lüfterunterstützung.

SmartSim soll eine Möglichkeit zur Abschätzung der Kühlwirkung für eine möglichst breite Anwendergruppe bieten. Hierbei soll die aufwendige Modellerstellung des realen Anwendungsfalls über skalierbare Gebäudemodelle deutlich erleichtert werden, wobei die Gebäudemodelle jeweils einen bestimmten Teil des Gebäudebestandes repräsentieren. Wichtige Skalierungsparameter sind dabei die Gebäudegrundfläche, Anzahl der Aufgänge und Geschosse, Wärmeschutzniveaus, Standort, Parameter der Heizungs- sowie der Kälteerzeugungsanlage. Aktuell wurde für ein Gebäudemodell der komplette Durchlauf in einem Software-Prototypen erfolgreich realisiert. Als Erweiterungen folgen der Ausbau der Gebäudemodelle, die Berücksichtigung verschiedener Nutzungsszenarien sowie die Einbindung spezifischer Herstellerangaben. Des Weiteren wird die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich relevanter Ausgabewerte und Kennwerte weiter angepasst.

Die Grundlagen der Berechnungen basieren auf der bidirektional gekoppelten Anlagen- und Gebäudesimulation mit TRNSYS-TUD, welche das Gebäudeverhalten sowie die thermischen und hydraulischen Wechselwirkungen im Bereich der Wärme (Kälte-)verteilung und -übergabe hinreichend genau abbildet.

Im Rahmen der DKV-Tagung soll der aktuelle Stand der Arbeiten präsentiert werden.

---

<sup>1</sup> KUEHASystem – Ganzjährige Gesamtsystemoptimierung zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Bestand-heizungsanlagen – Demonstration einer Systemlösung für Heizen und Kühlen

## 5.02

# **Systematik zur Effizienzbewertung von Kälteanlagensystemen mit Freier Kühlung**

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

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

[wagners@hochschule-bc.de](mailto:wagners@hochschule-bc.de); [volkmer@hochschule-bc.de](mailto:volkmer@hochschule-bc.de); [hausser@hochschule-bc.de](mailto:hausser@hochschule-bc.de);  
[becker@hochschule-bc.de](mailto:becker@hochschule-bc.de); [floss@hochschule-bc.de](mailto:floss@hochschule-bc.de)

Die Integration einer indirekten Freien Kühlung kann die energetische Effizienz von Kälteanlagensystemen signifikant verbessern. Die hydraulische Einbindung der Freien Kühlung zur Kältemaschine kann sowohl für den Kalt- als auch für den Kühlwasserkreis grundsätzlich seriell oder parallel sowie im Kühlwasserkreislauf mit gemeinsamem oder separatem Rückkühlwerk erfolgen. Diese grundlegenden Einbindungsvarianten werden systematisch dargestellt sowie die Vor- und Nachteile bzw. wesentliche Unterschiede beschrieben.

Zur systematischen Effizienzbewertung eines Kälteanlagensystems bestehend aus Freier Kühlung und Kältemaschine wird die VDMA 24247-7 herangezogen. Um die jeweiligen Teilsysteme (Freie Kühlung und Kältemaschine) im Betrieb energetisch bewerten zu können, werden die grundlegenden Bilanzräume der VDMA 24247-7 erweitert. Basierend auf experimentellen Untersuchungen werden die auf den Bilanzräumen der VDMA aufbauenden Effizienzkennzahlen (Total Coefficient of Performance (TCOP) und Total Energy Performance Factor (TEPF)) für unterschiedliche hydraulische Einbindungsvarianten gebildet. Anhand der Ergebnisse werden die Effizienzkennzahlen und deren Aussagefähigkeit für unterschiedliche Bilanzraumerweiterungen diskutiert. Darüber hinaus erfolgt im Beitrag ein energetischer Vergleich von Kälteanlagensystemen mit Freier Kühlung in unterschiedlichen hydraulischen Einbindevarianten.

**Stichwörter:**

Freie Kühlung, Energieeffizienz, Optimierung, VDMA 24247-7, experimentelle Untersuchungen

## 5.03

### Kühlen mit Freien Heizflächen

#### Ein Beitrag zur Optimierung von Bestandsheizungsanlagen in Wohngebäuden über den ganzjährigen Betrachtungszeitraum

Manuel Kornmacher<sup>1</sup>, André Kremonke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, DZH-Schepitz GmbH, +49-351-3365654  
[manuel.kornmacher@dzh.de](mailto:manuel.kornmacher@dzh.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, +49-351-463-35345  
[andre.kremonke@tu-dresden.de](mailto:andre.kremonke@tu-dresden.de)

Im Gebäudesektor liegt das größte Potenzial zur Senkung der Treibhausgas-Emissionen im Bereich der Bestandswohngebäude. Zusätzlich müssen viele dieser Gebäude vor einer sommerlichen Überhitzung geschützt werden. Ein gemeinsamer Lösungsansatz für beide Problemstellungen wird im Rahmen des Projektes KUEHASystem<sup>3</sup> in einem Feldtestobjekt in Leipzig mit 36 Wohneinheiten erprobt.

Bei diesem Lösungsansatz wird hauptsächlich auf Wärmepumpentechnologien gesetzt, da diese zur Wärme- und Kältebereitstellung genutzt werden können. Synergieeffekte entstehen insbesondere bei Anlagenkonfigurationen in Verbindung mit Erdwärmesonden. Für die verbraucherseitige bzw. raumseitige Energiebereitstellung werden die im Objekt bereits vorhandenen freien Heizflächen sowohl im Heiz- als auch im Kühlfall genutzt.

Zur Validierung der Systemlösung wurde im Feldtestobjekt ein besonders detailliertes Monitoring mit über 400 Datenpunkten und ca. 500.000 Messwerten pro Tag aufgebaut. Erfasst werden neben den Energieströmen der zentralen Wärme- und Kältebereitstellungsanlage und aller Wohneinheiten ebenso alle relevanten Temperaturen zur Bewertung des Anlagenverhaltens und der Raumluftzustände.

Neben der Erprobung und Validierung der Systemlösung liefern die Untersuchungen am Objekt zusätzliche Ergebnisse hinsichtlich des reglungstechnischen Zusammenspiels von bi- bzw. multivalenten Anlagen, Ergebnisse zur besseren Einschätzung der gegenseitigen Beeinflussung von Sondenbohrungen, der Möglichkeit zur Nutzung des Sondenfeldes als Saisonalspeicher sowie abschließend Aussagen zur Regenerationsfähigkeit des Erdreiches.

---

<sup>1</sup> KUEHASystem – Ganzjährige Gesamtsystemoptimierung zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Bestandsheizungsanlagen – Demonstration einer Systemlösung für Heizen und Kühlen

## Model-Order-Reduction-Verfahren zur Raumströmungsberechnung

Christian Friebe<sup>1\*</sup>, Thomas Oppelt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Luft- und Klimatechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Germany  
[klimatechnik@ilkdresden.de](mailto:klimatechnik@ilkdresden.de)

Umluftreiniger, korrekterweise Sekundärluftreiniger genannt, sind Bestandteil eines Systems zur Luftreinhaltung für Innenräume. Diese Geräte können mobil aufgestellt werden und entnehmen der Raumluft permanent einen Teil Luft, leiten diesen über einen Reinigungsmechanismus und führen diese aufbereitete Luft wieder dem Raum zu. Diese Eigenschaften des Gerätes können gut beschrieben werden. Anders sieht die Beschreibung der Interaktion des Gerätes mit dem Raum aus. Hier stellt sich die Frage, inwiefern die aufbereitete Luft im gesamten Raum wirksam wird.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens zur Entwicklung von Messverfahren wurde in einem Teilespekt dieser Frage untersucht. Neben strömungsmechanischen Visualisierungen wurden auch numerische Berechnungen (computational fluid dynamics, CFD) durchgeführt. Für CFD-Berechnungen wird das zu untersuchende Fluid-Volumen in einzelne Zellen zerlegt, Anfangs- und Randbedingungen festgelegt und die Bilanzgleichungen für jede einzelnen Zelle iterativ berechnet. Bei einer Zellenanzahl von deutlich über 100.000 benötigt eine solche Berechnung eine relevante Rechenzeit, bzw. Rechenkapazität. Dies führt zu einem deutlichen Kostenanteil, wenn diese Rechnungen durchgeführt werden. Auch für Echtzeitanwendungen sind diese Verfahren nicht geeignet.

Für sich wiederholende Berechnung unter ähnlichen Bedingungen sind jedoch Verfahren notwendig, die schnell Ergebnisse bereitstellen können. Eine solche Methode ist die Model Order Reduction (ROM). Hierbei werden vorhandene Ergebnisse einer CFD-Berechnung unter Angabe der Parametervariation verwendet, um ein Modell mit Methoden des maschinellen Lernens zu trainieren. Dieses Modell besitzt deutlich weniger Freiheitsgrade und kann eine Berechnung in einem Bruchteil der zuvor benötigten Zeit durchführen.

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Anwendung einer solchen Methode vorgestellt. Untersucht wurde der Einfluss der Austrittsgeschwindigkeit aus einem Luftreiniger auf die Strömungsverhältnisse in einem Raum. Die CFD-Berechnungen wurden transient mittels des Programms FDS für sechs verschiedene Fälle durchgeführt. Die Rechendauer betrug ca. 48 min für jeweils 60 s Echtzeit. Fünf dieser Fälle wurde für das Training des MOR-Modells genutzt, das sechste diente der Validierung. Die Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der Validierungswerte mit dem Ergebnis des trainierten Modells.

### Stichwörter:

Lüftung, numerische Berechnung, CFD, Model Order Reduction, maschinelles Lernen, Luftreinigung

## 5.05

# Selbstoptimierte Wärmepumpen-Heizkurven

## Anpassung der Wärmepumpen-Heizkurve an das Gebäude durch Nutzung datengetriebener Methoden

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

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.On Energieforschungscenter, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustr. 10, 52074 Aachen, Deutschland  
[florian.will@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:florian.will@eonerc.rwth-aachen.de)

Um verbrennungsbedingte Emissionen zu reduzieren, ist die Elektrifizierung der Raumheizung mit Wärmepumpen notwendig. Der Betrieb von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme erfordert Strom, sodass bei gleichzeitiger Elektrifizierung der Mobilität der Strombedarf in Deutschland stark ansteigen wird. Um die Stromnetzbelastung zukünftig minimal zu halten, muss der Strom zum Betrieb einer Wärmepumpe ebenfalls minimiert werden. Der Strombedarf einer Wärmepumpe kann entweder durch Senkung der Gebäudeheizleistung oder durch Steigerung der Gesamteffizienz der Energieumwandlung erreicht werden.

