

**Deutsche Kälte-  
und Klimatagung**



# **Deutsche Kälte- und Klimatagung 2013**

**Hannover**

**20. – 22. November 2013**

## **Kurzfassungen**

**Veranstalter:**

**Deutscher Kälte- und  
Klimatechnischer Verein e.V.**

Striehlstraße 11, 30159 Hannover

T. +49 (0) 511 897 0814

F. +49 (0) 511 897 0815

E. [info@dkv.org](mailto:info@dkv.org)

H. [www.dkv.org](http://www.dkv.org)

  
**MARITIM** Airport Hotel Hannover

Flughafenstr. 5

30669 Hannover

T. +49 (0) 511 9737-0

F. +49 (0) 511 9737-590

E. [info.hfl@maritim.de](mailto:info.hfl@maritim.de)

H. [www.maritim.de](http://www.maritim.de)



# Inhaltsverzeichnis

<b>Arbeitsabteilung I</b> .....	<b>4</b>
Kryotechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.1</b> .....	<b>19</b>
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.2</b> .....	<b>35</b>
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung III</b> .....	<b>50</b>
Kälteanwendung	
<b>Arbeitsabteilung IV</b> .....	<b>69</b>
Klimatechnik und Wärmepumpenanwendung	
<b>Studentenvorträge</b> .....	<b>87</b>

# Temperaturabhängigkeit des kritischen Stroms technischer Supraleiter

Theo Schneider, Marion Kläser\*

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Physik (ITEP),  
Postfach 3640, 76046 Karlsruhe, Deutschland  
[theo.schneider@kit.edu](mailto:theo.schneider@kit.edu), [marion.klaeser@kit.edu](mailto:marion.klaeser@kit.edu)

\* Korrespondenzautor

Der physikalische Zustand, bei dem der elektrische Widerstand unterhalb einer kritischen Temperatur sprunghaft auf Null abfällt, wurde von seinem Entdecker K. Omnes 1911 als Supraleitung bezeichnet. Die letzten hundert Jahre wurden darauf verwandt, dieses Phänomen physikalisch zu beschreiben, supraleitende Materialien mit möglichst hohen kritischen Temperaturen zu entdecken und diese dann auch technisch nutzbar zu machen.

Eine weltweit verbreitete, im Alltag integrierte Anwendung der Supraleitung besteht in der Magnetresonanztomografie (MRT). Magnetresonanztomografen benötigen zur Bilderzeugung ein Magnetfeld von standardmäßig etwa 1,5 T, das mit supraleitenden, heliumgekühlten NbTi-Spulen erzeugt wird. Klinisch etabliert sind mittlerweile auch MRT's mit einer Feldstärke von 3 T, während 7 T oder sogar 9,4 T Tomografen im Forschungsbetrieb angesiedelt sind. Noch höhere Magnetfelder werden in der hochauflösenden NMR-Spektroskopie benötigt. Spektrometer mit Resonanzfrequenzen von 1 Gigahertz, was einer Magnetfeldstärke von 23,5 T entspricht, sind heute technisch realisierbar. Weitere Anwendungen finden sich in der Hochenergiephysik (Forschungsanlagen CERN oder GSI) und in der Kernfusion (W7X und ITER), wo die supraleitenden Magnete teils bei Temperaturen von nur 1.8 K betrieben werden.

Supraleitung tritt nur unterhalb einer kritischen Fläche auf, deren Eckpfeiler die kritische Temperatur  $T_c$ , die kritische Stromdichte  $J_c$  und das kritische Magnetfeld  $B_c$  sind. Diese kritischen Größen sind materialspezifisch und hängen stark voneinander ab. Zu den supraleitenden Materialien, die aktuell in Draht- oder Bandform kommerziell in hinreichenden Längen erhältlich sind, zählen die metallischen Tieftemperatur-Supraleiter NbTi und  $(\text{NbX})_3\text{Sn}$ , sowie die Hochtemperatur-Supraleiter  $\text{MgB}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (BSCCO) und  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (REBCO). Die kritische Temperatur dieser Supraleiter variiert von etwa 9 K bei NbTi-Drähten bis etwa 110 K bei den BSCCO-Bandleitern.

Der Einsatz der Supraleiter in neuen Projekten oder Anwendungen ist nur möglich, wenn die Abhängigkeiten der Stromtragfähigkeit von der Einsatztemperatur  $T$  und dem externen Magnetfeld  $B$  bekannt sind. Messungen unter Betriebsbedingungen und mathematische Modellierungen sind daher notwendig.

