



---

# Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2011

Aachen

16. – 18. November 2011

## Kurzfassungen



### **Stadt Aachen - Eurogress Aachen**

Monsheimsallee 48  
52062 Aachen  
T. +49 (0) 241 9131-0  
E. [info@eurogress-aachen.de](mailto:info@eurogress-aachen.de)  
H. [www.eurogress-aachen.de](http://www.eurogress-aachen.de)

### Veranstalter

**Deutscher Kälte- und  
Klimatechnischer Verein e.V.**  
Striehlstrasse 11, 30159 Hannover  
T: +49 (0) 511 8970 814  
F: +49 (0) 511 8970 815  
E: [info@dkv.org](mailto:info@dkv.org)  
H: [www.dkv.org](http://www.dkv.org)



# **Inhaltsverzeichnis**

<b>Arbeitsabteilung I</b>	<b>4</b>
<b>Arbeitsabteilung II.1</b>	<b>19</b>
<b>Arbeitsabteilung II.2</b>	<b>37</b>
<b>Arbeitsabteilung III</b>	<b>53</b>
<b>Arbeitsabteilung IV</b>	<b>66</b>
<b>Studentenvorträge</b>	<b>79</b>

# Kryostrukturierung von Stützstrukturen für das Tissue Engineering

Dipl.-Ing. S. Wienecke\*, Prof. Dr.-Ing. B. Glasmacher

Leibniz Universität Hannover, Institut für Mehrphasenprozesse 30167 Hannover, Deutschland  
[wienecke@imp.uni-hannover.de](mailto:wienecke@imp.uni-hannover.de)

\* Korrespondenzautor

Tissue Engineering ist eine Form der rekonstruktiven Therapie, bei der künstliches Gewebe außerhalb des Körpers zur späteren Implantation hergestellt wird. Hierbei werden dem Patienten Zellen entnommen, diese werden außerhalb des Körpers vermehrt und anschließend auf ein dreidimensionales poröses Stützgerüst, ein sogenanntes Scaffold, gesiedelt. Das besiedelte Konstrukt wird dem Patienten an die betroffene Stelle implantiert. Dem Scaffold kommt beim Tissue Engineering besondere Bedeutung zu, da an ihn besondere Ansprüche gestellt werden. Als Materialien kommen häufig polymere Werkstoffe zur Verwendung, die sich im Körper in dem Umfang abbauen, in dem neues Gewebe entsteht. Neben der benötigten mechanischen Stabilität und Biokompatibilität muss ein Scaffold den Zellen optimale Oberflächenbeschaffenheiten zur Anhaftung und Vermehrung bieten. Die Poren des Scaffolds müssen einen Durchmesser aufweisen, der es den Zellen erlaubt, in sie hineinzewachsen. Zusätzlich muss genügend Raum zur Umspülung mit Nährmedium vorliegen. Ein mögliches Verfahren zur Herstellung solcher Stützstrukturen ist die gerichtete Erstarrung. Hierbei wird einer wässrigen Lösung ein örtlicher Temperaturgradient aufgeprägt, unter dem sie dann mit einer definierten Kühlrate eingefroren wird. In der Lösung bilden sich dendritische Eiskristalle, die von einem Ende der Probe bis zum anderen „wachsen“. Über die Kühlrate und den Temperaturgradienten können Form und Ausdehnung (Durchmesser) der Eiskristalle gezielt beeinflusst werden. Da fast ausschließlich das Wasser gefriert, werden die Lösungsbestandteile zwischen den Eiskristallen aufkonzentriert, so dass sich Wände bilden. Werden die Eiskristalle in einem anschließenden Schritt bei tiefen Temperaturen im Vakuum aus den Proben heraus sublimiert, so bleibt eine stabile, poröse Struktur mit Poren an Stelle der Eiskristalle zurück (Negativabformung). Als verwendete Materialien bieten sich alle Polymere an, die in eine wässrige Lösung gebracht werden können. Aufgrund ihrer biologischen Vorteile werden Kollagen und Chitosan verwendet.

**Keywords:**

Gerichtete Erstarrung, Tissue Engineering, Scaffolds, Chitosan, Kollagen

## I.02

# Eisige Auszeit für Zellen: Neue Techniken bei der Kryokonservierung von Stammzellen

**Prof. Dr.-Ing. B. Glasmacher, Dipl.-Ing. R. Spindler M.Sc., Dipl.-Ing. F. Evertz, M.Sc. Huan Sun,  
Dr. Denys Pogozhykh, Dr. Nicola Hofmann**

Institut für Mehrphasenprozesse (IMP), Zentrum für Biomedizintechnik (zbm),  
Leibniz Universität Hannover

In der Kryokonservierung werden Zellen wie Stammzellen, Erythrozyten, Spermien oder Eizellen in Suspensionen sowie in Verbänden (Gewebe, Organe) bei tiefen Temperaturen von bis zu -196°C gelagert. Ziel ist eine schonende Langzeitlagerung, die eine zeitlich beliebige Verfügbarkeit der Zellen ermöglicht. Für die Anwendung in der Regenerativen Medizin wird eine hohe Vitalität der biologischen Proben nach der Kryokonservierung – also nach dem Auftauen – gefordert. Oft beginnt eine Zellkultur im Labor bereits durch Auftauen eingefrorener Zellen, deren Güte alle nachfolgenden Experimente beeinflusst. Bei diesen tiefen Lagerungstemperaturen kommen alle Stoffwechselvorgänge zum Er liegen, so dass die konservierte Probe keinen weiteren Vitalitätsverlust während dieser Phase erleidet. Allerdings entstehen beim Einfrieren und Auftauen dieser biologischen Proben durch Eiskristallbildung jedoch Zellschädigungen. Durch die Entwicklung neuartiger Kryotechniken sollen diese Zellschädigungen minimiert werden. Nur wenn optimale Frierbedingungen herrschen – insbesondere nichtschädigende osmoregulatorische Wärme- und Stofftransporte – überleben die Zellen den Frier-/Auftauvorgang.

Wird auf Grundlage der bisherigen Forschungsergebnisse die Zukunft der Kryobiologie diskutiert, scheint eine viel versprechende, positive Schlussbetrachtung realistisch. Durch die Einbindung neuer Erkenntnisse in die Gestaltung von Kryokonservierungsprozessen könnten viele Herausforderungen in der Zukunft erfolgreich überwunden werden. Ein bisher unerreichtes Ziel im Bereich der Kryokonservierung bleibt derzeit noch die Deckung des klinischen Bedarfs an humanen Gewebetransplantaten. Diese werden sowohl mengenmäßig als auch bezüglich ihrer Art in zunehmendem Maße benötigt. Eine ausreichende Bereitstellung von Gewebeersatz für Patienten/innen zum Bedarfszeitpunkt – auch hergestellt mittels Tissue Engineering unter Verwendung von Stammzellen (hSC, IPS) – ist aber durch die Einrichtung von Gewebebanken (Tissue Banking) vorstellbar, sofern eine Lagerung mittels Kryokonservierung die für eine Transplantation/Implantation notwendige Funktion des biologischen Materials sicherstellen kann. Während eine solche erfolgreiche Kryokonservierung bei einigen Gewebearten (Haut) bereits möglich ist, bestehen im Bereich von großen, vaskularisierten Geweben und Organen erhebliche Schwierigkeiten. Ist die Funktionalität eines Transplantats/Implantats durch die Existenz lebensfähiger Zellen gegeben, so müssen dafür verlässliche Testverfahren verfügbar sein.

## I.03

# Verbesserte Kryokonservierung primärer Hepatozyten in einer neuen Kryokonservierungslösung

**G. Pless-Petig, U. Rauen**

Institut für Physiologische Chemie, Universitätsklinikum Essen, Hufelandstr. 55, 45122 Essen  
[gesine.pless@uni-due.de](mailto:gesine.pless@uni-due.de), [ursula.rauen@uni-due.de](mailto:ursula.rauen@uni-due.de)

Leberzellen (Hepatozyten) dienen in der Forschung als wichtige *in vitro* Modelle zur Untersuchung des Fremdstoffmetabolismus und gewinnen zudem eine zunehmende Bedeutung bei der Therapie angeborener Lebererkrankungen (Hepatozytentransplantation). Eine Vorratshaltung dieser Zellen ist jedoch derzeit kaum möglich, da die Zellen sehr empfindlich gegenüber der Kryokonservierung sind und ihre Fähigkeit verlieren, sich anzuheften. Basierend auf Vorerfahrungen aus der Kaltlagerung (4°C) von Zellen haben wir hier versucht, die Kryokonservierung isolierter Hepatozyten durch den Einsatz spezieller Kryokonservierungslösungen zu verbessern. Dazu wurden isolierte humane und Rattenhepatozyten in verschiedenen kürzlich entwickelten Kaltlagerungslösungen mit Zusatz von

10 % DMSO eingefroren. Die Anheftungsrate nach dem Auftauen, die Morphologie sowie der allgemeine Metabolismus (Resazurin-Umsatz) waren nach Kryokonservierung in diesen Lösungen im Vergleich zum Standardansatz in Zellkulturmedium erheblich verbessert.

Diese Ergebnisse eröffnen neue Perspektiven zur Kryokonservierung von Hepatozyten. Die hepatocytenspezifische Funktion der resultierenden Kulturen, eine weitere Optimierung der Lösung sowie die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Zelltypen werden derzeit untersucht.

**Stichworte:**

Kryokonservierung, Hepatozyten, Kryokonservierungslösung

I.04

## **Kryokonservierung von Nabelschnurblut für die unverwandte Transplantation bei hämatologischen Erkrankungen**

**Lutz Körschgen<sup>1</sup>, Andrea Meyer<sup>1</sup>,  
Gesine Kögler<sup>1\*</sup>**

Institut für Transplantationsdiagnostik und Zelltherapeutika; Leitung der Jose Carreras Stammzellbank  
Universität Düsseldorf, Geb. 14.80, Moorenstraße 5, 40225 Düsseldorf,  
[koegler@itz.uni-duesseldorf.de](mailto:koegler@itz.uni-duesseldorf.de)

Die Düsseldorfer Jose Carreras Stammzellbank wurde 1992/1993 etabliert und verfügt derzeit über ein Inventar von über 21.000 allogenen kryokonservierten Spenden und konnte bisher 860 Transplantate (Stand August 2011) weltweit für Patienten mit hämatologischen Erkrankungen zur Verfügung stellen. Aufgrund der klinischen Dokumentation in Kooperation mit dem Eurocordregister, NMDP und IBMTR konnten die klinischen Daten beim Paul-Ehrlich Institut (PEI) hinterlegt werden, so dass Düsseldorf im letzten Jahr eine unbefristete Zulassung für ihre Produkte erhalten konnte. Düsseldorf verfügt seit 2001 über eine Zulassung des PEI (Dus Cord Blood 5 und Dus Cord Blood-2.5 (PEI.H.00383.01.1 und PEI.H.00383.02.1). International ist Düsseldorf seit 2003 FACT-NETCORD akkreditiert. Eine Suche in der Düsseldorfer Stammzellbank und in Netcord ist kostenfrei und innerhalb von 24 Stunden möglich. Voraussetzung ist das Vorliegen der HLA-Daten des Patienten. Ein Transplantat kann im Notfall innerhalb von drei Arbeitstagen kryokonserviert zur Verfügung gestellt werden. Hämatopoetische Stammzellen überstehen die Kryokonservierung unbeeinträchtigt, während andere seltene Zellsubpopulationen wie MSC, USSC, Endothelzellen aufgrund der geringen Frequenz nur noch schwer aus einmal kryokonserviertem Blut isolierbar sind.

**Stichwörter:**

Nabelschnurblut, hämatopoetische Stammzellen, Transplantation, Kryokonservierung

I.05

## Gefriertoleranz und Gefriervermeidung - Wie Tiere in der Kälte überleben und was wir daraus lernen können

PD Dr. Ralph O. Schill

Biologisches Institut, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart  
[ralph.schill@bio.uni-stuttgart.de](mailto:ralph.schill@bio.uni-stuttgart.de)

Um Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu überleben, nutzen die kältetoleranten Organismen entweder die Fähigkeit, das Gefrieren zu vermeiden, oder zu Gefrieren. Tiere, die das Gefrieren vermeiden, versuchen dabei, die Temperatur des spontanen Gefrierens (supercooling point, SCP) herabzusetzen, indem sie Gefrierschutzproteine oder andere Gefrierschutzsubstanzen, wie beispielsweise Zucker und Polyole, einlagern. Es zeigt sich, dass bei vielen wirbellosen Tieren die Überlebensraten bei sehr schnellen und sehr langsamen Abkühlungsraten am besten sind. Dabei beruht die gute Überlebensfähigkeit bei schnellen Abkühlungsraten von 9°C/h und mehr meist auf einem physikalischen Effekt, da hierbei nur kleine Eiskristalle entstehen. In der Natur vorkommende Abkühlungsraten von 1°C/h und weniger ermöglichen hingegen, dass die Tiere sich durch die Synthese von Gefrierschutzmolekülen auf die Eisbildung vorbereiten können. Die Eisbildung im Körper wird von gefriertoleranten Organismen oft bei noch hohen Temperaturen durch eisinduzierende Proteine verursacht und ermöglicht ein kontrolliertes Gefrieren. Dabei beeinflussen Proteine sowohl das Wachstum als auch die Verteilung der Eiskristalle. Eine dritte Strategie, die gefrierschützende Dehydrierung (Gefriertrocknung) genannt wird, ist ebenfalls von verschiedenen Tieren bekannt. Bislang gibt es jedoch nur wenige experimentelle Studien über die Fähigkeit, das Gefrieren im hydrierten Zustand zu überleben.

**Stichwörter:**

Gefrierschutz, Gefriertrocknung, Gefriertoleranz, Gefriervermeidung

I.06

## Sicherung von Versuchstierstämmen durch Kryokonservierung: Möglichkeiten und Probleme

Martina Dorsch

Institut für Versuchstierkunde und Zentrales Tierlaboratorium der Medizinischen Hochschule Hannover, Carl-Neuberg-Str. 1, 30625 Hannover  
[Dorsch.martina@mh-hannover.de](mailto:Dorsch.martina@mh-hannover.de)

Eine der Hauptaufgaben von Versuchstierhaltungen ist es, Ressourcen von Tiermodellen zu sichern, um diese bei Bedarf zu Verfügung zu stellen. Dies gilt vor Allem für solche Modelle, für die aktuell kein wissenschaftlicher Bedarf besteht.

Eine Möglichkeit der Ressourcen-Sicherung bietet die Etablierung von „Kryobanken“ in denen Embryonen oder Gameten, nach dem heutigen Wissenstand auf unbestimmte Zeit gelagert werden können. Die Kryokonservierung ist nur dann erfolgreich, wenn aus dem Gefriergut nach dem Auftauen lebende Nachkommen produziert werden können.

Nach dem heutigen Kenntnisstand unterliegt der konservierte genetische Pool der tiefgefrorenen Versuchstierstämme keiner genetischen Drift. Damit wird eine weitere wichtige Aufgabe von Versuchstierhaltungen erfüllt, nämlich langfristig die genetische Authentizität von Versuchstierstämmen zu gewährleisten. Negative Langzeiteffekte sind für Versuchstiere bisher nicht beschrieben. Epigenetische Modifikationen von direkten Nachkommen der revitalisierten Systeme sind jedoch nicht auszuschließen.

Im dem Vortrag sollen verschiedene Möglichkeiten der Ressourcensicherung bei Maus, Ratte und Meerschweinchen angesprochen werden.

Neben großen Fortschritten bei der Kryokonservierung von Spermien oder ovariellem Gewebe der Maus, ist die Kryokonservierung dieser Proben bei Ratte und Meerschweinchen noch immer problematisch. Auch darauf soll eingegangen werden. Auch bei der Kryokonservierung unbefruchteter Eizellen von Maus und Ratte ist noch Entwicklungsarbeit bei den Einfrierverfahren nötig um permanent gute und reproduzierbare Revitalisierungsergebnisse zu erhalten.

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, Versuchstierstämme, Kryobank,

**I.07**

## **Management wesentlicher Daten von (kryokonservierten) gentechnisch veränderten Mäusen**

**Johannes Schenkel**

Kryokonservierung W430, Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ) Heidelberg

Um in der biomedizinischen Forschung aussagekräftige Daten zu erhalten, sind Experimente an Modellorganismen unverzichtbar. Mäuse sind die wichtigsten Versuchstiere in der aktuellen Grundlagen- und präklinischen Forschung. Eine besonders entscheidende Rolle spielen transgene Mauslinien, das sind Tiere, die eine oder mehrere definierte Mutationen in ihrem Erbgut tragen und stabil weitervererben können. Diese wertvollen, gezielten Mutanten können nur mit großem Aufwand generiert und charakterisiert werden. Um diese transgenen Linien zu erhalten und vor einem unerwarteten Verlust zu schützen (z.B. Unfall, Hygieneeinbruch), gleichzeitig aber eine Erhaltungszucht zu vermeiden wurde im DKFZ ein Repozitorium mit kryokonservierten Mausembryonen und -Spermatozoen angelegt. So ist es möglich, die transgenen Mauslinien ständig verfügbar zu halten, gleichzeitig aber keinen Bedarf an Versuchstieren für die Erhaltung der speziellen Linie zu benötigen.

Neben der Überprüfung der Qualität der eingefrorenen Proben ist eine umfassende, eindeutige Dokumentation dieser Linien äußerst wichtig. Um einen größtmöglichen Nutzen aus den im Haus vorhandenen mutanten Mauslinien (aktiv und archiviert) zu ziehen, wurde eine detaillierte, aber übersichtliche Datenbank mit möglichst umfangreichen wissenschaftlichen Daten erstellt, derzeit sind dort etwa 1.500 Linien registriert.

Um einen möglichst einfachen Zugang zu ermöglichen, wurde eine Web-basierte Anwendung realisiert, was den Vorteil hat, dass auf lokalen Rechnern keine Software installiert werden muss. Es gibt auch Suchfunktionen. Die Daten sind wie folgt organisiert:

### **Wissenschaftliche Beschreibung**

Genetische Modifikation mit Generierungstechnik, Name der Line (incl. internationale Bezeichnung), Charakterisierung/Beschreibung, Nutzen als Tiermodell, Genotyp, genetischer Hintergrund, Rückkreuzungsgeneration sowie möglicher Phänotyp sind gelistet. Die Herkunft der Mutation (gene-ID und Donororganismus), die Herkunft der regulatorischen Elemente und deren Donororganismus sowie verwendete Vektoren sind eingetragen.

### **Mögliche Publikationen, Keywords**

In der Datenbank gelistete Mutanten sind mit der institutionellen Publikationsdatenbank mit allem bibliographischen Details verlinkt (und andersherum).

### **Hausinterne Information**

Haltungsort, Kryokonservierung sowie eine mögliche Sanierung der Tiere sind aufgeführt.

### **Rechtlicher Status**

Die rechtliche Status wird gezeigt, wie Materials Transfer Agreements (MTA), Eigentums- und Erfinderrechte, die sich möglicherweise auch aus Projektfinanzierungen ergeben. So ist die Datenbank auch eine Auskunftsplattform für den Technologietransfer.

Die Datensätze sind so organisiert, dass gleichzeitig die gesetzlich erforderliche Dokumentation nach dem Gentechnik- und Tierschutzrecht erfüllt wird. Dabei werden auch zu erwartende rechtliche Änderungen in Folge der Direktive 2010/63/EU berücksichtigt.

I.08

## Produktion und Einsatz von gesextem und kryokonserviertem Nutztiersperma in der instrumentellen Samenübertragung

Rudolf Großfeld<sup>1\*</sup>, Alba Rodriguez Ruiz<sup>1</sup>, Marlene Strothmeyer<sup>1</sup>,  
Gerd Mönch-Tegeder<sup>2</sup>, Detlef Rath<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut für Nutztiergenetik (Friedrich-Loeffler-Institut), 31535 Neustadt-Mariensee, Deutschland

<sup>2</sup> Masterrind GmbH, 27283 Verden, Deutschland

[rudolf.grossfeld@fli.bund.de](mailto:rudolf.grossfeld@fli.bund.de)

In Deutschland wurden im Jahr 2010 rund 4.3 Mio. Kühe und Färsen besamt. Die Spermaportionen für die instrumentelle Samenübertragung werden in 22 zertifizierten Besamungsstationen produziert. Auf den Stationen können aus einem Bullenejakulat bis zu 500 Besamungsportionen produziert werden, die dann bis zur Verwendung in flüssigem Stickstoff konserviert werden. Darüber hinaus besteht auf einigen Besamungsstationen die Möglichkeit, die Spermien vor der Tiefgefrierung nach ihrem DNA-Gehalt in X- und Y-chromosomal Populationen aufzuteilen und so das Geschlecht der Nachkommen mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu 95 % vorauszusagen. Bei diesem Verfahren werden die Spermien mit einer Fluoreszenzfärbung versehen und in einem Flowzytometer anhand Ihrer Chromosomenausstattung getrennt.

Während bei Bullensperma sowohl die Anwendung von kryokonserviertem Sperma, als auch die Produktion von gesextem Sperma bereits kommerzialisiert ist, ist dies bei anderen Tierarten nicht der Fall. So ist z. B. beim Schwein die Frischsamen-Konservierung üblich. Kryokonserviertes Sperma wird nur in 1 % der Besamungen eingesetzt, da Schweinespermien gegenüber der Kryokonservierung deutlich sensibler sind. Der Grund dafür ist vor allem die unterschiedliche Zusammensetzung der Plasmamembran bei Bullen- und Schweinespermien. Dies stellt insbesondere bei der Erstellung von Genreservebanken eine Herausforderung dar, an der im Institut für Nutztiergenetik gearbeitet wird.

I.09

## Gestützte Vakuum-Isolierungen – eine sinnvolle und wirtschaftliche Alternative zu Multilayer-Systemen?

Dr.-Ing. Jobst, H. Kerspe

TEB Dr. Kerspe, 69245 Bammental, Im Degen 5/1  
[kerspe@vakuum-isolierung.de](mailto:kerspe@vakuum-isolierung.de)

Die Entwicklung der Vakuum-Wärmedämmungen nimmt Ihren Anfang mit den ersten doppelwandigen, evakuierten Glasgefäßen des englischen Physikers James Dewar um 1874. Im Umfeld der Kryotechnik wird bis heute an Dämmsystemen unter Hochvakuum festgehalten.

Der Ausgangspunkt der hier vorgestellten gestützten Vakuum-Isolierungen (GVI-Systeme) ist wohl in den Arbeiten von Smoluchowski um 1910 zu sehen. Der „Vakuum-Effekt“, der bei den bekannten Multilayer-Isolierungen (MLI) erst bei einem Restgasdruck von  $p < 10^{-4}$  mbar erreicht wird, tritt in mikroporösen Strukturen bereits bei Restgasdrücken von etwa  $0,1 < p < 10$  mbar ein.

Bei entsprechender Auslegung und Auswahl der Füllstoffe wird außerdem eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des gesamten Dämmsystems erreicht – die Isolierung ist druckbelastbar, weshalb hier auch von gestützten Vakuum-Isolierungen (GVI-Systeme) gesprochen wird.

Vergleichende System-Untersuchungen haben gezeigt, dass GVI-Systeme vergleichbare Dämm-eigenschaften haben, wie die klassischen MLI.

Durch die Stützwirkung ist es möglich, großflächige, ebene Wandelemente mit dünnen Hüllwänden herzustellen - die so entstehenden Isolierschichten können zusätzlich Gewichtskräfte aufnehmen. Daraus sowie auch aus den geringen Vakuum-Anforderungen ergeben sich erhebliche Kostenvorteile von GVI-Systemen gegenüber den klassischen Multilayer-Systemen.

**Stichworte:**

Vakuum-Wärmedämmung; Gestützte Vakuum-Isolierung (GVI); mikroporöse Dämmung; VIP; Kryotechnik

I.10

## Cryokomponenten für die Füllstands-Überwachung und -Regelung

**Wolfgang Flohr**

Cryotherm GmbH & Co. KG, Kirchen

Unterschiedlichste Anforderungen der Anwender an eine Füllstands-Regelung bzw. -Überwachung an Behältern und Systemen für die Cryotechnik, die Art des Mediums sowie die einschränkenden Randbedingungen zu Parametern wie Druck, Temperatur, Genauigkeit und bauliche Gegebenheiten erfordern eine sehr spezifische Auslegung der technischen Lösung.

In sehr vielen Fällen können Anforderungen mit verschiedenen, konkurrierenden Lösungen erfüllt werden. Dieser Beitrag soll hierzu eine Entscheidungshilfe darstellen.

Es werden verschiedene Aufgabenstellungen, die dazu passenden physikalischen Lösungen und anhand von konkreten Fallbeispielen die konstruktiven und apparativen Lösungen aufgezeigt.

Da es sich selten um Insellösungen handelt, spielt die Definition von Schnittstellen und die Einbindung in übergeordnete Systeme eine zunehmende Rolle.

**Stichworte:**

Cryotechnik, Füllstandsüberwachung, Füllstandsregelung, Schnittstellen

I.11

## Neugestaltung des Übergangsbereichs von hybriden Stromzuführungen

**M. Börsch<sup>1</sup>, F. Holdener<sup>1</sup>, D. Oetig<sup>1</sup>, N. Magginetti<sup>1</sup>, H. Quack<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> WEKA AG, CH-8344 Bäretswil/Schweiz

<sup>2</sup> TU Dresden, D-01062 Dresden

Supraleitende Magnete mit variablem Feld benötigen Stromzuführungen, die den Strom von Umgebungstemperatur zur Arbeitstemperatur des Magneten leiten. Um den Wärmeeinfall durch diese Stromzuführungen zu minimieren, setzt man seit einiger Zeit hybride Stromzuführungen ein, bei welchen der Strom im kälteren Bereich durch einen Leiter aus keramischen Supraleiter fließt. Der warme Teil der Stromzuführung besteht weiterhin aus Kupfer. Die dort entstehende Ohmsche Wärme wird durch einen Kühlmittelstrom gekühlt, meistens Helium von einer Kälteanlage mit einer Temperatur von 50 K. Besondere Aufmerksamkeit erfordert der Übergangsbereich zwischen Kupfer und keramischem Supraleiter. Es wird eine neuartige Konstruktion dieses Übergangsbereichs vorgestellt, die zu einer Reduktion des benötigten Kühlmittelstroms und gleichzeitig zu einer Absenkung der Kontakttemperatur führt, ab welcher der Supraleiter den vollständigen Strom tragen muss. Eigenheiten dieser neuen Konstruktion sind ein verlängerter Überlappungsbereich zwischen Kupfer und Supraleiter, eine allmähliche Verjüngung des Kupferquerschnitts in diesem Überlappungsbereich sowie eine Kühlung des Übergangsbereichs von innen her.

I.12

## Kryogene und warme Hochdruckventile für neue Prozesse in L/GH2

**M. Börsch\*, F. Holdener, D. Oertig, D. Weber**

WEKA AG, CH-8344 Bäretswil, Schweiz  
[info@weka-ag.ch](mailto:info@weka-ag.ch)

Aktuelle Technologien im Bereich der Verteilanlagen von Wasserstoff sind durch deren hohe Drücke bis 700barg gekennzeichnet. Die Temperaturbereiche erstrecken sich dabei von 21K bis zum Umgebungs niveau. Für diese Anforderungen entwickelte WEKA eine Reihe verschiedener Ventile in den Druckstufen 420barg, 640barg und 1000barg. Die Nennweiten reichen von DN6 bis DN25. Als besonderes Merkmal besitzen die grösseren Nennweiten einen integrierten Druckausgleich. Je nach Einsatzbereich werden die Ventile von Hand oder pneumatisch betätigt und sind als Regel- oder Absperrventile ausgeführt. Um dem Explosionsschutz gerecht zu werden, sind die betreffenden Abschnitte doppelt abgedichtet und mit einer überwachten Sicherheitsabdichtung versehen. Technische Lösungen mit Metallbalg, welche üblicherweise bei sehr hohen Dichtigkeitsanforderungen eingesetzt werden, sind in diesen Druckbereichen aber kaum ausführbar und wären zu wenig flexibel. Deshalb kommen hochentwickelte federgespannte Dichtsysteme zum Einsatz. Aufgrund qualifizierter Design- und Herstellmerkmale stellen diese Systeme dennoch eine vergleichbar zuverlässige Abdichtung sicher. Die tragenden Ventilkomponenten werden aus hochfestem Stahl gefertigt. Das Design wurde hinsichtlich Druckfestigkeit und minimaler Wärmeleitung vollständig optimiert. Besonderer Schwerpunkt liegt auch auf der Gestaltung Medium-berührender Komponenten, um eine hohe Lebensdauer zu gewährleisten.

I.13

## LNG, Kraftstoff und Kühlmedium der Zukunft

**Franz Lürken**

Air Liquide Deutschland GmbH, 47805 Krefeld, Deutschland  
[franz.luerken@airliquide.com](mailto:franz.luerken@airliquide.com)

Erdgas ist ein anerkannt sauberer Brennstoff. Als CNG (Compressed Natural Gas) ist er bereits millionenfach als Kraftstoff in PKW im Einsatz. Die geringe Energiedichte einerseits und die hohe Leistungsaufnahme schwerer Nutzfahrzeuge andererseits ließen aber in der Vergangenheit neben diversen Bus – Projekten den Durchbruch des umweltfreundlichen Kraftstoffs nicht zu. Ferner waren auch die LKW mit den notwendigen Hochleistungs - Otto-Motoren nicht verfügbar.

Hier hat sich in jüngster Zeit vieles geändert. Darunter der wichtigste Punkt: Erdgas ist heute in flüssiger Form großtechnisch verfügbar. Dieses so genannte LNG (Liquefied Natural Gas) ist -16 °C kalt und verfügt neben der chemisch gebundenen Energie des Methans über einen nicht unerheblichen Kälteinhalt (711 kJ/kg). Diese Kälteleistung kann mit geeigneter Technologie für die Kühlung von Lebensmitteltransporten eingesetzt werden. Damit entfällt praktisch der Energiebedarf des Kälteaggregats. Das spart bei Lkw die täglich 12 h Kühlen bis zu 8600 l Diesel im Jahr! Doppelter Nutzen bedeutet also hier auch weniger Kosten und weniger Umweltbelastung.

In den NL sind verschiedene Unternehmen Vorreiter in dieser Technik. Bereits heute gibt es die ersten öffentlichen LNG - Tankstellen und noch in 2011 werden die ersten 100 LKW auf der Straße sein. Die Pläne für die Folgenden Jahre sind enorm, denn LNG - LKW haben noch einen weiteren wichtigen Vorteil: Sie sind deutlich leiser und verursachen keinen Abgasgestank. Die Folge: In den NL soll die Zufahrtbeschränkung in Wohngebiete für solche LKW gelockert werden. Wenn die Lebensmittel - Transporteure damit aus der Verkehrsspitze in ruhigere Nachtstunden ausweichen könnten würde dies wesentlich zur Entlastung der Straßen, Reduktion von Staus und natürlich für den LKW-Betreiber kürzere Fahrzeiten und damit drastische Einsparungen bedeuten.

Bei Betrachtung dieser Fakten wundert das große Interesse an den Kühlmöglichkeiten des LNG nicht. Air Liquide hat sich diesem Thema verschrieben. Ausgehend von der bereits bekannten Hybridkühlung (Maschinenkälte und Stickstoff bei Maschinenstillstand) hat unser Haus die neue CTL2-Kühlung (Cryogen Trans LNG und LIN) entwickelt. Sie kühlt auch dann geräuschlos und ohne Abgase wenn der LKW kein LNG verbraucht.

Ein wesentlicher Nebeneffekt der neuen Technik ist die Möglichkeit das tiefkalte LNG auch über längere Zeiten mit dem flüssigen Stickstoff (LIN = Liquefied Nitrogen) kalt halten zu können. Hierdurch sind die Anlagen frei vom so genannten Boil Off. Diese Methan – Emission war bislang unvermeidbar und damit ein nicht zu vernachlässigendes Umwelt und Sicherheitsargument.