Während die Senkung der Gebäudeheizleistung aufgrund von Verbesserungen an der Gebäudehülle speziell für die Endnutzenden sehr kostenintensiv ist, liegt die Steigerung der Effizienz der Wärmepumpe sowohl beim Hersteller als auch beim Endnutzenden. Um hohe Effizienzen mit Wärmepumpen zu erreichen, sind niedrige Vorlauftemperaturen erforderlich, welche prinzipiell durch die Endnutzenden selbst definiert werden können. Herkömmlicherweise korreliert die Heizkurve die Umgebungstemperatur mit der Vorlauftemperatur und wird bei Installation ein mal vorgegeben. Heizkurven versagen allerdings darin, die maximale Effizienz der Wärmepumpe sicherzustellen, da Heizkurven im Betrieb häufig nicht auf spezifische Gebäude und dessen Nutzung zugeschnitten sind. Daher ist eine Methode zur Anpassung der Vorlauftemperatur an das Gebäude und dessen Nutzung vielversprechend, um die Effizienz zu maximieren und gleichzeitig thermischen Komfort einzuhalten.

Dieser Beitrag stellt eine selbstoptimierte Heizkurve vor, die sich an ein Gebäude und dessen Nutzung anpasst. Zu diesem Zweck werden mit datengetriebenen Methoden Prozessmodelle erstellt, welche Korrelationen zwischen der Vorlauftemperatur und Eingangsgrößen wie der Außentemperatur herstellen. Mit den Prozessmodellen wird die selbstoptimierte Heizkurve erstellt. Wir bewerten die Leistung der selbstoptimierten Heizkurve in verschiedenen Heizsystemen in Simulationen. Die herkömmliche Heizkurve wird in Bezug auf die Effizienz übertroffen, während gleichzeitig thermischer Komfort eingehalten wird. Durch die Effizienzsteigerungen kann der Strombedarf reduziert werden, sodass die theoretischen Erkenntnisse als nächstes in der Praxis überführt werden sollten.

### Stichwörter:

Heizkurve, Machine-Learning, Simulation, Wärmepumpe

## Zum Entwurf von raumweisen Temperaturreglern

**Untersuchung sich ändernder Voraussetzungen für eine dezentrale PI-Regelung der Raumtemperatur in hochgedämmten bzw. energetisch sanierten Wohngebäuden**

**Tim Jourdan<sup>1\*</sup>, Mostafa Barghash<sup>2</sup>, Lukas Siebler<sup>1</sup>, Tobias Henzler<sup>1</sup>  
Konstantinos Stergiopoulos<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),  
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[tim.jourdan@igte.uni-stuttgart.de](mailto:tim.jourdan@igte.uni-stuttgart.de)

<sup>2</sup> Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK),  
Pfaffenwaldring 6A, 70569 Stuttgart, Deutschland

Für eine effiziente Beheizung von Räumen werden häufig raumweise Temperatur-Regelungen eingesetzt, die aus mehreren dezentralen PI-Reglern bestehen. Die energetischen Gebäudeeigenschaften beeinflussen die thermisch-energetische Kopplung von Räumen und damit das Verhalten der zu regelnden Systeme. Die dadurch bedingten Voraussetzungen für den Reglerentwurf liegen im Fokus der Untersuchungen.

Eine typische Maßnahme in Neubauten und als Sanierungsmaßnahme für Heizungssysteme ist die Installation elektronisch geregelter Thermostatventile. Dabei können Regler mit PI-Verhalten eingesetzt werden, um Einsparpotentiale zu erschließen, die typischerweise durch niedrigere Aufwandszahlen der Nutzenübergabe im Vergleich zu Reglern mit P-Verhalten vorliegen. Oft wird eine Realisierung von dezentralen PI-Reglern angestrebt, die z. B. je Raumheizfläche installiert sind und dabei als so genannte einschleifige Regelkreise ausgeführt werden. Mithilfe geeigneter Entwurfsverfahren zeigt sich, ob hinsichtlich des Systemverhaltens tatsächlich unabhängige dezentrale PI-Regler entworfen werden können oder Mehrgrößenregler bzw. übergreifende Strategien notwendig sind.

Es wird gezeigt, wie sich energetische Gebäudeeigenschaften in Systemeigenschaften abbilden, die entscheidend für das Vorgehen beim Entwurf von Regelungssystemen mit mehreren PI-Reglern zur Temperaturregelung in Gebäuden sind. Den Bezugspunkt des Anwendungsbeispiels bildet eine exemplarische Wohnung in einem hochgedämmten Mehrfamilienhaus, die mit Wohnungslüftungsanlage, Wärmerückgewinnung und separatem Heizungssystem ausgestattet ist. Den Untersuchungen werden Simulationsergebnissen mit variiertem thermisch-energetischer Kopplung von Räumen in hochgedämmten Gebäuden im Vergleich zu Gebäuden mit niedrigerem Energiestandard zugrunde gelegt. Anhand der Auswirkungen auf Kriterien des Reglerentwurfs wird gezeigt, in welchen Fällen übergreifende Regelstrategien erforderlich werden können.

**Stichwörter:**

Temperaturregelung, Übergreifende Regelstrategien, Energetische Sanierung, PI-Regler

## Analysse des Energiebedarfs und COVID-19 Auswirkungen auf Hotelgebäude

**Fatih Meral\*, Hendrik Margraf, Federico Lonardi, Andrea Luke**

Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Technische Thermodynamik,  
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland  
[ttk@uni-kassel.de](mailto:ttk@uni-kassel.de)

Der Energiebedarf von Gebäuden im Gastgewerbe, insbesondere Hotels, ist hoch und vielfältig verteilt. Zudem steigt er stetig aufgrund der wachsenden Komfortbedarfs der Gäste. Effizienzmaßnahmen und nachhaltige Versorgungssysteme sind essentiell, um den wachsenden Energiebedarf zu decken und den ökologischen Fußabdruck der Branche zu reduzieren. Dazu ist es notwendig, den Energiebedarf hinsichtlich der Wertigkeit der Energie zu quantifizieren, z.B. den elektrischen und thermischen Energiebedarf. Dies wird zusätzlich durch fehlende zeitlich sowie lokal aufgelöste Daten erschwert.

Daher sind 24 Gebäude des Gastgewerbes mit entsprechender hochauflösender Sensorik ausgestattet, um von Januar 2019 bis Januar 2021 detaillierte hochauflöste Daten zum elektrischen und thermischen Energiebedarf in Abhängigkeit der Belegung aufzunehmen und zu quantifizieren. Mögliche Energieeinsparungen werden identifiziert und eine modellprädiktiven Steuerungsalgorithmen (MPC) für Effizienzverbesserungen entwickelt. Dies geschieht ohne Beeinträchtigung der Gäste und ohne viel Mehraufwand für die Hoteliers. Die Hotels werden so klassifiziert, dass sie in vier Anwendungsbereiche Konferenz, Reise, Event und Wellness eingruppiert und mit dem jeweiligen Energiebedarf und hinsichtlich Energieeffizienz kombiniert werden. Exemplarische Hotels werden besonders detailliert analysiert. Leider beeinflusste die COVID-19-Pandemie die Ergebnisse im ausgewählten Zeitraum maßgeblich.

Die Integration erneuerbarer Energiequellen, einschließlich Photovoltaik (PV) und Blockheizkraftwerke (BHKW), kombiniert durch Fernwärme (FW) bzw. Nahwärme, neben herkömmlichen Öl- und Gasheizungen wird untersucht. In den ausgesuchten Hotels werden keine Klimaanlagen oder Wärmepumpen eingesetzt. Das Konzept zur Datenerfassung in jeder Kategorie und die erforderliche Instrumentierung werden vorgestellt, mit dem der Energiebedarf räumlich und zeitlich aufgelöst über einen Zeitraum von zwei Jahren gemessen wird. Anhand ausgewählter Hotels wird gezeigt, dass der Energiebedarf ohne Belegung – quasi die Grundlast – relativ hoch ist. Die Messergebnisse schaffen die Grundlage für eine tiefergehenden Analyse: Spezifische Lastprofile werden identifiziert, die sowohl die Tageszeit als auch den Wochentag berücksichtigen. Der tägliche Wärmebedarf wird in Abhängigkeit der Außentemperatur für unterschiedliche Gebäudeeffizienzkategorien und Nutzungskonzepte aufgezeigt. Ein MPC wird auf Basis dieser Erkenntnisse entwickelt, um die Effizienz der Energieversorgung sowohl während als auch außerhalb pandemiebedingter Einflüsse zu optimieren.

Im Kontext der Pandemie wird die sog. Grundlast im Gastgewerbe herausgearbeitet, die unabhängig von der Belegung ist. Durch die fundierte Datenanalyse werden wesentliche Energieverbesserungsmaßnahmen zu Grundlasten, typischen Spitzen und mittelfristigen Einflüssen wie Feiertagen hergeleitet. Klimaanlagen und Wärmepumpen werden in den erforderlichen Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz ohne Komforteinbußen in Zukunft berücksichtigt werden müssen.

### Stichwörter:

Hotelsektor, Energiebedarf und Verteilung, Datenerfassung, Energieeffizienz

## Entwicklung einer Monitorringplattform für Kälteanlagen und Benchmarking von Kälteanlagen

Holger Kühl<sup>1\*</sup>, Stephan Lehr<sup>2</sup>

<sup>1</sup> KühlAnalyse GmbH, An der Brauerei 73, 08412 Werdau, Sachsen

[Holger.Kuehl@kuehlanalyse.de](mailto:Holger.Kuehl@kuehlanalyse.de)

<sup>2</sup> Staatliche Studienakademie Glauchau, Versorgungs- und Umwelttechnik,  
Copernikusstraße 51, 08371 Glauchau, Sachsen

[stephan.lehr@ba-sachsen.de](mailto:stephan.lehr@ba-sachsen.de)

Der technische Bereich der Kältetechnik, der Klimaanlagen und Wärmepumpen (engl.: RACHP) befindet sich seit dem Montreal-Protokoll 1987 im Übergang. Im Übergang hinsichtlich der verwendeten und verwendbaren Kältemittel sowie in Bezug auf die Steigerung der Energieeffizienz und dem Weg zur Digitalisierung. Dies knüpft auch an die Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (engl.: Sustainable Development Goals) der Vereinten Nationen an.