Es werden Messungen zur  $I_c(T, B)$ -Abhängigkeit einiger Supraleiter vorgestellt und mathematische Modellierungen durchgeführt

## Stichwörter:

Supraleitung, Supraleitende Spulen, Kritischer Strom

## **Industriell gefertigte HTS Stromzuführungen mit optimierten Design-Merkmalen**

**M. Börsch<sup>1\*</sup>, F. Holdener<sup>1</sup>, E. Iten<sup>1</sup>, N. Maggini<sup>1</sup>, H. Quack<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

\* Korrespondenzautor

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 keramischem Supraleiter fließt. CRPP und WEKA haben in einem gemeinsamen Projekt Stromzuführungen für den Bereich von 3 kA bis 30 kA entwickelt, die mit industriellen Verfahren hergestellt werden. Die Hauptkomponenten der Stromzuführungen sind der Kupfer-Wärmetauscher, das HTS-Modul sowie die Anschlüsse am kalten und am warmen Ende. Das Design der Stromzuführung lässt sich einfach an die geforderten Stromstärken oder Arbeitstemperaturen anpassen. Im Rahmen des Entwicklungsprojektes wurden zwei Prototypen-Stromzuführungen entwickelt, hergestellt und getestet, die sich hauptsächlich im Design des Wärmetauschers sowie des Übergangsbereiches zum HTS-Moduls unterscheiden. Es werden besondere Konstruktionsmerkmale erläutert und die Ergebnisse der Tests dargestellt. Das Projekt wurde von der Schweizer Kommission für Technologie und Innovation (KTI) gefördert.

## **Flüssigwasserstoff als Energiespeicher für stationäre Anwendungen – Exergieeffizienz und politische Durchsetzbarkeit**

**Mario Ludwig<sup>1,2\*</sup>, Sebastian Thuß<sup>1,3</sup>, Christoph Haberstroh<sup>2</sup>, Ullrich Hesse<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> TU Dresden, Boysen-TUD-Graduiertenkolleg, 01069 Dresden

<sup>2</sup> TU Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01069 Dresden

<sup>3</sup> TU Dresden, Lehrstuhl für politische Systeme und Systemvergleich, 01069 Dresden

[mario.ludwig@tu-dresden.de](mailto:mario.ludwig@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Die auf den Weg gebrachte Energiewende erfordert eine Umstellung von mindestens 80 % der Stromversorgung auf erneuerbare Energiequellen. Dazu müssen zum größten Teil Potenziale von Solar- und Windenergie ausgeschöpft werden. Allerdings fällt Strom aus diesen Quellen nur stark fluktuierend und nicht bedarfsgerecht an. Diese Differenz aus Angebot und Nachfrage erfordert Speicher auf Basis chemischer Energieträger wie beispielsweise Wasserstoff.

Ein Teil der so gespeicherten Energie kann dezentral in Blockheizkraftwerken in Strom und Wärme umgewandelt werden. Flüssigwasserstoff ist dabei wegen seiner um 1,8- bis 5,3-mal höheren volumetrischen Energiedichte als Hochdruck-Wasserstoff (700 bar bis 180 bar) und der Einsparung eines integrierten Reformers gegenüber methanisierendem Wasserstoff ein vorteilhafter Sekundärenergieträger.

Ausgehend von einem typischen Jahresprofil eines Windparks mit integrierter Elektrolyse wurden Methanisierung, Verflüssigung und Verdichtung von Wasserstoff mit folgender Rückverstromung in einem dezentralen Brennstoffzellenheizgerät miteinander verglichen. Dazu wurde zuerst eine Exergieanalyse der Prozesspfade unter Beachtung von Teillastfällen durchgeführt. Daraufhin wurden die Pfade hinsichtlich ihrer politischen Umsetzbarkeit bezüglich nötigem Infrastrukturausbau, Wertschöpfungsort und Förderregime bewertet.

**Stichwörter:**

Wasserstoff, Wasserstoffverflüssigung, Exergie-Analyse, Energiewende, Energiepolitik

I.04

## **Flüssigluftenergiespeicherung: Konzept und Analyse eines Systems für großtechnische Anwendungen**

**A. Alekseev<sup>1</sup>, Ch. Stiller<sup>1</sup>, B. Stöver<sup>2</sup>, S. Rehfeldt<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Linde AG, Pullach, Germany

<sup>2</sup> Hitachi Power Europe GmbH, Duisburg, Germany

\* Korrespondenzautor

Der von erneuerbaren Energiequellen erzeugte Stromanteil nimmt nicht nur im Europäischen Verbundsystem sondern auch weltweit stetig zu. Die unstetige Stromproduktion erneuerbarer Energiequellen (Solar- & Windkraft) ist mit dem Lastverhalten der Verbraucher nicht immer vereinbar und stellt deswegen eine Herausforderung für die wirtschaftliche Energieproduktion dar. Energiespeichersysteme unterschiedlichster Art werden zurzeit intensiv untersucht als eine der Möglichkeiten, die Netze zu stabilisieren und zuverlässige Stromversorgung zu gewährleisten.