## I.14

### **Technische Relevanz der para-ortho-Umwandlung von Wasserstoff in tiefkalten, mobilen Wasserstoffspeichern**

**Jürgen Essler\*, Christoph Haberstroh, Ullrich Hesse**

Technische Universität Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-,

Kryo- und Kompressorentechnik, 01162, Dresden

[juergen.essler@tu-dresden.de](mailto:juergen.essler@tu-dresden.de)

Die beiden Allotrope Orthowasserstoff und Parawasserstoff spielten bislang lediglich bei der Wasserstoffverflüssigung eine meist unangenehme Rolle, da die notwendige Umwandlung von Ortho- in Parawasserstoff zum entsprechenden Gleichgewichtszustand einen zusätzlichen Energieaufwand bedeutet.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Zustandsgleichungen für Wasserstoff und deren Mischungen, einer geeigneten Beschreibung der Kinetik der ortho-para bzw. para-ortho-Umwandlung, den Kenntnissen der zugehörigen Geschwindigkeitskonstanten  $k$  der entsprechenden Katalysatoren und den notwendigen Berechnungsvorschriften für die Umwandlung stellen ein geeignetes Werkzeugpacket für die gezielte Auslegung tiefkälter Wasserstoffsysteme dar. Damit ist es möglich einen Umwandlungsprozess bis maximal in den Gleichgewichtszustand gezielt auszulegen und die dabei entstehende Wärmequelle bzw. Wärmesenke sinnvoll zu nutzen.

In dieser Arbeit werden die Vorteile der para-ortho bzw. der ortho-para-Umwandlung in einem tiefkalten, mobilen Wasserstofftank aufgezeigt. Hierfür wird auf den aktuellen Forschungsstand der Mischungsberechnungen von Ortho- und Parawasserstoff, den notwendigen Grundlagen der Umwandlungskinetik und der gezielten Vorgehensweise der Auslegung eingegangen.

**Stichwörter:**

Wasserstoff, Orthowasserstoff, Parawasserstoff, Umwandlung, Kinetik

# Kryogene Flüssigwasserstoffspeicher für die zivile Luftfahrt – Auswirkungen variabler Umgebungsdrücke

Sebastian Mock, Stephan Kabelac

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr,  
Institut für Thermodynamik, 22043 Hamburg  
[mock@hsu-hh.de](mailto:mock@hsu-hh.de)

Der Einsatz von Brennstoffzellensystemen in zivilen Flugzeugen erfordert nach derzeitigem Entwicklungsstand die Speicherung ausreichender Wasserstoffmengen an Bord, welcher dem System als Kraftstoff dient. Neben der Sicherheit und den Kosten ist ein geringes Gewicht eine der wichtigsten Systemeigenschaften bei einer Luftfahrtanwendung. Das Systemgewicht von kryogenen Flüssigwasserstoffspeichern ist unter anderem von den im Speicher herrschenden Drücken abhängig, da sich die Drücke direkt auf die Wandstärken bei der Druckbehälterauslegung auswirken.

Der Flüssigwasserstoffspeicher hat die Aufgabe die Brennstoffzelle mit Wasserstoff bei einem definierten Vordruck zu versorgen. Dieser Druck ist jedoch nicht der für die Auslegung relevante maximal auftretende Druck, welcher mittels Abdampf- und Sicherheitsventilen begrenzt wird. Die Druckniveaus im System setzen sich aus mehreren Anteilen, wie beispielsweise den Druckverlusten und Druckschwankungen im System sowie den Sicherheitsfaktoren für die Sicherheitsventile zusammen. Der maximale Druck sollte jedoch möglichst niedrig gehalten werden, um ein minimales Systemgewicht zu erreichen. Bei den angesprochenen Abdampf- und Sicherheitsventilen handelt es sich um Differenzdruckventile, die bei einem definierten Druck relativ zum Umgebungsdruck öffnen. In der Luftfahrt besteht die Schwierigkeit, dass der Umgebungsdruck ca. zwischen 1,02 bar(a) am Boden und 0,02 bar(a) während des Fluges variiert. Bei einer Systemauslegung analog der Vorgehensweise bei Bodenanwendungen kann es ggf. dazu führen, dass der geforderte Wasserstoffdruck während des Fluges nicht mehr bereit gestellt werden kann, da die Abdampfventile bereits bei niedrigeren Drücken öffnen. Um dies zu verhindern, ist eine für die Luftfahrtanwendung geeignete Definition der zulässigen Druckniveaus und Sicherheitsfaktoren zwingend erforderlich.

Dieser Beitrag stellt das betrachtete Flüssigwasserstoffspeicherkonzept für eine Flugzeuganwendung vor und es wird unter Beachtung der anzuwendenden Normen und Standards eine Definition zur Festlegung der Druckniveaus und Sicherheitsfaktoren für kryogene Flüssigwasserstoffspeicher in der Luftfahrt hergeleitet.

**Stichwörter:**

Flüssigwasserstoffspeicher, Luftfahrt, Systemdrücke, Umgebungsdrücke, Sicherheitsfaktoren

I.16

## **Vorstellung einer dynamischen Tieftemperaturphasengleichgewichtsanlage mit Dampfzirkulation**

**Dirk Winkelmann, Lothar Rainer Oellrich**

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

Die Ermittlung der Phasengleichgewichtsinformation von Gemischen erfordert neben der Messung der Drücke und Temperaturen auch die Bestimmung der Zusammensetzung der Gemische in den Gleichgewichtsphasen. Dies kann als Teilinformation durch die Messung von Siedepunkten erfolgen [statische Apparatur, s. 1] oder durch Analyse der Gleichgewichtszusammensetzung der flüssigen und der gasförmigen Phase. Hierfür ist es erforderlich, eine Versuchsapparatur einzusetzen, bei der entweder nur die Gasphase oder sowohl die Gas- als auch die Flüssigphase zirkuliert werden (dynamische Apparatur). Es wird über den Bau und die Inbetriebnahme einer dynamischen Apparatur berichtet, bei der die Gasphase zirkuliert wird. Mit ihr sind Messungen in einem Temperaturbereich bis etwa 100 K und Drücken bis 35 bar möglich. Weitsiedende Gemische aus Komponenten mit stark realem Verhalten bilden oft Flüssig-Flüssig-Entmischungen bei tiefen Temperaturen aus. Die Messzelle der Anlage ist daher mit Saphirfenstern ausgestattet, durch die eine solche Entmischung beobachtet werden kann. Messergebnisse von binären Gemischen aus teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) und mit Argon/Stickstoff werden vorgestellt.

Die gewonnenen Informationen sollen bei der Auslegung von Einsatzgemischen in Gemischkleinkühlern Verwendung finden.

### **Schlüsselwörter:**

Tieftemperaturphasengleichgewichte, Flüssig-Flüssig-Dampf-Gleichgewichte, Kältemittelgemische, HFKW, Gemischkleinkühler

[1] D. Winkelmann, L.R. Oellrich, Aufbau und Inbetriebnahme einer Tieftemperaturphasengleichgewichtsanlage,  
DKV Jahrestagung 2009, AAI.03

I.17

## **Betriebserfahrungen und ersten Messwerten mit unserem Kalorimeterkryostaten**

**T. Funke**

TU Dresden

I.18

## Erstellung eines Messunsicherheitsbudgets für die kryogene Temperaturmessung

M. Süßer

KIT Karlsruhe, Institut für Technische Physik, 76131 Karlsruhe, Deutschland

Der erste Teil des Beitrages gibt eine allgemeine Einführung in den GUM (Guide of Uncertainty of measurement). In Erweiterung der Fehlerrechnung nach Gauss werden im GUM auch die Behandlung von systematischen Fehlern oder externe Unsicherheitsangaben z.B. Kalibriergenauigkeiten berücksichtigt. Der GUM ist die aktuelle Form der Bestimmung der Messunsicherheit und wird bei Kalibrierungen angewendet bzw. ist durch den DAKKS bei akkreditierten Kalibrierlabors vorgeschrieben. Im Weiteren wird die Erstellung eines Messunsicherheitsbudgets für kryogene Temperaturmessung entsprechend dem GUM vorgestellt und diskutiert. Die unterschiedlichen Einflüsse auf die Messunsicherheit stellen sich zusammen aus den Einzelkomponenten Fühler, Montage und Messtechnik. Diese Komponenten werden analysiert und im Detail diskutiert.

I.19

## Pulsrohrkühler für Flüssighelium-Temperaturen: Entwicklungsstand und Anwendungen

Günter Thummes

Zentrum für Adaptive Kryotechnik und Sensorik, TransMIT GmbH, D-35392 Gießen  
[thummes@transmit.de](mailto:thummes@transmit.de)

Institut für Angewandte Physik, Justus-Liebig-Universität Gießen, D-35392 Gießen  
[g.thummes@ap.physik.uni-giessen.de](mailto:g.thummes@ap.physik.uni-giessen.de)

Unter allen regenerativen Kühlern zeichnet sich der Pulsrohrkühler (PRK) durch das Fehlen beweglicher Teile im Kaltbereich aus. Dies macht PRKs zu attraktiven Kandidaten für die störsame Kühlung ohne den Einsatz kryogener Flüssigkeiten. Die seit etwa 15 Jahren am TransMIT-Zentrum und der Universität Giessen entwickelten zweistufigen PRK-Typen erreichen bei einer Temperatur von 4.2 K Kälteleistungen von 0.2 W bis 1.0 W bei Verwendung von vom Gifford-McMahon-Kompressoren mit Leistungsaufnahmen von 2 kW bis 7.3 kW. Demonstrierte Anwendungen liegen z. B. im Bereich der Kryoelektronik, der Kühlung supraleitender Magnete und der Vorkühlung von 1 K- und Sub-Kelvin Kühlstufen. Weiterhin können PRKs auf einfache Weise zur Verflüssigung von Helium im kleinen Maßstab eingesetzt werden (Verflüssigungsgraten bis ca. 0,5 Liter/h). Bei höchstempfindlichen Anwendungen machen sich auch beim PRK die durch die periodische Druckänderung hervorgerufenen Restvibrationen und Temperatur-Oszillationen an der Kaltfläche störend bemerkbar. Auf Maßnahmen zur Dämpfung dieser störenden Effekte wird eingegangen. Außerdem zeigen PRKs gravitations-induzierte Konvektionsverluste im Pulsrohr, wenn der Kaltkopf aus der Vertikalen gekippt wird. Durch geeignete Wahl der Kühlergeometrie lassen sich die Konvektionsverluste bis zu Neigungswinkeln von 45° auf ein akzeptables Maß verringern.

**Stichwörter:**

Pulsrohrkühler, Flüssighelium-Temperaturen, Kryoelektronik, Magnetkühlung, Heliumverflüssigung

I.20

## Supraleitende Hot-Electron Bolometer als Detektoren für Terahertz-Strahlung

Heinz-Wilhelm Hübers<sup>1,2\*</sup>, Heiko Richter<sup>1</sup>, Alexej Semenov<sup>1</sup>, Konstantin Il'in<sup>3</sup>, Michael Siegel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Planetenforschung,  
Rutherfordstr.2, 12489 Berlin, Deutschland

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Institut für Optik und Atomare Physik,  
Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin, Deutschland

<sup>3</sup> Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme, Hertzstr. 16,  
76187 Karlsruhe, Deutschland

\* Korrespondenzautor, [heinz-wilhelm.huebers@dlr.de](mailto:heinz-wilhelm.huebers@dlr.de)

Der Terahertz-Spektralbereich (0,3 – 10 THz, 1 mm – 30  $\mu$ m) bietet eine Fülle von Anwendungen, sowohl wissenschaftlicher als auch kommerzieller Art. Supraleitende Detektoren sind für viele Anwendungen wesentliche Voraussetzung. Nanostrukturierte Hot-Electron Bolometer sind die empfindlichsten Mischere in Heterodynspektrometern oberhalb von ca. 1.2 THz. DLR und KIT entwickeln gemeinsam einen solchen Mischer für den 4,7 THz Hochfrequenzkanal des deutschen Heterodynempfängers GREAT, der auf SOFIA; dem Stratosphärenobservatorium für Infrarotastronomie eingesetzt wird. Der Mischere basiert auf einem ca. 5 nm dünnen,  $\mu$ m breiten und 0,2  $\mu$ m langen NbN Film, der sich auf einem Silizium-Substrat befindet und in eine planare Antenne eingebettet ist. Dieser Chip wiederum wird auf die Rückseite einer Siliziumlinse geklebt. Im Rahmen des Vortrags werden die physikalischen Grundlagen des Mischers, seine Detektionseigenschaften und sein zukünftiger Einsatz auf SOFIA vorgestellt. Als Spin-off Anwendung werden Hot-Electron Bolometer des gleichen Typs seit mehreren Jahren als Detektoren für ps-THz Pulse an Elektronenspeicherringen eingesetzt. Diese Ergebnisse werden ebenfalls vorgestellt.

I.21

## Sub-Kelvin Kryogenik für die erdgebundene THz-Astronomie

Ernst Kreysa

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn

Astronomische Beobachtungen im THz Spektrum (dh bei Wellenlängen unterhalb 1 mm Wellenlänge) können wesentliche Beiträge zum Verständnis des Universums liefern. Leider macht aber der nichtkondensierte Wasserdampf die Erdatmosphäre gerade diesen Spektralbereich fast undurchlässig. Nur an extremen Standorten, die hoch, kalt und trocken sind, können gelegentlich THz Beobachtungen gemacht werden. Das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn betreibt mit zwei Partnern das "Atacama Pathfinder Experiment" (APEX) in 5100 m Höhe auf dem Hochplateau von Chajnantor in der Atacama Wüste von Chile. APEX ist ein THz Teleskop von 12 m Durchmesser und einer Genauigkeit der Oberfläche von 15  $\mu$ m rms. Einige Empfänger müssen quasi kontinuierlich auf Temperaturen von etwa 300 mK in Bereitschaft gehalten werden, um Perioden guter atmosphärischer Transparenz auszunutzen zu können. An einem abgelegenen, extremen Standort wie Chajnantor ist die Versorgung mit flüssigem Helium sehr teuer und unzuverlässig. Kryogenik auf der Basis von Kühlmaschinen ist daher vorzuziehen. Zweistufige Pulsrohrkühler erzielen Temperaturen von 2,4 K. Auf dieser Basis kann man dann mit einem mehrstufigen He-4/He-3 Sorptionskühler Temperaturen unter 300 mK erreichen. Diese Endtemperatur muss allerdings auch unter Kippungen von +/- 45 ° stabil sein.

## Einsatz der Pulsröhrenkühler-Technologie zur Realisierung eines passiven Terahertz-Körperscanners

Detlef Born<sup>1\*</sup>, Torsten May<sup>1</sup>, Erik Heinz<sup>1</sup>, Gabriel Zieger<sup>1</sup>, Katja Peiselt<sup>1</sup>,  
Günter Thummes<sup>2</sup>, Hans-Georg Meyer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IPHT, Abteilung Quantendetektion, 07745 Jena, Deutschland  
[detlef.born@ipht-jena.de](mailto:detlef.born@ipht-jena.de)

<sup>2</sup> TransMIT GmbH, 35394 Gießen, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Elektromagnetische Wellen im Terahertz-Bereich versprechen aufgrund ihrer speziellen Eigenschaften verschiedene neuartige Anwendungen. Von Metallen werden sie reflektiert, dielektrische Materialien (Papier, Plastik, Textilien) sind weitgehend transparent, während polare Moleküle (z. B. biologische Substanzen) charakteristische Absorption bzw. Emission zeigen. Gleichzeitig ist die Wellenlänge klein genug, um bildgebende Verfahren mit Auflösungen im Millimeterbereich zu ermöglichen („Terahertz-Kameras“).

Im Fokus sind derzeit vor allem Anwendungen im Sicherheitsbereich, z. B. für Sicherheitskontrollen an Flughäfen oder zum Schutz militärischer Einrichtungen. Terahertz-Kameras können z. B. versteckte Objekte aus Metall oder organischen Substanzen unter der Kleidung von Personen aufspüren. Wegen ihrer höheren Akzeptanz in der Öffentlichkeit sind dabei passive Verfahren besonders interessant, bei denen die von den Personen selbst emittierte thermische Strahlung ausgenutzt wird.

Passive Terahertz-Kameras erfordern hochempfindliche Detektoren und tiefe Temperaturen, da Strahlungsleistungen von weniger als 1 pW detektiert werden müssen. Aus praktischen und anwendungsorientierten Gründen ist dabei der Aufbau eines solchen Systems auf einem Pulsrohrkühler naheliegend. Neben der Beschreibung der Funktionsweise des Körperscanners wird über die spezifischen thermischen und mechanischen Probleme berichtet, die bei der Entwicklung eines ersten Demonstrators zu lösen waren.

### Stichwörter:

THz-Videokamera, passiv, supraleitende Kantenbolometer

## Notizen

### II.1.01

## Strömungsinstabilität bei der Verdampfung von aufwärts strömenden Kältemittelgemischen

Arndt-Erik Schael

Linde AG, Geschäftsbereich Linde Engineering, Werk Schalchen, Tacherting, Deutschland  
[arndt-erik.schael@linde-le.com](mailto:arndt-erik.schael@linde-le.com)

Bei der aufwärts gerichteten Verdampfung von Kältemittelgemischen kann es unter bestimmten Umständen zu einer Strömungsinstabilität kommen, die der aus dem Dampfkesselbetrieb bekannten Ledinegg-Instabilität ähnelt. Dabei stellen sich in parallelen Kanälen bei gleichem Druckverlust unterschiedliche Massenströme ein. Der Unterschied zur Ledinegg-Instabilität liegt darin, dass das Kältemittel zweiphasig und nicht unterkühlt eintritt und dass annähernd eine konstante Temperaturdifferenz im Apparat herrscht anstatt konstanter Wärmestromdichte. Das Kältemittel tritt um 5 – 10 K überhitzt aus dem Verdampfer aus.

Die Ursache liegt in den unterschiedlichen Druckverlustanteilen aus denen sich der Gesamtdruckverlust des Kältemittels vom Eintritt in bis zum Austritt aus dem Tauscher zusammensetzt. Das sind bei einem aufwärts strömenden und verdampfenden Fluid der Reibungsdruckverlust der zweiphasigen Strömung und der überhitzenden Dampfphase, der hydrostatische Druckverlust und der Beschleunigungsdruckverlust. Während der hydrostatische Druckgradient mit zunehmendem Strömungsdampfgehalt stetig abnimmt, nimmt der Gradient des Beschleunigungsdruckverlustes mit zunehmendem Strömungsdampfgehalt bzw. steigender Temperatur stetig zu. Der Reibungsdruckgradient der überhitzenden Dampfphase nimmt ebenfalls mit steigender Temperatur zu. Berechnet man nun den Gesamtdruckverlust für unterschiedliche Massenströme, kann es unter bestimmten Bedingungen dazu kommen, dass man in einem Bereich für einen Druckverlust mehrere (also 2-3) mögliche Massenströme errechnet. Das heißt, dass es in einem Apparat mit mehreren parallelen Kanälen pro Strom zu unterschiedlichen Massenströmen in den Kanälen kommen kann. Dies führt zu mechanischen Beanspruchungen des Apparates und zu Minderleistung.

### II.1.02

## Thermisch-beschichtete Wärmeübertrager zur Verdampfung von Wasser bei niedrigen Drücken

Franz Lanzerath<sup>1</sup>, Gerrit Tebrügge<sup>1</sup>, Stephan Kalawrytinos<sup>2</sup>, André Bardow<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, 52062 Aachen  
[franz.lanzerath@ltt.rwth-aachen.de](mailto:franz.lanzerath@ltt.rwth-aachen.de), [andre.bardow@ltt.rwth-aachen.de](mailto:andre.bardow@ltt.rwth-aachen.de)

<sup>2</sup> PALLAS GmbH & Co. KG, Adenauerstr. 17, 52146 Würselen  
[info@pallaskg.de](mailto:info@pallaskg.de)

Das Kältemittel Wasser stellt in Adsorptionskälteanlagen hohe Anforderungen an die Wärmeübertrager. Dies liegt zum einen daran, dass bei klimatechnischen Anwendungen nur geringe Temperaturdifferenzen für den Verdampfungsprozess zur Verfügung stehen. Zum anderen sind die Verdampfungseigenschaften von Wasser im niedrigen Druckbereich deutlich schlechter als bei Umgebungsdruck. Bei klimatechnischen Anwendungen liegt die Verdampfungstemperatur bei etwa 15°C und der entsprechende Satt dampfdruck bei ca. 17,8 mbar. Blasensieden ist bei diesen Bedingungen erst bei Wandüberhitzungen von mehr als 20 K zu erwarten (McGillis, 1992). In modernen Verdampfern werden daher optimierte Rohrgeometrien verwendet. In der Literatur werden sogenannte Microfin-Rohre als besonders vorteilhaft für die Verdampfung von Wasser vorgeschlagen, da diese durch Ausnutzung des Kapillareffekts den Wärmeübergang verbessern und somit die notwendigen Wärmeübertragerflächen gering halten (Xia, 2008).

Im Rahmen dieser Studie werden thermisch-beschichtete Rohre der Firma Pallas als alternative Wärmeübertrager zur Verdampfung von Wasser bei niedrigen Drücken vorgestellt. Untersucht wird der Einfluss von Beschichtungen sowohl auf einfache, unstrukturierte Rohre, als auch auf berippte Rohre.

Da der Wärmeübergang bei der Verdampfung stark von der Benetzung der Rohre abhängt, erfolgt die Bilanzierung des Wärmedurchgangskoeffizienten ( $k$ -Wert) kontinuierlich über den Wasserfüllstand im Verdampfer: von komplett mit Wasser überstaute Rohren bis hin zu vollständig trocken gefallenen Rohren. Hierzu wurde ein neuartiges Prüfstandskonzept umgesetzt, das eine einfache Bestimmung des optimalen Betriebspunktes erlaubt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Beschichtungen ein 10-fach höherer Wärmeübergang gegenüber unbeschichteten Glattrohren bei der Verdampfung erreicht werden kann. Selbst gegenüber Microfin-Rohren weisen die beschichteten Rohre einen 30 % bis 70 % höheren  $k$ -Wert auf. Die Untersuchungen erlauben insbesondere eine quantitative Analyse des Einflusses des Wasserfüllstands auf den  $k$ -Wert. So konnte gezeigt werden, dass sich  $k$ -Werte von unter 1000 W/m<sup>2</sup>K durch eine optimale Wahl des Füllstands auf über 5000 W/m<sup>2</sup>K steigern lassen.

**Stichwörter:**

Verdampfung, Kältemittel Wasser (R718), thermische Beschichtung,  $k$ -Wert

### II.1.03

## Strömungsformen und Strömungsformkarten für die Verdampfung in horizontalen Rohren

P. Rollmann\*, K. Spindler

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[rollmann@itw.uni-stuttgart.de](mailto:rollmann@itw.uni-stuttgart.de)

Es wurde die Strömungsform beim Strömungssieden von R407C in einem horizontalen innenberippten Rohr und in einem Glattrohr untersucht. Dabei wurde die Massenstromdichte zwischen 25 und 300 kg/m<sup>2</sup>/s, die Sättigungstemperatur zwischen 10 und -30°C, die Wärmestromdichte zwischen 1000 und 20000 W/m<sup>2</sup> und der Dampfgehalt zwischen 0,1 und 1,0 variiert.

Es werden die Strömungsformkarten von Steiner sowie Wojtan, Ursenbacher und Thome vorgestellt. Beide Karten wurden für Glattrohre entwickelt. Ein Vorteil der Karte von Wojtan et al. besteht darin, dass die Strömungsformkarte in der Form Massenstromdichte über Dampfgehalt dargestellt wird. Somit lässt sich bei einer gegebenen Massenstromdichte der Verdampfungsweg durch Wärmezufuhr leicht nachvollziehen.

Die beobachteten Strömungsformen werden in die Strömungsformkarte von Wojtan et al. eingetragen. Es zeigt sich, dass Strömungsformkarten für Glattrohre wegen des unterschiedlichen Benetzungsverhaltens nicht für innenberippte Rohre geeignet sind. Durch die Helixstruktur der Rippen kommt es schon früher zur Ringströmung. Für innenberippte Rohre liegen bisher keine Strömungsformkarten vor. Anhand der Gleichung der Grenzkurve zwischen Wellen- und Ringströmung wird gezeigt, wie die Grenzkurve für berippte Rohre angepasst werden muss.

II.1.04

## **Neue Ergebnisse und Stand der Berechnungsmethoden für den Einfluß von Oberflächenstrukturen auf den Wärmeübergang beim Sieden**

**Björn C.F. Müller, Yabei Wang, Patrick Bujok und Andrea Luke**

FG Technische Thermodynamik (TTK), Universität Kassel

Die Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz von Kälteanlagen hängt u.a. von den im Verdampfer erzielten Wärmeübergangskoeffizienten ab. Gezielte Steigerungen des Wärmeübergangskoeffizienten werden durch Modifikation der Verdampferrohre erzielt. Deshalb werden Berechnungsmethoden für den Einfluß von Oberflächenstrukturen (Rauheit, Rippenstrukturen und hinterschnittene Strukturen von Hochleistungsrohren) auf den Wärmeübergang beim Sieden anhand einer großen Datenbasis experimenteller Ergebnisse diskutiert. Die behandelten Messungen betreffen verschiedene Kältemittel in weiten Bereichen des Druckes und der Wärmestromdichte. Als Heizflächen werden bevorzugt einzelne, horizontale Verdampferrohre aus unterschiedlichen Materialien, mit verschiedenen Durchmessern, Oberflächenbearbeitungen und Rippenstrukturen (einfache K-Rippen bis zu neuen Hochleistungsstrukturen) berücksichtigt.

Die Berechnungsmethoden aus der Literatur liefert für Glattrohre und die als Kältemittel in Frage kommenden reinen Flüssigkeiten relativ gute Ergebnisse für einen begrenzten Bereich von Druck und Wärmestromdichte bei der Beschreibung des Einflusses der Oberflächenstrukturen auf den Wärmeübergangskoeffizienten. Für Gemische ist die Vorausberechnung schlechter, da die Wärme- und Stoffübertragungsmechanismen wesentlich komplexer als bei reinen Stoffen sind und weniger experimentelle Daten zur Verfügung stehen. Für die komplizierten Strukturen von Hochleistungsrohren ist eine Vorherbestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten im technischen Anwendungsbereich bis jetzt noch nicht befriedigend möglich. Daher ist es das gemeinsame Ziel einer Gruppe von Hochschulinstituten mit Unterstützung der Industrie, einerseits eine theoretisch begründete Berechnungsmethode zum Wärmeübergang beim Sieden zu entwickeln und andererseits eine fundierte Datenbasis für die Auslegung von Verdampfern aufzustellen. Dafür werden neben Einzelrohren auch kleine Rohrbündel im Labormaßstab untersucht und die Ergebnisse im Technikum des Industriepartners verifiziert.

**Stichworte:**

Wärmeübergang, Behältersieden, Rippenrohr, Hochleistungsrohr, Rauheit

II.1.05

## Optische und CFD-gestützte Untersuchung von Ammoniak-Blasenströmungen in Ammoniakwasserlösung zur Entwicklung eines Mikrokanalabsorbers

**G. Schmid, C. Reichl, P. Benovsky, T. Fleckl, G. Pauschenwein, M. Monsberger**

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department,  
Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria  
[gerwin.schmid@ait.ac.at](mailto:gerwin.schmid@ait.ac.at)

Absorptionswärmepumpen stellen eine wichtige und vielversprechende Technologie zur Nutzung erneuerbarer Energieträger beziehungsweise zur Steigerung der Energieeffizienz sowohl im Gebäudetechnikbereich als auch von industriellen Prozessen dar. Der Absorber ist dabei eine kritische Komponente, die maßgeblich die Effizienz und Kosten solcher Systeme bestimmt.

Die Effizienz eines Zweiphasenplattenwärmetauschers hängt stark von der Verteilung der beiden Phasen im Wärmetauscher ab. Es hat sich gezeigt, dass Blasenströmungen für Absorptionsanwendungen sehr vielversprechend in Bezug auf kompakte Bauweisen sind. Um diese Strömungen zu charakterisieren wurde eine Versuchsanlage aufgebaut, mit Hilfe derer das Verhalten bei verschiedenen Kanalgeometrien und unterschiedlichen Gaseinlässen untersucht werden kann. Wegen der hohen Blasengeschwindigkeiten und der Turbulenz der Strömung ist es notwendig eine Hochgeschwindigkeitskamera für die Analyse von Form und Verhalten der Blasen einzusetzen. Um ein CFD-Modell (*computational fluid dynamics*) für die Anwendung auf kompliziertere und optisch unzugängliche Geometrien zu entwickeln, werden die optisch ermittelten und computergestützt ausgewerteten Daten mit CFD-Simulationen verglichen.

Die Ergebnisse sollen für die Entwicklung eines Hochleistungsplattenabsorbers für Ammoniakabsorptionswärmepumpen verwendet werden.

II.1.06

## Neue innovative Methode zur Bestimmung des Benetzungsverhaltens von Arbeitsstoffpaaren in Fallfilm-Plattenwärmeübertrager

**P. Dudziński\*, G. Pauschenwein, T. Fleckl, M. Monsberger**

AIT Austrian Institute of Technology, Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria  
[piotr.dudzinski@ait.ac.at](mailto:piotr.dudzinski@ait.ac.at)

Der steigende Bedarf an Kühlung und Klimatisierung erfolgt zurzeit hauptsächlich durch die Verwendung von elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen. Um den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen und die Stromnetze zu entlasten, werden in Zukunft Absorptionskältemaschinen unter Nutzung von Abwärme und Solarthermie eine wesentliche Rolle spielen. Für eine wirtschaftliche und kompakte Bauweise dieser Anlagen mit Kälteleistungen kleiner 10 kW stellen Fallfilm-Plattenwärmeübertrager eine zukunftsweisende Technologie dar. Wesentlich für deren Effizienz ist eine vollständige Benetzung der Plattenoberfläche. Aus diesem Grund wurden ein optisches Verfahren und eine Bildverarbeitungsmethode am AIT entwickelt, mit deren Hilfe die Beurteilung des Benetzungsgrades verschiedener Arbeitsstoffpaare an unterschiedlichen Oberflächenstrukturen und Fallfilmdicken (200 µm bis 60 µm) erfolgt. Mit dieser Methode ist es möglich eine optimale Abstimmung zwischen Arbeitsstoffpaaren und Plattenoberflächenstruktur zu erhalten. Dieses Wissen wird bei der Auslegung und Effizienzsteigerung zukünftiger Absorptionskälteanlagen einen wesentlichen Beitrag leisten.

### II.1.07

## Untersuchung der Einflüsse der Lamellenformen auf die Wärmeübertragungseigenschaften eines Trockenkühlturms

Dipl.-Ing. Diala Karmo, PD Dr.-Ing. habil. Salman Ajib

TU Ilmenau, Institut für Thermo- und Flüssigdynamik, 98693 Ilmenau, Deutschland  
[diala.karmo@tu-ilmenau.de](mailto:diala.karmo@tu-ilmenau.de), [salman.ajib@tu-ilmenau.de](mailto:salman.ajib@tu-ilmenau.de)

Zur Abkühlung oder Erwärmung von flüssigen Medien mittels Luft werden vorzugsweise Lamellenwärmeübertrager eingesetzt. Zur Erhöhung des übertragbaren Wärmestroms in solchen Wärmetauschern wurden in anderen Publikationen zahlreiche Lamellen- und Rohrkonfigurationen untersucht. Dabei wurden die Abstände zwischen den Lamellen als auch den Rohren variiert. In diesem Beitrag wird der Einfluss der Lamellenform auf das Wärmeübertragungsverhalten dargestellt. Dabei werden abgewinkelte und gebogene Lamellen sowie deren Dimensionen betrachtet. Der sich, für die jeweilige Geometrie, einstellende Strömungszustand wird mittels CFD (Fluent) simuliert und die übertragenen Wärmeströme berechnet. Zielsetzung ist eine Erhöhung der Wärmeübertragung ohne die äußeren Dimensionen des Wärmeübertragers zu vergrößern. Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass sich bei gebogenen Lamellen der Wärmeübergang erhöht. Dabei sind die Anzahl der Segmente<sup>1</sup> jeder Lamelle und die optimalen Abstände zwischen den Lamellen zu bestimmen. Weitere Details werden im Beitrag dargestellt.