Die Herausforderung, welche sich hinter einer geringen Energieeffizienz von Anlagen im Betrieb verbirgt, ist das mangelnde Bewusstsein für die Bedeutung der Inbetriebnahme und Wartung der Systeme. Es wird vom Betreiber meist falscherweise davon ausgegangen, dass die Anlagen effizient arbeiten, wenn sie die vorgegebenen Temperaturen einhalten. Das Interesse an der Sicherstellung der Effizienz nimmt zu, doch ohne entsprechende Vorschriften stehen Energieeffizienzprojekte in der Priorität oft nicht an oberster Stelle. Hierbei wird vorausschauende Wartung und Optimierung als „die Zukunft“ erkannt, aber der Übergang findet in der Praxis zu langsam statt, um gesteckte Ziele zu erreichen.

An dieser Stelle knüpft das von der Deutschen Energie-Agentur (dena) geförderte Projekt zum Monitoring an und wird im vorliegenden Beitrag sowohl kältetechnisch (Formelwerk, Thermodynamik) als auch datentechnisch (Datensicherheit, Datenübertragung) vorgestellt. Zum bisherigen Projektstand wurden die Anlagenkategorien/-typen: Kaltwassersätze, (wassergekühlt, luftgekühlt) sowie gewerbliche Kältetechnik (insbesondere Systeme mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel) untersucht und Hinweise zur Energieeffizienz waren in jedem Fall zu geben.

Das schlussendliche Ziel der zu entwickelnden Energie-Performance-Benchmark-Plattform (EPB-Plattform) ist das Aufzeigen von Verbesserungsmöglichkeiten zur Energieeinsparung für den Anlagenbetreiber, sodass z. B. eine Standortoptimierung möglich wird. Hierzu werden verschiedene Kriterien zur Bewertung der Anlageneffizienz genutzt und für den Betreiber als verständliche Darstellung im Ampelprinzip aufbereitet, so z. B. der sogenannte SEI – System Efficiency Index (Gesamtenergieeffizienz). Weiterhin erfolgt die Auswertung als spezifischer Wert im Sinne einer weltweiten Vergleichbarkeit als Normalisierte Energiesignatur (NES), die den durchschnittlichen Energiebedarf pro Stunde bei jeder Außentemperatur in normierter Form z. B. je m<sup>2</sup> gekühlter Fläche bzw. je Meter Kühlregal oder anderer für den Standorttyp charakteristischer Normalisierungsparameter zeigt.

In einem „erwarteten künftigen Fehlerfall“ ist es durch die Überwachung der Anlagen und der zukünftigen Nutzung von automatisierter Fehlererkennung und -diagnose (engl.: AFDD) möglich, nach vorangegangenen Warnmeldungen wegen Abweichungen vom geregelten Betriebsablauf vorausschauende Wartungsaufträge zu generieren.

### Stichwörter:

Monitoring, Benchmarking, Data Warehouse, COP / EER, DENA

## Kühlpaneel mit indirekter Verdunstungskühlung über Membranen

Hannes Rosenbaum<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Luft- und Klimatechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Germany  
[klimatechnik@ilkdresden.de](mailto:klimatechnik@ilkdresden.de)

Im Zusammenhang mit der globalen Erwärmung ist die Steigerung der Energieeffizienz von Kühlsystemen eine Notwendigkeit. Mit Leistungszahlen (EER) > 10 und dem Verzicht auf klima- und umweltschädliche Kältemittel sind Verdunstungskühlsysteme von besonderer Bedeutung. Durch die Möglichkeit der adiabaten Kühlung ohne gleichzeitige Befeuchtung des Zuluftstroms wird die indirekte Verdunstungskühlung als vorteilhaft angesehen. Bei der indirekten Verdunstungskühlung wird Abluft isenthalp gekühlt und die reduzierte Ablufttemperatur genutzt, die Zuluft zu kühlen. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass Aerosole in die Abluft abgegeben werden. Während die indirekte Verdunstungskühlung fast ausschließlich in zentralen Klimageräten eingesetzt wird, fehlt es derzeit an geeigneten Lösungen für kleinere dezentrale oder nachrüstbare Geräte.

Um die positiven Effekte der indirekten Verdunstungskühlung in Kleingeräten und in Bestandsgebäuden umzusetzen und gleichzeitig das Aerosolproblem zu lösen, entwickelt das ILK Dresden ein innovatives Kühlpaneel mit einem neuartigen Wärme- und Stoffübertrager. Dieser Wärmeübertrager wird gleichzeitig von Wasser, Zuluft und Abluft durchströmt. Während Wasser durch eine wasserdampfdurchlässige Membran in den Abluftstrom verdunstet, wird die Kühlwirkung über eine diffusionsdichte Sperrsicht zum Zuluftstrom wirksam. Der als Kreuz-Gegenströmer ausgebildete Membranwärmeübertrager wird aus gestapelten 4-lagigen Textillaminaten aufgebaut. Für deren Herstellung und Verarbeitung werden eigens entwickelte Verarbeitungsmethoden und neue Materialkombinationen eingesetzt.

Der Vortrag gibt einen Einblick in die Entwicklung des Membranwärmeübertragers sowie des neuartigen Kühlpaneeels: die Konzeption, Materialversuche, thermodynamische Auslegung, konstruktive Umsetzung und messtechnische Analysen. Thematisiert werden auch Optimierungs- und Anwendungspotenziale der Verdunstungskühlung über Membranen sowie der Membranwärmeübertrager allgemein.

**Stichwörter:**

Verdunstung, Kühlung, Befeuchtung, Wärmeübertrager, Membran

## 6.01

# Integration einer dampfproduzierenden 1,6 MW<sub>th</sub> Wärmepumpe

## Am Beispiel der Produktion von pelletiertem Tierfutter

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

<sup>1</sup> Aneo Industry AS, Klæbuveien 118, 7031 Trondheim, Norwegen  
[christian.schlemminger@aneo.com](mailto:christian.schlemminger@aneo.com)

Pelletierungsprozesse in der Nahrungsmittel- und Tierfutterherstellung benötigen oftmals Dampf zur thermischen Behandlung des Produktes. Typische Dampfdrücke des Prozesses sind hierbei im Bereich von 2 barA bis 5 barA, da das Rohmaterial bei höheren Temperaturen Qualitätseinbußen ausgesetzt ist. Nachfolgend der thermischen Behandlung wird das Produkt mittels Luft getrocknet und gekühlt. Diese feuchte Abluft des Prozesses hat eine Temperatur von bis zu 65 °C und eine relative Luftfeuchte von bis zu 40 %.

Die hier vorgestellte, direkt in den Prozess integrierte, Kaskadenwärmepumpe ermöglicht die Nutzung latenter und sensibler Wärme der feuchten Abluft als Wärmequelle und liefert bis zu 2 t/h Dampf an die Prozesslinien. Die Integration erfolgte in der Tierfuttermittelfabrik Felleskjøpet Skansen in Trondheim, Norwegen.

Hauptkomponenten der Wärmepumpe sind: 1) Abluft/Glykol Wärmeübertrager, 2) Wasserdampf produzierende R717-Wärmepumpe und 3) Dampfverdichter (vierstufig). Die dimensionierenden Bedingungen sind eine Verdampfungstemperatur der zweistufigen R717-Wärmepumpe von 25°C und die Bereitstellung von Niederdruckdampf bei 85 °C. Des Weiteren wird die Unterkühlungswärme aktiv zur Vorwärmung des Speisewassers genutzt. Die vier in Serie geschalteten R718-Verdichter erzeugen einen Dampfdruck von 2 bara bei einer Temperatur von 130°C (10 K Überhitzung). Ein neu installiertes Niederdruckdampfnetz verteilt den Frischdampf direkt zur Produktionslinie.

Durch den Einsatz von Frequenzumrichtern wird ein Teilstabtrieb auf bis zu 35 % gewährleistet. Bei einem Temperaturhub von 100 K lässt sich ein Gütegrad der Wärmepumpe in einem Bereich von 2,6 bis 3,3 messen. Unter Berücksichtigungen von parasitären Verbrauchern wie Ventilation und Pumpen reduziert sich dieser um 0,2. Im Vergleich zur direkt elektrischen Dampferzeugung lässt sich der Energieverbrauch um 5 GWh/Jahr reduzieren. Der CO<sub>2</sub> Ausstoß reduziert sich um ca. 65 %.

Das hier angeführte Beispiel verdeutlicht die Möglichkeiten einer effizienten und wirtschaftlichen industriellen Dampferzeugung mit natürlichen Kältemittel. Anwendungsfelder sind Nahrungsmittel-, Tierfutter-, Papier- und Chemieindustrie wo ähnliche Wärmequellen- und Senkentemperaturen zur Verfügung stehen.

### Stichwörter:

Dampfproduzierende Wärmepumpe, Industrielle Wärmepumpe, Integrationsbeispiel, Energy as a Service

## 6.02

# Umweltfreundliche Wärmepumpe mit natürlichen Kältemittel

M. Mahnert

SCM Frigo, Sant'Angelo di Piovedi Sacco, Italien  
[manfred.mahnert@scmfrigo.com](mailto:manfred.mahnert@scmfrigo.com)

Keine Kurzfassung verfügbar

## 6.03

# Großwärmepumpen in der Tiefengeothermie

Felix Loistl

SWM - Stadtwerke München, Entwicklung regionale EE-Erzeugung,  
Emmy-Noether-Straße 2, 80992 München, Deutschland  
[loistl.felix@swm.de](mailto:loistl.felix@swm.de)

Die Wärmetransformation ist das zentrale Instrument zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung. Für die Stadt München und das angrenzende Umland bietet das Molassebecken aufgrund seiner geologischen Beschaffenheit großes Potenzial zur Nutzung von tiefengeothermischer Energie. Durch die Anbindung an ein Fernwärmennetz kann zukünftig der größte Anteil des Wärmebedarfs regenerativ gedeckt werden. In Hinblick auf die geothermischen Anlagenstandorte ergeben sich unterschiedliche geologische Bedingungen, die sich in variierenden Thermalwassertemperaturen und Förderraten widerspiegeln. Besonders südlich von München treten Thermalwassertemperaturen von bis zu 140 °C auf, während sie im Norden auf bis zu 60 °C absinken. Im Süden besteht aufgrund der tieferen Lage allerdings ein erhöhtes Bohr- und Fündigkeitsrisiko. Das Fernwärmennetz wird das ganze Jahr über mit einer gleitenden Temperatur betrieben, die im Winter bei bis zu 125 °C liegt und sich im Sommer auf ca. 85 °C reduziert. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, an den Standorten mit zu geringen Thermalwassertemperaturen eine Temperaturanhebung vorzunehmen. Ein weiterer Einsatzfall besteht darin, zusätzliche Wärme durch das Aufheizen eines Teilstroms des Fernwärmerücklaufs zu erzeugen. In beiden Fällen kann die Geothermie als hochwertige Wärmequelle dienen. Eine stärkere Auskühlung des Thermalwassers steigert infolgedessen die Effizienz des Thermalwasserkreislaufs. Großwärmepumpen bieten sich als effiziente Lösung für diese Anforderungen an.