Die Flüssigluftenergiespeicherung ist eine Methode der Energiespeicherung, die etwa seit Beginn der 1980er Jahre bekannt ist. Bei Stromüberschuss wird Umgebungsluft komprimiert, verflüssigt und in speziellen isolierten Kryobehältern gespeichert. Die gespeicherte Flüssigkeit wird bei Lastspitzen zur Stromerzeugung aus dem Speicher entnommen, in einer Pumpe auf den hohen Druck gebracht, verdampft und angewärmt und in einer oder mehreren Entspannungsturbinen arbeitsleistend entspannt. Das Verfahren ähnelt der Druckluftspeicherung in Salzkavernen, ist aber von geologischen Bedingungen unabhängig und daher überall einsetzbar; weiterhin ist der Zeitaufwand für Planung, Bau und Genehmigung deutlich kürzer.

Prozesstechnisch bestehen diese Anlagen aus zwei Einheiten – einem Tieftemperaturteil mit Luftverflüssiger, Flüssigluftspeicher und Flüssigluftverdampfer – und einer „Power Island“ zur Stromproduktion aus komprimierter Luft. Diese kann entweder aus einem Luftexpander, einer Gasturbine oder Kombination aus beiden bestehen.

Die Linde AG, als eines der führenden Unternehmen für kryogenen Anlagenbau und Luftzerlegung, und die Hitachi Power Europe GmbH, als führender Ausrüster von konventionellen Kraftwerken, haben gemeinsam Energiespeichersysteme basierend auf Verwendung von Flüssiggasen für die periodische Energieerzeugung untersucht. In diesem Artikel werden Potenziale und Herausforderungen von Tieftemperaturenergiespeicherkonzepten diskutiert. Die untersuchten Konzepte werden dargestellt inkl. thermodynamischer und wirtschaftlicher-Analyse. Außerdem werden die Systeme mit Druckluftspeichersystemen wie Huntorf und McIntosh verglichen.

## **Design and manufacture of the PTCL Test infrastructure cryogenic hardware for ITER India**

**Ronald Dekker\*, Ruud van der Woude**

DeMaCo, Noord-Scharwoude, The Netherlands  
E [rd@demaco.nl](mailto:rd@demaco.nl), T +31 226 33 21 21, M +31 6 51 38 98 08

In march 2012 ITER-India awarded the contract for the design, manufacture and installation of the PTCL test infrastructure to a collaboration of Linde Kryotechnik, Switzerland and DeMaCo, The Netherlands. The PTCL test infrastructure is a dedicated facility to test the structural and thermal performance of a prototype section (PTCL) of the main cryoline that will be part of the ITER nuclear fusion facility in France to be installed in the new ITER-India Cryogenics laboratory in early 2013.

The main cryogenic hardware includes a cold box, three test boxes and the associated cryogenic transfer lines. The hardware is used to implement the basic design, which involves two different helium subsystems: a high pressure closed loop system operating at minimum temperature of 80 K and a low pressure open loop system operating at minimum temperature of 4 K in order to control precisely the temperature of the PTCL from ambient down to liquid helium levels.

The hardware used to control flows and temperatures from both helium subsystems is located in the three test boxes, which are connected to the three branches of the PTCL. An additional function of the test boxes is to assure the safe operation of the test system including the PTCL throughout the entire test sequence by appropriately sized safety valves and lines.

In the Cold Box being part of the high pressure subsystem, helium from the compressor system is cooled from ambient temperature down to 80K (using liquid nitrogen), which is distributed to the three test boxes.

All boxes and transfer lines are vacuum insulated and are completely made from different kinds of stainless steel to achieve the highest level of safety and robustness.

## **Leistungstests der Helium-Kälteanlage für das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X**

**M. Ressel<sup>1\*</sup>, L. Blum<sup>1</sup>, C.P. Dhard<sup>2</sup>, M. Nagel<sup>2</sup>, S. Raatz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Linde Kryotechnik AG, Dättlikonerstr. 5, 8422 Pfungen, Schweiz  
[michael.ressel@linde-kryotechnik.ch](mailto:michael.ressel@linde-kryotechnik.ch)

<sup>2</sup> Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Teilinstitut Greifswald,  
Wendelsteinstr. 1, 17491 Greifswald, Deutschland

\* Korrespondenzautor

Bei dem Fusionsexperiment Wendelstein 7-X (W7-X) handelt es sich um einen Fusionsreaktor vom Typ Stellarator. Das Ziel dieses Experiments ist, die Fähigkeit zum Dauerbetrieb und folglich die Kraftwerkstauglichkeit dieses Konzepts zu demonstrieren.