**Stichwörter:**

Lamellenform, Wärmeübertragung, gebogene Lamellen.

<sup>1</sup> Der Lamellenabschnitt wird in gleichartige symmetrische Segmente eingeteilt.

### II.1.08

## Numerische Strömungssimulation an Edelstahl-Lamellenwärmeaustauschern

Stanislav Perencevic, M.Sc.

Güntner AG & Co. KG, F&E, 82256 Fürstenfeldbruck, Deutschland  
[Stanislav.Perencevic@guentner.de](mailto:Stanislav.Perencevic@guentner.de)

Im Rahmen der Entwicklung neuer Lamellensysteme für luftbeaufschlagte Wärmeaustauscher haben Untersuchungen an Wärmeaustauschern mit Edelstahl-Lamellen ergeben, dass es signifikante Diskrepanzen zwischen gemessener und theoretisch ermittelter Leistung gibt.

Bei der Leistungsberechnung eines Wärmeaustauschers ist die Kenntnis vom realen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_R$  und des Lamellenwirkungsgrades  $\eta_R$  grundlegend. Eine oft verwendete Methode zur Berechnung von  $\alpha_R$  und  $\eta_R$  stammt von Th. E. Schmidt und wird in vielen Lehrbüchern und auch im VDI Wärmeatlas beschrieben.

In diesem Vortrag werden anhand von CFD-Simulationen die Strömungsvorgänge und der Wärmetransport an einer Edelstahl-Lamelle analysiert. Es wird gezeigt, dass die Berechnungsmethode nach Th. E. Schmidt im Fall von Lamellen mit niedriger Wärmeleitungszahl und bei ungünstigen Lamellengeometrien stark abweichende Ergebnisse im Vergleich zu Messungen liefert. Die Gründe hierfür werden erläutert.

**Stichwörter:**

Wärmeübergangskoeffizient, Rippenwirkungsgrad, Edelstahl-Lamelle, CFD-Simulation

## II.1.09

# Berechnung wassergekühlter Lamellenrohr-Wärmeübertrager zur Entfeuchtung von Luft hoher Wasserbeladung

**Uwe Sievers**

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg,  
Institut für Energiesysteme und Brennstoffzellentechnik, 20099 Hamburg  
[uwe.sievers@haw-hamburg.de](mailto:uwe.sievers@haw-hamburg.de)

Der Prozessschritt der Luftentfeuchtung tritt u. a. in nach dem Luftbefeuchtungs-/Entfeuchtungsprinzip arbeitenden, solarbetriebenen Meerwasserentsalzungsanlagen sowie in Klimaanlagen auf. Die Temperatur der Luft und damit deren Wasserbeladung ist am Eintritt in den Entfeuchter einer solchen Meerwasserentsalzungsanlage deutlich höher als am Eintritt in den Entfeuchter einer Klimaanlage. Die höhere Wasserbeladung der Luft wirkt sich auf die Berechnung des Entfeuchters mit der darin ablaufenden Kondensation aus einem Gas-Dampf-Gemisch aus.

Bei der Berechnung von Luftentfeuchtern in Klimaanlagen werden für den gekoppelten Wärme- und Stoffübergang vereinfachende Annahmen getroffen, die bei höheren Wasserbeladungen der feuchten Luft nicht mehr gerechtfertigt sind. Die Berechnungsgleichungen ohne die vereinfachenden Annahmen werden zusammengestellt. Als Luftentfeuchter werden neben Plattenwärmeübertragern auch Lamellenrohr-Wärmeübertrager eingesetzt. In Entfeuchtern von Meerwasserentsalzungsanlagen dient die bei der Kondensation und Abkühlung des Gas-Dampf-Gemisches frei werdende Wärme ganz oder teilweise zur Vorwärmung des zu entsalzenden Meerwasser, welches anschließend auf solarthermischem Wege weiter erwärmt wird. Während der Wärmeübergang einerseits für die Meerwasserkühlung durch die üblichen Gleichungen aus dem VDI-Wärmeatlas beschrieben werden kann, sind andererseits für den gekoppelten Wärme- und Stoffübergang auf der Rohraußenseite und an den Lamellen recht unterschiedliche Berechnungsgleichungen in der Literatur zu finden. Diese werden miteinander verglichen und geeignete Wärmeübergangsbeziehungen ausgewählt. Hiermit werden exemplarisch wassergekühlte Lamellenrohr-Wärmeübertrager zur Entfeuchtung von Luft mit hoher Wasserbeladung berechnet.

**Stichwörter:**

Luftentfeuchter, Lamellenrohr-Wärmeübertrager, Meerwasserentsalzungsanlage, Kondensation von Gas-Dampf-Gemischen, gekoppelter Wärme- und Stoffübergang

## II.1.10

# Messergebnisse der Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge eines berieselten Absorbers

**PD Dr.-Ing. habil. Salman Ajib<sup>\*</sup>, Dipl.-Ing. Wolfgang Günther**

Technische Universität Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluiddynamik,  
P.O. Box 100565, 98684 Ilmenau  
[salman.ajib@tu-ilmenau.de](mailto:salman.ajib@tu-ilmenau.de), [wolfgang.guenther@tu-ilmenau.de](mailto:wolfgang.guenther@tu-ilmenau.de)

Im Rahmen der Forschungsarbeiten im Institut für Thermo- und Fluiddynamik der TU Ilmenau werden solar betriebene Absorptionskältemaschinen im Hinblick auf ihre Betriebsweise untersucht und optimiert. Zur Optimierung der Betriebsweise der Anlage soll die Benetzung der Wärmetauscherrohre der Komponenten Austreiber, Kondensator, Verdampfer und Absorber beim Betrieb der Anlage verbessert werden.

Zu diesem Zweck wurde einen Versuchsstand, welcher den Absorber der Absorptionskältemaschine repräsentiert (als Modell), aufgebaut und thermisch vermessen. Es wurden mehrere Messreihen zur

Ermittlung der Eigenschaften der Massen- und Wärmetransportvorgänge unter verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Dabei wurden die Berieselungsstärke, die Temperaturen und die Konzentration der Lösung berücksichtigt. Die Versuchsreihen fanden bei verschiedenen Kühlwasser-temperaturen statt. Weiterhin, wurden zwei Rohrarten, glatt Rohre und berippte Rohre untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die Effektivität der Berieselung und demzufolge der Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Wärmeaustauschfläche von der Art der Flüssigkeitsverteiler und Rauigkeit der Rohroberfläche abhängig ist. Je homogener die Flüssigkeitsverteilung ist, desto besser ist die Benetzung der Oberfläche der Wärmetauscherrohre; und je höher die Rauigkeit der Oberfläche ist, desto besser ist der Wärmedurchgangskoeffizient des Wärmetauschers. Der Wärmedurchgangskoeffizient eines berippten Rohres ist je nach Kühlwassertemperatur ca. 30 bis 50% höher als bei glatten Rohren, bei gleichen Abmessungen und Randbedingungen.

In diesem Beitrag werden die Messergebnisse, insbesondere der Einfluss der Berieselungsstärke und der Berippung auf die Wärme- und Stoffübertragungskoeffizienten zwischen verschiedenen Medien vorgestellt und Optimierungsvorschläge abgeleitet und diskutiert.

**Stichwörter:**

Filmberieselung, Versuchsstand, Wärme- und Stofftransportvorgänge, Lösungsverteiler.

## II.1.11

# Erste Betriebserfahrungen mit neuartigen Resorptionskältemaschinen zur Nutzkälteerzeugung aus Abwärme

Thomas Weimer<sup>1\*</sup>, Kirsten Helle<sup>2</sup>, Stefan Peil<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Makatec GmbH, Siemensstrasse 3, 71149 Bondorf  
[weimer@makatec.eu](mailto:weimer@makatec.eu)

<sup>2</sup> Institut für Energie- und Umwelttechnik IUTA e.V., Bliersheimer Str. 60, 47229 Duisburg  
[helle@iuta.de](mailto:helle@iuta.de)

Resorptionsanlagen zur Kälteerzeugung aus Abwärme bestehen aus zwei Lösungskreisläufen mit Absorber, Desorber und Lösemittelwärmeübertrager, zwischen denen gasförmiges Kältemittel ausgetauscht wird. Durch den Einsatz einer Resorptionsverschaltung für ammoniakbasierte Absorptionskälteanlagen kann auf die Gasaufbereitung verzichtet werden. Der Einbau kompakter Apparate, wie z. B. Plattenwärmeübertrager oder neuartige Membrankontaktoren mit integriertem Wärmeübertrager für Desorber und Absorber, ermöglicht kompakte Anlagen zur Kälteerzeugung auch im Temperaturbereich unter 0°C zu realisieren. Somit können erstmals kostengünstige Anlagen zur Nutzkälteerzeugung mit thermischer Antriebsenergie bereitgestellt werden.

Zunächst wird die Resorptionsverschaltung erläutert und ein Vergleich mit konventionellen Absorptionsanlagen hinsichtlich Anlageneffizienz und technischer Prozessparameter durchgeführt. Weiterhin werden interessante Anwendungsmöglichkeiten in der Kälte- und Klimatechnik für Resorptionsanlagen vorgestellt, z. B. die Kombination mit einem Eisspeicher zur Spitzenlastabdeckung.

Erste Betriebserfahrungen mit zwei Resorptionsanlagen betreffen eine kleine Anlage im universitären Umfeld mit 3 kW Kälteleistung am IUTA e.V. und eine Resorptionsanlage mit 50 kW Kälteleistung in Kombination mit einem Eisspeicher. Die kleine Resorptionsanlage wird mit einer HT-PEM Brennstoffzelle beheizt, die größere Anlage mit Fernwärme. Für beide Anlagen liegen inzwischen umfangreiche Messdaten vor.

Zum Abschluss werden zukünftige Einsatzgebiete kurz skizziert. Dies betrifft neben mobilen Anwendungen der Resorptionsanlagen zur Kühlung mit Motorabwärme auch Anwendungen mit völlig neuartigen Kältemitteln.

**Stichwörter:**

Abwärmenutzung, Resorption, Nutzkälte, Kältespeicherung

### II.1.12

## Experimentelle Untersuchungen an einem hocheffizienten Generator einer direkt befeuerten Absorptionswärmepumpe

P. Benovsky<sup>1\*</sup>, T. Fleckl<sup>1</sup>, M. Monsberger<sup>1</sup>, A. Bangheri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology  
Energy Department, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, Austria  
[peter.benovsky@ait.ac.at](mailto:peter.benovsky@ait.ac.at)

<sup>2</sup> Heliotherm Wärmepumpentechnik GmbH  
Sportplatzweg 18, 6336 Langkampfen, Austria  
[andreas.bangheri@heliotherm.com](mailto:andreas.bangheri@heliotherm.com)

Direkt befeuerte Absorptionswärmepumpen stellen eine zukunftweisende Technologie dar, mit der neben der im Brennstoff gespeicherten Energie auch erneuerbare Energieformen, zum Beispiel Erdwärme, für Heizzwecke genutzt werden kann. Damit ist es möglich Effizienzen zu erzielen, die jene der Brennwerttechnik um 50 – 100 % übersteigen. Besonders interessant ist die Absorptionswärmepumpe für den Bereich der Gebäudesanierung. Eine Schlüsselkomponente stellt dabei der Generator dar, dessen Wirkungsweise einen großen Einfluss auf den COP der Gesamtanlage hat. Daher wurde am AIT eine Versuchsanlage zur Charakterisierung der Wirkungsweise eines neuen Generatorkonzeptes errichtet und umfangreiche Messungen bei verschiedenen Betriebsbedingungen durchgeführt. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden zur weiteren Optimierung des Konzeptes und der Regelungsstrategie der Gesamtanlage verwendet.

### II.1.13

## Entwicklung einer direkt solar angetriebenen Kälteanlage auf Basis des Diffusions-Absorptionskälteprozesses

F. Schmid, M. Zetsche, K. Spindler

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[schmid@itw.uni-stuttgart.de](mailto:schmid@itw.uni-stuttgart.de)

In den letzten Jahren lag der Focus der solaren Kühlung auf Ad- und Absorptionskälteanlagen. Diese Anlagen haben einen Leistungsbereich von mehr als 10 kW. Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik wird ein neues Konzept zur dezentralen solaren Kühlung entwickelt. Grundlage ist der Diffusions-Absorptionskälteprozess. Hierbei erfolgt der Lösungsmittelumlauf durch das Thermosiphonprinzip. Dadurch hat die entwickelte Anlage den Vorteil, dass sie verschleißfrei, strom- und geräuschlos arbeitet. Die Bauteile der Kälteanlage werden teilweise direkt in den Solarkollektor integriert (Thermosiphonpumpe/Austreiber). In einem ersten Forschungsprojekt wird eine Kälteleistung von circa 400 W angestrebt. Für größere Kälteleistungen sollen mehrere Anlagen modular verschaltet werden. Durch den im Solarkollektor ebenfalls integrierten Mäander, kann der Solarkollektor bei Bedarf auch zur Brauchwassererwärmung eingesetzt werden.

Die Anlage wurde im Labor vermessen. Dabei wurde der Einfluss von unterschiedlichen Heizleistungen sowie der Einfluss von Rückkühlung durch freie und erzwungene Konvektion auf die Kälteleistung der Anlage untersucht. Die inneren Wärmeübertrager haben einen großen Einfluss auf die Leistung sowie die Leistungszahl der Anlage. Im Zuge der Entwicklung sind verschiedene Wärmeübertrager untersucht und in der Anlage getestet worden.

Im Vortrag wird das Verfahren zur Kälteerzeugung detailliert beschrieben und die Laboranlage vorgestellt. Weiterhin wird über die ersten Betriebserfahrungen und die gewonnenen Messwerte berichtet. Die zukünftigen Entwicklungsschritte und Potentiale der Technik werden abschließend erläutert.

II.1.14

## Neuartiges Zyklenkonzept mit verbesserter interner Wärmerückgewinnung für Adsorptionskältemaschinen

Valentin Schwamberger<sup>1\*</sup>, Christian Glück<sup>1</sup>, Dr. Ferdinand P. Schmidt<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsgruppe Energie- und Gebäudetechnologie, Fachgebiet Strömungsmaschinen, 76131 Karlsruhe, Deutschland  
[valentin.schwamberger@kit.edu](mailto:valentin.schwamberger@kit.edu)

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Thermische Anlagen und Gebäudetechnik, 79110 Freiburg, Deutschland

Verglichen mit Adsorptionskältemaschinen haben Adsorptionskältemaschinen einen deutlich geringeren COP. Grund hierfür ist die interne Wärmerückgewinnung zwischen Adsorptions- und Desorptionsphase, die bei den diskontinuierlichen arbeitenden Adsorptionsmaschinen weniger effektiv ist. Bei einem neuen Zyklenkonzept [2], das am Fraunhofer ISE und am KIT entwickelt wurde, wird ein thermischer Schichtspeicher zur Zwischenspeicherung der Wärme eingesetzt. Dies ermöglicht einerseits einfachere Systeme mit nur einem Adsorber, andererseits aber auch einen größeren Anteil an sensibler und sorptiver Wärme, die zurückgewonnen werden kann. Ein Patent auf das Stratisorp-Systemkonzept wurde angemeldet [1]. Ein Wärmeträgerfluid, das gleichzeitig als Speichermedium dient, wird mittels einer Ladelanze temperaturabhängig in den Speicher eingeschichtet. Gleichzeitig lässt sich mittels einer Anzahl von Extraktionsringen Fluid mit der momentan am Adsorber benötigten Temperatur entnehmen. Auf diese Weise kann die Adsorptionsmaschine mit sehr geringen treibenden Temperaturdifferenzen betrieben werden, und die freiwerdende Adsorptionswärme kann während des Desorptionshalbzykluses benötigte Antriebswärme ersetzen. Im Kühlfall können mit dem Stratisorp-System Coefficients of Performance (COP) von bis etwa 1 erreicht werden, was typische einstufige Adsorptions- und Adsorptionsmaschinen übertrifft.

Im verwendeten Simulationsmodell werden Adsorber sowie das Fluid im Hydraulikkreis und im Speicher als Propfenströmung in Strömungsrichtung diskretisiert, um die auftretenden großen Temperatur- und Beladungsgradienten ausreichend abbilden zu können. Bei der Simulation in MATLAB® wird die Wärmeübertragung gekoppelt mit der Propfenströmung und den Adsorptionsgleichungen gelöst. Die Leistungsfähigkeit des Systems wird bei einer Antriebstemperatur von 130 °C aus Solarkollektoren und mit Wasser als Wärmeträgerfluid unter wechselnden Randbedingungen und Regelungsparametern untersucht. Der integrierte Speicher dient hier auch als Pufferspeicher für den schwankenden solarthermischen Ertrag. Aufgrund seines großen Temperaturüberlapps von Adsorptions- und Desorptionswärme wird das Adsorptionspaar Zeolith/Wasser verwendet.

Das System eignet sich auch für eine Wärmepumpenanwendung [3], dann aber mit höheren Antriebstemperaturen. Aufgrund des hohen Dampfdrucks von Wasser wird hierfür Thermoöl als Wärmeträgerfluid verwendet.

### Stichwörter:

Adsorption, Wärmerückgewinnung, Stratisorp, Schichtspeicher, Modellierung

- [1] Munz, G., Schmidt, F. P., Núñez, T., Schnabel, L., *Adsorption Heat Pump with Heat Accumulator*, US Patent Application US 2009/0282846 A1, 2009.
- [2] Schmidt, F. P., Füldner, G., Schnabel, L., Henning, H.-M., Novel cycle concept for adsorption chiller with advanced heat recovery utilising a stratified storage. *Proc. 2nd International Conference Solar Air-Conditioning*, Tarragona, Spanien, 2007, 618–623.
- [3] Schwamberger, V., Joshi, C., Schmidt, F. P., Second law analysis of a novel cycle concept for adsorption heat pumps, *Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf.*, Padua, Italien, 2011, 991–998.

## II.1.15

# Potenzial und Grenzen von Natriumhydroxid als Zusatz zum Stoffpaar Ammoniak/Wasser in Absorptions-Wärmepumpen

Oleksandr Kotenko\*, Harald Moser, René Rieberer

Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, 8010 Graz, Österreich  
[oleksandr.kotenko@tugraz.at](mailto:oleksandr.kotenko@tugraz.at)

Die Verwendung von Natriumhydroxid (NaOH) als Zusatz zum Arbeitsstoffgemisch Ammoniak/Wasser wurde von verschiedenen Autoren vorgeschlagen, um den Rektifikationsaufwand zu senken und die Effizienz des Prozesses zu erhöhen. In der einschlägigen Literatur sind gemessene Dampf-Flüssig-Gleichgewichts-Daten von diesem Dreistoffgemisch zu finden. Die mit diesen Daten durchgeföhrten thermodynamischen Rechnungen zeigen, dass die Effizienz (COP) durch die Zugabe von Natriumhydroxid in einer Ammoniak/Wasser-Absorptionswärmepumpe theoretisch erhöht werden kann.

Zur Überprüfung dieser Theorie wurde am Institut für Wärmetechnik ein Prüfstand aufgebaut, mit welchem Messungen mit dem Dreistoffgemisch Ammoniak/Wasser/Natriumhydroxid durchgeföhr werden können.

In diesem Artikel wird der Einfluss von Natriumhydroxid als Zusatz zum Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser sowohl messtechnisch als auch mittels Simulation analysiert:

Zuerst werden der Aufbau des Prüfstandes und die Regelung kurz beschrieben. In weiterer Folge werden die Messergebnisse mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser ohne Zugabe und mit Zugabe von Natriumhydroxid dargestellt und diskutiert. Anschließend werden die Messergebnisse anhand thermodynamischer Rechnungen mit ASPEN Plus analysiert. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Rektifikations- und Absorptionsvorgänge sowie auf die Effizienz des Prozesses gelegt.

Basierend auf den Mess- und Simulationsergebnissen werden das Potential von Natriumhydroxid bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten abgeschätzt und die Randbedingungen für den Betrieb diskutiert.

### Stichwörter:

NaOH Zusatz, Effizienz, Experiment, Simulation

### II.1.16

## Effizienzsteigerung einer Ammoniak/ Wasser- Absorptionskältemaschine

**T. Koller\*, M. Zetzsche, F. Schmid, K. Spindler**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[koller@itw.uni-stuttgart.de](mailto:koller@itw.uni-stuttgart.de)

Das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart entwickelt eine solar angetriebene Absorptionskältemaschine mit dem Arbeitspaar Ammoniak/Wasser. Die fortlaufende Entwicklung der Kältemaschine wurde in den letzten Jahren regelmäßig auf der DKV-Tagung vorgestellt und anhand von Messdaten und Simulationen diskutiert.

Im aktuellen Beitrag werden anhand von Messdaten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Absorptionskältemaschine vorgestellt und bewertet. Durch eine Steigerung des Lösungsmittelumlaufs und Anpassung der Regelung des Lösungsmitteldurchflusses gelingt es z.B. die Antriebstemperatur deutlich zu senken, bei gleichbleibender Kälteleistung.

Ein weiterer wesentlicher Schritt ist die Weiterentwicklung der Absorptionskältemaschine zu einer rein luftgekühlten Anlage. Hierfür ist eine Neukonstruktion von Absorber und Kondensator erforderlich.

Ziel ist es den Verbrauch von elektrischer Energie für die Kühlung der Absorptionskältemaschine deutlich zu senken. Bisher wird die Absorptionskältemaschine mit einem trocken arbeitenden Rückkühler gekühlt. Für diese Kühlvariante ist allerdings die Umwälzung des Kühlmittels zwischen Kondensator und Absorber der Kältemaschine und dem Rückkühler mit Umwälzpumpen notwendig. Weitere elektrische Verbraucher sind die Ventilatoren des Rückkühlers.

Im Beitrag werden daher die ersten Ergebnisse dieser Weiterentwicklung präsentiert und zur Diskussion gestellt.

## II.1.17

# Ionische Flüssigkeiten: Neue Einsatzmöglichkeiten für Absorptionskältemaschinen und –Wärmepumpen

M.-C. Schneider<sup>1</sup>, O. Zehnacker<sup>2</sup>, R. Schneider<sup>3</sup>,  
A. Kühn<sup>3</sup>, F. Cudok<sup>3</sup>, T. Meyer<sup>3</sup>, M. Seiler<sup>1\*</sup>, F. Ziegler<sup>3\*\*</sup>

<sup>1</sup> Evonik Degussa GmbH, Advanced Intermediates, New Business Development,  
Rodenbacher Chaussee 4, 63457 Hanau  
[matthias.seiler@evonik.com](mailto:matthias.seiler@evonik.com)

<sup>2</sup> Evonik Degussa GmbH, Fluid-Verfahrenstechnik,  
Rodenbacher Chaussee 4, 63457 Hanau

<sup>3</sup> Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT2,  
Marchstr. 18, 10587 Berlin  
[felix.ziegler@tu-berlin.de](mailto:felix.ziegler@tu-berlin.de)

Der Hauptvorteil in der Entwicklung von Absorptionskältemaschinen und –wärmepumpen liegt in dem Prinzip der Mehrstufigkeit und im Zusammenhang damit in der Auswahl des Arbeitspaars. Obwohl in den letzten Jahrzehnten viele Arbeitsstoffpaare für Absorptionskälteanlagen vorgeschlagen wurden, werden hauptsächlich H<sub>2</sub>O/LiBr und NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O eingesetzt. Bei Klimaanwendungen dominieren LiBr-Anlagen, da sie gegenüber Ammoniak-Anlagen eine bessere Effizienz aufweisen, weniger Eigenstrom verbrauchen und kompakter gebaut werden können. Eingeschränkt ist der Einsatz von H<sub>2</sub>O/LiBr-Systemen bei hohen Kühlwasser- oder hohen Antriebstemperaturen aufgrund der Kristallisationsgefahr der Lösung, insbesondere wenn gleichzeitig das Kaltwassertemperaturniveau niedrig ist. NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Systeme zeigen vor allem Nachteile durch Toxizität, hohen Arbeitsdruck und die Notwendigkeit von Rektifikation.

Da zunehmend mehr trockene Rückkühlssysteme in Verbindung mit Absorptionsanlagen eingesetzt werden (z.B. ist in Frankreich der Einsatz von Nasskühltürmen in Wohngebieten nicht zulässig) und vermehrt Anfragen zum Einsatz thermischer Kühlung auf Basis solarer Kälte oder Fernkältenetzen aus heißen und trockenen Klimazonen eingehen, bietet sich ein interessantes Einsatzgebiet für Arbeitsmittel, die nicht durch Kristallisation in ihrem Einsatz begrenzt sind, aber trotzdem die Vorteile der LiBr-Anlagen bieten.

Eine ausgiebige Suche nach geeigneten Absorbentien, vor allem zum Ersatz von LiBr, führte zu einer aussichtsreichen Gattung von Salzen, die bei Raumtemperatur flüssig sind und ein erfolgversprechendes Potential zum Einsatz in Absorptionsanlagen zeigen: Ionische Flüssigkeiten (IL). Die in diesem Artikel zusammengefassten Nachteile können durch maßgeschneiderte Arbeitspaare auf Basis von ILs der Evonik Degussa überwunden werden. In einem gemeinsamen Forschungsprojekt von Evonik Degussa und TU Berlin werden diese Arbeitspaare hergestellt und thermodynamisch charakterisiert. An der TU Berlin wurde ein Prototyp einer Absorptionskältemaschine (< 10kW) mit einer Glashülle aufgebaut, um Phänomene des Wärme und Stofftransports, Betriebsverhalten und Wirkungsgrad dieser zukunftsträchtigen Absorbentien zu untersuchen. Es werden Testergebnisse im Vergleich zum Stand der Technik präsentiert und diskutiert.

### Stichworte:

Absorptionskälteanlage, Absorptionswärmepumpe, Absorbent, ionische Flüssigkeiten, Wärme- und Stoffübergang

II.1.18

## Geothermisch- und sorptionsgestützte Klimatisierung in der HafenCity Hamburg

Dipl.-Ing. Jan Wrobel, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz

Institut für Thermofluiddynamik, Technische Thermodynamik  
Technische Universität Hamburg-Harburg  
Denickestraße 17, D-21073 Hamburg  
jan.wrobel@tu-harburg.de

Zunehmende Dictheit der Gebäude sowie regionale Wetterverhältnisse machen zum Teil eine Klimatisierung unumgänglich. Vor allem die Entfeuchtung verursacht jedoch bei der konventionellen Klimatisierung einen hohen Kälte- und damit auch Energiebedarf, da die Luft unter die Taupunkttemperatur abgekühlt werden muss, um das Wasser zu kondensieren. Natürliche Kältequellen (z. B. Erdreichkühlung) können, aufgrund des zur Verfügung stehenden Temperaturniveaus, in diesem Zusammenhang nur unzureichend genutzt werden. Eine Alternative zur Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung bieten Sorptionskörper wie z. B. Sorptionsräder. Diese nutzen die hygrokopischen Eigenschaften bestimmter Stoffe wie z. B. Lithiumchlorid (LiCl) oder Silicagel, um die Luft zu entfeuchten. Der Kältebedarf wird dabei durch die vorhergehende Entfeuchtung deutlich reduziert. Kältequellen mit einem Temperaturniveau zwischen 16 °C und 19 °C können genutzt werden. Für die Regeneration des Sorptionskörpers ist zusätzlich thermische Energie erforderlich. Grundidee des hier beschriebenen Verfahrens ist die Verknüpfung der sorptionsgestützten Klimatisierung mit natürlichen Wärmequellen (Solarthermie) und Wärmesensen (Erdreich). Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Forschung sowie von der Freien und Hansestadt Hamburg geförderten Projekts haben die Institute Thermofluiddynamik, Technische Thermodynamik und Geotechnik und Baubetrieb eine Pilotanlage nach diesem Konzept in der HafenCity Hamburg realisiert. Als Wärmequelle steht die Nutzung von Solarthermie und Fernwärme zur Verfügung. Die Erschließung des Erdreichs erfolgt durch 3 Erdwärmesonden mit je 75 m Länge und 5 Energiepfählen mit je 14 m Länge. Durch die Einbindung vorhandener Eigenkonvektionskühlbalken oder dem Fußbodenwärmevertrager und der Beschränkung der Frischluftzufuhr auf die hygienisch notwendige Luftwechselrate, kann der Anlagenbetrieb noch weiter energetisch optimiert werden. Anhand der Messperiode Sommer 2010 der Pilotanlage Hamburg HafenCity konnte bereits gezeigt werden, dass es möglich ist, mit einer kältemaschinenfreien Klimatisierung eine signifikante Primärenergieeinsparung zu realisieren. Mit Messdaten aus der Messperiode Sommer 2011 kann diese Aussage validiert werden.

**Stichwörter:** Klimaanlage, Sorption, Geothermie, Erdsonden, Energiepfähle Ökologisch

## II.1.19

# Untersuchung der eisvermindernden Wirkung von neuen Materialbeschichtungen

Ralf Noack

Institut für Luft und Kältetechnik Gemeinnützige Gesellschaft mbH,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, D-01309 Dresden  
[ralf.noack@ilkdresden.de](mailto:ralf.noack@ilkdresden.de)

Die Reif- und Eisbildung an Kühltaggregaten, Tragflächen und Rotorenblättern erfordert einerseits einen zusätzlichen Energieaufwand im Betrieb und andererseits zusätzliche Maßnahmen zur mechanischen, chemischen und thermischen Enteisung, um die Funktionsfähigkeit und/oder Betriebs-sicherheit der Systeme zu gewährleisten.

Um den gesamtwirtschaftlichen Aufwand und die daraus resultierende CO<sub>2</sub>-Emission, der durch Eis- und Reifbildung innerhalb der Kältetechnik entsteht, abzuschätzen, wurde ausgehend von dem Bedarf an Elektroenergie zur Kälteerzeugung dieser jährliche Anteil abgeschätzt.

Eine Gefrierpunkt erniedrigenden Wirkung an der Bauteilloberfläche im Bereich von 1 oder 2 K hat eine signifikante Auswirkung auf die wirtschaftliche Funktionsweise einer mit Luftwärmetauschern betriebenen Kälteanlage oder Wärmepumpe in Mitteleuropa.

Im Ansatz wurden zwei Schichtentwicklungsrichtungen verfolgt, die die Reif- oder Eisbildung an der Oberfläche verhindern oder zu tieferen Temperaturen verschieben sollen. Durch Projektpartner im Rahmen eines Verbundprojektes wurden Schichten entwickelt, einerseits auf Basis eines Lacks und andererseits auf Basis von multifunktionellen Polymeren. Auf die eigentliche Schichtentwicklung wird innerhalb des Vortrages nicht eingegangen, sondern vielmehr auf die Untersuchungsmethodik und Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Wirksamkeit der Schichten auf Materialproben und realen Luft-Wärmeübertragern. Es werden Testmethoden vorgestellt, die zur Bestimmung der Adhäsions-wirkung des Eises auf der beschichteten Oberfläche im Vergleich zur unbeschichteten Oberfläche geeignet sind.