Im Folgenden werden der Hintergrund des Wärmepumpeneinsatzes erläutert, verschiedene Integrations- und Betriebsweisen der Wärmepumpe in Verbindung mit der Tiefengeothermie dargelegt, relevante Bilanzräume für die Bewertung der Systemeffizienz definiert und eine vereinfachte Bewertung der Anlage vorgenommen.

## 6.04

# Messtechnische Analysen von Großwärmepumpen

## Eine Betrachtung der FuE-Inbetriebnahmephase für fernwärmetechnisch gekoppelte Großwärmepumpen

Axel Oliva<sup>1\*</sup>, Jana Seiz<sup>1</sup>, Lena Günther<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg i.Br., Deutschland  
[axel.oliva@ise.fraunhofer.de](mailto:axel.oliva@ise.fraunhofer.de)

Im Rahmen des über das BMWi initialisierten Reallabors „Großwärmepumpen in Fernwärmennetzen – Installation, Betrieb, Monitoring und Systemeinbindung“ wird seit dem Jahr 2021 die Umsetzung von fernwärmetechnisch gekoppelten Großwärmepumpen an fünf Standorten wissenschaftlich begleitet. Im Jahr 2023 erfolgte die Inbetriebsetzung der ersten Anlage. Mittlerweile befinden sich vier der Anlagen in der messtechnisch begleiteten FuE-Inbetriebnahmephase.

Im Rahmen des Beitrages werden die fünf Standorte hinsichtlich des bestehenden aktuellen Anlagenportfolios dargestellt und die Herausforderungen für die Integration der Wärmepumpen in den Kraftwerksprozess herausgearbeitet. Basierend auf den Anforderungen an den jeweiligen Standorten werden die gewählten Spezifika der jeweils ausgeschriebenen Wärmepumpenlösung erläutert. Neben den planerischen Phasen wird insbesondere auf die relevanten genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen eingegangen und die Herausforderungen im Vergabe- und Umsetzungsprozess beleuchtet. Darüber hinaus werden die jeweils installierten Kältekreistechnischen Prozesse vergleichend gegenübergestellt. Mittels der wissenschaftlich aufbereiteten

Messdaten werden wesentliche Betriebscharakteristika, wie das Teillastprozessverhalten oder die Vorschaltketten bei einem Kaltstart aufgezeigt und erste Kennzahlen zum Einordnen der Anlagencharakteristik vermittelt.

## 6.05

### **Performance assessment of an oil-free heat pump system operated with natural refrigerant R290**

**Ahmet Çoksen<sup>1\*</sup>, Tatvakumar Bhandari<sup>1</sup>, Luis Eric Olmedo<sup>1</sup>, Thaddäus Hinterberger<sup>2</sup>  
Clemens Dankwerth<sup>3\*</sup>, Lukas Joos<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Pre-Development & Tech. & Innovation Management,  
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland

[Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com](mailto:Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com); [Tatvakumar.Bhandari@de.ebmpapst.com](mailto:Tatvakumar.Bhandari@de.ebmpapst.com);  
[luiseric.olmedo@de.ebmpapst.com](mailto:luiseric.olmedo@de.ebmpapst.com);

<sup>2</sup>ebm-papst Landshut GmbH & Co. KG, Heating Division, R&D Systems Engineering  
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland  
[thaddaeus.hinterberger@de.ebmpapst.com](mailto:thaddaeus.hinterberger@de.ebmpapst.com)

<sup>3</sup> Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Wärme- und Klätetechnik,  
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland  
[clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de](mailto:clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de); [lukas.joos@ise.fraunhofer.de](mailto:lukas.joos@ise.fraunhofer.de)

Homeowners and industries are increasingly looking for energy efficient, sustainable and environmentally friendly heating and cooling solutions. Oil-free operation of a heat-pump system based on a natural refrigerant has significant potential to meet those demands. In this study, the performance of such a system is investigated by both system simulation studies and experimental measurements. The latter are based on a novel ebm-papst's oil-free propane (R290) turbo compressor demonstrator. A dedicated heat-pump demonstrator is designed and built at Fraunhofer ISE to investigate the operation of the oil-free turbo compressor with propane refrigerant as a working fluid. The results of the measurement campaign and simulations related to overall system performance in a brine water heat pump demonstrator are shown. Such innovative compressor solutions can be applied to heat-pump and other HVAC systems to achieve higher system performance.

**Keywords:**

Refrigeration system; HVAC; Heat pump; Turbo Compressor; Oil-free; System performance; R290; Propane

## 6.06

### **Maximierung der Wärmepumpeneffizienz dank offener Schnittstellen**

#### **Eine experimentelle Fallstudie mit modellprädiktiven Reglern**

**Stephan Göbel<sup>1\*</sup>, Florian Will<sup>1</sup>, Phillip Stoffel<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  
[stephan.goebel@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:stephan.goebel@eonerc.rwth-aachen.de)

Der optimale Betrieb von Wärmepumpensystemen erfordert den Einsatz höherer Regelungsstrategien wie der modellprädiktiven Regelung (MPR). Fehlende Schnittstellen verhindern die Verbreitung von MPR in der Praxis

und erlauben damit lediglich konventionelle Regelungen wie Heizkurven, die das Gesamtpotenzial nicht vollständig ausschöpfen können.

Diese Arbeit zeigt das Potenzial von MPR für Wärmepumpensysteme in Abhängigkeit von Systemschnittstellen in einer experimentellen Fallstudie. Dabei werden zwei Systemschnittstellen analysiert: Erstens stellt der MPR die Vorlauftemperatur ein, während der interne Kältekreisregler die Verdichterdrehzahl regelt. Zweitens passt der MPR die Verdichterdrehzahl direkt an. Wir vergleichen beide MPR Strategien mit einem Heizkurvenregler mit Nachabsenkung.

Die Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss von Systemschnittstellen auf das maximale Potential im Wärmepumpenbetrieb. Beide MPR Strategien reduzieren den Energieverbrauch der Wärmepumpe um bis zu 20 %. Die Anpassung der Vorlauftemperatur durch den MPR führt zum geringsten Energieverbrauch, aber zu einer erhöhten Anzahl Verdichterstarts. Direkt verdichtergesteuerte Systeme erzielen vielversprechende Ergebnisse und können die Anzahl der Verdichterstarts erheblich reduzieren.

## 6.07

### **Steady-State-Detektion zur Beurteilung von Wärmepumpen:**

#### **Eine Analyse von Feldmessdaten**

**Silvan N. Bernal\*, Leon P. Brendel, Stefan Bertsch, Cordin Arpagaus**

OST – Ostscheizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme,  
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs SG, Schweiz  
[silvan.bernal@ost.ch](mailto:silvan.bernal@ost.ch)

In der Schweiz müssen bis 2050 etwa eine Million fossile Heizungsanlagen durch Wärmepumpen ersetzt werden [1]. Deshalb ist es wichtig, mögliche Effizienzverluste frühzeitig zu erkennen. Diesem Zweck dient das Projekt "Feldmessungen von Wärmepumpenanlagen" [2], das vom Institut für Energiesysteme der Fachhochschule OST im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt wird.

In der Schweiz müssen bis 2050 etwa eine Million fossile Heizungsanlagen durch Wärmepumpen ersetzt werden [1]. Deshalb ist es wichtig, mögliche Effizienzverluste frühzeitig zu erkennen. Diesem Zweck dient das Projekt "Feldmessungen von Wärmepumpenanlagen" [2], das vom Institut für Energiesysteme der Fachhochschule OST im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt wird.

Eine der Schwierigkeiten bei der Beurteilung der Effizienz, ist die Anlage selbst. Der transiente Betrieb erschwert die Einordnung der gemessenen Effizienz. In der Forschung werden dazu oft aufwändige stationäre Messungen in Klimakammern durchgeführt. Diese sind zeitaufwändig und kostenintensiv.

In dieser Studie wird eine Möglichkeit präsentiert, um anhand von transienten Messdaten nachträglich stationäre Betriebszustände zu ermitteln. Um die stationären Messwerte zu ermitteln, werden hochauflösende Messdaten aus den Feldmessungen verwendet. Die Messgrößen wurden mit einer Abtastrate von 100 ms erfasst und in Form von 10 Sekunden-Mittelwerten gespeichert.

Die Feldmessungen umfassen insgesamt 28 Wärmepumpen im Heizleistungsbereich von 4.5 bis 110 kW:

- 5 Luft-Wasser-Wärmepumpen mit fester Drehzahl,
- 5 Erdwärmesonden-Wärmepumpen mit fester Drehzahl,
- 10 Luft-Wasser-Wärmepumpen mit variabler Drehzahl, sowie
- 8 Erdwärmesonden-Wärmepumpen mit variabler Drehzahl.

Mit der angewandten Methode konnten für 85% der Anlagen stationäre Messdaten ermittelt werden. Insgesamt konnten aus 110'000 Heizbetriebsstunden ca. 17'000 Stunden Steady State Daten gewonnen werden. Bei allen Anlagen zeigt der Vergleich COP vs. Temperaturhub dass die ermittelten Daten plausibel sind.

Anhand des angewendeten Vorgehens besteht die Möglichkeit aus großen Datenmengen präzis, belastbare Messwerte zu extrahieren die zur Überwachung und Beurteilung der Wärmepumpe verwendet werden können.

Aufgrund der guten Ergebnisse stellt sich die Frage, ob es nicht teilweise sinnvoller wäre, nur Steady State Daten zu speichern. Das würde die Datenmenge von Messdaten um ein Vielfaches reduzieren.