**Stichwörter:**

Wärmetauscher, Eisverminderung, Beschichtung, Testverfahren

## II.1.20

# Impact of supercritical CO<sub>2</sub> on the material properties of cooling devices

**Yvonne Müller\*, Monika Knabe, Thomas Guhleman, Linda Russek,  
Christina Mann, Siegfried Römer**

Institute of Air Handling and Refrigeration, Applied New Technologies (Materials/Measurement Technology), Bertolt-Brecht Allee 20, 01309 Dresden, Germany  
[ymueller@ilkdresden.de](mailto:ymueller@ilkdresden.de)

Carbon dioxide has a long tradition in the field of natural refrigerants. Nowadays CO<sub>2</sub> becomes even more attractive for cooling purposes due to its low global warming potential, no ozone-depleting potential, and its environmental compatibility. However, due to its material properties the use of CO<sub>2</sub> is not unproblematic. The higher pressure levels require the development of technically improved components. Moreover, the temperature plays an important key feature as carbon dioxide merges into the super critical state ( $p > 74$  bar, critical pressure) at temperatures above 31 °C (critical temperature). This state can be reached during the operation of the cooling device but also, which might be more important, during resting state at ambient temperature higher than the critical temperature. The resulting interactions of the refrigerant with eligible materials of a cooling device (stationary, mobile) e.g. elastomers, thermoplastics, and enameled wires can result in premature aging of the materials

which in turn can cause a system failure. The damage mechanisms as well as the mutual influence of refrigerant, lubricants as well as construction- and sealing materials in highly stressed CO<sub>2</sub>-thermo processing plants are mostly unexplored being an obstacle for the introduction of the environmentally friendly cold application. Here the question especially arises whether the currently available materials are permanently suitable for applications as valve seals, high-pressure hoses, and insulating materials. Within a present study performed at ILK Dresden mutual interactions of thermal pollution, supercritical CO<sub>2</sub> as refrigerant and lubricants are investigated with respect to the effect of supercritical CO<sub>2</sub> on the functional resistivity of thermoplastics (PTFE, PBT, PA), elastomers (HNBR, FKM, EPDM, CR), and enameled copper wires. The effect of temperature, pressure and media on the material's properties is investigated phenomenologically. Based on this knowledge technical application limits of the materials for refrigeration purposes in the presence of supercritical carbon dioxide can be pointed out which in turn might provide the impetus for alternative material formulations.

**Key words:**

Carbon dioxide, supercritical state, elastomers, thermoplastics, enameled wires

### II.1.21

## Experimentelle Untersuchung des Schmelzvorgangs von Phase Change Materials in Aluminium-Trägerstrukturen

**Ekkehard Lohse<sup>\*</sup>, Gerhard Schmitz**

Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Thermofluidodynamik,  
Technische Thermodynamik, 21073 Hamburg, Deutschland  
[ekkehard.lohse@tu-harburg.de](mailto:ekkehard.lohse@tu-harburg.de), [schmitz@tu-harburg.de](mailto:schmitz@tu-harburg.de)

Sogenannte Phase Change Materials bieten die Möglichkeit große Wärmemengen durch den Phasenwechsel von fest nach flüssig aufzunehmen. Dies macht den Einsatz als zeitlich begrenztes Kühlsystem bei gleichzeitig geringem Gewicht in sicherheitsrelevanten Flugzeugsystemen interessant. Allerdings erschwert die geringe Wärmeleitfähigkeit die gleichmäßige Be- und Entladung größerer PCM-Speichermasse. Das führt dazu, dass kritische Systemtemperaturen schon überschritten werden, während ein Großteil der Speichermasse noch ungenutzt bleibt.

Die Verteilung von Wärme kann durch die Kombination mit einer Trägerstruktur aus Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit erheblich verbessert werden. Durch Selektives Lasersintern lassen sich beliebige dreidimensionale Aluminiumstrukturen fertigen, die als Trägerstruktur verwendet werden. Dies erlaubt die Optimierung der Trägerstruktur unter besonderer Berücksichtigung der Wärmequelle.

In dem Vortrag werden die Ergebnisse von Versuchen zur Beladung von PCM-Speichern mit unterschiedlichen Trägerstrukturen vorgestellt. Dabei werden nicht nur Temperaturverläufe gemessen sondern auch der Schmelzvorgang mithilfe einer Kamera optisch überwacht und ausgewertet. Abschließend werden die Versuchsergebnisse mit FEM-Simulationen verglichen.

**Stichwörter:**

Phase Change Materials, Latentwärmespeicher, Kühlung

## II.1.22

# Eisbreierzeugung durch sekundäre Keimbildung

**Susanne Frank, Michael Kauffeld**

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU)  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe  
[susanne.frank@hs-karlsruhe.de](mailto:susanne.frank@hs-karlsruhe.de)

Eisbrei ist umweltfreundlicher Kälteträger mit hoher Effizienz der auch vorteilhaft als Kältespeichermedium eingesetzt werden kann. Die Anzahl der Eisbreianlagen weltweit steigt stetig an. Als ein Hemmnis der breiteren Anwendung von Eisbrei sind derzeit in erster Linie noch die hohen Investitionskosten zu nennen. Der Eisbreigenerator (in der Regel als Kratzverdampfer ausgeführt) ist in der Eisbreianlage noch immer das teuerste Bauteil

Der Einsatz von Oberflächen mit geringer Eisadhäsion soll die Basis zur Verbesserung der Eisbreierzeugung liefern. Eine Literaturrecherche zeigte den Einfluss verschiedener Parameter auf die Eisadhäsion an einer gekühlten Fläche auf. Als wichtige Einflussgrößen wurden u. a. Polarität einer Oberfläche, die Oberflächenrauheit sowie Temperaturgefälle und -niveau am Wärmeübertrager bestimmt. Polarität und Oberflächenrauheit sind direkt an den Wärmeübertrager gekoppelte Parameter. Sie hängen vom Material und der Oberflächenbehandlung ab und können darüber eingestellt werden. Das Zusammenspiel von Temperaturniveau und möglicher Unterkühlung, bevor ein Anhaften von Eis am Wärmeübertrager auftritt, wird im Rahmen eines Forschungsprojektes experimentell ermittelt. Verschiedene Messmethoden dazu werden vorgestellt, ebenso wie erste Ergebnisse der untersuchten Wärmeübertrageroberflächen.

**Stichwörter:**

Eisbrei, Kristallisation, sekundäre Keimbildung, Eiserzeugung, Wärmeübertrager

## II.1.23

# Energetischer Nutzen latenter Kältespeicherung

**Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld**

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU)  
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Moltkestr. 30, D-76133 Karlsruhe  
[michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.kauffeld@hs-karlsruhe.de)

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung sehen eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % bis 2050 verglichen mit den Emissionen vor 1990 vor. Dazu soll der Primärenergieverbrauch von 2008 bis 2050 um 50 % sinken. Gleichzeitig soll der Anteil an erneuerbaren Energien von derzeit 17 % auf 80 % im Jahr 2050 ansteigen. Sonne und Wind stehen aber nicht an 365 Tagen rund um die Uhr zur Verfügung. Die derzeit rund 60 % ausmachenden fossilen Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas) sind eigentlich nichts anderes als Energiespeicher von solarer Energie! Die ehrgeizigen Klimaschutzziele der Bundesregierung erfordern also neben dem vehementen Ausbau der erneuerbaren Energien auch die Entwicklung von energetisch sinnvollen Speichertechnologien.

Alle Energiespeicher haben für sich betrachtet einen Wirkungsgrad unter 1. Bei Betrachtung der gesamten Anlage, zeigt sich jedoch für die latente Kältespeicherung ein energetische Nutzen, d.h. Kälte – latent gespeichert – kann die Energie nicht nur speichern, sondern gleichzeitig noch die Energieeffizienz der Gesamtanlage erhöhen. Latente Kältespeicherung ist damit die einzige Speichertechnologie, die bei Ihrer Anwendung keine Energie vernichtet, sondern sogar noch Energie einsparen hilft. Der Vortrag zeigt wieso und warum dies so ist und stellt geeignete Latentkältespeicher vor.

**Stichwörter:**

latente Kältespeicherung, Eiserzeugung

II.1.24

## Prozessdampf- und Kälteerzeugung mit Solarkollektoren, Dampfstrahlkältemaschine und latenten Wärmespeichern

Dipl.-Ing. Tunay Özcan, Dipl.-Ing.(FH) Wladimir Korejba, Prof. Dr.-Ing. Maurice Kettner  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld

Institut für Kälte-, Klimate- und Umwelttechnik  
Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Moltkestr.30,76133 Karlsruhe, Deutschland  
[tunay.oezcan@hs-karlsruhe.de](mailto:tunay.oezcan@hs-karlsruhe.de), [wladimir.korejba@hs-karlsruhe.de](mailto:wladimir.korejba@hs-karlsruhe.de)

Die Ziele des hier vorgestellten Projekts sind die Errichtung und der Demonstrationsbetrieb einer Pilotanlage zur solarthermischen Prozessdampf- und Kaltwassererzeugung. Hierfür werden ein Solarkollektorfeld auf Basis von Vakuumröhrenkollektoren (VRK) mit einer thermischen Leistung von 20 kW<sub>th</sub> und eine Dampfstrahlkältemaschine (DSKM) mit einer Kälteleistung von 80 kW<sub>th</sub> bei einer Kaltwassertemperatur von 6 °C miteinander kombiniert. Zur Sicherstellung der Dampfversorgung bzw. Kaltwasserversorgung wird ein latenter Wärme- und Kältespeicher eingesetzt.

Die Projektziele der Hs Karlsruhe sind die Entwicklung eines latenten Wärmespeichers für den Temperaturbereich um 150 °C und die Einbindung des Wärmespeichers in das Gesamtkonzept der Anlage. Für die Entwicklung und Planung des Wärmespeichers ist es zunächst notwendig, geeignete Speichermedien zu identifizieren. Als Wärmespeichermedium könnten beispielsweise Kunststoffe, Zuckeralkohole, Salzhydrate eingesetzt werden. Vorversuche dienen zur Prüfung der Funktionalität des Speicherkonzepts. Erforderlich ist die Modellierung des Speicherverhaltens hinsichtlich dessen Energiespeicherkapazität und insbesondere der Geschwindigkeit der Energieauf- und -abgabe mit Hilfe von Beladungs- und Entladeversuchen an Versuchsspeichern.

**Stichwörter:**

Vakuumröhrenkollektoren, Dampfstrahlkälteanlage, latente Wärme, solare Kühlung

## Notizen

## II.2.01

# Drehzahlgeregelter Scroll-Kompressor in R410A Luft/Wasser Wärmepumpen

**Dina Koepke**

Emerson Climate Technologies GmbH, 52076 Aachen, Deutschland  
[dina.koepke@emerson.com](mailto:dina.koepke@emerson.com)

Die Effizienz von Luft/Wasser Wärmepumpen mit An/Aus Regelung beim Einsatz von Kompressoren mit fester Drehzahl erreicht nicht die Werte, die für eine wesentlich verbesserte Marktdurchdringung notwendig sind.

Durch eine kontinuierliche Anpassung der gelieferten Kapazität an die benötigte Wärmelast erhöht sich die Effizienz beträchtlich. Eine notwendige Voraussetzung dafür ist der Einsatz von drehzahlgeregelten Kompressoren und Lüftern mit einem weiten Anwendungsbereich und hoher Teillasteffizienz.

Durch drehzahlgeregelte Scroll Kompressoren mit Dampfeinspritzung werden höhere Wassertemperaturen erreicht, die die Altbauanierung erleichtern und zudem zu verbesserter Effizienz führen.

Diese Präsentation erläutert anhand einer Simulation basierend auf der prEN14825 den jeweiligen Einfluss von Dampfeinspritzung und Drehzahlregelung bei verschiedenen Anwendungstemperaturen.

## II.2.02

# Digitale Leistungsregelung für Hubkolbenverdichter in der Gewerbekälte

**Norbert Kämmer, Igor Majer, Dr. Thomas Tomski**

Emerson Climate Technologies Europe, 52076 Aachen-Oberforstbach, Deutschland  
[norbert.kaemmer@emerson.com](mailto:norbert.kaemmer@emerson.com)

Im Bereich der Scrollverdichter hat sich in den letzten Jahren bei Verflüssigungssätzen und kleineren Verbundanlagen die digitale stufenlose Leistungsregelung etabliert. In diesem Segment kann die Technologie ihre Vorteile, Einfachheit und geringe zusätzliche installierte Kosten bezogen auf das Gesamtsystem, am Besten ausspielen. Die digitale Regelung ist nun auch für Hubkolbenverdichter verfügbar. Einerseits bietet sie eine interessante Alternative zu Frequenzumrichtern und herkömmlichen Entlastungssystemen. Andererseits kann sie auch in Kombination mit diesen Technologien eingesetzt werden. In den Grenzbereichen des Einsatzbereiches bedarf es hierzu einer genauen Überwachung, der für die Einsatzgrenzen relevanten Temperaturen und Drücke. Diese Überwachung kann durch neuartige Verdichterelektronik gewährleistet werden.

Der Artikel beschreibt zunächst Funktionsprinzip und konstruktive Ausführung der digitalen Regelung für Hubkolbenverdichter. Ergebnisse aus Labortests und Feldversuchen belegen die Relevanz der Technologie. Darüberhinaus werden die Vor-, Nachteile und Einsatzgrenzen der Kombination mit weiteren Leistungsregelungs-technologien anhand von Laborergebnissen erörtert.

II.2.03

## A Miniature-Scale Linear Compressor for Electronics Cooling

Craig R. Bradshaw<sup>a,b</sup>, Eckhard A. Groll<sup>a,b</sup>, Suresh V. Garimella<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Herrick Laboratories, Purdue University, West Lafayette, IN 47907

<sup>b</sup> Cooling Technologies Research Center, Purdue University, West Lafayette, IN 47907

A comprehensive model of a miniature-scale linear compressor for electronics cooling is presented. Linear compressors are appealing for refrigeration applications in electronics cooling. A small number of moving components translates to less theoretical frictional losses and the possibility that this technology could scale to smaller physical sizes better than conventional compressors. The model developed here incorporates all of the major components of the linear compressor including dynamics associated with the piston motion. The results of the compressor model were validated using experimental data from a prototype linear compressor custom-built for this study. The model results showed good agreement when validated against the experimental results. The piston stroke is predicted within 1.3% MAE. The volumetric and overall isentropic efficiencies are predicted within 24 % and 31 %, MAE respectively. A sensitivity study using the model is also presented. This study examined the sensitivity to changes in geometry and operating conditions. It identified the piston-cylinder material selection as a critical design decision for optimum performance of a linear compressor.

II.2.04

## Simulation von R744 (CO<sub>2</sub>) Turboverdichtern

A. Hafner<sup>1</sup>, S. Försterling<sup>2</sup>, F. Bothe<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway

[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

<sup>2</sup> TLK-Thermo GmbH, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Germany

[s.foersterling@tlk-thermo.de](mailto:s.foersterling@tlk-thermo.de)

<sup>3</sup> NTNU, 7491 Trondheim, Norway

In this work the development and simulation of a geometry-based two-stage turbocompressor is presented. The model is required to simulate a turbocompressor working under certain operating conditions. Performance maps, created with the simulation results, provide the investigation of the compressors behavior and help to identify fields of application.

This work is based on knowledge that was gained in previous steps of the research project 'CREATIV SP4 Efficient heating and cooling' where the main characteristics of the turbocompressor were determined. The results are compared to the design parameters given by the manufacture of the pilot turbocompressor.

First the basics of turbocompressors working with CO<sub>2</sub> as refrigerant are reviewed and the methods that are used in the development are explained. The modeling language Modelica, the simulation environment Dymola and the library TIL are introduced. Calculations for several input values are shown and the behavior of the turbocompressor model is simulated. Results are presented and performance maps are generated. The summary gives a discussion about the limits of the model and an outlook for further work.

## II.2.05

# Leistungsmessungen an Klimaanlagen und Wärmepumpen mit einem neuartigen Expansionsmodul

Thomas Tiedemann<sup>1\*</sup>, Gunda Mader<sup>2</sup>, Stefan Pietrek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Danfoss GmbH, AC-SA, 63067 Offenbach  
[t.tiedemann@danfoss.com](mailto:t.tiedemann@danfoss.com), [s.pietrek@danfoss.com](mailto:s.pietrek@danfoss.com)

<sup>2</sup> Danfoss AS, AC-RTP, 6430 Nordborg, DK  
[gunda.mader@danfoss.com](mailto:gunda.mader@danfoss.com)

In Klimaanlagen und Wärmepumpen werden Verdampfer typischerweise mit mehreren parallel durchströmten Rohrreihen ausgelegt, um sie hinsichtlich Wärmeübertragung und Druckverlust zu optimieren. Eine Herausforderung dieser Bauart besteht in der gleichmäßigen Verteilung des eingespritzten Kältemittels auf die parallelen Rohrreihen. Dies ist besonders problematisch für Anlagen mit sich änderndem Kältemittelmassenstrom aufgrund Verdichterleistungsregelung oder varierender Verdampfungstemperaturen. Die Auslegung eines Verteilers kann in solchen Fällen nur einen Kompromiss darstellen. Daneben besteht häufig eine ungleichmäßige Wärmebeaufschlagung der Verdampferoberfläche durch Unterschiede im Luftmassenstrom oder in der Lufteintrittstemperatur. Zudem kann eine Verschmutzung oder Vereisung der Verdampferoberfläche ein unterschiedliches Wärmeübertragungsvermögen der Rohrreihen zur Folge haben. Einige dieser Effekte können sich zudem mit der Zeit ändern.

Alle diese Ursachen resultieren in einer ungleichen Länge der Überhitzungszonen in den parallelen Rohrreihen und damit zu einem insgesamt größeren überhitzen Bereich im Verdampfer. Dies hat eine Absenkung des Verdampfungsdrucks mit entsprechend verminderter Energieeffizienz der Anlage zur Folge. Ebenso kann eine schnellere Vereisung und damit einhergehend ein häufigeres Abtauen mit entsprechend negativen Folgen für die Effizienz der Anlage auftreten.

Danfoss hat ein elektronisches Expansionsmodul entwickelt, das es ermöglicht, die einzuspritzende Kältemittelmenge in jedem Strang individuell zu regeln und somit eine minimale und gleichmäßige Überhitzung jedes Strangs zu erreichen. Dadurch kann auch die Überhitzung des aus dem Verdampfer austretenden gesamten Kältemittelmassenstroms weiter minimiert werden. Diese optimale Verteilung des Kältemittelmassenstroms auf die Stränge des Verdampfers kann die Effizienz und Leistung der Anlage erheblich erhöhen oder alternativ die Möglichkeit eröffnen, bei gleicher Leistung Verdampfer mit geringerer Wärmeübertragerfläche zu verwenden.

In diesem Beitrag werden das Prinzip dieses Expansionsmoduls erläutert sowie Ergebnisse aus Messungen an realen Klima- und Wärmepumpenanlagen vorgestellt. Das Potential und die Begrenzungen dieses Systems werden diskutiert.

Des Weiteren ermöglicht die individuelle Dosierung der Kältemittelmenge in die einzelnen Verdampferstränge weitere Möglichkeiten des Betriebs einer Anlage, wie z.B. die partielle Verdampferabtauung. Auch dazu werden einige Messergebnisse vorgestellt.

### Stichwörter:

Klimaanlage, Wärmepumpe, Expansionsventil, Verdampferregelung, Kältemittelfehlverteilung

## II.2.06

# Simulation von Kompressionskältemaschinen mit Lösungskreisläufen

Thomas Weimer<sup>1</sup>, Anne Berger<sup>2</sup>, Ullrich Hessel<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Makatec GmbH, Siemensstrasse 3, 71149 Bondorf  
[weimer@makatec.eu](mailto:weimer@makatec.eu)

<sup>2</sup>TU Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik  
[Ullrich.Hesse@TU-Dresden.de](mailto:Ullrich.Hesse@TU-Dresden.de)

Werden Verdampfer und Kondensator in konventionellen Kompressionsanlagen durch einen Lösungskreislauf mit Absorber, Desorber und Lösemittelwärmeübertrager ersetzt, erhält man gleitende Temperaturdifferenzen auf der Kältemittelseite während der Wärmeübertragung. Hierdurch kann die Entropieerzeugung während der Wärmeübertragung zu einphasigen Fluiden deutlich reduziert werden.

Durch den Einsatz von Gemischen kann zudem der Anlagendruck durch die Kältemittelkonzentration im Lösemittel je nach Anwendung variiert werden. Insbesondere beim Einsatz von NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O Mischungen können moderate Drücke für NH<sub>3</sub> basierte Kälteanlagen auch für Anwendungen im Wärmepumpen- oder Klimatisierungsbereich realisiert werden. Auch das Kältemittel CO<sub>2</sub> ist schon in der Vergangenheit mit Lösemitteln in Kompressions-Resorptionsanlagen erprobt worden. Im Vordergrund steht hier vor allem auch die Möglichkeit die Drücke gegenüber den transkritischen Prozessen abzusenken. Zukünftig ist der Einsatz völlig neuartiger Kälte-/Lösungsmittelmischungen, z. B. CO<sub>2</sub> und ionische Fluide oder Karbonatlösungen, möglich.

Nach einer kurzen Erläuterung des Anlagenkonzepts werden die Ergebnisse eines gleichgewichtsbasierten Simulationsmodells vorgestellt, und die Anlagenperformance für ausgewählte Anwendungen mit unterschiedlichen Temperaturniveaus mit konventionellen, kommerziell erhältlichen Anlagen verglichen.

Zum Abschluss werden die wesentliche Bausteine für die Realisierung des Anlagenkonzepts diskutiert, insbesondere geeignete Verdichterkonzepte unter besonderer Berücksichtigung der Werkstoffauswahl und kompakte und kostengünstige Lösemittelkreisläufe unter Verwendung von Polymerapparaten.

### Stichwörter:

Kompression, Lösemittelkreislauf, Kunststoffwärmetauscher, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O

## II.2.07

# Numerisch effiziente Simulation von Mehrverdampfer-Klimaanlagen unter hochdynamischen Randbedingungen

Christian Schulze<sup>1</sup>, Christian Kaiser<sup>1</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>2</sup>, Jürgen Köhler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TLK-Thermo GmbH, Hans Sommer Straße 5, D-38106 Braunschweig

<sup>2</sup> TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans Sommer Straße 5, D-38106 Braunschweig

Bei der Erstellung von physikalisch basierten Modellen für die dynamische Simulation von Kreisprozessen muss ein gutes Gleichgewicht zwischen Detaillierungsgrad und Rechengeschwindigkeit gewählt werden: Das Modell muss die Realität hinreichend genau abbilden, im Gegenzug jedoch auch innerhalb eines angemessenen Zeitraums Ergebnisse liefern sowie in allen Betriebszuständen lösbar sein.

Die dynamische Modellierung von Mehrverdampfer-Klimaanlagen stellt im Vergleich zu einfachen Kreisprozessen eine besondere Herausforderung dar, da in diesen Systemen die Interaktion mehrerer Wärmeübertrager auf einem Druckniveau zu numerisch herausfordernden Effekten wie z. B. Rückströmung führen kann.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Simulation der Wärmeübertrager in diesen Systemen unter hochdynamischen Randbedingungen wie z. B. einer Abschaltung des Verdichters. Zur Modellierung der Wärmeübertrager gibt es je nach Anforderung verschiedene Modellierungsansätze, hierzu zählen beispielsweise Finite Volumen, Moving Boundary, oder Finite Elemente. Die Modellierungsansätze werden vorgestellt und hinsichtlich Ihrer Einsatzfähigkeit für Mehrverdampfer-Klimaanlagen bewertet.

Für den 1-D Finite Volumenansatz zur Beschreibung von Wärmeübertragern werden verschiedene bekannte Strategien zur Vereinfachung vorgestellt, die numerische Effizienz zu verbessern. Es wird zudem aufgezeigt, dass diese Strategien dazu führen, dass das Gleichungssystem nicht immer lösbar ist, sowie ein Ansatz vorgestellt, der die Lösbarkeit sicherstellt.

Die Funktionsweise des Ansatzes wird am Beispiel der Simulation einer Mehrverdampfer-Busklimaanlage veranschaulicht.

## II.2.08

# Kompressorschutz – next generation Schutzgeräte mit Diagnose & Kommunikation

Xiaoming Peng<sup>1</sup>, Elmar Zeitler<sup>2\*</sup>

1 KRIWAN Industrie Elektronik GmbH, Entwicklung, 74670 Forchtenberg, Deutschland  
[Xiaoming.Peng@KRIWAN.com](mailto:Xiaoming.Peng@KRIWAN.com)

2 KRIWAN Industrie Elektronik GmbH, Geschäftsführung, 74670 Forchtenberg, Deutschland  
[Elmar.Zeitler@KRIWAN.com](mailto:Elmar.Zeitler@KRIWAN.com)

Heutige Schutzgeräte für Verdichter sind einzig auf ihre originäre Aufgabe Schutz ausgerichtet. Das übergeordnete Interesse der den Verdichter enthaltenden Anlage in Bezug auf z.B. Verfügbarkeit, Informationen zum Status, etc. wird nicht Rechnung getragen. Die möglichen Synergien werden nicht genutzt oder durch redundante Datenerfassung zumindest geschmälert.

Um dies zu verändern wurde ein neues Verdichterschutzgerätekonzept entwickelt. Seine Hauptaufgaben sind:

- Schutz des Verdichters bzgl. Übertemperatur
- Öldifferenzdruck- und/oder Ölniveauüberwachung

- Heißgasüberwachung
- Erfassung von sonstigen Daten
- Datenhaltung für z.B. Servicezwecke (Diagnose)
- Datenübermittlung an übergeordnete Einheiten

Je nach Anwendung enthält das Schutzgerät eine oder mehrere der genannten Module. In Verbindung mit der Datenübermittlung sind differenzierte Eingriffe in die Gesamtanlage besser herstellbar.

Der Beitrag zeigt das Konzept mit Ausblicken in die Möglichkeiten.

**Stichwörter:**

Schutz, Diagnose, Kommunikation, Verfügbarkeit, KRIWAN

**II.2.09**

## **Kältetechnisches Expansionsventil für kleine Leistungen**

**Dr.-Ing. Peter Röllig**

ILK Dresden, Hauptbereich Kälte- und Wärmepumpentechnik, D-01309 Dresden, Deutschland  
[peter.roellig@ilkdresden.de](mailto:peter.roellig@ilkdresden.de)

Beim Bau von kältetechnischen Prüfeinrichtungen war es oft problematisch, für sehr kleine Durchflüsse geeignete Expansionsventile zu beschaffen. Deshalb wurde im ILK Dresden ein Expansionsventil für den Leistungsbereich von etwa 15 bis 100 W entwickelt. Dabei wurden sehr hohe Anforderungen an die Regelgenauigkeit gestellt. Darüber hinaus soll das Ventil eine zuverlässige Funktionssicherheit aufweisen, die auch bei technisch bedingten Verunreinigungen des Kältemittels noch gewährleistet ist.

Die Entwicklung des Ventils wurde bis zu einem hohen Niveau vorangetrieben. Ein Ventilmuster wurde im Rahmen des Entwicklungsprojektes hergestellt und detailliert getestet. Die Ergebnisse dieser Tests sind recht vielversprechend. Der Ventilkörper wurde als Fremdleistung mittels Lasertechnologie hergestellt. Diese Technologie muss für diese spezielle Anwendung noch weiterentwickelt werden, so dass fertigungsbedingte Optimierungsspielräume bei der Ventilherstellung noch ausgeschöpft werden können.

Der im Rahmen des Projektes entwickelte elektromotorische Antrieb für das Ventil arbeitet mit sehr hoher Auflösung und Präzision. Der Antrieb kann losgelöst vom Ventil auch anderweitig eingesetzt werden. Alternative Anwendungsmöglichkeiten für diesen Antrieb wurden im Prüfstandsbau des ILK bereits erfolgreich erschlossen, z. B. für Prüfstände zur Lecksuche von Kältemitteln.

Die im Rahmen des Projektes errichtete Prüfeinrichtung für das neu entwickelte Ventil kann auch für Funktionstests und Vermessung weiterer kältetechnischer Komponenten verwendet werden. Diese Möglichkeit wird vom ILK für Unternehmen der Branche angeboten und genutzt.

Das Ventil wurde zum Patent angemeldet.

Nach erfolgreichem Abschluss des Patentverfahrens sollen mit Ventil-Herstellerfirmen Kontakte aufgenommen werden mit dem Ziel der kooperativen Weiterentwicklung des Ventils bis zur industriellen Serienreife.

Eine künftige Vermarktung hängt sehr stark davon ab, inwieweit sich die Ventilneuentwicklung bis zur Serienreife erfolgreich vorantreiben lässt und vor allem zu welchen Kosten das Ventil industriell hergestellt werden kann.

Für den präzisen, hochauflösenden elektromotorischen Ventilantrieb zeichnen sich alternative Anwendungsmöglichkeiten ab, die auch losgelöst vom Ventil genutzt und vermarktet werden können.

**Stichwörter:**

Ventil, Expansionsventil

## II.2.10

# Untersuchungen zum Verschmutzungsverhalten von microox® und finoox® Wärmeübertragern

Anna Holfeld

Güntner AG & Co. KG, F&E Versuch, 82256 Fürstenfeldbruck, Deutschland  
[Anna.Holfeld@guentner.de](mailto:Anna.Holfeld@guentner.de)

Ein wichtiger Einflussparameter auf die thermische Leistung eines Rückkühlers oder Verflüssigers stellt bei Außenaufstellung die Verschmutzung auf der Luftseite des Wärmeübertragers dar. Zur Untersuchung des Verschmutzungsverhaltens von microox® (Microchannel-) und finoox® (lamellierte Rohr-) Wärmeübertragern wurden mehrere zweilüftige Testgeräte mit jeweils einem microox® und finoox® Block ausgestattet und an unterschiedlichen Orten innerhalb Deutschlands aufgestellt. Die Messungen starteten im Frühjahr 2010 und gingen über 16 Monate. Die Beurteilung der Verschmutzung wurde in regelmäßigen Abständen sowohl optisch durch Art und Stärke als auch durch die Messung des Druckverlusts über die Wärmeübertragerblöcke durchgeführt

In den Untersuchungen wurde besonders der Einfluss der Vegetationsperiode betrachtet und das Verhalten der beiden Wärmeübertragerbauarten gegenübergestellt.

**Stichwörter:**

Verschmutzung, Microchannel Wärmeübertrager, lamellierte Wärmeübertrager, Rückkühler, Verflüssiger

## II.2.11

# Energetische Systembetrachtungen zur Regelung von Verflüssigern in Teillast

Peter Roth

Güntner AG & Co. KG, 82256 Fürstenfeldbruck  
[peter.roth@guentner.de](mailto:peter.roth@guentner.de)

Es ist allgemein bekannt, dass die Wahl der Verflüssigungstemperatur in Kältekreisläufen einen starken Einfluss auf den COP des Kreislaufes hat. Je niedriger die Verflüssigungstemperatur, desto höher ist der Wirkungsgrad der Anlage und desto weniger Energie muss zur Bereitstellung einer gegebene Kälte-/Klimaleistung aufgebracht werden. Dabei betrachtet man gewöhnlich nur die Leistungsaufnahme des Verdichters, oft unter Einbeziehung seines Wirkungsgrades, als einzig aufzuwendende Leistung.

Berücksichtigt man bei der Gesamtleistungsaufnahme der Kälte-/Klimaanlage auch die el. Leistung der Verflüssigerventilatoren, bleiben die oben erwähnten Zusammenhänge bei Auslegungsbedingungen, d.h. im Vollastfall, erst einmal richtig. Sobald jedoch Teillastzustände der Kälteanlage und veränderte Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel niedrigere Umgebungstemperaturen vorliegen, kann die Leistungsaufnahme der Verflüssigerventilatoren in die Größenordnung des Verdichters kommen oder diese sogar übertreffen.

In diesem Vortrag werden sowohl gerätespezifische Eigenschaften als auch thermische Randbedingungen untersucht, bei denen die Verflüssigerventilatoren einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch einer Kälte-/Klimaanlage haben und Strategien aufgezeigt, den Gesamtenergieverbrauch zu minimieren.

**Stichwörter:**

Verflüssiger, Energieverbrauch, Regelung

### II.2.12

## Vergleich von Luftkühlern mit saugender und drückender Luftführung in der Obst- und Gemüsekühlung

Steven Duncan

GEA Küba GmbH, Kühler Weg 1, 82065 Baierbrunn, Deutschland

[steven.duncan@geagroup.com](mailto:steven.duncan@geagroup.com)

Um die optimale Qualität der Ware Obst und Gemüse zu gewährleisten, ist die Auswahl des richtigen Luftkühlers besonders wichtig. Aus jedem Liter Wasser, der über den Luftkühler aus dem Kühlraum entfernt wird, folgen Gewichtsreduzierungen der Ware und somit primäre finanzielle Verluste für den Betreiber. Außerdem ergeben sich, bei nicht optimaler Auswahl des Luftkühlers, höhere energetische Aufwendungen der Kälteanlage, wodurch weitere finanzielle Verluste entstehen. Falsch dimensionierte Luftkühler reduzieren die Warenqualität am Ende der Lagerphase dramatisch und führen nachweislich zu einem erheblichen Verlust an Warenwert. Die unterschiedlichen Fruchtsorten erfordern jeweils spezifische Lagerbedingungen in Bezug auf Lagerdauer, Atmosphäre, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Für die Einhaltung dieser Parameter spielt der Luftkühler eine besonders wichtige Rolle. Die wichtigsten Kriterien für die Luftkühler-Projektierung werden aufgezeigt. Die thermodynamischen sowie die konstruktiven Eigenschaften, der Luftkühler mit drückender und saugender Luftführung, werden analysiert und theoretisch, wie auch durch praktische Anwendungen verglichen.

### II.2.13

## Luftgekühlte Wärmetauscher für CO<sub>2</sub> Kältekreisläufe

Stefano Filippini

LU-VE Group, Via Caduti della Liberazione 53, Uboldo, 21040, Italy  
[stefano.filippini@luve.it](mailto:stefano.filippini@luve.it)

Alternative Lösungen für traditionelle HFC – Anlagen werden ein immer wichtigeres Thema, bestrebt eine niedrigere Co<sub>2</sub> Bilanz zu erreichen. Daher stieg der Gebrauch von natürlichen Kältemitteln in der Kälteindustrie in der letzten Jahren erheblich an. Co<sub>2</sub> scheint eine ausgezeichnete und umweltfreundliche Lösung zu sein, es ist ungiftig, nicht entflammbar und hat interessante Vorteile im Vergleich zu anderen Kältemitteln wie Kohlenwasserstoff und Ammoniak. Die wahre Herausforderung jedoch besteht darin, Anlagen zu entwickeln, die eine gleiche oder sogar höhere Leistungsfähigkeit als gegenwärtige Anlagen mit HFC haben.

Dieser Artikel beschreibt die Haupteinflussfaktoren, die auf die Leistung des Co<sub>2</sub> – Kältekreislaufes einwirken, mit Fokus darauf, welchen Beitrag eine effiziente Bauform von luftgekühlten Wärmetauschern leisten kann. Die Eigenschaften von Co<sub>2</sub> sind sehr unterschiedlich im Vergleich zum gegenwärtigen HFC und bereiten den Entwicklern erhebliche Probleme, aufgrund dessen, dass der Betriebsdruck sehr hoch sein muss. Auf der anderen Seite eröffnen die hohen thermophysikalischen und Wärmeaustauscheigenschaften und der geringe Druckverlust ganz neue Möglichkeiten bezüglich der Definition eines Hochleistungswärmetauschers. Der Artikel erläutert zuerst die Hauptpunkte der Bauart von Luftkühlereinheiten, den Unterschied im Vergleich zu HFC-Produkten, wobei hervorgehoben wird, wie wichtig es ist, ein niedriges inneres Volumen zu haben. Analysen dazu wurden an DX-Luftkühlern durchgeführt. Auf jeden Fall ist der Co<sub>2</sub> Gaskühler ein wirklich anspruchsvolles Produkt. Man kann sicher nicht von einer Neugestaltung des bestehenden HFC-Verflüssigern sprechen. Hier ist eine komplett neue Bauweise notwendig. Der Betriebsdruck ist fast 4 Mal höher (120 bar) und die Temperatur doppelt so hoch (150 °C). Diese Eigenschaften benötigen eine neue Bauweise, die den hohen Anforderungen entspricht und zugleich auch die völlig unterschiedlichen Flüssigkeitseigenschaften nutzt.

Im Vergleich zu einem HFC-Verflüssiger kann ein Gaskühler durch die Batterie eine sehr viel höhere Lufterwärmung garantieren, ein geringerer Massenstrom mit folglich niedrigerem Energieverbrauch

wegen weniger Energiezufuhr für die Ventilatoren ist erforderlich. Der Artikel erläutert die wichtigsten Schritte zum Bau eines guten Gaskühlers (Auswahl des Materials, mechanischer Widerstand, Batterieanordnung für hohe Leistungsfähigkeit) und die Entwicklung einer Methode zur Hochpräzisionsberechnung dieser Wärmetauscher; verschiedene Testergebnisse bestätigen eine hohe Genauigkeit von Software- Vorausberechnungen. Beim Bau wurde darauf Wert gelegt, dass die Wärmetauscher einen geringen Rohrdurchmesser haben, wenig Kältemittel brauchen und eine Kreislaufanordnung besitzen, die den pitch point minimiert.

Schließlich ist es bei einer leistungsfähigen Kühlwanlage wichtig, auch unter sommerlichen Bedingungen eine niedrige Gasaustrittstemperatur des Gaskühlers zu erreichen. Das ist tatsächlich ein Schlüsselparameter um den Energieverbrauch der Verdichter zu reduzieren und die Lösung, demineralisiertes Wasser auf die Oberfläche der Batterien zu sprühen scheint sehr attraktiv. Im Laufe des Artikels finden Sie noch eine detaillierte Erklärung dieser Technologie, mit Hinweisen auf die erhebliche Energieeinsparung, auf die physikalischen Eigenschaften des Sprühwassers und darauf, wie man das Wasser richtig auf die mit Lamellen versehene Oberfläche sprüht.

**Stichworte:**

CO<sub>2</sub>, Gaskühler, Luftkühler, Wärmetauscher, Natürliche Kältemittel

#### II.2.14

## Normgerechte Prüfung der Energieaufnahme für moderne und gleichzeitig energieeffiziente Haushaltskühl- und Gefriergeräte

Robin Langebach\*, Moritz Hensel, Ullrich Hesse

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

[Robin.Langebach@tu-dresden.de](mailto:Robin.Langebach@tu-dresden.de), [Moritz.Hensel@googlemail.de](mailto:Moritz.Hensel@googlemail.de),  
[Ullrich.Hesse@tu-dresden.de](mailto:Ullrich.Hesse@tu-dresden.de)

Kühl- und Gefriergeräte sind heutzutage in nahezu jedem Haushalt vorhanden und gleichwohl nicht mehr wegzudenken. Der Anspruch seitens der Nutzer an diese Geräte hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Neben Funktionalität und langer Lebensdauer sind beispielsweise ein modernes Design und der geräuscharme Betrieb ebenso hoch priorisiert. Allen voran steht jedoch meist die Energieeffizienz – gerade in Zeiten stark steigender Strompreise und dem damit gestiegenen Kostendruck auf jeden einzelnen Haushalt.

Damit der Nutzer – etwa bei einem Neukauf – einen leicht zugänglichen Überblick zur Energieeffizienz des Kühl- und Gefriergerätes im Hinblick auf den Stand der Technik bekommt, kann er beispielsweise die Angaben auf dem Europäischen Energielabel als Informationsquelle verwenden. Damit entsteht in jedem Fall der Anspruch Kühl- und Gefriergeräte nach einem standardisierten Prüfverfahren zur elektrischen Energieaufnahme welches eine hinreichende Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte erlaubt.

In der Norm DIN EN ISO 15502 „Haushalts-Kühl-/Gefriergeräte – Eigenschaften und Prüfverfahren“ werden die detaillierten Prüfzyklen dargestellt und entsprechende Anforderungen an die Messprozedur festgeschrieben. Auf Basis dieser Norm wurde an der TU Dresden ein entsprechender Teststand zur Prüfung der elektrischen Energieaufnahme unter verschiedenen thermischen Randbedingungen aufgebaut. Dieser ermöglicht die normgerechte Prüfung üblicher Haushalts-Kühl-/Gefriergeräte bis zu einer Gesamthöhe von zwei Metern.

In dieser Arbeit werden die grundlegenden Anforderungen zur normgerechten Prüfung nach der DIN EN ISO 15502 aufgezeigt. Gleichwohl sollen aber auch die praktischen Herausforderungen bei der entsprechenden Umsetzung für einen Prüfstand diskutiert werden.

**Stichwörter:**

Kühl- und Gefriergeräte, elektrische Energieaufnahme, Prüfverfahren, DIN EN ISO 15502

### II.2.15

## Korrosionskonzepte für HVAC&R Anwendungen

**Stefan Schlüter, Dr. Hartmut Janssen**

Hydro Aluminium Deutschland GmbH, Rolled Products, 41515 Grevenbroich, Deutschland

[Stefan.schlüter@hydro.com](mailto:Stefan.schlüter@hydro.com)

Die Zukunft der HVAC&R Anwendungen liegt Hydro zu Folge in gelöteten Vollaluminium Konzepten, die ein intelligentes und energiesparendes Temperieren ermöglichen.

Auf dem HVAC&R Markt sind die gelöteten Aluminiumkonzepte im Vergleich zu den traditionell verwendeten Wärmetauschern aus Kupfer und Aluminium leichter, kompakter und effizienter. Die Wärmeübertragung ist bei gelöteten Varianten durch eine Lötkehlhaftverbindung zwischen Lamelle und Mehrkanalstrangpressrohr im Vergleich zu konventionellen Geräten mit Kupferrundrohr und gesteckter Aluminiumlamelle um ein Wesentliches verbessert.

Bedingt durch das kompaktere Design bei gleichem Berstdruck, bringt die neuartige Aluminiumlösung die gleiche Leistung bei weniger Kühlmittel- und Energiebedarf. Aus den gesetzlichen Bestimmungen ergibt sich ein kleinerer Wartungs- und Instandhaltungsaufwand. Zusätzlich wird bei diesem Konzept die Wiederverwertbarkeit der Wärmetauscher verbessert.

Die vorgestellten Materialkombinationen werden typischen Korrosionsangriffen im gelöteten Zustand um einiges besser widerstehen, als die zur Zeit marktbewährten Produkte. Hinsichtlich des SWAAT Tests (sea water acetic acid test) weisen die korrosions- und festigkeitsoptimierten Legierungspakete von Hydro-Aluminium bei gleichzeitig kleinerer Bauweise und geringerem Energie- und Kühlmittelbedarf ein vielfach verbessertes Korrosionsverhalten auf als die konventionelle Kupfer- und Aluminiumlösung.

Zusätzlich zu den bereits angebotenen Konzepten wurde das Portfolio um eine weitere Lamellenlegierung ergänzt, die den Anforderungen längerer Lötzyklen und einer größeren thermischen Masse gerecht wird.

Für die unterschiedlichen lokalen Anforderungen kann man auf die Mehrkanalstrangpressprofilrohre eine Beschichtung aufbringen. Diese HYSPRAYTM- oder Zink-Arc-Spray-Beschichtung bilden im weiteren Lötprozess einen Zinkgradienten im Material aus und generieren somit einen zusätzlichen Korrosionsschutz.

### II.2.16

## Frequenzumrichter steigern die Energieeffizienz von Elektromotoren in Kälteanlagen

**Alexander Heide**

Ziehl-Abegg AG, Produktmanagement System- und Regeltechnik,  
74653 Künzelsau, Deutschland  
[alexander.heide@ziehl-abegg.de](mailto:alexander.heide@ziehl-abegg.de)

Kälteanlagen, insbesondere bestehende Kälteanlagen, bieten großes Potenzial Energie einzusparen. Ventilatoren die auf Verflüssigern oder Rückkühlern montiert sind, werden überwiegend mit Regelgeräten betrieben, die die Drehzahl über die Spannung variieren (Phasenanschnittregelung).

Es wird aufgezeigt, dass durch moderne Frequenzumrichter auf einfache Art und Weise bestehende Anlagen energetisch verbessert werden können. Am Beispiel des Frequenzumrichters Fcontrol, der einen allpolig wirksamen Sinusfilter integriert hat, werden die Vorteile durch die Kombination von Frequenzumrichter und Sinusfilter erklärt. Die nachträgliche Installation in bestehende Anlagen ist einfach. Die Investition in eine solche Umrüstung rechnet sich in der Regel sehr schnell. Beispielhaft

wird gezeigt, dass beim Ersetzen der Phasenanschnittregelung gegen einen Frequenzumrichter mehr als 50 % der Energiekosten an den Ventilatoren eingespart werden können.

Neben der energiesparenden Regelung der Ventilatoren auf Verflüssigern oder Rückkühlern, kann auch der Verdichtermotor durch Frequenzumrichter geregelt werden. Dadurch ergeben sich grund-sätzliche Vorteile für die komplette Kälteanlage.

Ziehl-Abegg stellt Möglichkeiten vor, insbesondere bei bestehenden Kälteanlagen durch die Nach-rüstung moderner Frequenzumrichter Energie und Betriebskosten einzusparen.

**Stichwörter:**

Frequenzumrichter, allpoligen Sinusfilter, Nachrüstung Kälteanlage

## II.2.17

### Leistungstest eines CO<sub>2</sub>-Verdichters mit Parallelverdichtung

Bella B.<sup>1</sup>, Kämmer N.<sup>2</sup>

Emerson Climate Technologies GmbH, Pascal Straße 65, D-52076 Aachen – Germany  
<sup>1</sup> [Bachir.Bella@emerson.com](mailto:Bachir.Bella@emerson.com), <sup>2</sup> [Kaemmer.Norbert@emerson.com](mailto:Kaemmer.Norbert@emerson.com)

CO<sub>2</sub> gewinnt seit Jahren zunehmendes Interesse als Ersatz für FKW's in der Kältetechnik. So wurde dieses Kältemittel zunächst in unterkritischen und nun auch verstärkt in transkritischen Anwendungen in der Supermarktkühlung verwendet und ist damit zu einer wichtigen technologie geworden.

Transkritische CO<sub>2</sub> Systeme führen zu niedrigeren Gütegraden verglichen mit FKW's sofern die Umgebungstemperaturen hoch sind. Als eine Massnahme zur Steigerung des Gütegrades wurden daher Hubkolbenverdichter entwickelt, bei denen in sogenannter Parallelverdichtung zwei getrennte Gasströme in einem einzelnen Verdichter komprimiert werden. Die Vorteile dieses Verfahrens wurden in theoretischen Arbeiten gezeigt, allerdings gibt es wenige experimentelle Daten, die die erwarteten Verbesserungen des Gütegrades nachweisen.

Die hier vorgestellte Arbeit beschreibt die experimentellen Untersuchungen an einem Prototypen-Verdichter mit Parallelverdichtung und erläutert die Ergebnisse. Bei dem Versuchsverdichter handelt es sich um einen Vierzylinder-Verdichter, bei dem ein Zylinder für den parallelen verdichtungsprozess genutzt wird. Die Versuche wurden an einem Versuchsstand bei einer Verdampfungstemperatur von 10°C durchgeführt, wobei der Austrittsdruck und der Saugdruck des Parallelgasstromes verändert wurden.

Die Ergebnisse werden für unterschiedliche Betriebsbedingungen mit veränderten Saugdruck des Parallelstromes dargestellt. Dabei wird der Einfluss dieses veränderten Saugdruckes auf Verdichterwirkungsgrad, Kreislaufgütegrad und Schwingungsverhalten des Verdichters gezeigt. Ebenso beeinflusst dieser Saugdruck den volumetrischen Wirkungsgrad im Hauptgasstrom und entsprechen auch den Gütegrad des gesamten Kreislaufes.

Darüber hinaus wird ein Vergleich Kreislaufgütegrade angestellt zwischen einer Konfiguration mit Parallelverdichtung und einer üblichen Anordnung ohne Parallelverdichtung.

II.2.18

## Ölfreie wärmepumpende Systeme mit R744 (CO2)

Armin Hafner

SINTEF Energy Research, Trondheim, Norwegen

[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

Today's refrigeration systems have to use a defined portion of oil in order to provide lubrication of mechanical moving parts in the compressors. This oil is mainly added into the compressor but is transported with the working fluid into the system, so a not negligible amount is pumped around in the system.

The benefits of oil-free R744 systems compared to conventional system are evaluated for different application like: commercial refrigeration, transport refrigeration, onboard Refrigerated Sea Water (RSW) production and industrial heat pumping systems. In general the installation costs are reduced, due to much simpler oil-free system architecture. The Life Cycle Costs (LCC) of an oil-free system are reduced compared to conventional systems due to a reduction in servicing and maintenance efforts and the improved system

performance which leads to more energy efficient operation. The development of a hermetic oil-free compressor is part of the CREATIV project. A pilot compressor is under development, detailed simulation results show the losses of the different component inside the turbo compressor. New temperature limits have to be defined, since the lubricant is not dictating the maximum discharge temperature of the compressor anymore. The compressor design has to be adapted for the area of operation, either ultra low temperatures or applications at elevated ambient temperatures.

II.2.19

## CO<sub>2</sub>OLtec analysiert und bewertet auf [www.vdma-effizienz-quickcheck.org](http://www.vdma-effizienz-quickcheck.org)

Dipl.-Ing. Bernd Heinbokel

Carrier Kältetechnik Deutschland GmbH, Sürther Hauptstr. 173, 50999 Köln  
[bernd.heinbokel@carrier.utc.com](mailto:bernd.heinbokel@carrier.utc.com)

Das Thema Energieeffizienz von Kälteanlagen gewinnt heute immer mehr an Bedeutung. In der Gewerbekälte werden die meisten Kälteanlagen erst vor Ort im Verkaufsmarkt individuell kombiniert und fertig gestellt, dadurch kann die sogenannte Verbundkälteanlage nur eingeschränkt durch die verschiedenen Effizienzlabel für die Einzelkomponenten beurteilt werden. Es wird eine Kennzahl notwendig, welche alle Verbundkälteanlagen in den verschiedenen Marktformaten von Discount über Supermarkt bis zum Hypermarkt beurteilen kann.

Der VDMA Effizienz-Quickcheck ist anwendbar für den Betrieb von Verkaufskühlmöbeln, Kühlräumen und die dazugehörigen kältetechnischen Einrichtungen im Bereich des Lebensmitteleinzelhandels mit den Marktformaten von Discount über Supermarkt bis zum Hypermarkt. Er kann sowohl für Verkaufskühlmöbel, welche in sogenannten Verbundkälteanlagen betrieben werden, als auch für steckerfertige Kühlmöbel genutzt werden.

Über die Statistik aus einer hohen Anzahl von Märkten wird der Trend zu effizienteren Kälteanlagen in Supermärkten dokumentiert.

Erstmalig können in einer Kennzahl auch die Einflüsse durch Klimaregion, Öffnungszeiten, Kühlmöbeltyp/-familie, Temperaturklassen der Kühlmöbel, Steckerfertige Kühlmöbel, Kühlräume, Temperatur und Größe sowie Wärmerückgewinnung für Brauchwarmwasser und Heizung erfasst und berücksichtigt werden.

Unter [www.vdma-effizienz-quickcheck.org](http://www.vdma-effizienz-quickcheck.org) kann jeder Marktbetreiber seinen Markt kostenlos eingeben und bewerten lassen. Seit der Chillventa im Oktober 2010 ist die Seite im Web online. Mit Stand Mai 2011 konnten Benchmarks schon mit über 150 Vergleichsmärkten von mehr als 10 Handelsketten und den meisten Kühlmöbel-/ Kälteanlagenherstellern gemacht werden.

Auf Basis dieser neuen Methode werden mehr als 20 CO<sub>2</sub>OLtec Kältesysteme in deutschen Supermärkten analysiert und bewertet, welche während heißer Außentemperaturen transkritisches arbeiten. Durch die Wahl des natürlichen, klimaneutralen Kältemittels CO<sub>2</sub> erzielt man einen erstklassig niedrigen TEWI-Wert. Im Vergleich zu herkömmlichen HFKW-Direktverdampfungssystemen besitzt eine CO<sub>2</sub>-Installation kein Treibhauspotenzial aufgrund von Kältemittel-Leckage und verbessert die Energieeffizienz um durchschnittlich rund 10 %, bezogen auf ein mildes bis kaltes Klima.

**Stichworte:**

VDMA - Effizienz-Quickcheck, VDMA - Einheitsblatt 24247-4, Supermarkt, Gewerbekälte, Kühlmöbel, Energieeffizienz, Kältemittel CO<sub>2</sub>, HFKW-Kältemittel

## II.2.20

# Übersicht über Eurovent Energieeffizienzlabels für Produkte der Kälte-, Lüftungs- und Klimatechnik

Dipl.-Ing. Hanns Christoph Rauser

HCR CONSULTING Ingenieurbüro für Kälte- und Klimatechnik  
Lerchenweg 23, 74321 Bietigheim-Bissingen  
[info@hcr-consulting.com](mailto:info@hcr-consulting.com)

Um die Energieeffizienz auch bei industriellen und gewerblichen Anlagen zu fördern, hat die Eurovent Zertifizierungsgesellschaft ihre Kennzeichnungen um Energieeffizienzlabels für die einzelnen Produktbereiche erweitert. Dabei wurde sowohl die Aktualisierung europäischer Normen als auch die ErP-Richtlinie (2009/125/EC, Ökodesign) berücksichtigt. Ausgehend vom Energie-effizienzlabel für Zentrallüftungsgeräte wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Energieeffizienzkennzeichnung von Produkten der Kälte-, Lüftungs- und Klimatechnik gegeben.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz - Energiekennzeichnung - Energieklasse - Eurovent – Zertifizierung

## II.2.21

# **Sicherheitstechnische Anforderungen an Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln**

**Carsten Hoch**

TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München

In den letzten Jahren hat sich die Nutzung natürlicher Kältemittel in allen Anwendungsbereichen der Kältetechnik positiv entwickelt. Neben dem klassischen Kältemittel Ammoniak in industriellen Anwendungen werden zunehmend auch Kohlendioxid und Kohlenwasserstoffe eingesetzt.

Allerdings bestehen beim Einsatz natürlicher Kältemittel gegenüber fluorierten Kältemitteln bestimmte zusätzliche Gefährdungen, zum Beispiel Brennbarkeit des Kältemittels oder hohe Betriebsdrücke. Ggf. sind auch zusätzliche Bedingungen für die Aufstellungsorte der Kälteanlagen zu erfüllen.

Im Vortrag werden die Sicherheitsaspekte, wie sie bereits in den heute existierenden Normen und Regelwerken implementiert sind, behandelt. Zugleich erfolgt ein Ausblick über die laufenden bzw. noch ausstehenden Anpassungen insbesondere der Normen auf europäischer Ebene.

## II.2.22

# **Sicherheitsnormen in der Kältetechnik – Überarbeitungen und Neuausgaben**

**Bernhard Schrempf**

KISC-KÄLTE-Information-Solution-Consulting, 82418 Murnau, Deutschland

Der Einsatz von neuen Kältemitteln so wie der verstärkte Umweltgedanke und damit auch das Thema Energieeinsparen erfordern eine immer schnellere Überarbeitung von bestehenden Normen.

So wird derzeit die kältetechnische Sicherheitsnorm DIN EN 378 überarbeitet und neue weitere Normen wie z.B. die Norm DIN EN 16084, werden in Kürze erscheinen.

Die Regelwerke werden immer komplexer so dass ein entsprechendes Fachwissen bei dem Anwender vorhanden sein muss. Ferner ist es nicht ausreichend, sich nur mit einer Norm zu beschäftigen. Die Normen sind heute sehr oft „verzahnt“, dass man von einem „Normenkomplex“ spricht.

Über diese Situation sowie über das Zusammenspiel der Normen untereinander sowie über wichtige Sicherheitsaspekte soll berichtet werden.

II.2.23

## Stand der Normung im Bereich der empfunden Luftqualität

**Birgit Müller**

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 12459 Berlin

[birgit.mueller@htw-berlin.de](mailto:birgit.mueller@htw-berlin.de)

Unterschiedliche Verunreinigungsquellen in Innenräumen beeinflussen die Gesundheit und Behaglichkeit von Personen. Bauprodukte sind als Verunreinigungsquellen von großer Bedeutung, da diese nicht einfach entfernt werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass häufig die Entscheidung über die Auswahl der Baumaterialien in Wohnungen, Büros oder öffentlichen Gebäuden nicht durch die Nutzer gefällt wird. Die Anzahl der Beschwerden über schlechte Innenraumluftqualität steigt. Der Außenluftwechsel von Gebäuden wird aufgrund der sich ändernden Bauweisen immer weiter verringert. Damit steigt die Bedeutung von Verunreinigungsquellen im Innenraum an. Die Etablierung von Geruchsbewertungen an Bauprodukten aber auch von Innenräumen ist ein wichtiges Thema, um energieeffiziente und behagliche Innenräume zu schaffen. Im Bereich der Internationalen und Nationalen Richtlinienarbeit sind in letzter Zeit wesentliche Änderungen erfolgt. In dem Vortrag wird der Stand der Richtlinienarbeit zur VDI 4302 (Geruchsprüfung von Innenraumluft und Emissionen aus Innenraummaterialien) Teile 1 (Grundlagen) und 2 (Innenraumluft) und der entsprechenden ISO 16000 Blätter 28 (Baumaterialien) und 30 (Innenraumluft) vorgestellt und deren Auswirkung und Möglichkeiten der Umsetzung erläutert.

**Stichworte:**

Geruchsbewertung von Baumaterialien, Innenräume, Bewertungskriterien für den Geruch, Empfundene Luftqualität, Richtlinie

## Notizen

III.01

## Entwicklung der Eissportkälte und die heutigen technischen Anforderungen

M. Decker

GfKK – Gesellschaft für Kältetechnik-Klimatechnik mbH, Köln

III.02

## Kryogenes Frosten und Kühlen in der Lebensmitteltechnologie

Tobias Rapp

Linde AG, Geschäftsbereich Linde Gas, 82049 Pullach

[Tobias.Rapp@linde-gas.com](mailto:Tobias.Rapp@linde-gas.com)

Die Anwendung kryogener Kälte hat sich in der Lebensmitteltechnologie seit Jahren in zahlreichen Nischen etabliert. Dabei spielen die physikalischen Vorteile tiefkälter Anwendungen eine große Rolle. Die Verdampfungstemperatur von flüssigem Stickstoff bei -196° C beeinflusst die Gefriergeschwindigkeit und damit die Produktqualität. Darüber hinaus sind auch hohe Flexibilität und geringe Investitionssummen bei den Lebensmittelbetrieben gefragt.

Die einfachste technische Lösung, der Schrankfroster erlebt durch den vermehrten Einsatz von Hochleistungsslicern eine Renaissance, da durch die Randhärtung Kapazität und Ausbeute verbessert werden können. Kontinuierliche Produktionslinien erfordern Linearfroster. Hier werden die Vorteile des hohen treibenden Temperaturgefälles, das einfache hygienische Design oder bestimmte Zusatzfunktionen herausgestellt, wie zum Beispiel die Herstellung von IQF-Produkten. IQF bedeutet individually quick frozen und damit so viel wie lose rollende schockgefrorene Lebensmittel. Also alles, was der Verbraucher einzeln aus der Packung entnehmen kann. Hierfür stehen verschiedene Lösungen bereit, die je nach Produkt zu wählen sind.

Darüber hinaus wird gezeigt, wie sich Saucen zu Pellets frosten lassen oder wie man bei Pfannengerichte auf jedes Reiskorn die entsprechende Menge Sauce aufbringt. Außerhalb der Industrie, in der gehobenen Gastronomie findet der Einsatz von flüssigem Stickstoff in der sogenannten molekularen Küche eine Anwendung.

Da das Lebensmittelrecht aus einem Gase-Hersteller unter anderem auch einen Lebensmittelunternehmer gemacht hat, sind neben den Kundenanlagen auch die eigenen Anlagen und Distributionswege strengen Vorschriften unterworfen. So hat sich nicht nur die Herstellung von Trockeneis für Lebensmittel verändert. Mit der steigenden Anzahl an zentralen Versorgungsküchen und Schulverpflegungen steigt auch der Bedarf und die Anforderungen an Lösungen zur Transportkühlung.

**Stichwörter:**

Lebensmittelgase, Trockeneis, (Schock-) Frosten, Kühlen, IQF

### III.03

## Energiecontrolling in Großkälteanlagen Konzeption und Umsetzung von Messtechnik und Software

Dr. Eckardt Augenstein<sup>1\*</sup>, Jens Lücke<sup>1</sup>, Rainer Schnellenpfeil<sup>2</sup>, Dorle Beilharz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Energiesystemtechnik, D-52066 Aachen  
[e.augenstein@perpendo.de](mailto:e.augenstein@perpendo.de), [j.luecke@perpendo.de](mailto:j.luecke@perpendo.de)

<sup>2</sup> Energie Food Town GbR, D-47228 Duisburg  
[Rainer.Schnellenpfeil@havilog.com](mailto:Rainer.Schnellenpfeil@havilog.com), [Dorle.Beilharz@havilog.com](mailto:Dorle.Beilharz@havilog.com)

\* Korrespondenzautor

Auch für Großkälteanlagen hat die energieeffiziente Betriebsführung in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Durch die Versorgung mehrerer Temperaturniveaus, integrierter Systeme zur Wärmerückgewinnung und eine unstetige Abnahme durch die Verbraucher zeichnen sich diese Anlagen allerdings durch eine hohe Komplexität aus. Um die zur Analyse und Beurteilung der energetischen Qualität notwendige Transparenz zu schaffen, ist neben der Erfassung der produzierten Kältemengen die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Energieströme notwendig.

Hier bieten Energiecontrollingsysteme entsprechende Möglichkeiten. Im Vergleich zum Funktionsumfang der bereits vorhandenen Leittechniksysteme erlauben diese eine langfristige Historisierung der Messdaten sowie eine automatisierte Auswertung in Form von Kennzahlen, Diagrammen und Berichten für beliebige Zeiträume. Neben der Überwachung der energetischen Qualität der Anlagen spielt bei der Einführung solcher Systeme häufig auch die transparente und zuverlässige Abrechnung der gelieferten Medien gegenüber internen oder externen Kunden eine Rolle.

Eine besondere Herausforderung stellt die messtechnische Erfassung der tatsächlich erzeugten Kälteleistung dar. Da aus überflutet arbeitenden Direktverdampfern in der Regel ein Flüssigkeits-Dampf-Gemisch in die Abscheider zurückfließt, kann die gelieferte Kältemenge nicht durch eine Messung der flüssigen Kältemittelströme erfasst werden. Um dennoch die Kälteleistung erfassen zu können, bietet die Volumenstrommessung der Druckleitungen der Verdichter eine Alternative. Zusammen mit weiteren Messgrößen des Kältemittelkreislaufs kann so die Kälteleistung und Effizienz der Anlage online errechnet werden.

Der Vortrag stellt das Gesamtkonzept und die Umsetzung eines Energiecontrollingsystems am Beispiel der Energie Food Town GbR vor. Diese betreibt eine Ammoniak-Großkälteanlage mit insgesamt 4,4 MW Kälteleistung und liefert am Standort Duisburg Tief-, Normal- und Solekälte sowie verschiedene weitere Medien an drei Unternehmen der Lebensmittelbranche. Der Vortrag geht neben der allgemeinen Konzeption des Systems näher auf die verwendete Messtechnik und die Bilanzierung der Anlage ein. Abschließend wird über die ersten Betriebserfahrungen berichtet.