**Stichwörter:**

Feldmessungen, Wärmepumpen, Taktbetrieb, Energieeffizienz

**Literatur:**

- [1] Bundesamt für Energie (2020). Energieperspektiven 2050+: Kurzbericht, 26. November 2020, Bern,  
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHROcHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmhvYWQvMTAzMjM=.html>
- [2] Bernal, S., Berthold, M., Bertsch, S., Eschmann, M.: Feldmessungen von Wärmepumpen-Anlagen Heizsaison 2022/21, Jahresbericht 2023, im Auftrag von EnergieSchweiz, 27. November 2023,  
[https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3\\_forschung\\_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige\\_wichtige\\_dokumente/2023\\_jahresbericht\\_feldmessungen.pdf](https://www.ost.ch/fileadmin/dateiliste/3_forschung_dienstleistung/institute/ies/wpz/sonstige_wichtige_dokumente/2023_jahresbericht_feldmessungen.pdf)

**6.08**

## **Wärmepumpen für bestehende Mehrfamilienhäuser**

### **Multikriterielle Bewertung unterschiedlicher Optionen**

**Björn Nienborg\*, Marek Miara, Peter Engelmann**

Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2, 79110, Freiburg, Deutschland

[bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de](mailto:bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de)

Die Umstellung auf Wärmepumpen stellt den zentralen Lösungsansatz zur schnellen Dekarbonisierung der Gebäudewärme dar. Im Einfamilienhausbereich haben die Anlagen ihre Eignung bereits unter Beweis gestellt und sind dort im Neubau bereits die meistgenutzte Heizungstechnologie. Nun gilt es, auch für den Mehrfamilienhausbestand, der immerhin 40 % der Wohnfläche in Deutschland ausmacht, tragfähige und skalierbare Wärmepumpen-Lösungen zu identifizieren. Herausfordernd ist dabei neben den Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit auch die Vielzahl an bestehenden Systemkonfigurationen und Gebäudearten (Zentral- oder Gasetagenheizung, Art der Brauchwassererwärmung, Baualter, Sanierungszustand, ...).

Anhand von realen Beispielgebäuden, welche in Zusammenarbeit mit 5 Unternehmen der Wohnungswirtschaft aus deren Bestand als relevant definiert wurden und die Variantenvielzahl aufgreifen, werden im vorliegenden Beitrag unterschiedliche wärmepumpenbasierte Versorgungskonzepte gegeneinander bewertet. Dabei werden unterschiedliche Kriterien berücksichtigt, wie:

- Effizienz
- Platzbedarf (innen/außen)
- Installationsaufwand
- Aufwand im Betrieb
- Außenwirkung (optisch, akustisch)

Angesichts des beschleunigten Phase-Outs von konventionellen Kältemitteln wie R410A oder R407c sowie des abzusehenden weitgehenden Verbots neuerer Kältemittel mit persistenten Abbauprodukten (PFAS) fokussieren sich die Arbeiten auf Wärmepumpen mit dem natürlichen Kältemittel Propan, welches diesen Einschränkungen nicht unterliegt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpen, Mehrfamilienhäuser, Propan, Effizienz, Platzbedarf

## 6.09

# Wärmepumpen-Speicher-System zur Dampfbereitstellung – Auslegung des Hochtemperatur-Speichers

Felix Oestreich<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik,  
Reichenhainer Straße 70, 09126, Chemnitz, Deutschland  
[thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de)

Im Rahmen des Verbundvorhabens Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik – KETEC [1], [2] wurde ein neuartiges Wärmepumpen-Speicher-Konzept [3], [4] zur emissionsarmen Bereitstellung von Prozesswärme bzw. – Wasserdampf (über 110 °C) erarbeitet [3]. Als Speicher kommt unter anderem ein Hochtemperatur-Speicher (HT-SP) zum Einsatz. Der vorliegende Artikel diskutiert Anforderungen und vergleicht zwei Konzepte zur Auswahl und konstruktiven Gestaltung des Speichermaterials. Ziel ist die Realisierung einer hohen thermischen Speicherkapazität mit Ausnutzung des Phasenwechsels über eine lange Zeitspanne während der Be- und Entladung. Die Konstruktion sollte ein niedriges technisches Risiko aufweisen und wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein. Das Konzept A sieht den Einsatz von makroverkapselten Phasenwechselmaterial (PCM) als Speichermedium vor. Im genannten Temperaturbereich liegen jedoch nur wenige geeignete Stoffe vor. Ein aussichtsreicher Kandidat ist hochverdichtetes Polyethylen (HD-PE). Dessen Einsatz weist u. a. aufgrund der hohen thermischen Volumenausdehnung technische Risiken (z. B. Minderung der Wärmeübertragung, mechanische Spannungen) auf. Deshalb schlagen die Autoren im alternativen Konzept B den Einsatz von Rundstäben z. B. aus Stahl vor. Für die Untersuchungen beider Konzepte kommt Ansys Mechanical zum Einsatz. Im Ergebnis präsentiert dieser Artikel die thermische, mechanische und wirtschaftliche Bewertung für das Konzept A und B. Der Beitrag liefert abschließend erste Auslegungsempfehlungen.

## Stichwörter

Speicher, Konstruktion, PCM, Stahl, Eisen, Wärmeübertragung, Dampf

- [1] Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: [www.ketec.online](http://www.ketec.online). Internetseite zum Verbundvorhaben 03.02.2024.
- [2] Urbaneck, T.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.: KETEC Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik - Entwicklung, Ziele und fachliche Ausrichtung. Kälte-, Luft- und Klimatechnik Hüthig 59. Jg. (2023) Heft 1-2 S. 38-41. – ISSN 1865-5432
- [3] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 10 2023 117 382.0, Patentanmeldung vom 30.06.2022
- [4] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 20 2023 103 656, Gebrauchsmusteranmeldung vom 30.06.2022, Eintragung am 22.08.2023

## 6.10

# Wärmepumpen-Speicher-System zur Dampfbereitstellung – Vorstellung des Konzeptes

Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>, Haochen Wang<sup>1</sup>, Felix Oestreich<sup>1</sup>, Dimitri Nefodov<sup>1</sup>

Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik,  
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland  
[thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de](mailto:thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de)

Im Teilprojekt 10 des Verbundvorhabens Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik (KETEC) [1], [2] werden Speichersysteme entwickelt, die Heißwasser oder Wasserdampf mit Temperaturen über 110 °C bereitstellen können. Dieser Temperaturbereich ist für die Versorgung von klassischen Fernwärme- und die Prozesswärmesystemen interessant.

Ein schwankender Dampfverbrauch hat schon frühzeitig den Bau von Dampfspeichern motiviert [3]. Neue Arbeiten kombinieren Dampfspeicher mit Phasenwechselmaterial. *Nefodov et al.* [4] analysierten die Konstruktionen und Betriebsweisen dieser hybriden Speicher. Im Zusammenhang mit der ProzesswärmeverSORGUNG müssen Hochtemperatur- oder Industriewärmepumpen genannt werden, welche *Appagus* [5] schon frühzeitig thematisierte. Neuere Arbeiten [6] weisen einen hohen Wärmebedarf in den verschiedenen Industriezweigen nach. Diese Quelle liefert auch eine sehr gute Übersicht zu verfügbaren Hochtemperatur- bzw. Industriewärmepumpen. Ein signifikanter Einsatz dieser kann jedoch nicht beobachtet werden, was auf verschiedene Sachverhalte zurückgeführt werden kann.

Dieser Beitrag stellt ein Wärmepumpen-Speicher-System [7], [8] bzw. verschiedene Ausführungsmöglichkeiten vor. Mit den neuen Ansätzen Verbesserungen ggü. dem Stand der Technik angestrebt. Die Ansätze lassen eine gute Abstimmung der Be- und Entladeleistung bzw. der Betriebsführung sowie eine Steigerung der spezifischen Speicherkapazität zu. Dies erfordert aber eine Optimierung mit mehreren Kriterien, wobei auch wirtschaftliche und fertigungstechnische Aspekt zu beachten sind. Alle Komponenten können für hohe Leistungen bzw. Wärmeströme gefertigt werden. Damit erscheint eine großtechnische und kostengünstige Speicherung und damit eine Steigerung der Flexibilität bei der WärmeverSORGUNG und Stromverwendung möglich zu sein.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Speicher, Dampf, Versorgung, Anlage, Verfahren

- [1] Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: [www.ketec.online](http://www.ketec.online). Internetseite zum Verbundvorhaben 03.02.2024.
- [2] Urbaneck, T.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.: KETEC Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik - Entwicklung, Ziele und fachliche Ausrichtung. *ki - Kälte-, Luft- und Klimatechnik* Hüthig 59. Jg. (2023) Heft 1-2 S. 38-41. – ISSN 1865-5432
- [3] Goldstern, W.: Dampfspeicheranlagen - Bau, Berechnung und Betrieb industrieller Wärmespeicher. Berlin: Springer 1963.
- [4] Nefodov, D.; Wang, H.; Richter, M.; Berlin, R.; Urbaneck, T.: Simulationsstudie für die Dampfversorgung mit Wärmepumpen und Speichern. *EuroHeat&Power*, VDE Verlag 52. Jg. (2023), Heft 10, S. 27-35. – ISSN 0949-166X
- [5] Arpagaus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen Marktübersicht; Stand der Technik und Anwendungspotenziale. VDE Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, 2019. – ISBN 978-3-8007-4550-0.
- [6] Henninger, S.; Teles de Oliveira, H.; Benkert, S.; Schöttl, P.: Hochtemperatur-Wärmepumpen in Deutschland – Technologie- und Marktübersicht. *ki – Kälte-, Luft- und Klimatechnik* Hüthig 59. Jg. (2023) Heft 4 S. 48-54. – ISSN 1865-5432
- [7] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 10 2023 117 382.0, Patentanmeldung vom 30.06.2022
- [8] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 20 2023 103 656, Gebrauchsmusteranmeldung vom 30.06.2022, Eintragung am 22.08.2023

6.11

## Dampferzeugende HTWP mit Kohlenwasserstoffen

### Vermessung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP) mit n-Butan und n-Pentan

**Sebastian Benkert<sup>1\*</sup>, Hannah Teles de Oliveira<sup>1</sup>, Ursula Wittstadt<sup>1</sup>, Lukas Joos<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>,  
Thorsten Klahm<sup>2</sup>, David Corteleazzi<sup>3</sup>, Marco Daniel Jensen<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Wärme- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland

[sebastian.benkert@ise.fraunhofer.de](mailto:sebastian.benkert@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> GESMEX Exchangers GmbH, Werkstraße 226, 19061 Schwerin, Germany  
[Thorsten.Klahm@gesmex.com](mailto:Thorsten.Klahm@gesmex.com)

<sup>3</sup> Johnson Controls Systems & Service GmbH, Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim, Germany

<sup>4</sup> Johnson Controls Denmark, Christian X's Vej 201, 8570 Højbjerg, Denmark

Die Dekarbonisierung der Prozesswärme in vielen Industrieanwendungen erfordert innovative Lösungen. Eine vielversprechende Möglichkeit besteht in der Verwendung von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) in Verbindung mit Strom aus erneuerbaren Quellen. Allerdings sind derzeit nur wenige HTWPs auf dem Markt verfügbar, die speziell für den Betrieb im Temperaturbereich über 130°C ausgelegt sind und darüber hinaus natürliche Kältemittel verwenden.