#### Stichwörter:

Energiecontrolling, Großkälteanlage, Durchflussmessung

### III.04

## Betriebsverhalten von CO<sub>2</sub> Boostersystemen

O. Javerschek, T. Hieble

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, Eschenbrünnlestr.15, 71083 Sindelfingen, Germany  
[oliver.javerschek@bitzer.de](mailto:oliver.javerschek@bitzer.de)

Das Betriebsverhalten und die resultierenden Betriebsbedingungen von CO<sub>2</sub>-Boostersystemen in der Supermarktkälte werden in der vorliegenden Veröffentlichung erläutert und diskutiert. Dabei werden die wesentlichen Kriterien und Herausforderungen bei den unterschiedlichen Betriebs- und Lastbedingungen erläutert. Unterstützt durch mathematische Modellierung (Software), werden die notwendigen Auslegungskriterien hinsichtlich Komponenten und Systemsteuerung definiert. Außerdem werden simulierte und gemessene Betriebszustände einer kleinen Booster-Anlage vergleichend betrachtet und bewertet.

### III.05

## Glasabdeckungen für Kühl- und Tiefkühlmöbel im Supermarkt

Dipl. Ing. Konrad Boergen<sup>1</sup>, Dipl. Ing. Simon Swiderski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Remis GmbH / Entwicklung, 50829 Köln / Germany  
[k.boergen@remis.de](mailto:k.boergen@remis.de)

<sup>2</sup> Remis GmbH / Anwendungstechnik, 50829 Köln / Germany  
[s.swiderski@remis.de](mailto:s.swiderski@remis.de)

Energieeinsparungen:

- seit Jahren Thema in Deutschland durch die Energiekosten
  - gestiegenes Umweltbewusstsein + politische Ziele einer CO<sub>2</sub>-Reduktion
  - Energieverfügbarkeit durch Entscheidungen zum Ausstieg Atomstrom fraglich.
- Energieverbraucher - sind zum Handeln aufgefordert.

Kälte stellt in Supermärkten mit ca. 60 % Anteil den größten Energieverbraucher dar. Energieverbrauch und Warensicherheit/-hygiene sind andauernde Themen.

Neben Optimierung der Anlagentechnik (Antriebe, Kältemittel, Baugruppen) sind seit 1997 Glasabdeckungen der Fa. Remis erfolgreich auf den TK-Truhen im Supermarkt eingesetzt mit den Ergebnissen:

- Energieeinsparung > 30 % bei konstanten TK-Temperaturen < 18 °C
- Reduktion der Abtauungen (2x/d) > 50 %
- Temperaturstabilität bei Energieausfall durch geschlossene Möbel
- stabile Abverkäufe / Umsätze bei TK-Produkten.

Alternative zu Nachtrollos sind permanente Glastüren für Kühlregale - mit Ausnahme Diskonter bereits großflächig eingesetzt.

TK-Schränke sind seit 2000 eine gute Alternative zu TK-Truhen. Konstruktiv bedingt verfügen TK-Türen über 3-fach Verglasung, elektrisch beheizten Tür-/Basisrahmen und Scheiben.

Weiterentwicklung und Optimierungspotenziale werden aufgezeigt, die Umsätze fördern bei gleichzeitigen sinkenden Betriebskosten und verbesserten Gebrauchseigenschaften wie z. B. energiefreie TK-Türen.

**Stichwörter:**

Energieeinsparung, Warensicherheit, Warentransparenz, Technische Entwicklungen / Ziele

**III.06**

## **Verbesserung der Energieeffizienz von Supermärkten**

**J. Denecke**

H. W. Denecke GmbH, Solingen

**III.07**

## **Efficient retrofitting of R-22 installations with Forane® 427A**

**Beatrice Boussand**

ARKEMA France, Centre de Research Rhône-Alpes, Pierre-Bénite Cedex, France  
[Beatrice.boussand@arkema.com](mailto:Beatrice.boussand@arkema.com)

HCFC-22 has been used for decades mostly in air-conditioning applications due to its excellent thermodynamic properties. However, like all HCFCs (hydrochloro-fluorocarbons), R-22 is subject to the regulations of the Montreal Protocol and its subsequent amendments. In Europe in particular, R-22 is phased out from 2010. Therefore, the industry was looking for a zero-ODP solution to replace R-22 in existing equipment.

Forane® 427A is the refrigerant blend Arkema proposes for the retrofitting of the R-22 installations. It is a non-toxic, non-flammable (A1 classification) and zero-ODP refrigerant. Forane® 427A requires just one drainage of the system's oil followed by its replacement by a POE lubricant. Optimum performance similar to R-22 can be achieved without the need for a long and costly rinse of the circuit thanks to high tolerance to the residual original oil (mineral or alkylbenzene). No modification of the installation is required.

FORANE® 427A is a 100% HFC blend. It is consequently compatible with elastomers or with plastics normally compatible with R-407C and R-404A.

Forane® 427A can be used to retrofit low temperature refrigeration equipment as well as air-conditioning installations. It is running successfully in installations for more than 6 years now.

Practical case studies will be presented: conversion of ferry boat chillers, conversion of a large low temperature refrigerated warehouse. We will also focus particularly on the retrofit of installations with flooded evaporators.

**III.08**

## **Low GWP Alternativen für die gewerbliche Kältetechnik**

**Frank Rinne<sup>1</sup>, Barbara Minor<sup>2</sup>, Ward Wells<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> DuPont Deutschland GmbH, Neu-Isenburg

<sup>2</sup> DuPont Fluoroproducts, Wilmington, DE

R-404A ist der globale Industriestandard von den HFKW Kältemitteln in der gewerblichen Kälte-technik, sowohl in kleinen als auch in großen Kälteanlagen. Aufgrund des hohen Treibhauspotentials (GWP) von R-404A von 3922 (4<sup>th</sup> IPCC Assessment Report auf Basis von 100 Jahren), wächst das Interesse nach Alternativen mit niedrigem Treibhauspotential bei gleicher Performance hinsichtlich Kälteleistung und Leistungszahl. Das neue niedrig GWP Kältemittel HFO-1234yf mit einem GWP 4 ist eine geeignete Komponente für Kältemittelgemische mit niedrigem GWP zur Entwicklung von R-404A Ersatzstoffen. Zwei unterschiedliche Gemische wurden untersucht. Das erste Gemisch hat ein GWP um 1400, ist nicht toxisch und nicht brennbar. Dieses Gemisch ist für den Austausch von R-404A in großen Supermarktkälteanlagen geplant, da diese Systeme nicht für brennbare Kältemittel konstruiert

wurden. Das zweite Gemisch ist die Entwicklung einer Alternative mit möglichst geringen GWP (~250), diese Gemische fallen in die neue ASHRAE A2L Kältemittelklassifizierung. Dieses Gemisch ist geeignet für kleinere Kälteanlagen, die entsprechenden Normen EN378 und ISO 5149 sind hierfür zurzeit in der Überarbeitung um die Randbedingungen für den Einsatz zu definieren. Im Rahmen des Vortrages werden Kreislaufsimulationen mit den Gemischen vorgestellt sowie die ersten experimentellen Untersuchungen in einem gewerblichen Tiefkühlschrank. Es werden die thermodynamischen Daten, der Kältemittelmassentrom sowie der Energieverbaruch im Vergleich zu R-404A dargestellt.

### III.09

## Reduzierung der F-Gas-Emissionen in Europa – Ergebnisse aus dem REAL SKILLS EUROPE-Projekt

Beermann K.<sup>1</sup>, Cowan D.<sup>2</sup>, Chaer I.<sup>3</sup>, Gontarz G.<sup>4</sup>, Kaar K.<sup>5</sup>,  
Koronaki I.<sup>6</sup>, Maidment G.<sup>3</sup>, Reulens W.<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Informationszentrum für Kälte-, Klima- und Energietechnik gGmbH, Germany

<sup>2</sup> Institute of Refrigeration, Kelvin House, 76 Mill Lane, Carshalton, Surrey, SM5 2JR, United Kingdom

<sup>3</sup> London South Bank University, United Kingdom

<sup>4</sup> Krajowe Forum Chłodnictwa, Poland

<sup>5</sup> Estonian Environmental Research Centre, Estonia

<sup>6</sup> National Technical University of Athens, Greece

<sup>7</sup> Limburg Catholic University College, Belgium

REAL Skills Europe – ist ein zweijähriges EU-Projekt – teilfinanziert im Rahmen des EU-Programms für lebenslanges Lernen - das auf den Ergebnissen eines britischen Programms (Real Zero) im Jahre 2009 entwickelt wurde, um die Reduzierung der Kältemittel-Leckagen durch bessere Sensibilisierung, Bildung und Ausbildung zu erreichen.

Diese freiwillige Informations- und Schulungsinitiative schafft für Einzelpersonen und Organisationen in den EU-Mitgliedsstaaten die Möglichkeit, an technische Informationen und bewährte Praktiken im Umgang mit Kältemitteln zu gelangen.

Es bietet eine strukturierte Methode für die Durchführung von Anlageninspektionen und der Beurteilung und Minimierung von potenziellen Leckagestellen. Ein zertifiziertes E-Learning-Programm, Software-Tools und Leitfäden (mehrsprachig) stehen hierfür zur Verfügung. Ein besonderer Vorteil ist für Unternehmen in Ländern mit weniger gut entwickelten Ausbildungsprogrammen im Bereich der Kälte- und Klimatechnik und verspäteter Umsetzung der F-Gas-Verordnung darin zu sehen, dass durch Lernen und Erfahrungsaustausch mit den fortgeschrittenen Partnerländern auch für eine rasche und wirksame Umsetzung in diesen Ländern gesorgt werden kann.

Der Beitrag beschreibt die Entwicklung dieses EU-Projektes in den sechs Partnerländern und die bisher erzielten Ergebnisse.

III.10

## Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch neuartige Riemenscheibenkupplung für Pkw-Klimaanlagen

Jörg Aurich, Rico Baumgart

Technische Universität Chemnitz, Institut für Konstruktions- und Antriebstechnik,  
09126 Chemnitz, Deutschland  
[joerg.aurich@s2007.tu-chemnitz.de](mailto:joerg.aurich@s2007.tu-chemnitz.de)

Bereits seit einigen Jahren ist der überwiegende Teil der Kraftfahrzeuge mit einer Klimaanlage ausgestattet. Für die Kompression des Kältemittels werden dabei hauptsächlich hubvolumengeregelte Axialkolbenverdichter eingesetzt. Damit kann der gelieferte Kältemittelmassenstrom an den aktuellen Kältebedarf im Fahrzeug angepasst werden. Bei abgeschalteter Klimaanlage wird der Verdichter mit minimalem Hubvolumen betrieben. Allerdings entstehen dabei Reibungsverluste, die zu einem Kraftstoff-Mehrverbrauch führen. Um dies zu vermeiden, werden an den Kältemittelverdichtern zum Teil schaltbare Magnetkupplungen verbaut, wie sie schon früher bei ungeregelten Verdichtern zum Einsatz gekommen sind. Dadurch lassen sich zwar die Schleppverluste einsparen, jedoch kommt es bei eingeschalteter Klimaanlage, wie z. B. im Sommer, aufgrund der permanenten elektrischen Leistungsaufnahme der Magnetspule zu einem Kraftstoffmehrverbrauch.

An der TU Chemnitz wurde ein umfangreiches prozess- und geometriebasiertes Simulationsmodell entwickelt, mit dem unter anderem die Möglichkeit besteht, verschiedene Optimierungsmaßnahmen an Klimaanlagenkomponenten hinsichtlich der erreichbaren Kraftstoffeinsparpotentiale zu analysieren.

Bei den Untersuchungen wurde deutlich, dass mit der herkömmlichen Magnetkupplung innerhalb eines Jahres nur geringe Kraftstoffeinsparungen realisierbar sind. Im Gegensatz dazu lassen sich mit einer Kupplung ohne dauerhaften elektrischen Leistungsbedarf weitaus höhere Einsparungen erzielen.

Aus diesem Grund werden derzeit an der TU Chemnitz zwei neuartige Riemenscheibenkupplungen entwickelt, die weder im geschalteten noch im ungeschalteten Zustand elektrische Leistung benötigen. Diese Lösungen zeichnen sich insbesondere durch ihren geringen Bauraumbedarf, ihr einfaches Funktionsprinzip sowie ihre niedrigen Herstellungskosten aus.

Im Vortrag wird zunächst das oben genannte Simulationsmodell kurz vorgestellt. Anschließend werden die beiden Riemenscheibenkupplungen ausführlich beschrieben. Des Weiteren wird auf die konstruktiven Besonderheiten, die Vor- und Nachteile sowie die erreichbaren Kraftstoffeinsparpotentiale eingegangen. Unser Ziel ist es, bereits auf der DKV-Tagung Prototypen zu präsentieren.

### III.11

## Wärmepumpentechnik in Elektrofahrzeugen

**Leonhard Hörrth\*, Markus Spinnler, Thomas Sattelmayer**

Technische Universität München, Lehrstuhl für Thermodynamik,  
Boltzmannstrasse 15, 85748 Garching  
[hoerth@td.mw.tum.de](mailto:hoerth@td.mw.tum.de)

Derzeitige Personenkraftfahrzeuge bedienen sich der Motorabwärme und elektrischen Zuheizern, um die Fahrzeugkabine zu beheizen. In zukünftigen Elektrofahrzeugen hingegen muss aufgrund der Reichweitenproblematik auf andere Techniken zugegriffen werden. Die Nutzung des Kältekreises im Fahrzeug als Wärmepumpe ist hierzu eine Lösung, effizienter den thermischen Komfort zu gestalten.

Zusätzlich wird es notwendig sein die Batterie mittels Kältekreis zu konditionieren, da zum einen bei kalten Bedingungen die Leistungsfähigkeit des Energiespeichers eingeschränkt ist und zum anderen die Lebensdauer bei sehr hohen Temperaturen stark sinkt. Überdies ist es sinnvoll die Abwärme der E-Maschine zur Beheizung des Innenraums zu nutzen.

Um den oben genannten Anforderungen zu genügen, ist die Architektur des Kältekreises hierzu drastisch umgestaltet worden. Dabei ergeben sich mehrere Betriebsmodi mit unterschiedlichen Wärmequellen und –senken, die ungleiche Temperaturniveaus besitzen.

Mittels 1D-Simulation wurden die Funktionen der R134a/R1234yf-Kälteanlage beleuchtet. Die Untersuchungen zeigen deren Potenziale bei der Nutzung der unterschiedlichen Wärmequellen sowie die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe bei den unterschiedlichen Modi im Sommer und Winterbetrieb auf. Hierzu werden ausgewählte Betriebsmodi insbesondere mit zwei Wärmequellen vorgestellt und bei unterschiedlichen Leistungsanforderungen bewertet.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Klimatisierung Elektrofahrzeuge, 1D-Simulation

### III.12

## Effizienter Kältekreislauf zur Fahrzeugklimatisierung

**Marc Graaf, Florian Wieschollek**

Visteon Deutschland GmbH, 50170 Kerpen, Deutschland  
[fwiescho@visteon.com](mailto:fwiescho@visteon.com)

Gesetzlich Anforderungen an Schadstoffemissionen sowie die Forderung nach geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen setzen Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Fahrzeugkomponenten und Subsystemen. Im Vordergrund der Entwicklung stehen hier Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung von Komponenten sowie die Effizienzsteigerung. Der bei Verbrennungsmotoren vor einigen Jahren eingesetzte Trend des „Downsizing“ steht hier an vorderster Stelle. Auch bei den Komponenten des Kältekreislaufs, speziell der Kältemittelverdichter, ist dieser Trend zu erkennen.

Eine weitere Randbedingung in der Entwicklung von Fahrzeugklimaanlagen wird durch die gesetzlich vorgeschriebene Einführung alternativer Kältemittel gesetzt. Die Fahrzeughersteller haben sich hier für den Einsatz des Kältemittel R1234yf entschieden. Dabei werden die Leistungs- und Effizienzanforderungen an zukünftige Systeme im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik trotz abweichender Eigenschaften des Kältemittels R1234yf nicht reduziert.

Diese Anforderungen sind Impulsgeber für die Entwicklung zukünftiger Klimaanlagen, die im Rahmen dieses Vortrages gezeigt werden. Es werden Maßnahmen und ihr Einfluss auf die Leistung und Effizienz am Beispiel einer Basisarchitektur für R134a und eines optimierten Systems für R1234yf beschrieben.

### III.13

## Einsatz von Phasenwechselmaterialien in Sekundärkreisläufen von Pkw-Klimaanlagen

Julia Lemke, Nicholas Lemke, Jürgen Köhler

Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig  
[j.lemke@tu-bs.de](mailto:j.lemke@tu-bs.de)

Neue Antriebskonzepte erfordern im Rahmen des Fahrzeug-Gesamtenergiemanagements auch eine Anpassung der Fahrzeugklimaanlage. Konzepte mit Start-Stopp-Automatik z. B. weisen Anforderungen auf, die eine Neustrukturierung bisheriger Klimatisierungssysteme erfordern. Indirekte Systeme mit Sekundärkreislauf können hierbei eine Möglichkeit darstellen, diesen geänderten Anforderungen zu begegnen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Möglichkeit der Erweiterung von Sekundärkreisläufen durch den Einsatz hocheffizienter Wärmespeicher wie beispielsweise Phasenwechselmaterialien (PCM) untersucht. Die verschiedenen Implementierungsmöglichkeiten von PCM im Kreislauf werden vorgestellt. Des Weiteren werden Anhand experimenteller Ergebnisse der Nutzen und die Einsatzmöglichkeiten von PCM in Fahrzeugklimaanlagen diskutiert.

**Stichworte**

Sekundärkreislauf, PCM, Pkw-Klimaanlage

### III.14

## Thermisches Pkw-Innenraum-Modell

Dipl.-Ing. Björn Flieger, Dr.-Ing. Rita Streblow, Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen

Der Energiebedarf von Klimageräten nimmt in der Automobilindustrie einen immer höheren Stellenwert ein. Der Anteil des Energiebedarfs für den Antriebsstrang gegenüber dem der Nebenaggregate wird sich in der Zukunft stark verändern. Die zunehmende Elektrifizierung im Automobilsektor verlangt im Hinblick auf alternative Antriebe in der Automobilindustrie, wie Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge, eine effiziente Nutzung vorhandener Energien unter Einhaltung von Komfortkriterien. Mit einem Modell eines Fahrzeuginnenraums können Aussagen über die Luftverteilung und den Energiebedarf getroffen werden, um die Effizienz neuer Klimatisierungskonzepte und den thermischen Komfort zu bewerten.

**Stichworte:**

Fahrzeuginnenraum, mathematische Modellierung, numerische Simulation, Komfort, Thermische Behaglichkeit

III.15

## **Zum Einfluss wechselnder Wärme- und Feuchtigkeitslasten auf die erreichbaren Raumluftzustände in Reisezugwagen**

**Ingwer Ebinger**

HAW Hamburg, Department für Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau,  
Berliner Tor 9, 20099 Hamburg  
[ingwer.ebinger@haw-hamburg.de](mailto:ingwer.ebinger@haw-hamburg.de)

Die Auslegung von Klimaanlagen für Reisezugwagen erfolgt nach international gültigen Vorschriften. In diesen sind u. a. die maximalen Auslegungsbedingungen für den Heiz- und Kühlbetrieb in Abhängigkeit vom Einsatzgebiet und der Einsatzcharakteristik hinsichtlich der Umgebungsbedingungen sowie des Besetzungsgrades vorgegeben. Auf dieser Basis werden die Klimaanlagen für die Fahrzeuge dimensioniert, gebaut und ausführlich getestet.

Während des Einsatzes verändern sich die Lastbedingungen in Reisezugwagen ständig. Die Fahrzeuge bewegen sich in unterschiedlichen Fahrtrichtungen, die Umgebungsluftzustände und die Sonnenstrahlung variieren im Tagesverlauf. Einen besonders großen Einfluss hat die wechselnde Personenanzahl. In verkehrsintensiven Zeiten, z. B. im Berufsverkehr, kann die Belegungsdichte deutlich über den zur Auslegung berücksichtigten Vorgaben liegen. Zeitgleich können extreme Umgebungszustände (insbesondere der Sonnenstrahlung) auftreten. Außerdem ist mit zunehmender Einsatzdauer eine Verschmutzung der Wärmeübertrager nicht auszuschließen, was zu einer Reduzierung der zur Verfügung stehenden Heiz- bzw. Kälteleistung beiträgt.

Es wird untersucht, welche Raumluftzustände im Reisezugwagen mit einer vorschriftsmäßig dimensionierten Klimaanlage in extremen Einsatzsituationen erreicht werden können.

**Stichwörter:**

Klimaanlage, Raumluftzustand, Wärme- und Feuchtigkeitslast, Reisezugwagen

III.16

## **Klimatisierung von Flugzeugkabinen – Herausforderungen für die Kühlung**

**Arnav Pathak, Gunnar Grün**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley  
[gunnar.gruen@ibp.fraunhofer.de](mailto:gunnar.gruen@ibp.fraunhofer.de)

Flugzeuge operieren unter extremen klimatischen Bedingungen: Außentemperaturen schwanken von unter -55 °C bis über +50 °C, der Umgebungsdruck von etwa 150 hPa bis 1050 hPa und der Wassergehalt der Luft von extrem trocken bis gesättigt. Notwendigerweise muss innerhalb der Flugzeughülle ein kontrolliertes Raumklima herrschen, so dass Crew und Passagiere sichere und komfortable Konditionen erfahren und günstige Bedingungen für den Betrieb von Instrumenten und Geräten herrschen.

Um dies zu erreichen sind Flugzeuge mit dem sogenannten Environmental Control System (ECS) ausgerüstet, dessen primäre Aufgabe es ist, das Klima innerhalb der Druckhülle in tolerablen Grenzen zu halten. Eine große Herausforderung stellen hier die vielfältige Kühllasten dar: Sonneneinstrahlung, Wärmeabgabe durch die Passagiere, Beleuchtung, Inflight Entertainment, aber auch durch Geräte in der Galley oder der Avionik. Insbesondere während des Fluges müssen diese Kühllasten abgeführt werden, möglichst ohne große Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch. Trotz des häufig großen Temperaturunterschiedes zwischen Flugzeugkabine und Umgebung ist eine aktive Kühlung fast permanent erforderlich.

Durch den notwendigen höheren Kabinendruck wird das ECS üblicherweise mit aus dem Mantelstrom der Triebwerke entnommener Zapfluft versorgt, welche jedoch bei höheren Drücken und Temperaturen als benötigt zur Verfügung steht. In der Kühlwanlage des ECS wird diese soweit konditioniert, dass sie – unter Umständen gemischt mit einem rezirkulierten Anteil – die Kühllasten von Kabine, Cockpit oder Avionik abführen kann.

Es wird ein Überblick über die Klimatisierung von Flugzeugkabinen und die resultierenden Herausforderungen für die Kühlung gegeben, welche ein komfortables Klima für Passagiere und Crew ermöglichen und ein sicheres Betreiben des Flugzeugs und seiner Geräte und Systeme sicherstellen soll.

### III.17

## **Konzept und Anwendungen eines speziellen Scrollverdichters mit EC-Motor für Fahrzeuge mit 24V-Bordnetz**

**Oliver Rathfelder**

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, 71065 Sindelfingen, Deutschland  
[oliver.rathfelder@bitzer.de](mailto:oliver.rathfelder@bitzer.de)

Um den Anforderungen nach Steigerung der Energieeffizienz der Klimaanlagen von Stadtbussen nachzukommen, sollte ein neues Verdichterkonzept entwickelt werden. Dies beinhaltete eine motordrehzahlunabhängige und stufenlose Regelung des Fördervolumens, um die Verdichterkälteleistung der erforderlichen Kühlanforderung des Busses optimal anpassen zu können. Die benötigte elektrische Leistung konnte mangels zur Verfügung stehender Alternativen eines konventionellen Stadtbusses ausschließlich aus dem 24V-Gleichspannungsnetz bezogen werden. Weiterhin mussten hohe Anforderungen hinsichtlich Bauhöhe, Gewicht und Wartungsfreundlichkeit erfüllt werden.

Konzept und Design des Verdichters werden vorgestellt und auf diese und weitere Anwendungen und deren Betriebserfahrungen eingegangen.

### **Stichwörter**

Scrollverdichter / EC-Motor / drehzahlvariabel / motordrehzahlunabhängig / energieeffizient

III.18

## **Jahresenergieverbrauch von Klimaanlagen in Schienenfahrzeugen - Möglichkeiten der Optimierung**

**Dipl.- Ing. Lutz Boeck**

Leiter Center of Competence HVAC  
Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG

Ein wesentliches Ausstattungsmerkmal moderner Schienenfahrzeuge heute sind Klimaanlagen zur Schaffung komfortabler Umgebungsbedingungen für die Reisenden. War dieses Ausstattungsmerkmal in der Vergangenheit vor allem HGV und Reisezugwagen vorbehalten, so sind heute auch Regionalfahrzeuge bis hin zu Straßenbahnen zunehmend damit ausgerüstet.

Mit dem breiten Einzug der Klimatisierung in die Fahrzeuge wird dem Jahresenergieverbrauch für die Klimatisierung zunehmend mehr Aufmerksamkeit gewidmet, da zur Realisierung der angestrebten Raumluftzustände ein nicht unerheblicher technischer und energetischer Aufwand erforderlich ist. Insbesondere bei Kurzstreckenfahrzeugen mit energetisch optimierten Antriebs- Rückspeisesystemen erreicht der Energiebedarf für die Klimatisierung Größenordnungen von ca. 25 % des Gesamtenergiebedarfes eines Fahrzeuges.

Nachdem über die technischen Möglichkeiten, wie Wärmepumpe, Wärmerückgewinnung aus der Fortluft und besetzungsabhängige Außenluftzufuhr und die erzielbaren Einsparpotentiale auf der DKV-Tagung 2009 berichtet wurde, werden jetzt die Ergebnisse, die bei der praktischen Umsetzung in Projekten erzielt wurden, vorgestellt.

III.19

## **Energetische Effizienz zweistufiger Transportkälteanlagen**

**Andreas Möhlenkamp\*, Nicholas Lemke, Jürgen Köhler**

TU-Braunschweig, Institut für Thermodynamik, 38106 Braunschweig, Deutschland  
[a.moehlenkamp@tu-bs.de](mailto:a.moehlenkamp@tu-bs.de)

In der Transportkühlung werden bislang vorwiegend geschlossene, einstufige Kältekreisläufe eingesetzt. Zweistufige Kältekreisläufe ermöglichen neue Schaltungsvarianten und führen gegenüber einstufigen Kältekreisläufen zu einer deutlichen Steigerung der energetischen Effizienz. Dies gilt insbesondere für das Kältemittel R744. Derzeit kommen in den Kältekreisläufen die synthetischen Kältemittel R410A und R404A zum Einsatz, die beide ein hohes global warming potential (GWP) aufweisen. Das GWP von natürlichen Kältemitteln, wie beispielsweise R744 und R1270, ist dagegen zu vernachlässigen. Beide genannten natürlichen Kältemittel kommen aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften für Anwendungen im Bereich Transportkühlung in Betracht.

Es werden Simulationen zu mehreren zweistufigen Kältekreisläufen vorgestellt, wobei jeweils das verwendete Kältemittel variiert wird. Die durchgeführten Simulationen berücksichtigen die unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften der verwendeten Kältemittel R410A, R1270 und R744 hinreichend und ermöglichen daher einen Vergleich der energetischen Effizienz. Es wird gezeigt, dass für die vorgestellten zweistufigen Kältekreisläufe die natürlichen Kältemittel R744 und R1270 jeweils vergleichbare energetische Effizienzen gegenüber dem synthetischen Kältemittel R410A erreichen und sich somit als eine Alternative zu dem bislang verwendeten Kältemittel empfehlen.

III.20

## **Erste Betriebserfahrungen mit einer LiBr-Absorptionskälteanlage an Bord eines Schiffes**

**Yves Wild**

Dr.-Ing. Yves Wild Ingenieurbüro GmbH, 22765 Hamburg, Deutschland  
[YWild@DrWild.de](mailto:YWild@DrWild.de)

Auf dem E-Ship 1 des Windenergieanlagenherstellers Enercon ist die erste 140 kW Absorptionskälteanlage der EAW Energieanlagenbau Westenfeld GmbH eingebaut. Das Schiff wurde ursprünglich bei der Lindenau Werft in Kiel gebaut. Aufgrund der Insolvenz der Werft wurde der Bau durch den Eigentümer mit Unterstützung der CassensWerft in Emden fertiggestellt. Die Absorptionskälteanlage sowie die vorangegangenen Untersuchung hinsichtlich der Funktionsfähigkeit der Anlage unter Seegangsbedingungen wurden bereits auf dem Deutschen Kälte-Klima Tagung 2007 in Hannover vorgestellt.

Seit Dezember 2010 ist die Absorptionskälteanlage in Betrieb. Seit April 2011 werden mit Hilfe von Datenloggern Betriebsdaten erfasst, deren Auswertung bis zum November 2011 abgeschlossen sein sollen. Hierbei werden nicht nur thermische Daten (Temperaturen) erfasst, sondern auch Daten hinsichtlich der Schiffsbewegung (Krängung). Eine Beschreibung der installierten Anlage sowie die Auswertung der Betriebsdaten sollen in dem Vortrag vorgestellt werden.

EAW hat im März 2011 den 1. Preis beim 3. Deutschen Kältepreis in der Kategorie „Kältetechnische Sonderanwendungen“ für die seetaugliche Absorptionskälteanlage erhalten. Der Deutsche Kältepreis wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit vergeben.

### ***Aktuelles Thema: Energieeffizienz***

#### **Einführung**

**Michael Arnemann**

DKV e. V., Hannover

III.21

## **Energieeffizienz von Kälteanlagen im internationalen, politischen Kontext – VDMA-Einheitsblatt 24247**

**Holger König**

UHTC – United Heat Transfer Technology Center/a-heat AG, Lindau, und  
Sprecher des Arbeitskreises „Energieeffizienz“ im VDMA

#### **Diskussion**

**mit Vertretern des Arbeitskreises „Energieeffizienz“ im VDMA**

## Notizen

VI.01

## KWKK-Anlagen im Feldtest: Verbesserung ihrer Regelung und Hydraulik

Klaus Backes\*, Mario Adam

Fachhochschule Düsseldorf, Arbeitsgruppe E<sup>2</sup> - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz  
40474 Düsseldorf, Josef-Gockeln-Straße 9  
[klaus.backes@fh-duesseldorf.de](mailto:klaus.backes@fh-duesseldorf.de)

KWKK-Anlagen bieten Potential für bessere Gesamt-Nutzungsgrade der Energiebereitstellung im Vergleich zur üblichen Einzel-Erzeugung von Strom, Wärme und Kälte. Allerdings sind die Einzelkomponenten kleiner KWKK-Anlagen in der Praxis oft zu wenig abgestimmt und somit Verbesserungen an Regelung und Hydraulik wünschenswert.

Die FH Düsseldorf und die FH Aachen untersuchen dazu drei Anlagen mit den Mini-BHKW der Firmen Senertec und PowerPlus Technologies und der Adsorptionskältemaschine der Fa. Sortech. Zwei der Anlagen sind „klassische“ Feldtests bei einem Kunden (Blumenhaus und Ingenieurbüro), die dritte ist ein innovativer Hardware-in-the-Loop- bzw. HiL-Prüfstand an der Fachhochschule Düsseldorf.

Der HiL-Prüfstand enthält zwar BHKW, Speicher und Kältemaschine als reale Geräte, die restlichen Systemkomponenten wie Rückkühler, Gebäude, Fancoils und Systemregelung sind aber durch Simulationsmodelle unter Matlab/Simulink mit den Toolboxen Carnot und Stateflow ersetzt.

Dynamische Echtzeitsimulation und reale Geräte sind über den automatisierten Prüfstand miteinander verbunden, wodurch die Geräte wie in einer realen Einbausituation betrieben werden. Randbedingungen wie Größe des Gebäudes, Standort, Nutzerverhalten und Hydraulik der Wärme und Kälteverteilung sind leicht am Rechner änderbar. So können die vorgeschlagenen Regelungs-Optimierungen realistisch getestet, der Anlagenbetrieb unter allen Bedingungen abgesichert und Kundenprobleme und kritische Betriebszustände einzeln untersucht werden.

Dargestellt werden die Prüfstandstechnik und Ergebnisse der Messungen sowie paralleler Rechnersimulationen dazu, z.B. zur Wirkungsgradoptimierung bei Kälteteillast entweder durch Reduktion der Ventilatordrehzahl im Rückkühler bzw. im Fancoil oder durch eine verlängerte Zyklusdauer der periodisch arbeitenden Adsorptionskältemaschine.

**Stichwörter:**

KWKK, Matlab, CARNOT, hardware-in-the-loop, HiL, BHKW, Adsorption, Kältemaschine

VI.02

## Ergebnisse zu neuen Feldmessungen von elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen aus „WP Monitor“ durch das Fraunhofer ISE

Dipl.-Ing. Marek Miara, Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Danny Günther,  
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kramer, Dipl.-Ing.(FH) Robert Langner

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg,  
Fon: ++48 761-4588-5529, Fax: ++48 761-4588 -9529, [marek.miara@ise.fraunhofer.de](mailto:marek.miara@ise.fraunhofer.de)

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE führt seit mehreren Jahren umfangreiche Feldmessungen elektrisch angetriebener Kompressionswärmepumpen durch. Im ersten großen Projekt wurde der Einsatz von Wärmepumpen in Passivhäusern untersucht. Dabei fand ein Vergleich zwischen Lüftungs-Kompaktgeräten mit integrierter Abluftwärmepumpe (Luft/Luft-WP) und Sole/Wasser-Wärmepumpen statt. Im Jahr 2006 begannen zwei weitere Monitoringprojekte. Im Rahmen des Projektes „Wärmepumpen-Effizienz“ wurde untersucht, wie effizient die sich damals am

Markt befindlichen Wärmepumpen in Wohngebäuden aktuellen Baustandards sind. Das Ziel des zweiten Projektes „WP im Gebäudebestand“ war die Untersuchung von Wärmepumpen in unsanierten bzw. teilsanierten Bestandsgebäuden. Beide Projekte wurden bereits auf früheren Kälte-Klima-Tagungen vorgestellt. Seit mittlerweile zwei Jahren läuft nun auch das Projekt „WP Monitor“, in Rahmen dessen ca. 100 Wärmepumpen von 12 Herstellern unter realen Bedingungen untersucht werden. Mit hoher zeitlicher Auflösung werden Volumenströme, Temperaturen, Wärmemengen und Stromverbräuche bei den einzelnen Messobjekten erfasst, per Datenfernabfrage täglich ans Institut übertragen, dort gespeichert und ausgewertet. Aus den Messergebnissen werden verschiedene Kennwerte ermittelt, das Systemverhalten abgebildet und analysiert sowie Korrelationen zu Anlagenstammdaten überprüft. Die untersuchten Wärmepumpen nutzen vor allem die Außenluft und das Erdreich als Wärmequelle. So wie bei den früheren Projekten gelten die Bestimmung der Effizienz sowie die Identifikation von Optimierungspotenzialen als die Hauptziele von „WP Monitor“.

Auf der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2011 werden die ersten Ergebnisse aus dem Projekt „WP Monitor“ für die Luft-, Erdreich- sowie Wasser-Wärmepumpen vorgestellt und mit der Ergebnissen aus früheren Monitoringprojekten verglichen. Zusätzlich werden bis jetzt nicht präsentierte Ergebnisse aus dem Projekt „WP-Effizienz“ vorgestellt und kommentiert.

## VI.03

### Adaptive Einzelraumregelung

**Michael Adolph<sup>1\*</sup>, Nina Kopmann<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>, Jens Linden<sup>2</sup>, Bernd Böwer<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> ista International GmbH, Essen

\* Korrespondenzautor

In Europa entfällt etwa ein Drittel des Energieverbrauchs auf die Raumbeheizung. Eine ausreichende Raumbeheizung ist wichtig für das Komfortempfinden des Nutzers. Daher müssen Einzelraumregelungen eine optimale Lösung zwischen Energieeinsparung und Komfortanforderungen des Nutzers finden. Am E.ON Energy Research Center werden daher adaptive Regelungsstrategien entwickelt, die sich auf zwei Weisen an den Nutzer anpassen.

Zum einen erfolgt eine Anpassung an das Anforderungsprofil des Nutzers. Über eine simple Schnittstelle, welche Eingaben der Form zu kalt „ oder „zu warm“ akzeptiert, kann der Nutzer dem System eine Rückmeldung über den aktuell empfundenen Komfort geben. Anhand der Rückmeldungen passt sich das System an das Anforderungsprofil des Nutzers an, ohne dass es im Vorfeld aufwändig konfiguriert werden muss.

Die zweite Form der Adaption des Systems ist die Adaption an den Raum selbst. Über eine System-Identifikation wird die Reaktion der Raumtemperatur auf eine Veränderung des Thermostatventilhubs abgeschätzt und auf das Anforderungsprofil des Nutzers optimiert.

Die einzelnen Regelungsstrategien sollen sowohl anhand von Simulationen, Labormessungen und in einem Feldtest hinsichtlich Komfort und Energieeinsparungspotential getestet werden.

#### IV.04

## Optimierung der Regelungsstrategie für ein Fassadenlüftungsgerät mit Hilfe von Simulation

Max Huber, Ana Constantin, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center,  
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, 52074 Aachen, Deutschland  
[mhuber@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:mhuber@eonerc.rwth-aachen.de)

Der Einsatz von dezentralen Fassadenlüftungsgeräten bietet im Vergleich zu zentralen Lüftungssystemen in bestimmten Anwendungsfällen sowohl technische als auch wirtschaftliche Vorteile. So kann auf die Konstruktion von Lüftungskanälen verzichtet werden und die einzelnen Räume sind voneinander entkoppelt.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit dezentrale Regelkonzepte einzusetzen und darin die jeweiligen Raumbesonderheiten zu berücksichtigen. Eine solche modulare Regelungsstrategie muss Kriterien sowohl zur Innenraumbehandlichkeit und zur Luftqualität, als auch zur Energieeffizienz erfüllen.

Oft passiert es, dass in der Entwicklungsphase einer Regelungsstrategie der potentielle Einfluss von unterschiedlichen Faktoren (wie z. B. Außentemperatur oder Wärmerückgewinnungsgrad) auf das Raumklima, unter- oder überschätzt werden. Um zu untersuchen, ob und in welchem Maße eine Einbeziehung der genannten und weiterer Faktoren in die Regelungsstrategien dezentraler Lüftungsmodule zu erhöhtem Komfort und gesteigerter Effizienz führt, empfiehlt sich der Einsatz dynamischer Simulationen, die es erlauben, die gesamten Prozessabläufe zu betrachten. Es werden Regelungsstrategien mit unterschiedlichen Einflussfaktoren modelliert, unter gleichen Bedingungen simuliert und anschließend miteinander verglichen. Dabei werden sowohl die Auswahl, als auch die Gewichtung der Einflussfaktoren variiert.

Für den Aufbau der Modelle wird die objektorientierte Programmiersprache Modelica angewendet, als Simulationsumgebung das Programm Dymola.

Die in der Simulation gewonnenen Ergebnisse werden im Versuchstand und am realen Gebäude validiert.

**Stichwörter:**

Regelungsstrategie, Fassadenlüftungsgerät, Dymola, Modelica

#### IV.05

## Entwicklung eines Prüfstandes zur Abbildung eines hydraulischen Heizungsnetzwerks

Nina Kopmann\*, Michael Adolph, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, 52074 Aachen  
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate  
[nkopmann@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:nkopmann@eonerc.rwth-aachen.de)

Am E.ON Energy Research Center wird als alternativer Ansatz ein „Hardware-in-the-Loop“(HiL)-Prüfstand entwickelt, welcher ein reales hydraulisches Heizungsnetz einer Wohnung oder eines Gebäudes mit geringem Platzbedarf nachbildet. In den Prüfstand, welcher aus mehreren vernetzten Modellräumen besteht, werden Standardheizkörper eingebaut und nur das umschließende Volumen wird verkleinert. Die Modellräume haben jeweils ein Volumen von  $3 - 4 \text{ m}^3$ .

Abhängig von der Wärmeabgabe der Heizkörper werden die einzustellenden Randbedingungen der Zuluft (Volumenströme und Temperaturen) und der Wände (Oberflächentemperaturen) mit Hilfe einer gekoppelten Gebäude- Und Anlagensimulation in der Programmiersprache Modelica berechnet und

am Prüfstand emuliert. Die gemessenen Wärmeemissionen der Heizkörper werden als Randbedingungen an die thermo-hydraulische Simulation übergeben.

Um die Funktionsweise des HiL-Prüfstandes zu testen, wird zunächst ein einzelner Modellraum aufgebaut. Zur Verifizierung des Prüfstand-Konzepts werden Messungen des Geschwindigkeits- und Temperaturfeldes vor dem Heizkörper gemacht und mit Messungen in einem Leistungsprüfstand mit realistischen Raumabmessungen verglichen.

## IV.06

# **Aufbau und Regelungsentwurf einer klimatisierten Luftkammer eines Hardware-in-the-Loop(HiL)-Prüfstands für Luft-Wasser-Wärmepumpensysteme**

**Kan Chen\***, **Dirk Müller**

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center Institute for Energy  
Efficient Buildings and Indoor Climate  
[kchen@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:kchen@eonerc.rwth-aachen.de)

Zukünftig werden innovative Energiemanagementsysteme und Heizungstechnologien wie z. B. elektrische Wärmepumpen im Wohnungsmarkt an Relevanz gewinnen. Die Luft-Wasser-Wärmepumpe wird wegen ihrer einfachen Installation und Inbetriebnahme verstärkt in den Markt eingeführt. Der HiL-Prüfstand für Luft-Wasser-Wärmepumpensysteme bietet eine Plattform, in der die reale Wärmepumpe und das Regelsystem unter komplizierten simulierten Randbedingungen wie z. B. der variierenden Umgebungstemperatur geprüft werden können. Im Vergleich zur konventionellen Sole-Wasser-Wärmepumpe mit dem Erdreich als Wärmequelle, welches eine relativ stabile Energiequelle darstellt, hängt die Energieeffizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpe im großen Maße von den Umgebungsbedingungen wie Außentemperatur und Luftfeuchte ab, die große Schwankungen über den Tag und das Jahr haben. Eine klimatisierte Luftkammer, die eine gewünschte Umgebungstemperatur und Luftfeuchte für die Luft-Wasserwärmepumpe emuliert, wird ausgelegt und aufgebaut. Die Plausibilität des HiL-Tests steht in engem Zusammenhang mit der Klimatisierung insbesondere der Genauigkeit und der Schnelligkeit der Temperaturregelung in der Luftkammer. In dem Beitrag wird die konkrete Aufbaustruktur der klimatisierten Luftkammer beschrieben. Das thermische Verhalten in der Kammer wird mathematisch modelliert. Die modellbasierte Regelungsstrategie für die Kammertemperatur wird anhand von Matlab-Simulink und experimentellen Versuchen entwickelt.

**Stichwörter:**

Luft-Wasser-Wärmepumpe, HiL-Prüfstand, Luftkammer, Temperaturregelung

## IV.07

# Modellierung von Wärmepumpen anhand eines komponentenbasierten Modells unter Berücksichtigung transienter Betriebsweisen

R. Marx\*, K. Spindler

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[marx@itw.uni-stuttgart.de](mailto:marx@itw.uni-stuttgart.de)

Für die optimale Auslegung von Wärmepumpen in solar unterstützten Nahwärmeversorgungsanlagen (SuN) mit saisonaler Wärmespeicherung wurde ein Modell weiterentwickelt. Das Modell kann große elektrisch betriebene Wärmepumpen mit vielfältigen Betriebsweisen abbilden. Insbesondere werden transiente Effekte der Wärmepumpe berücksichtigt, wodurch eventuell auftretende Taktverluste abgebildet werden können.

In der Modellierung sind drei der gängigsten Kältemittel R134a, R227ea und R407C für Kompressions-Wärmepumpen implementiert, wie sie in SuN-Anlagen zum Einsatz kommen. Um möglichst kurze Rechenzeiten bei der Simulation der Wärmepumpe zu erhalten und somit Ergebnisse für Mehrjahressimulationen für gesamte SuN-Anlagen zu erzielen, wurden bei der Modellierung möglichst viele Vereinfachungen angenommen. Die Implementierung der vereinfachten Ansätze führt trotzdem zu einem Genauigkeitsgewinn bei der Simulation im Vergleich zu üblichen Modellen, wie die Validierung an den Messdaten einer Wärmepumpe mit einer Leistung von 500 kW<sub>th</sub> aufzeigt.

Durch das Modell können Kennlinienfelder für Wärmepumpen erzeugt werden, die den Wärmeminderertrag durch Taktverluste quantifizieren. Somit lässt sich in der Planung der Anlagenregelung und -betrieb energetisch ungünstige Betriebsweisen der Wärmepumpe vermeiden.

## IV.08

# Thermal Comfort Simulation for Low $\Delta T$ Heat Exchangers

Jiazhen Ling, Yunho Hwang, Vikrant Aute, Reinhard Radermacher\*

Center for Environmental Energy Engineering, University of Maryland,  
College Park, 3163 Glenn L. Martin Hall Bldg., MD 20742, USA  
[raderm@umd.edu](mailto:raderm@umd.edu)

The low  $\Delta T$  heat exchanger is proposed as an improved design of the sensible heat exchanger used in low temperature lift heat pump systems. Since the low  $\Delta T$  heat exchanger utilizes natural convection for conditioning the space air, it eliminates the power demand by fan motors. Another attractive feature of the low  $\Delta T$  heat exchanger is its capability of providing better thermal comfort condition by delivering radiative cooling/heating and controlling the mean radiant temperature (MRT). The operative temperature (OT) field generated by the low  $\Delta T$  heat exchanger was calculated by combining both the MRT and air temperature. An eight-surface model was used to compute the MRT field for a given space. Proper orthogonal decomposition (POD) method was adapted to model the natural convection inside the space. The POD method was shown to be more computationally cost-effective than the conventional CFD simulation. The OT simulation results were validated with the experimental data showing the average discrepancy of 0.4 K in the measurement locations.

**Keywords:**

radiative cooling, natural convection, mean radiant temperature, operative temperature, proper orthogonal decomposition

**IV.09**

## **Berechnung des Energiebedarfes regenerativer Kühltechnologien**

**Ronny Mai**

ILK Dresden gGmbH, Hauptbereich Luft- und Klimatechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, D-01309 Dresden

Die DIN V 18599 erlaubt die Berechnung des Energiebedarfes von Kälteanlagen für die Klimatisierung anhand spezifischer Gerätekennwerte für die RLT- und Kältetechnik. Mit Blick auf die Kältetechnik beinhaltet das Verfahren konventionelle wasser- und luftgekühlten Kompressions- und Absorptionskältetechnik. Regenerative Kühlsysteme, die erneuerbare Energien zur Gebäudekühlung verwenden, sind im Rahmen des Kennwertverfahrens bisher jedoch noch nicht bilanzierbar. Mit der Überarbeitung der DIN V 18599 im Jahr 2011 wurde diese Lücke geschlossen. Damit ist künftig auch die Bedarfsberechnung von Anlagensystemen mit Freier Kühlung, mit indirekter Verdunstungskühlung, mit geothermischer Kühlenergienutzung und von DEC-Anlagen möglich. Diese Technologien bieten einen ganzheitlichen Ansatz, um neben den Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) an die Energieeffizienz im Gebäudebereich, auch die im Erneuerbare- Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG) geforderten Mindestanteile an Erneuerbaren Energien im Bereich der Klimakälteanwendung nachzuweisen. Anhand typischer Beispiele von RLT- und Kälteanlagen wird das Kennwertverfahren erläutert und der spezifische Energiebedarf von konventionellen und regenerativen Anlagensystemen gegenübergestellt.

**IV.10**

## **Demonstrationsprojekt einer direkt mit Erdgas beheizten Absorptionswärmepumpe für Gebäudeheizung und Brauchwasserbereitung**

**Harald Moser\*, René Rieberer**

Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, 8010 Graz, Österreich  
[harald.moser@tugraz.at](mailto:harald.moser@tugraz.at)

Im Rahmen des IEA HPP Annex 34 „Thermally Driven Heat Pumps for Heating and Cooling“ wurde an der TU Graz (Institut für Wärmetechnik) ein Demonstrationsprojekt durchgeführt, mit dem Ziel die Jahresarbeitszahl von zwei Ammoniak/Wasser Absorptionswärmepumpen (AWP) für Gebäudeheizung und Brauchwasserbereitung zu erheben.

Die installierten AWP besitzen eine Nennleistung von ca. je 40 kW und stellen die benötigte Wärme für eine Lagerhalle und Büroräumlichkeiten einer Brauerei in Graz bereit. Als Wärmequelle werden Erdreichsonden verwendet und zur Wärmeverteilung ist ein Niedertemperatur-Fußbodenheizungssystem vorgesehen. Eine Besonderheit der verwendeten Absorptionswärmepumpen ist, dass diese einen Wärmetauscher zur Rauchgaskondensation integriert haben, wodurch ein Teil der Kondensationswärme des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes an den Heizungsrücklauf abgegeben wird.

Das beschriebene Heizungssystem wurde über das gesamte Jahr 2010 vermessen, wobei alle relevanten Temperaturen, Wärmeleistungen sowie der Erdgasvolumenstrom und die elektrische Leistungsaufnahme erfasst wurden.

Dabei arbeitete das System zuverlässig und mit relativ hoher Effizienz. Bezogen auf den unteren Heizwert des Erdgases errechnet sich für das Jahr 2010 eine Jahresarbeitszahl von 1,54. Weiters haben die Messungen aber auch Verbesserungspotential aufgezeigt, insbesondere für die Brauchwasserbereitung im Sommer.

**Stichwörter:**

Ammoniak/Wasser, SPF, Demoprojekt

## IV.11

# Innovative Luft-/Wasser-Wärmepumpen mit natürlichem Kältemittel und Leistungsregelung

Dr.-Ing. Johannes Brugmann, Dr.-Ing. Enno Wagner, Dipl.-Ing. Fabian Beber

Stiebel-Eltron GmbH & Co. KG, Dr.-Stiebel-Straße, 37603 Holzminden  
[johannes.brugmann@stiebel-eltron.de](mailto:johannes.brugmann@stiebel-eltron.de), [enno.wagner@stiebel-eltron.de](mailto:enno.wagner@stiebel-eltron.de),  
[fabian.beber@stiebel-eltron.de](mailto:fabian.beber@stiebel-eltron.de);

Luft-Wasser-Wärmepumpen werden zunehmend im Bestand sowie im Neubau eingesetzt. Durch den Einsatz von drehzahlgeregelten Verdichtern kann die Heizleistung deutlich besser an die Außentemperatur und den tatsächlichen Wärmebedarf angepasst werden. Die einstufig mit dem natürlichen Kältemittel CO<sub>2</sub> betriebene Wärmepumpe WPL 5N plus bietet vor allem Effizienzvorteile in der Warmwasserbereitung durch die Nutzung eines Schichtspeichers. Im Heizbetrieb sorgt eine intelligente 3-Stufen-Leistungsregelung für eine effiziente Wärmeversorgung. In der 2-stufig arbeitenden Wärmepumpe WPL 33 HT kommt das Kältemittel R407C zum Einsatz wodurch hohe Heizleistungen und hohe Vorlauftemperaturen besonders effizient bereitstellen können. Durch eine intelligente Regelung von zwei hintereinander geschalteten Verdichtern kann auch bei geringem Heizbedarf eine ressourcenschonende Wärmeversorgung realisiert werden. Ein TEWI-Vergleich zeigt, dass die beiden vorgestellten Luft-Wasser-Wärmepumpen deutlich klimaschonender sind als Gas- bzw. Öl-Brennwertgeräte. Die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe zeigt allerdings höhere TEWI-Gesamtwerte als die mit R407C betriebene Wärmepumpe. Die Effizienz des Energieumsatzes scheint hier ausschlaggebend zu sein.

## IV.12

# Effizienzsteigerung von Wärmepumpen durch partielle Verdampferabtauung während des Heizbetriebs

Gunda Mader\*, Claus Thybo

Danfoss A/S, Automatic Controls, 6430 Nordborg, Denmark  
[Gunda.mader@danfoss.com](mailto:Gunda.mader@danfoss.com)

Bei niedrigen Außentemperaturen kann die Verdampfungstemperatur in Luft-Wärmepumpen unter den Gefrierpunkt von Wasser fallen, der Wassergehalt der Luft bildet dann auf der Außenseite des Wärmeübertragers eine Frostschicht. Dies führt zu einem erhöhten luftseitigen Druckabfall und reduzierter Wärmeübertragungsleistung des Verdampfers und mindert folglich die Energieeffizienz des Systems. Bei andauerndem Betrieb schließlich kann der Verdampfer gänzlich oder in großen Bereichen zufrieren. Um einen Ausfall oder gar eine Beschädigung der Anlage zu verhindern, muss daher eine regelmäßige Abtauung des Verdampfers vorgenommen werden. Eine weitverbreitete Methode dazu ist die Umkehrung des Kältemittelstroms, bei der heißes Gas aus dem Verdichter in den Verdampfer eingeleitet wird. Neben deutlichen Effizienzverlusten entstehen dabei Probleme der Materialbelastung und bei manchen Anlagentypen Komforteinbußen.

Die Methode der partiellen Abtauung zielt darauf ab, die Häufigkeit der Kreislaufumkehr zu reduzieren oder ganz zu vermeiden. Das Prinzip beruht darauf, einzelne Stränge des Verdampfers abwechselnd zu deaktivieren um dort eine energiesparende Abtauung durch die überströmende Luft zu ermöglichen. In den übrigen Bereichen des Verdampfers wird weiterhin Wärme von der Außenluft auf das Kältemittel übertragen, so dass der Betrieb der Anlage kontinuierlich aufrechterhalten werden kann. Ermöglicht wird dies durch ein spezielles Ventil, welches Expansion und Verteilung kombiniert und damit erlaubt, die Kältemittelmassenströme in den einzelnen Verdampfersträngen gezielt einzustellen.

Anhand eines mathematischen Modells werden Details der Methode vorgestellt und diskutiert. Durch experimentelle Untersuchungen an Luft-Luft-Wärmepumpen wird gezeigt, dass unter Standard-Betriebsbedingungen mit Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt während der Deaktivierungsphase der gesamte Reif abgetaut werden kann und somit keine Kreislaufumkehr erforderlich ist.

IV.13

## Potenzial für Wärmepumpen in der gewerblichen und industriellen Anwendung

Dr.-Ing. Rainer M. Jakobs

DMJ Beratung, Kreuzfeldstr. 10a, D-64747 Breuberg  
[Dr.Rainer.Jakobs@T-online.de](mailto:Dr.Rainer.Jakobs@T-online.de)

Die Wärmepumpe im privaten Bereich hat sich in den Europäischen Ländern in den letzten 10 Jahren immer stärker durchgesetzt. WP im Wäschetrockner, zur Warmwassererzeugung, zur Entfeuchtung und vorrangig für die Raumheizung sind Serienprodukte und haben sich im Wettbewerb zu den fossil betriebenen Wärmeerzeugern einen beachtlichen Marktanteil erobert, unterschiedlich in den verschiedenen Ländern.

Die Nutzung der WP im gewerblichen und industriellen Bereich hat ein weiteres hohes Potenzial, das in diesem Vortrag näher aufgezeigt werden soll. Die derzeitigen CO<sub>2</sub> - Emissionen in der Industrie liegen in ähnlicher Größenordnung wie bei der Raumheizung und bieten ebenfalls erhebliches Einsparpotenzial durch den Einsatz von WP. Die Hemmnisse für deren Nutzung werden aufgezeigt und an Hand von Beispielen aus der ganzen Welt werden erfolgreiche Anwendungen vorgestellt.

Ein Überblick über die derzeitige Forschung auf diesem Gebiet zeigt die Bedeutung und die weiteren Entwicklungen auf.

**Stichworte:**

Industriewärmepumpen, Wärmepumpen im Gewerbe, Technische Entwicklungen

IV.14

## Betriebsoptimierung eines Verwaltungsstandortes Reduzierung des Energieverbrauchs und nachhaltige Verbesserung der energetischen Qualität

Tobias Frey<sup>1\*</sup>, Dr. Stella Schraps<sup>2</sup>

<sup>1</sup> perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Gebäudeenergietechnik, D-52066 Aachen  
[t.frey@perpendo.de](mailto:t.frey@perpendo.de)

<sup>2</sup> perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Geschäftsführung, D-52066 Aachen  
[s.schraps@perpendo.de](mailto:s.schraps@perpendo.de)

\* Korrespondenzautor

Energieeffizienz und Nachhaltigkeit nehmen immer mehr an Bedeutung zu und werden auch auf politischer Ebene als Motor zur Einhaltung der globalen Klimaschutzziele angesehen. Das vorgestellte Projekt beinhaltet eine Betriebsoptimierung im Bestand, mit dem klar formulierten Ziel, die Treibhausgasemissionen des untersuchten Standortes nachhaltig zu senken. Bei der untersuchten Liegenschaft handelt es sich um einen Verwaltungsstandort in Duisburg, der insgesamt 11 Gebäude mit den Hauptnutzungen Büro, Schulung, Auditorium und Gastronomie umfasst. Zusätzlich befindet sich ein Rechenzentrum am diesem Standort. Die verwendeten Energieträger sind Strom, Erdgas und Heizöl, wobei in insgesamt fünf Zentralen Kälte für die Klimatisierung der einzelnen Nutzflächen erzeugt wird.

Um einen nachhaltigen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen zu leisten, wurde für die beschriebene Liegenschaft eine Detailanalyse des Energiebedarfs durchgeführt. Zur Erlangung eines möglichst hohen Transparenzgrades wurde der gesamte Standort mittels eines komplexen Simulationsmodells untersucht und bewertet. Dieses Verfahren gewährleistet neben der detaillierten Aufschlüsselung der Energiebedarfsstruktur, die Quantifizierung von einzelnen Verbesserungsmaßnahmen unter der Berücksichtigung aller auftretenden Wechselwirkungen. Ein besonderes Augen-

merk lag bei der Untersuchung auf dem Bereich der Raumlufttechnik, da sich der Bedarf dieses Bereichs in der Regel sehr gut beeinflussen lässt und er zudem einen erheblichen Anteil an dem Gesamtenergiebedarf der Liegenschaft hat. Das Simulationsmodell wurde mit den vorhandenen Zählerwerten validiert, sodass es möglich war, ein konsistentes Energieflussbild zu zeichnen. Die im Anschluss durchgeführten Sensitivitätsanalysen dienten der Identifikation und Bewertung der vorhandenen Energieeinsparpotenziale.

Die Analyse hat vornehmlich Maßnahmen ermittelt, die im Bereich der Anpassung der Regelung der raumlufttechnischen Anlagen durch eine bedarfsgerechte Fahrweise zu finden waren. Durch die Umsetzung der Maßnahmen konnten erhebliche Einsparungen in den Bereichen Strombezug, Kälteerzeugung und Erdgaseinsatz erzielt werden. Zur Umsetzung der Maßnahmen wurden im Wesentlichen geringinvestive Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt, die sich größtenteils auf eine Neuprogrammierung der Regelung der Lüftungsanlagen beschränkten, sodass eine Amortisation des Gesamtpaketes von etwa einem Jahr realisiert werden konnte. Nach der Umsetzung der Maßnahmen wurde ein Energiecontrolling am Standort eingeführt, welches den unmittelbaren Nutzen der Detailanalyse sehr deutlich aufzeigt. Alle prognostizierten Einsparungen wurden im Jahr nach der Umsetzung der Maßnahmen erreicht: So konnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen für den gesamten Standort um 27 % nachhaltig gesenkt werden. Die gewählte Vorgehensweise hat dabei für den Kunden einen deutlichen Mehrwert generiert, der sich nicht nur monetär bemerkbar gemacht hat, sondern maßgeblich zu einem zeitlichen Vorteil bei der Umsetzung eigener Reduktionsvorgaben geführt hat.

**Stichwörter:**

Anlagensimulation, Simulationsmodell, Effizienzsteigerung, Energiecontrolling

#### IV.15

## Energieeinsparungspotenzial in Heizungssystemen durch den Einsatz von Gebläsekonvektoren

**Andreas Binder, Ingo Raisch**

Walter Roller GmbH & Co., Lindenstraße 27-31, 70839 Gerlingen, Deutschland  
[Andreas.binder@walterroller.de](mailto:Andreas.binder@walterroller.de)

In Gebäuden werden zur Raumheizung in vielen Fällen Radiatoren eingesetzt. Diese werden beispielsweise unter Fenstern oder in Ecken platziert. Der Architekt sieht für den Einbau der Geräte oftmals eine Nische vor.

Wird das komplette Heizungssystem saniert, ist es unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll die Vorlauftemperatur zu reduzieren. Der vorhandene Heizkörper ist damit unterdimensioniert.

Es wird ein Gebläsekonvektor entwickelt, der in eine Vielzahl der architektonisch üblichen Heiznischen passt. Bei Abgabe der gleichen thermischen Leistung, ist es mit diesem Gerät möglich die Heizung bei geringeren Wassertemperaturen zu betreiben.

Die Beheizung von Räumen mittels Konvektoren ist aber auch mit einigen Nachteilen behaftet, so wird elektrische Energie benötigt, die Geräte emittieren Schall und neigen stärker zur Verschmutzung.

Dem gegenüber stehen einige Vorteile wie einer schnelleren und komfortableren Regelung der Raumtemperatur und die Möglichkeit zu Kühlen.

Es werden theoretische Abschätzungen durchgeführt, wie groß das Einsparpotential durch Gebläsekonvektoren sein kann, und wie sich die Umstellung auf den Komfort, und die Luftqualität auswirkt.

**Stichworte:**

Energieeffizienz, Gebläsekonvektor, Klimatisierung, Sanierung

## IV.16

# Einfamilienhaus als Plusenergiegebäude

**Olaf Zeidler, Sebastian Otto**

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Abteilung V, 14052 Berlin

[olaf.zeidler@bbr.bund.de](mailto:olaf.zeidler@bbr.bund.de)

Im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau ist im Rahmen eines universitären Wettbewerbs ein Pilotprojekt entstanden, das den Stand der Entwicklung im Bereich energieeffiziente Anlagentechnik und nachhaltiges Bauen aufzeigen soll. Zusätzlich besteht eine Vernetzung zur Elektromobilität. Ziel ist es, ein Gebäude zu errichten, welches die Energie für den Betrieb und die Nutzung des Gebäudes sowie den Betrieb von Elektrofahrzeugen zur Verfügung stellt. Das Projekt ist als Pilotprojekt angelegt. Im Rahmen eines begleitenden Monitoring wird die Bauphase und ein anschließender zweijähriger Betrieb begleitet. Dabei werden Erfahrungen gesammelt und Komponenten sowie deren Zusammenspiel in der Anlagentechnik getestet. Gefördert werden soll damit auch die enge interdisziplinäre Zusammenarbeit der unterschiedlichen am Bau beteiligten Fachdisziplinen. Die energetische Vernetzung des Gebäudes einschließlich der Möglichkeit, Elektroautos mit einer jährlichen Fahrleistung von 25.000 km zu betreiben soll zeigen, dass dieses Gebäude allein aus Umweltenergien versorgt werden kann. Das Gebäude ist so konzipiert, dass am Ende der Nutzungsdauer die vollständige Recyclebarkeit möglich ist. Damit wird dem Gedanken des nachhaltigen Bauens Rechnung getragen.