Um diese Lücke zu schließen, wurde ein Teststand entwickelt, um eine HTWP mit den Kältemitteln n-Butan (R600) und n-Pantan (R601) zu vermessen. Dieser Teststand ermöglicht Dampferzeugung bis 165°C in einem Plate-Shell Wärmeübertrager. Alternativ kann heißes Druckwasser und Thermal-Öl erhitzt werden. Die thermische Kapazität soll, abhängig von den jeweiligen Betriebspunkten über 100 kWth liegen. Der Teststand bildet damit Bedingungen ab, welche beispielsweise in der Papier- oder Chemieindustrie vorkommen, und mit solch einer Anlage dekarbonisiert werden können.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der Darstellung der Messergebnisse hinsichtlich des Betriebsbereiches und der Effizienz mit n-Butan und deren Abgleich mit einem dynamischen Simulationsmodell. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf die Verwendung von n-Pantan als Kältemittel gegeben und das angewandte Sicherheitskonzept der Anlage dargestellt.

**Stichwörter:**

HTWP, n-Pantan, n-Butan, Dampferzeugung

## 6.12

# Inbetriebnahme einer reversiblen Hochtemperatur-Wärmepumpe für geothermische KWK-Anlagen

Florian Kaufmann<sup>1\*</sup>, Jannik von Zabienski<sup>1</sup>,  
Christopher Schifflechner<sup>1</sup>, Hartmut Sliethoff<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme,  
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland  
[florian.k.kaufmann@tum.de](mailto:florian.k.kaufmann@tum.de)

Zuletzt haben reversible Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) aufgrund ihrer Fähigkeit, flexibel Wärme oder Strom zu liefern, in Wissenschaft und Industrie an Interesse gewonnen. Dabei wurde geothermischen Anwendungen bisher eher wenig Aufmerksamkeit geschenkt. In geothermischen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) ermöglichen reversible HTWP die Bereitstellung von Wärme an ein Fernwärmennetz (FWN) in Spitzenlastzeiten sowie die Erzeugung von Strom in Zeiten mit geringem Wärmebedarf, wobei sie reversibel also Organic Rankine Cycle (ORC) arbeiten. Diese Arbeit stellt die experimentelle Charakterisierung eines reversiblen HTWP Prüfstandes vor, der kürzlich in Betrieb genommen wurde. Der Prüfstand wird von einem 200 kW Warmwasser-Heizkreislauf als Wärmequelle versorgt und verwendet einen voll-reversiblen 20 kW Schraubenverdichter. Ein geschlossener Zwischenkühlkreislauf ermöglicht die Simulation eines FWN mit unterschiedlichen Temperaturniveaus und Massenströmen während des HTHP-Betriebs. Die Wärmequellentemperatur für den ORC-Betrieb liegt in einem Bereich zwischen 90°C und 140°C. Umgekehrt reicht die Temperatur der Wärmesenke im HTWP-Betrieb von 80°C bis 120°C, wobei die Temperatur der Wärmequelle zwischen 40°C und 90°C variiert wird. Dieser Beitrag gibt Einblicke in den ersten Betrieb der Versuchsanlage, kommentiert betriebliche Herausforderungen und beurteilt die technische Leistungsfähigkeit beider Kreisläufe sowie mögliche Verbesserungen der Konstruktion.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, reversibel, Organic Rankine Cycle, Geothermie

6.13

## Industriewärmepumpe zur 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)

Prozesswärme in der Industrie trägt zu einem maßgeblichen Teil zu den heutigen CO<sub>2</sub> Emissionen bei und bietet damit ein ebenso großes Potential zur Dekarbonisierung. Grüner Wasserstoff wird in der Zukunft wahrscheinlich nicht in dem Maße bestehen, um die gesamte Prozesswärme abzudecken. Für Temperaturen von unter 200°C stellen Wärmepumpen eine effiziente Möglichkeit dar, grünen Strom in Kombination mit industrieller Abwärme oder Umweltwärme in hochwertige Prozesswärme umzuwandeln. Dampf ist hierbei das meistverbreitete Wärmetransfermedium.

Es werden aktuelle Projekte im Bereich der Dampferzeugung mit der Wärmepumpe ThermBooster vorgestellt. Dazu werden erste Betriebserfahrungen und Daten aus den Industriebetrieben, sowie Messergebnisse aus den durchgeführten Prüfstandsuntersuchungen gezeigt. Als Industriezweige stehen Anwendungen in der Papier-, Tabak- und Metallindustrie im Fokus. Der Temperaturbereich des erzeugten Dampfes liegt im Bereich zwischen 120°C und 160°C bei Quellentemperaturen zwischen 40°C und 90°C. Es werden sowohl einstufige als auch Kaskadensystem vorgestellt.

**Stichwörter:**

Industriewärmepumpe, Hochtemperaturwärmepumpe, Dampf

6.14

## GreenSteam: Regenerative Dampferzeugung

### Anlagenkonzept mit R718-Drehkolben- und Turboverdichter

Moritz Enge<sup>1\*</sup>, Thomas Werner Mösch<sup>1</sup>, Konrad Klotsche<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>

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

Die Dekarbonisierung der Industrie bietet Umweltschutz und langfristige Kosteneinsparungen. Eine Möglichkeit dazu ist die effiziente Bereitstellung von Wasserdampf, der in der Industrie insbesondere zur Trocknung von verschiedenen Stoffen und Produkten verwendet wird. Der Fokus sollte dabei auf Prozessen mit Wärmerückgewinnung, z. B. mittels Wärmepumpen, und im Hinblick auf die novellierte EU-F-Gase-Verordnung 2024/573, auf Prozessen mit natürlichen Arbeitsfluiden (z. B. CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>2x+2</sub>, H<sub>2</sub>O) liegen. Im Rahmen des Projektes "GreenSteam" wird die effiziente Bereitstellung von Wasserdampf (R718) für industrielle Trocknungsprozesse mittels zweistufiger mechanischer Dampfverdichtung (Drehkolben- und radialer Turboverdichter) und Wärmepumpe untersucht. Der Fokus dieser Veröffentlichung liegt dabei auf dem Anlagenmodell, welches in Modelica implementiert wurde und dazu genutzt wird, das Anlagenbetriebskennfeld des Dampferzeugers vorherzusagen. Das berechnete Kennfeld zeigt, dass die Anlage theoretisch einen COP von bis zu 4,5 erreicht, und hierbei 138 kW<sub>el</sub> benötigt, um dem Trocknungsgut eine Tonne H<sub>2</sub>O zu entziehen.

**Stichwörter:**

R718, Wärmepumpe, Trocknungsprozesse, Drehkolben, Turboverdichter

**6.15**

## **Experimentelle Untersuchung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe**

### **Vergleich verschiedener Verschaltungen**

**Hannah Teles de Oliveira<sup>1\*</sup>, Sebastian Benkert<sup>1</sup>, Dr. Ursula Wittstadt<sup>1</sup>, Dr. Lena Schnabel<sup>1</sup>  
Prof. Dr. Stephan Kabelac<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Wärme- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland  
[hannah.teles.de.oliveira@ise.fraunhofer.de](mailto:hannah.teles.de.oliveira@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland  
[kabelac@ift.uni-hannover.de](mailto:kabelac@ift.uni-hannover.de)

Eine Möglichkeit industrielle Prozesswärme und Fernwärme zu dekarbonisieren ist die Elektrifizierung. Der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) ist dabei besonders energieeffizient, da mehr Nutzwärme zur Verfügung gestellt wird, als elektrische Energie dem System zugeführt wird. Die Effizienz von HTWP kann gerade bei großen Temperaturhüben durch Verschaltungen weiter gesteigert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes Ketec wurde ein Lernprüfstand aufgebaut, der mehrere Verschaltungen in einem Aufbau vereint. Zusätzlich zu einem einfachen Kreislauf, einem zweistufigen Kreislauf mit offenem oder geschlossenem Economizer und einer parallelen Verdichtung kann ein interner Wärmeübertrager und eine weitere Quelle mit unterschiedlicher Temperatur zugeschaltet werden. Als Kältemittel wurde n-Butan verwendet, sodass die angestrebte maximale Senktemperatur bei 140 °C liegt. Die thermische Leistung liegt bei maximal 40 kW.

Bisher wurde schon in mehreren Studien der theoretische Vergleich der verschiedenen Verschaltungen untersucht. In diesem Beitrag wird ein Vergleich auf Grundlage der Messergebnisse vorgestellt. Hauptziel ist es, den Einfluss der einzelnen Komponenten auf das gesamte System herauszuarbeiten.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, n-Butan, Verschaltungen, Energieeffizienz, Teststand

**6.16**

## **Innovatives Energiekonzept mit Minenspeicher**

### **-Integration von Abwärme in ein bestehendes Fernwärmennetz unter Nutzung eines saisonalen Minenwärmespeichers-**

**Philip Hofmann<sup>1\*</sup>, Simon Höckenkamp<sup>1</sup>, Matthias Utri<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG,  
Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum  
[philip.hofmann@ieg.fraunhofer.de](mailto:philip.hofmann@ieg.fraunhofer.de)  
[simon.hoeckenkamp@ieg.fraunhofer.de](mailto:simon.hoeckenkamp@ieg.fraunhofer.de)  
[matthias.utri@ieg.fraunhofer.de](mailto:matthias.utri@ieg.fraunhofer.de)

Vor dem Hintergrund der Dekarbonisierung im Wärmesektor gewinnt der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen und mechanischen Dampfkompressoren in der Fern- und Prozesswärmeverzeugung an Bedeutung. Vor diesem Hintergrund betreibt das Fraunhofer IEG am Standort Bochum ein Reallabor, das ein Versuchsfeld für

Hochtemperatur-Wärmepumpen und Dampfkompressoren über einen Untergrundwärmespeicher an ein Fernwärmennetz in Bochum koppelt.