**Stichworte:**

Nullenergiegebäude, Plusenergiegebäude, energieeffiziente Anlagentechnik, E-Mobilität

## IV.17

# Analyse von R32 in Klima-Anwendung

**Bella B.<sup>1</sup>, Kämmer N.<sup>2</sup>**

Emerson Climate Technologies GmbH, Pascal Straße 65, D-52076 Aachen – Germany

<sup>1</sup> [Bachir.Bella@emerson.com](mailto:Bachir.Bella@emerson.com), <sup>2</sup> [Kaemmer.Norbert@emerson.com](mailto:Kaemmer.Norbert@emerson.com)

Um eine Verminderung der Treibhausgasemissionen zu erreichen schlagen viele Institute und Produzenten neue Kältemittel vor, um fluorierte Kohlenwasserstoffe zu ersetzen. Die Gesetzgebung prüft die Möglichkeit, das Erderwärmungspotenzial von Kältemitteln in feststehenden Anwendungen zu limitieren, ähnlich wie in mobilen Klimaanwendungen. Unter den Kältemittel, die ein geringeres Erderwärmungspotenzial aufweisen um R-410A zu ersetzen, befinden sich R-32 und Hydrofluorolefin-Gemische. R-32 hat ein Erderwärmungspotenzial von 675 und damit nur ein Drittel gegenüber R-410A mit 2088. Die Hydrofluorolefin-Gemische, die von einigen Herstellern, wie Dupont oder Honeywell für den Ersatz von R-410A vorgeschlagen werden, liegen zwischen 400 und 600. R-32 könnte eingeführt werden, wenn es gute Anwendungsresultate zeigt, wie Leistung und Anwendungslimits. Währenddessen sind die Hydrofluorolefin-Gemische unter Bewertung und deren Eigenschaften sind immer noch nicht veröffentlicht. Dieser Beitrag berichtet über den Vergleich zwischen R-32 gegenüber R-410A und analysiert die Resultat von experimentellen Tests mit Scroll Kompressoren in Klimaanwendungen.

IV.18

## Future Refrigerants for Heat Pumps

H. Dhont

Daikin Europe N. V., Brüssel/Belgien

IV.19

## Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft

Sebastian Herrmann<sup>1</sup>, Hans-Joachim Kretzschmar<sup>1\*</sup>, Donald P. Gatley<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Zittau/Görlitz, Fakultät Maschinenwesen, Fachgebiet Technische Thermodynamik,  
02763 Zittau, Deutschland  
[hj.kretzschmar@hs-zigr.de](mailto:hj.kretzschmar@hs-zigr.de)

<sup>2</sup> Gatley & Associates, Inc., 30305, Atlanta, GA, U.S.A.

Vorgestellt wird ein verbessertes Modell zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft. Die Zustandsberechnung erfolgt als reales Gasgemisch mit einer Virialgleichung. Als Grundlagen dienten die Modelle von Hyland und Wexler (1983) und von Nelson und Sauer (2002).

Alle aktuellen IAPWS- und NIST-Standards für trockene Luft, Wasserdampf, Wasser und Eis wurden in die Arbeit einbezogen. Der Zustandsbereich des neuen Modells beträgt 0.01 kPa bis 10 MPa im Druck, 130 bis 623.15 K in der Temperatur und 0 bis 10 kgw/kga in der absoluten Feuchte. Die Genauigkeit der bisherigen Modelle konnte bei hohen Temperaturen, Drücken und Feuchten deutlich verbessert werden. Die Ergebnisse sind im ASHRAE RP-1485 Final Repor [1] und einer Veröffentlichung in der Zeitschrift "HVAC&R Research" [2] dokumentiert.

Mit dem entwickelten Modell wurden im "2009 ASHRAE Handbook Fundamentals" die Tabellen mit Werten der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft sowie die Tabellen mit Werten für die Sättigungsgrößen von reinem Wasser berechnet. Diese Neuberechnung stellt die erste Aktualisierung der Tabellen seit 1985 dar. Die neuen Algorithmen sind Bestandteil der Stoffwert-Programmbibliothek für feuchte Luft LibHuAirProp der ASHRAE (<http://www.techstreet.com/ashraegate.html>).

### Stichwörter:

Feuchte Luft, Stoffdaten, Thermodynamische Zustandsgrößen, Virialgleichung, Reales Gasgemisch

[1] Herrmann, S.; Kretzschmar, H.-J.; Gatley, D. P.: *Thermodynamic Properties of Real Moist Air, Dry Air, Steam, Water, and Ice*. Final Report ASHRAE RP-1485, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta (2009).

[2] Herrmann, S.; Kretzschmar, H.-J.; Gatley, D. P.: Thermodynamic Properties of Real Moist Air, Dry Air, Steam, Water, and Ice (RP-1485). *HVAC&R Research* 15, 961-986 (2009).

IV.20

## Using Acetone vapor as a tracer gas in studying contaminant / odor dispersion in displacement ventilation

Birgit Müller<sup>1,2</sup>, Hossein Sagheby<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin, Germany

<sup>2</sup>Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Germany

[h.sagheby@gmail.com](mailto:h.sagheby@gmail.com)

As the quest for more efficient ventilation continues – both in terms of energy consumption and indoor air quality, investigations of contaminant dispersion remain one of the main research areas and tracer gases play an important role in these studies. This paper presents the methodology and results of a study, in which Acetone vapor is used as a tracer gas for investigation of displacement ventilation in an experimental room. The results show a proof of concept for the method used for introduction of Acetone into the room and endorse the layering effect in contaminant distribution in presence of displacement ventilation. In addition to the possibility of experimentation with a different density than that of typical tracer gases (namely the SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O), using Acetone is especially advantageous since there is a direct connection between Acetone concentration and odor intensity calculations in the area of 'Perceived Air Quality'. Furthermore the challenges of working with Acetone as a tracer gas are discussed.

**Keywords:**

Acetone Vapor, Contaminant Dispersion, Tracer Gas, Displacement Ventilation

IV.21

## Gemeinschaftsveranstaltung mit AA III

## Notizen

**S.01**

## **Modellierung und Simulation eines Absorptions-Kreislaufes mit einer Blasenpumpe**

**Markus Bücherl**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik  
Engler-Bunte-Ring 21, 76 131 Karlsruhe

Diffusions-Absorptions-Kältemaschinen werden in der Regel mit dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Wasser betrieben. Ersetzt man das Absorptionsmittel Wasser gegen eine ionische Flüssigkeit, die nur einen vernachlässigbaren Dampfdruck besitzt, kann man den Rektifikator einsparen. Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde eine Diffusions-Absorptions-Kältemaschine mit einer Blasenpumpe und dem Arbeitsstoffpaar Ammoniak-Ionische Flüssigkeit modelliert und simuliert. Hierfür wurden drei Modelle aus der Literatur ausgewählt. Diese Modelle wurden untereinander verglichen. Außerdem wurde die Veränderung des COP bei der Variation der Betriebsparameter für diese Berechnungsmodelle untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, eine Diffusions-Absorptions-Kältemaschine mit ionischer Flüssigkeit zu betreiben.

**S.02**

## **Kurzfassung: Dynamische Simulation eines Latenwärmespeichers in Dymola/Modelica**

**Timo Müller**

IKKU, Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft  
Postfach 24 40, 76012 Karlsruhe

An der Hochschule Karlsruhe wird derzeit, in Kooperation mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft, ein Latenwärmespeicher zur Versorgung einer solarbetriebenen Dampfstrahlkälteanlage entwickelt. Dieser Speicher soll in der Lage sein, die Anlage mit Wärmeenergie zu versorgen, wenn keine Sonnenenergie zur Verfügung steht.

Als Speicherelemente werden Stangen aus formstabil schmelzenden Polyethylen mit einem Schmelzbereich zwischen 124 und 133 °C und einer Schmelzenthalpie von 149 kJ/kg verwendet. Diese Elemente werden beim Beladevorgang mit überhitztem Dampf umströmt. Zum Entladen des Speichers wird flüssiges Wasser eingesprührt und an den heißen Stäben verdampft.

Zur Auslegung des Speichers ist es nötig, die instationären Wärmeleitvorgänge zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird ein Programm in Dymola/Modelica entwickelt.

Inhalt des Vortrages ist zunächst eine kurze Einführung in die mathematische Modellierung von Latenwärmespeichern, mittels einer Finiten Volumen Methode (FVM) für transiente Wärmeleitung. Zur Abbildung des Schmelzbereiches wird eine temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität verwendet.

Des Weiteren sollen die Verläufe von Temperatur, innerer Energie und der entnehmbare Wärmestrom dargestellt werden. Als Modelparameter werden z. B. die Geometrie der Speicherelemente, der verwendete Werkstoff und der Wärmeübergangskoeffizient verwendet.

Insbesondere soll gezeigt werden, wie sich die charakteristische Länge auf die zum Beladen und Entladen nötige Zeit auswirkt.

**S.03**

## **Energetisches Bilanzierungsmodell für Prozesskälteanlagen**

**Daniel Albert**

Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung ESaK, 63477 Maintal,

[Daniel.Albert@esak.de](mailto:Daniel.Albert@esak.de)

BASF SE, 67056 Ludwigshafen

[Daniel.Albert@basf.com](mailto:Daniel.Albert@basf.com)

Änderung der Betriebs- und Umgebungsbedingungen, sowie kurzfristige Produktionsspitzen sind Parameter, die an Prozesskälteanlagen zu Störungen führen. Mit Hilfe einer thermodynamischen und physikalischen Sensitivitätsanalyse wurden an Prozesskälteanlagen mit dem natürlichen Kältemittel Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) die relevanten Stoff- und Messgrößen festgelegt und ein energetisches Bilanzierungsmodell erstellt. Anhand der Sensitivitätsanalyse ist die Auswahl geeigneter Messverfahren und Messsysteme zur Messdatenerfassung möglich. Das energetische Bilanzierungsmodell dient als Grundlage für die Bestimmung der Kälteleistungszahl (COP) und der Auslastung der Prozesskälteanlagen. Dadurch sind Anpassungen der Betriebsparameter zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit möglich.

**Stichwörter:**

Prozesskälteanlage, Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Messverfahren, Kälteleistungszahl (COP), Anlagenverfügbarkeit

**S.04**

## **Befeuchtungssystem zur adiabaten Luftabkühlung für Verflüssiger- und Rückkühlersysteme**

**Ulrich Ziegler**

Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung ESaK, 63477 Maintal

[Ulrich.Ziegler@esak.de](mailto:Ulrich.Ziegler@esak.de)

Güntner AG & Co. KG, 82256 Fürstenfeldbruck

[Ulrich.Ziegler@guentner.de](mailto:Ulrich.Ziegler@guentner.de)

Um den sicheren Anlagenbetrieb auch bei klimatisch extremen Bedingungen zu gewährleisten, müssen Wärmeübertrager in ausreichender Größe dimensioniert werden. Aus energetischen Gesichtspunkten sollte die Fläche des Wärmeübertragers möglichst groß sein, wodurch die Anlage mit einer geringen Temperaturdifferenz zwischen Umgebungstemperatur und Arbeitsmediumstemperatur betrieben werden kann. Um die Investitionskosten gering zu halten, werden jedoch oftmals Wärmeübertrager für höhere Temperaturdifferenzen ausgelegt. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Arbeitsmediumstemperatur einer steigenden Umgebungstemperatur mit entsprechendem Abstand folgt. Daher muss schon bei der Anlagendimensionierung darauf geachtet werden, dass sich die Temperatur bzw. der Druck des Arbeitsfluides bei den zu erwartenden Umgebungstemperaturen im zulässigen Bereich befindet. Es wird nun ein System entwickelt, das einerseits auch bei hohen Umgebungstemperaturen einen sicheren Anlagenbetrieb gewährleistet und andererseits auch über die Gesamtauflaufzeit einen effizienten Betrieb ermöglicht. Um die Lufteintrittstemperatur am Wärmeübertrager zu verringern, wird die Luft durch adiabatische Verdunstung abgekühlt. Bei dieser Neuentwicklung ergeben sich signifikante Vorteile im Vergleich zu den bisher am Markt befindlichen Verdunstungssystemen. Für die Regelung des Systems wird die aufzubringende Wassermenge nach den Betriebsbedingungen sowie nach Kostengesichtspunkten permanent angepasst. Es kann daher bei diesem System auf einen Wasserumlauf verzichtet werden.

**Stichwörter:**

Befeuchtung, adiabate Verdunstung, Effizienz, Betriebskosten

**S.05**

## **Auslegung und Simulation von Wärmeübertragern einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine**

**J. Hong**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
E-Mail: [josua.hong@googlemail.com](mailto:josua.hong@googlemail.com)

Am ITW wird intensiv an einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine geforscht. Die solare Kühlung bietet große Potentiale zur Einsparung fossiler Energieträger. Ein Grund dafür ist die gute zeitliche Übereinstimmung zwischen Solarstrahlung und dem Kältebedarf für die Kühlung von Wohngebäuden und Büros. Bislang standen zentrale und indirekt solarthermisch angetriebene Systeme zur Kälteerzeugung im Fokus. Die direkt solarthermisch angetriebene Anlage kann auf Grund ihres neuen Konzepts dezentral aufgebaut und betrieben werden. Auf Grundlage des Diffusions-Absorptionskälteprozesses wurde eine Anlage gebaut, die ohne mechanische Bauteile funktioniert. Der Lösungsmittelumlauf erfolgt durch das Thermosiphonprinzip. Dadurch ist die Anlage im Betrieb geräuschlos, verschleißfrei und wartungsarm.

Im Rahmen dieser Studienarbeit wurde aufbauend auf den Gleichungen der Wärmeübertragung ein mathematisches Modell der Wärmeübertrager erstellt. Mit diesem Modell war es möglich, verschiedene Optimierungsansätze für die Wärmeübertrager zu finden. Untersuchungen hinsichtlich des Druckabfalls, welcher von entscheidender Bedeutung ist und Einflüsse der Geometrie und Werkstoffe waren damit möglich. Die Simulationsergebnisse wurden mit Messergebnissen validiert. Konkrete Optimierungspotentiale konnten somit aufgezeigt werden und erste Verbesserungen umgesetzt werden.

**S.06**

## **Auslegung eines Wärmespeichers für ein adiabates Druckluftspeicherwerk**

**Georg K. Bestrzynski**

Technische Thermodynamik Kassel (TTK), Universität Kassel

Der gesamtgesellschaftlich weithin getragene Ausstieg aus der Atomenergie und der damit verbundene Ausbau regenerativer Energien, im Speziellen primär der Solar- und Windenergie, forciert derzeit die Nachfrage nach innovativen Lösungen für die Sicherstellung der Energieversorgung in Deutschland. Besondere Charakteristik dieser Schlüsseltechnologien auf dem Weg zu einer nachhaltig tragbaren Energieerzeugung, sind dabei u. a. die regional beschränkte, sowie die stark stochastische, bedarfsentkoppelte Erzeugung und Bereitstellung von Strom.

Resultierend erscheint ein starker Ausbau der Übertragungskapazitäten der Netze unumgänglich. Eine ergänzende Maßnahme zur Begrenzung der Aktivitäten auf diesem Gebiet könnte gegebenenfalls die Errichtung großtechnischer Energiespeicher im Stromnetz darstellen. Großtechnische Technologien mit hohen Wirkungsgraden bei der Energiespeicherung sind daher derzeit im Fokus des technico-ökonomischen Diskurses zwischen Energieversorgung und Wissenschaft.

Einen der vielversprechendsten großtechnischen Ansätze für die Energiespeicherung ist der des adiabaten Druckluftspeicherwerks. Dieses Konzept verspricht neben hohen Wirkungsgraden und einer damit verbundenen guten Wirtschaftlichkeit eine zeitnahe Entwicklung, da konventionelle Anlagen dieses Typs, also Druckluftspeicherwerke ohne Wärmespeicher, bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im industriellen Einsatz sind. Die Applikation eines Wärmespeichers in diesem bewährten Kraftwerkstyp erscheint dabei thermodynamisch äußerst sinnvoll, da ein Hauptteil der für die

Kompression aufgewendeten Energie in die Kompressionswärme der Luftmassen eingeht. Bisher wird diese Energie nicht genutzt.

Die Auslegung und Berechnung eines sensiblen Wärmespeichers (Regenerator) für ein adiabates Druckluftspeicherwerk wurde im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführt. Basis bildet dabei die vorhergehende thermodynamische Berechnung (Basic Engineering) Gesamtanlage. Bei der Berechnung des Wärmespeichers wurden auch alternative sensible Speicherkonzepte mit verschiedenen Wärmeübertragungswegen, sowie Speichermedien beleuchtet. Resultierend erscheint eine zeitnahe Umsetzung dieses Aggregates technologisch anspruchsvoll aber möglich.

**Stichworte:**

Energie-/Wärmespeicherung, Speicherkonzepte, Regenerator, Druckluftspeicher-/kraftwerk, Regenerative Energien

**S.07**

## **Untersuchung der Speichervorgänge in einem Druckluftspeicherwerk**

**Michael Olbricht**

FG Technische Thermodynamik (TTK), Universität Kassel

Die zunehmende Nutzung regenerativer Energien und das damit verbundene zeitlich stark schwankende Aufkommen an elektrischer Energie erfordern die Entwicklung neuer Energiespeichersysteme. Erst durch den Einsatz geeigneter Energiespeicher kann eine zuverlässige und wirtschaftliche Energieversorgung, die zu einem großen Teil aus regenerativen Energien besteht, langfristig und flächendeckend gewährleistet werden. Eine für diesen Zweck großenordnungsmäßig geeignete Speichertechnologie stellen Druckluftspeicherwerke dar.

In der Diplomarbeit, die in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Hannover durchgeführt wurde, wurden zwei unterschiedliche Anlagenschemata für ein adiabates Druckluftspeicherwerk mittels einer Prozesssimulation anhand eines exemplarischen Speicherzyklusses untersucht und bewertet. Es zeigte sich, dass beide Anlagenschemata aus rein thermodynamischer Sicht funktionsfähig sind, bezüglich der Prozessführung jedoch ein großes, noch auszuschöpfendes Optimierungspotential besteht.

Weiterhin wurde der Wärmespeicher des Druckluftspeicherwerks hinsichtlich thermischer Ausgleichsvorgänge während des Anlagenstillstands mit der Umgebung und im Inneren des Wärmespeichers untersucht. Hierbei wurde deutlich, dass die Temperaturänderungen aufgrund der Ausgleichsvorgänge für kurze Zeiten nahezu vernachlässigbar sind, für längere Zeiten wie einem Monat jedoch einen merklichen Einfluss auf den Wärmehaushalt der Anlage haben.

Ebenfalls wurde der Einfluss von kondensierender Luftfeuchtigkeit auf die Kaverne, die als Druckluftspeicher dient, analysiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse in einem mathematischen Modell zusammengefasst. Aus dem Modell ließ sich eine mit der Zeit zunehmende Schrumpfung der Kaverne prognostizieren.

**Stichworte:**

Druckluftspeicher, Wärmespeicher, Kaverne

**S.08**

## **Der Einsatz von Blockheizkraftwerken im Neubau und Gebäudebestand zur Wärme-, Kälte- sowie Elektrizitätserzeugung unter technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten**

**Frank Mauersberger**

Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung ESaK, 63477 Maintal  
[Frank.Mauersberger@esak.de](mailto:Frank.Mauersberger@esak.de)

Heima-Welte Haustechnik GmbH & Co. KG, 72336 Balingen  
[Frank.Mauersberger@heima-welte.de](mailto:Frank.Mauersberger@heima-welte.de)

Blockheizkraftwerke zur Wärme- und Elektrizitätserzeugung nehmen heute einen immer größeren Stellenwert in der modernen Gebäudetechnik ein. Die industrielle Serienproduktion verhalf dem BHKW zu einer deutlich gesteigerten Qualität und ermöglichte durch gesunkene Produktionskosten den Einsatz im privaten Wohnraum. Im Neubau sowie im Gebäudebestand steht das BHKW jedoch in direkter Konkurrenz mit anderen Wärmeerzeugern wie Brennwertgeräten und Wärmepumpen. Um eine exakte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der jeweiligen Wärmeerzeuger erstellen zu können, müssen nicht nur gebäudespezifische Daten erfasst und berechnet werden, sondern es muss auch auf die restriktiven Vorgaben der Energieeinsparverordnung (EnEV) und des Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetzes (EEWärmeG) genauer eingegangen werden. Im EEWärmeG 2011 wird unter anderem erstmalig neben der Wärmeerzeugung auch auf die erneuerbare Kälteerzeugung eingegangen. Hier kann durch die Kopplung eines BHKWs mit einer Sorptionskälteanlage die Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung deutlich erhöht und das EEWärmeG in vollem Maße eingehalten werden. Diese Punkte stellen Planer, Architekten und ausführende Unternehmen vor große Herausforderungen. Folgender Fachbeitrag gibt einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung und es werden die jeweiligen Vor- und Nachteile anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen aufgezeigt.

**Stichwörter:**

Blockheizkraftwerk, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Sorptionskälte, EnEV, EEWärmeG

**S.09**

## **Screening von Zusatzstoffen zur Herstellung von Eisbrei für die NK-TK-Anwendung**

**Jascha Ruebeling, Jens Eiseler, Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld**

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik  
Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft  
Moltkestr.30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[ruja0011@hs-karlsruhe.de](mailto:ruja0011@hs-karlsruhe.de), [eije0011@hs-karlsruhe.de](mailto:eije0011@hs-karlsruhe.de)

Die Projektarbeit befasste sich mit der Untersuchung lebensmittelverträglicher Additive zur Herstellung von Eisbrei. Eisbrei gilt als umweltfreundlicher Kälteträger, der zunehmend in verschiedenen Bereichen zur Anwendung kommt und herkömmliche Kältemittel ersetzen kann. Aufgrund steigender Energiekosten sowie einer eventuell anstehenden Besteuerung umweltschädigender Kältemittel, kann Eisbrei zukünftig zur Kühlung von Lebensmitteln in Supermärkten verwendet werden. Dazu wird Eisbrei mit 0 °C für die Normalkühlung, beziehungsweise mit -25 °C für die Tiefkühlung benötigt.

Mit Glucose als Zusatzstoff wird ein sehr feinkörniger und damit pumpbarer Eisbrei für die Normalkühlung erzeugt. Bei der Tiefkühlung ist Natriumchlorid in einer eutektischen Konzentration mit geringen Mengen Ethanol empfehlenswert. Ethanol verfeinert die grobe Kristallstruktur des reinen Natriumchlorids und senkt den Gefrierpunkt. Des Weiteren wurde das Verfahren der Primärkristallisation an einem auskristallisierten Additiv erarbeitet. Bei einer industriellen Anlage nach diesem Verfahrensschema dürfte es im Vergleich zu den herkömmlichen Herstellungsverfahren zu weniger Störungen und Verschleiß kommen.

**Stichwörter:** Eisbreiherstellung, Supermarktkühlung, Primärkristallisation, Additiv

S.10

## Funktionsweise und Fördercharakteristik einer Mehrphasen-Schraubenspindelpumpe

Katerina Zabkova M.Sc.

Fachgebiet Technische Thermodynamik, Universität Kassel

In verfahrenstechnischen Prozessen werden zur Förderung von Gasen und Flüssigkeiten in der Regel Verdichter bzw. Pumpen eingesetzt. Dies erfordert jeweils ein einphasiges Medium, um die Beschädigung bzw. Zerstörung der verwendeten Maschinen zu vermeiden. Zur Druckerhöhung im Zweiphasengebiet können Mehrphasenpumpen eingesetzt werden. Sie fördern Gase und Flüssigkeiten in beliebigen Phasenanteilen und sogar eine Feststoffbeladung ist möglich. Dies erspart das sonst erforderliche Trennen der einzelnen Phasen und reduziert den apparativen Aufwand. Die größte Verbreitung haben die Mehrphasenpumpen in Erdgas- bzw. Erdölindustrie. Jedoch können sie auch in kältetechnischen Anwendungen, die sich im Bereich des Phasenwechsels bewegen, zum Einsatz kommen. Im Rahmen des Vortrags wird die Funktionsweise einer Mehrphasen-Schraubenspindelpumpe und ihre Fördercharakteristik vorgestellt.

**Stichworte:**

Mehrphasen-Schraubenspindelpumpe, Fördercharakteristik

S.11

## Realisierbarkeit von Propan als natürliches Kältemittel in Großwärmepumpen

Moritz Stache

Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung ESaK, 63477 Maintal  
[Moritz.Stache@esak.de](mailto:Moritz.Stache@esak.de)

Zent-Frenger Gesellschaft für Gebäudetechnik mbH, 64646 Heppenheim  
[Moritz.Stache@zent-frenger.de](mailto:Moritz.Stache@zent-frenger.de)

Aufgrund der momentanen Umweltpolitik und dem Ausstieg von R22 als Kältemittel ist es von großem Interesse der Kältetechnik, Kältemittel ohne Ozonabbaupotenzial und mit geringem Treibhauspotenzial einzusetzen. Immer häufiger werden deshalb natürliche Kältemittel in Kältekreisläufen verwendet, wie z. B. Propan, Ammoniak oder Kohlenstoffdioxid.

Das natürliche Kältemittel Propan hat aufgrund seiner organischen Verbindung (Kohlenwasserstoff) kein Ozonabbaupotenzial und einen geringen Treibhauseffekt. Hinzu kommt die gute Verträglichkeit mit üblichen Werkstoffen und Ölen, die auch den Einsatz mit hermetischen und halbhermetischen Verdichtern ermöglicht. Der Nachteil liegt darin, dass Propan leicht entflammbar ist und deshalb höhere Sicherheitsmaßnahmen im Vergleich zu nicht brennbaren Kältemitteln getroffen werden müssen.

Zu den wichtigsten Kriterien, die einen derartigen Einsatz von Propan als Kältemittel in Kältekreisläufen ermöglichen, zählen vor allem die Sicherheit und der ökologische Faktor. Im Rahmen der Präsentation soll gezeigt werden, mit welchen Vor- und Nachteilen Propan als Kältemittel in Großwärmepumpen eingesetzt werden kann und welche Restrisiken zu erwarten sind.

**Stichwörter:**

R22, Treibhauspotenzial, Ozonabbaupotenzial, natürliche Kältemittel, Propan, Großwärmepumpe

S.12

## **$\mu$ -Freezer-Einsatz bei der Entwicklung optimaler Einfrierparameter für Stammzellen**

**Boris Zingerov<sup>1</sup>, Denys Pogozhykh<sup>1,2</sup>, Florian Evertz<sup>1</sup>, Nicola Hoffmann<sup>1</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover

<sup>2</sup> Institute for Problems of Cryobiology & Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine

Heutzutage ist die einzige effektive Möglichkeit der Aufbewahrung von biologischen Objekten die Nutzung von tiefen Temperaturen. Die Entwicklung neuer Methoden für Kryokonservierung erlaubt es, die einzigartigen Eigenschaften des biologischen Materials beizubehalten und ist daher eine wichtige Aufgabe für moderne Biologen und Ingenieure.

Die effektive Kryokonservierung von Zellsuspensionen erfordert weiterer Parameteroptimierung beim Einfrieren und Auftauen, um eine hohe Qualität des Objektes nach der Rekultivierung zu gewährleisten. Für verschiedene Zelltypen bedarf es besonderer Bedingungen beim Einfrieren und Auftauen, um die osmotische Belastung und die Wärmebelastung der Zellen zu minimieren und die Überlebensrate der Zellen nach der Kryokonservierung zu erhöhen. Eine hohe Überlebensrate und die funktionelle Aktivität der Zellen sind besonders wichtig für das Einfrieren von seltenen, teureren oder hochempfindlichen Zelltypen und Zelllinien. Deshalb ist die Auswahl der Einfriergeschwindigkeit, die Konzentration von Kryoprotektoren, neben der Anpassung der Auftauprozesse notwendig, um nach einer längeren Aufbewahrung von Zellsuspensionen zufriedenstellende Ergebnisse zu erhalten.

Im IMP wurde ein  $\mu$ -Freezer entwickelt, der das parallele, programmgesteuerte Einfrieren von mehreren Proben bei unterschiedlichen Einstellungen ermöglicht. Das Funktionsprinzip des Freezers basiert auf einem mit flüssigem Stickstoff gekühlten Aluminiumkühlkörper, der über 12 Plattformen verfügt, die jeweils mit einer Heizfolie als Kompensationsheizung ausgestattet sind. Der  $\mu$ -Freezer kann im Bereich von 4°C bis -30°C Abkühlraten bis zu 26 K/min und zwischen -30°C und -80°C bis zu 11 K/min erreichen.

Die Studie beinhaltet eine systematische Auswahl einer optimalen Einstellung für Kryokonservierung von mesenchymalen Stammzellen bei der Nutzung des programmgesteuerten  $\mu$ -Freezers. Die Ergebnisse der Studie haben gezeigt, dass eine Kühlrate von 5 - 7, K/min in Kombination mit einer 7,5%igen Gefrierschutzmittelkonzentration (DMSO) für das Einfrieren von Stammzellen geeignet ist.

Danksagung: Wir danken der DFG für die finanzielle Unterstützung des Projekts im Rahmen des Exzellenzclusters REBIRTH.

**Keywords:**

$\mu$ -Freezer, Kryokonservierung, Stammzellen, Gefrierschutzmittel, Einfrierparameter, Funktionalität, Zell-Differenzierung

# **Entwicklung eines Kühlsystems und einer automatisierten bildgesteuerten Positionskalibrierung einer Metallspitze zum kontrollierten Gefrieren einer unterkühlten Probe**

**Schöps H. , Spindler R. , Glasmacher B.**

Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover  
Callinstr. 36, 30167 Hannover

In der Kryotechnik werden Zellen bei kryogenen Temperaturen gelagert, um sie zu einem späteren Zeitpunkt ohne Qualitätsverlust verfügbar zu haben. Der Vorgang des Einfrierens nimmt besonderen Einfluss auf die Überlebensrate der Zellen und muss daher eingehend erforscht werden. Dafür wird am Institut für Mehrphasenprozesse ein Kryomikroskop mit einer LINKAM®-Kühlkammer eingesetzt, in welcher die Probe liegt und beobachtet werden kann. Mehrere Faktoren wie Art und Konzentration der Kryoprotectiva, Nukleationstemperatur und Kühlrate der Probe beeinflussen die Überlebensrate und müssen in aufwändigen Versuchen optimiert und zu einem Kryoprotokoll zusammengestellt werden. Um die Nukleation aktiv einzuleiten wird in der Regel ein flüssigstickstoff-gekühlter Draht manuell in die Probe eingeführt (Seeding). Durch das Öffnen der Kühlkammer wird jedoch die Schutzgasatmosphäre in der Kammer zerstört und der Sichtkontakt zu der Probe unterbrochen, sodass der Vorgang der Nukleation nicht beobachtet werden kann.

Der Vorgang des Seedings mit einem gekühlten Draht wurde daher in dieser Arbeit automatisiert. Dafür wurde eine Apparatur entwickelt, die mittels eines Schrittmotors und einer Linearführung einen Draht durch eine neu entwickelte Deckelkonstruktion in die Kühlkammer einführt. Der Draht wird außerhalb der Kammer in einem Wärmetauscher geführt, welcher mit Flüssigstickstoff betrieben wird und den Draht vereist. Positioniert wird die Drahtspitze automatisch mittels eines in Visual Basic erstelltes Windowsprogramms, welches über ein weiteres USB-Mikroskop die Bildauswertung vornimmt und den Schrittmotor entsprechend bewegt. Um die Nukleation temperaturgesteuert auszulösen, wird die Spannung am Temperatursensor in der Kühlkammer abgegriffen, mit einer Operations-verstärkerschaltung verstärkt und mittels einer Datenerfassungskarte in das Windowsprogramm eingelesen. Dort werden die Messdaten gefiltert und in Temperaturwerte umgerechnet.

Die Nukleationstemperatur kann mit dieser Apparatur bis zu einer Kühlrate von 10 K/min auf  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  genau ausgelöst und dabei mikroskopisch beobachtet werden. Das temperaturgesteuerte Seeding garantiert die Einhaltung einheitlicher Messungen. Mit den gewonnenen Erkenntnissen kann ein besseres Verständnis der Frievorgänge an Zellen gewonnen werden und somit bestehende Kryoverfahren optimiert werden.

Wir danken der DFG für die finanzielle Unterstützung des Projekts im Rahmen des Exzellenzclusters REBIRTH.

## Notizen