Der vorliegende Beitrag stellt das Energiekonzept des Standorts vor. Im Fokus stehen dabei die effiziente Nutzung bzw. Speicherung von (Ab-)Wärme aus Versuchsständen sowie einer Solarthermieanlage in einem Untergrundspeicher. Durch Anhebung des Temperaturniveaus in einer Hochtemperatur-Wärmepumpenanlage wird die Wärme für das Fernwärmennetz aufbereitet. Für den Fall, dass auf der Quellenseite ein Überangebot an Wärme besteht, steht ein teilgefluteter und stillgelegter Kleinstollen aus den 1950er-Jahren zur Verfügung, in dem die Wärme zwischengespeichert werden kann und der auch in seiner Funktion als saisonaler Wärmespeicher untersucht wird. Dabei wird das Wärmeangebot im Sommer in der Mine eingespeichert, zur Heizperiode im Winter wieder ausgespeichert und durch Einsatz einer zweistufigen Hochtemperatur-Wärmepumpenanlage mit einer Vorlauftemperatur von bis zu 120 °C in das Fernwärmennetz gespeist. Herausforderungen werden durch berg- und wasserrechtliche Restriktionen und der Limitierung des Temperaturbereiches der Mine, sowie durch das hohe Temperaturniveau der Abwärme dargestellt. Es soll eine flexible und energetisch optimierte Ein- und Ausspeicherstrategie entwickelt und vorgestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Betriebsweise der (Ausspeicher-)Wärmepumpe in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur des Fernwärmennetzes und der Wassertemperatur in der Mine.

Ziel des Beitrags ist es, für die Relevanz von geothermalen Speichern zur Optimierung der Effizienz und Flexibilität in komplexen thermischen Systemen, nicht nur im Forschungsbetrieb, zu sensibilisieren. Minenspeicher stellen in Kombination mit anfallender Abwärme und zeitlich entkoppelter Wärmenachfrage einen vielversprechenden Sonderfall der geothermalen Speicher dar, die jedoch in vielen (Industrie-)Regionen in Deutschland in Zukunft realisierbar sind.

**Stichwörter:** Dekarbonisierung, Hochtemperatur-Wärmepumpe, Fernwärme, Effizienzsteigerung, geothermale Speicher, flexible Wärmespeicher, Betriebsstrategie

## 6.17

### Solare kalte Nahwärme mit zentraler Wärmepumpe

Peer Huber<sup>1\*</sup>, Stefanie Lott<sup>1</sup>, Harald Drück<sup>1</sup>, Bernd Hafner<sup>2</sup>, Ralf Dott<sup>2</sup>, Dominik Herden<sup>3\*</sup>, Christiane Thomas<sup>3</sup>, Yixia Xu<sup>3</sup>, Johannes Brunder<sup>1</sup>, Florian Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[peer.huber@igte.uni-stuttgart.de](mailto:peer.huber@igte.uni-stuttgart.de)

<sup>2</sup> Viessmann Climate Solutions SE, Viessmannstraße 1, 35108 Allendorf (Eder)

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

Solare kalte Nahwärmesysteme dienen der Deckung von Wärme- und Kältebedarfen von Verbrauchern und bestehen häufig aus verschiedenen Wärmequellen, einem thermischen Energiespeicher, Wärmepumpen und dem kalten Nahwärmennetz zur Verteilung der Wärme bzw. Kälte. Die Besonderheit einiger dieser Systeme ist die Verteilung und Nutzung von Wärmequellen mit Temperaturniveaus, die teilweise unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser liegen. Dies bedingt in bisherigen konventionellen kalten Nahwärmesystemen die Verwendung eines Wasser-Frostschutzmittel-Gemisches als Wärmeträgermedium. Jedoch ist der Einsatz von Frostschutzmitteln mit ökologischen und ökonomischen Nachteilen verbunden. Das Forschungsprojekt „SolKaN2.0“ hat daher das Ziel, eine zweite Generation solar unterstützter kalter Nahwärmesysteme mit Wasser als Wärmeträgermedium zu entwickeln.

Das „SolKaN2.0-Versorgungskonzept“ beinhaltet neben Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequellen und einem Eisspeicher als saisonalen thermischen Energiespeicher auch eine zentral zwischen den Luft-Sole-Kollektoren bzw.

dem Eisspeicher und dem kalten Nahwärmennetz positionierte Wärmepumpe. Die zentrale Wärmepumpe zeichnet sich in diesen Systemen durch einen Nutztemperaturbereich von ca. +10 °C bis +15 °C für die Temperaturen am Kondensator beim Heizbetrieb und +6 °C bis +10 °C für die Temperaturen am Verdampfer beim Kühlbetrieb aus. Dieser Temperaturbereich wird von den derzeitigen Wärmepumpentechnologien nur unzureichend abgedeckt, da die vorhandenen Komponenten in der Regel einen Mindestdruckunterschied zwischen dem Verflüssiger und dem Verdampfer erfordern, um einen sicheren und stabilen Betrieb zu gewährleisten.

Das Ziel dieses Beitrags ist es, das innovative SolKaN2.0-Versorgungskonzept und die geplanten Betriebsarten zur Deckung der Heiz- und Kühlbedarfe vorzustellen. Es werden erste Simulationsergebnisse eines TRNSYS-Modells gezeigt und mit Simulationsergebnissen eines konventionellen kalten Nahwärmesystems mit einem Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch als Wärmeträgermedium verglichen. Zudem werden verschiedene natürliche Kältemittel in geeigneten Kreislaufkonfigurationen der Wärmepumpe simulativ untersucht. Das Ziel der Analyse ist die Ermittlung eines effizienten Kältemittelkreislaufs und die Auswahl des am besten geeigneten Kältemittels für die zentrale Wärmepumpe.

#### Stichwörter

Kalte Nahwärmesysteme, Kalte Nahwärmennetze, Frostschutzmittel, Luft-Sole-Kollektoren, Eisspeicher, Wärmepumpen, TRNSYS, natürliche Kältemittel, Effizienz

#### Danksagung

Das Forschungsprojekt SolKaN2.0 „Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen **03EN6033A/B/C** gefördert. Die Autorinnen und die Autoren danken für diese Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags.

## 6.18

# Wärmepumpe mit integrierten Latentwärmespeichern für Raumwärme und Warmwasser

## Anlagenkonzept und Systemvergleich

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)

Aufbauend auf einem neuartigen Konzept eines Wärmepumpensystems mit integriertem Latentwärmespeicher für die Raumheizung soll ein Wärmepumpenheizgerät entwickelt werden, in dem Latentwärmespeicher auf unterschiedlichen Temperaturniveaus für die Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser eingesetzt werden. Das grundlegende Konzept sieht eine kaskadierte Einbindung des Latentwärmespeichers in den Wärmepumpenkreislauf vor, so dass eine Erhöhung des Druck- und Temperaturhubs des Wärmepumpenkreislaufs während der Speicherladung verbunden mit einer entsprechenden Verringerung der Arbeitszahl vermieden wird.

Das Wärmepumpen-Latentwärmespeicher-System soll nun um die Funktion der Warmwasserbereitung erweitert werden, um beide Funktionen für die Wärmeversorgung abzudecken. Die Entwicklung zielt auf den Einsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern und kleineren Wohnanlagen mit mehreren Einheiten.

Der Einsatz von Latentwärmespeichern in Wärmepumpensystemen bietet eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu herkömmlichen Wärmeträger-gefüllten Wärmespeichern:

- Da die Wärmeaufnahme und -abgabe während des Phasenwechsels des Speichermaterials bei annähernd konstantem Temperaturniveau erfolgt, ist eine besonders effiziente Kopplung mit der Wärmepumpe möglich, deren interner Kreislauf ebenfalls durch konstante Temperaturniveaus bei der Verdampfung und Kondensation des Kältemittels bestimmt wird.

- Das System enthält zwei Latentwärmespeicher, einen auf dem Temperaturniveau des zu versorgenden Heizkreises und einen zweiten auf dem Temperaturniveau der Brauchwarmwassers. Die Brauchwarmwasserbereitung erfolgt zweistufig durch seriellen Wärmeentzug aus den beiden Wärmespeichern. So muss die Wärmepumpe nur zur Beladung des zweiten Wärmespeichers mit erhöhter Kondensationstemperatur im Vergleich zur Heizanwendung betrieben werden.
- Das Temperaturniveau der Wärmespeicherung für die Brauchwarmwasserversorgung kann bei Verwendung eines Latentwärmespeichers passend zur gewünschten Zapftemperatur von etwa 45 °C gewählt werden. Eine Erwärmung des Speicherinhalts auf 60°C zur Vermeidung der Legionellenbildung, wie durch die einschlägigen technischen Regeln beim Einsatz von Brauchwasserbereitschaftsspeichern vorgegeben – ist nicht erforderlich, da die Wärmeentnahme aus dem Latentwärmespeicher im Durchlaufprinzip erfolgt. Entsprechend dem niedrigeren Temperaturniveau der Wärmespeicherung kann beim Einsatz von Latentwärmespeichern somit eine höhere Wärmepumpenarbeitszahl im Vergleich zum Einsatz von Brauchwasserbereitschaftsspeichern erreicht werden.

Das Anlagenkonzept und die Funktionsweise der Wärmepumpe mit integrierten Latentwärmespeichern für Raumwärme und Warmwasser werden vorgestellt und das System mit vergleichbaren, herkömmlichen Systemen nach aktuellem Stand der Technik verglichen.

## 6.19

# Kombinierte Schall- und Lebensdaueranalysen bei Luft-Wasser Wärmepumpen

Louis Allenbacher<sup>1\*</sup>, Mathias Drews<sup>1</sup>, Hannes Fugmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer ISE, Wärme- und Kältetechnik, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Deutschland  
[louis.allenbacher@ise.fraunhofer.de](mailto:louis.allenbacher@ise.fraunhofer.de)

Wärmepumpen sind eine der zentralen Lösungen für die klimaneutrale Gebäudeheizung und -klimatisierung. Neben Energieeffizienz rücken Fragen zur Geräuschentwicklung und Lebensdauer dieser Geräte zunehmend in den Fokus. Durch die systematische Bearbeitung beider Themen entstehen Synergien, die zu einer effizienten Beantwortung dieser richtungsweisenden Fragestellungen verhelfen können.

Um die Geräuschentwicklung von Wärmepumpen analysieren und verstehen zu können, ist die Kombination aus Schwingungsmessungen und FEM-Simulationen ein zentraler Ansatz. Auf diese Weise werden Geräte im Projekt „QUEEN-HP-MENESA“ hinsichtlich strukturdynamischer Wechselwirkungen untersucht, wobei das Zusammenspiel von Kompressor und Ventilator als Schwingungsverursacher und den nach außen gerichteten Bauteilen wie Verdampfer und Gehäuse von besonderer Bedeutung ist. Perspektivisch ermöglicht dieses Vorgehen Kältekreise mit verringriger Schallemission zu designen.

Neben akustischen Fragestellungen ermöglicht dieses Vorgehen auch Spannungswerte in Rohrleitungen abzuleiten und somit besonders belastete Stellen im Kältekreis zu identifizieren. Durch mechanische Beanspruchung und Korrosion können Leckagen an solchen Stellen auftreten, was, in Kombination mit brennbaren Kältemitteln, ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellt. Daher werden im Projekt „WP-Resilienz“ Lebensdauermodelle von Propan-Kältekreisen basierend auf simulativen Ansätzen und beschleunigten Alterungsexperimenten entwickelt, um Materialermüdung vorzubeugen.

Durch die Entwicklung leiser und langlebiger Geräte möchten wir in dem Vortrag unseren Beitrag zur Wärme wende präsentieren.

### Stichwörter:

Wärmepumpe, Schwingungen, Akustik, beschleunigte Alterung, Lebensdauermodelle

## 6.20

# Photovoltaisch-thermische Luft-Sole-Kollektoren als Quelle für Wärmepumpen

Dr. Bernd Hafner<sup>1\*</sup>, Ralf Dott<sup>1</sup>, Stefanie Lott<sup>2</sup>, Dr. Harald Drück<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Viessmann Climate Solutions SE, D-35107 Allendorf  
[drhf@viessmann.com](mailto:drhf@viessmann.com)

<sup>2</sup> Institut für Gebäudeenergetik, Thermodynamik und Energiespeicherung (IGTE)  
Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart  
[harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de](mailto:harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de)

Der Vortrag fasst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens Sol4City (FKZ 03ETW019 A/B) bezüglich der Untersuchungen an photovoltaisch-thermischen Luft-Sole-Kollektoren für den Einsatz in Wärmepumpenanlagen zusammen. Im Vorhaben wurde die Kombination der Kollektoren mit Latentspeichern (Eisspeicher) als Quellenanlage für Wärmepumpen zur Wärme- und Kälteversorgung von Quartieren untersucht. Eine typische Auslegung für ein Quartier mit 10 Wohngebäuden mit insgesamt über 100 Wohneinheiten und einem Wärmebedarf von ca. 500 MWh/a, einem kalten Wärmenetz und je einer Wärmepumpe pro Gebäude mit ca. 45 kW Heizleistung ist ein Eisspeicher mit 800 m<sup>3</sup> Wasservolumen und einer Kollektorfläche von etwa 150 m<sup>2</sup>.

Unterschiedliche Bauarten der photovoltaisch-thermischen Luft-Sole-Kollektoren wurden sowohl in Versuchsanlagen als auch auf dem Prüfstand des IGTE messtechnisch untersucht. Zu den Bauarten zählen „klassische“ PVT-Kollektoren, die einen direkten thermischen Kontakt zwischen Wärmeübertrager und PV-Modul haben und Varianten, die durch Vergrößerung der Wärmeübertragerfläche an die Umgebungsluft einen besonders hohen konvektiven Wärmetransport von der Außenluft an das Wärmeträgerfluid erwarten lassen. In Systemsimulationen wurden die Bauarten hinsichtlich ihrer Eignung wie z. B. Energieertrag und Systemarbeitszahl bewertet. Sowohl die untersuchten photovoltaisch-thermischen Luft-Sole-Kollektoren incl. ihrer charakteristischen Kennwerte als auch die aus Bewertung resultierenden Ergebnisse werden vorgestellt. Abschließend wird als Ergebnis der Untersuchungen eine Empfehlung für Bauart und Dimensionierung der Kollektoren gegeben.

### Stichwörter:

Photovoltaisch-Thermischer Luft-Sole-Kollektor, PVT, Quellenanlage, Eisspeicher, kalte Nahwärme

### Danksagung

Das Forschungsprojekt Sol4City „Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft““ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ETW019A/B gefördert.

Die Autoren und die Autorin danken für diese Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Beitrags.

## 6.21

# Vermessung eines R290 Wärmepumpen-Speicherkonzepts

Kevin Diewald<sup>1\*</sup>, Dr.-Ing. Hannes Fugmann<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Lena Schnabel<sup>1</sup>, Björn Nienborg<sup>1</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Christiane Thomas<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> TU Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,  
Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland

Durch die F-Gas Verordnung und das Ziel der Bundesregierung die Energiewende auch für Gebäude voranzutreiben, rücken Wärmepumpen mit R290 (Propan) als Kältemittel in den Fokus. Im Neubau ist die Wärmepumpe bereits der präferierte Wärmeerzeuger. Gleches gilt es auch im Gebäudebestand bzw. in der Sanierung zu erreichen. Hierbei rücken vor allem Gebäude im (vor-)urbanen Raum (Reihenhäuser) ins Blickfeld. Ein Einsatz einer Luft/Wasser Wärmepumpe ist bei diesen Gebäuden aufgrund der oftmals dichten Besiedelung und der ggf. einzuhaltenden Schallrestriktionen nicht immer möglich. Aus diesem Grund beschäftigt sich das Fraunhofer ISE im Projekt HPPVT4.0 mit der Kombination von Wärmepumpen und PVT-Kollektoren als Wärmequelle.

Fokus dieses Beitrags liegt dabei auf dem Wärmepumpen-Speicher-Konzept, bei dem der Kondensator im thermischen Speicher integriert ist. Idee hinter diesem Konzept ist die parallele Heizwärme- und Brauchwasserbereitstellung. Hierfür wurde ein Simulationsmodell in Dymola mit der objektorientierten Modelliersprache Modelica aufgebaut, um den Kondensator im Speicher zu bewerten. Bewertungsgrößen waren die erreichbaren Speicherkopftemperaturen, der COP und die Füllmenge, da das Kältemittel R290 verwendet wird. Für die Validierung des Simulationsmodells wurde ein Prototyp gebaut und am Fraunhofer ISE vermessen. Die Messungen zeigen unter anderem den COP, die erreichbaren Speicherkopftemperaturen und werden mit den Ergebnissen aus dem Simulationsmodell verglichen. Im weiteren Projektverlauf soll das entwickelte Konzept mit PVT-Kollektoren und Eisspeicher in ein Zweifamilienhaus eingebaut und im Praxistest evaluiert werden.

**Schlüsselwörter:**

Propan, Wärmepumpen, Kältemittel, Füllmengenreduzierung, thermischer Speicher, Direktkondensation, Modellierung

## 6.22

# Entwicklung Luft-Luft Wärmepumpe integriert in Gebäudefassade

Dipl.-Ing. A. Tzscheutschler<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Karl Steinjan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Institut für Luft und Kältetechnik gGmbH, Hauptbereich Kälte- und Wärmepumpentechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland  
[Karl.Steinjan@ilkdresden.de](mailto:Karl.Steinjan@ilkdresden.de)

Aktuelle und zukünftige Gebäude in Deutschland haben auf Grund der weltweiten Klimaerwärmung und der im Zuge der Energiewende beschlossenen, notwendigen Bauvorschriften und der Isolierung nur noch einen geringen Heizenergiebedarf. Dafür nimmt der Bedarf an Klimatisierung zu, denn immer mehr und längere Hitzeperioden sind jährlich zu verzeichnen. Passive Kühlung durch Verschattung des Baukörpers und andere bauliche Maßnahmen sind gewünscht, reichen aber meist nicht aus, sodass die Anwendung von aktiver Kühlung notwendig ist.

Das kann nur eine Wärmepumpe. Die geringen erforderlichen Leistungen ermöglichen erstmals eine kompakte Bauweise der Wärmepumpe, die als Luft-Luft-Wärmepumpe unauffällig im Baukörper unter einem Fenster in der Gebäudeaußenwand platziert werden könnte.

Die Idee des Projektes war deshalb die Entwicklung einer kompakten Luft-Luft Wärmepumpe als Monoblockgerät mit Heiz- und Kühlfunktion, die in ein neu entwickeltes Fassadenelement nahtlos integriert wird. Da die sehr dichten Gebäudehüllen die Be- und Entlüftung der Innenräume erfordern, wurden außerdem Möglichkeiten der Integration der Lüftungstechnik in die Wärmepumpe untersucht.

Die Wärmepumpe sollte mit weniger als 150 g R290 als Kältemittel Räume bis ca. 30 m<sup>2</sup> beheizen und klimatisieren. Die geringe Füllmenge ermöglicht, auf aufwändige Sicherheitsmaßnahmen zu verzichten.

Mehrere dezentrale, kleine Wärmepumpen können beliebig vernetzt und betrieben werden und könnten zentrale Heizanlagen/Klimaanlagen/Lüftungsanlagen im Grunde vollständig ersetzen.

Gemeinsam mit zwei Industriepartnern, der Firma ratiotherm, einem bekannten Wärmepumpenhersteller aus Dollnstein im Altmühltafel und der Firma Moser, einem Fenster- und Fassadenbauer aus Haslach im Schwarzwald wurde nach Lösungen gesucht.

Im Rahmen eines geförderten Projektes wurde zusammen mit den Projektpartnern ein Funktionsmuster ausgelegt, gebaut, in ein speziell für den Einsatz entwickeltes Fassadenelement integriert und vermessen. Es wird über die Herausforderung der kompakten Bauweise, die Beschaffung der Bauteile für den Prototypen und Schwierigkeiten der Entwicklung berichtet. Auch erste Messergebnisse des Prototypens werden vorgestellt.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Klimaanlage, natürliche Kältemittel, Propan, Fassade