Die Helium-Kälteanlage für das Fusionsexperiment W7-X mit einer Gesamtleistung von 7 kW bei 4.5 K liefert die nötige Kälteleistung für die supraleitenden Komponenten sowie Gehäuse, Strukturen, Kryo-Vakuumpumpen, Stromzuführungen und den thermischen Schild.

Die Betriebsweise der Kälteanlage ist gekennzeichnet durch unterschiedliche Anforderungen der Verbraucher, die bei Temperaturen im Bereich von 100 K bis 3.4 K und Drücken im Bereich von

1.5 bar bis 16 bar gekühlt werden müssen. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wurde ein Konzept mit Kaltverdichtern und kalten Helium-Pumpen gewählt.

Für den Nachweis der Leistung und Funktion waren eine Reihe unterschiedlicher Abnahmetests vorgesehen. Entsprechend der einzelnen Leistungstests waren unterschiedliche Kombinationen der kalten Maschinen (Turbinen, Kaltverdichter, kalte Helium-Pumpen) in Betrieb.

Die Ergebnisse zeigen, dass die garantierte Kälteleistung für alle spezifizierten Betriebsfälle erreicht wurde. Ferner konnte gezeigt werden, dass die Kälteanlage auf Anforderung automatisch zwischen den einzelnen Betriebsmodi wechselt.

Neben den Ergebnissen der Abnahmetests werden auch besondere Herausforderungen während der Inbetriebnahme der Kälteanlage aufgezeigt.

**Stichwörter:**

Helium, Fusion, Kälteanlage, Leistungstest

I.07

## **Entwicklungen innovativer Kryostate**

**A. Kade\*, M. Klupsch, M. Kuhn, M. Schneider, J. Klier**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

\* Korrespondenzautor

Am ILK Dresden werden nichtmetallische Kryostate entwickelt, die sich durch eine hohe Vakuumstandzeit auszeichnen und damit eine lange Standzeit des kryogenen Mediums besitzen. Damit diese Kryostate in beliebigen Anordnungen und Konstruktionen zum Einsatz kommen können, werden sie mit einer lageunabhängigen Funktionsweise ausgestattet. Neben speziellen Lösungen für Details der Konstruktion werden die Ergebnisse von Berechnungen, verschiedenartiger Materialuntersuchungen und thermodynamischer Messungen vorgestellt. Zudem erfolgten in Kooperation mit der PTB Berlin Untersuchungen zu Suszeptibilität und Restmagnetisierung des Entwicklungsgegenstands um die angestrebte hohe magnetische Rauscharmut zu verifizieren. Vorgestellt wird die jüngste Entwicklung eines lageunabhängigen, sehr rauscharmen, nichtmetallischen Heliumkryostaten sowie neueste Lösungen zur Kryostatierung für Hochtemperatursupraleiter-Anwendungen wie z. B. Strombegrenzer, Torque-Motoren und Generatoren. Der Einsatz für Anwendungen als Energiespeicher wird diskutiert.



## **Aufbau eines Versuchsstands zur Messung der Vorgänge in einem Flüssighelium-Behälter bei Zusammenbruch des Isoliervakuums**

**Carolin Heidt<sup>1,2,\*</sup>, Steffen Grohmann<sup>1,2</sup>, Heinz Schön<sup>1</sup>, Michael Stamm<sup>1</sup>**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
<sup>1</sup>Institut für Technische Physik (ITEP),  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
[Carolin.Heidt@kit.edu](mailto:Carolin.Heidt@kit.edu), [Steffen.Grohmann@kit.edu](mailto:Steffen.Grohmann@kit.edu)  
[Heinz.Schoen@kit.edu](mailto:Heinz.Schoen@kit.edu), [Michael.Stamm@kit.edu](mailto:Michael.Stamm@kit.edu)

<sup>2</sup>Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe

\* Korrespondenzautor

Die Belüftung des Isoliervakuums gilt für die sicherheitstechnische Auslegung der Sicherheitseinrichtungen eines Flüssighelium-Behälters in vielen Fällen als maximaler Störfall. Aufgrund der besonderen Bedingungen (niedrige Temperaturen, geringe Verdampfungsenthalpie des flüssigen Heliums) kommt der Dimensionierung von Sicherheitseinrichtungen eine große Bedeutung zu. Die existierenden Regelwerke (z. B. AD-2000, DIN) decken dabei die in der Kryotechnik auftretenden Bedingungen oft nicht ausreichend ab. Bisher basiert die Auslegung der Sicherheitseinrichtungen i.d.R. auf Erfahrungen und einer sehr begrenzten Auswahl experimenteller Daten.

In diesem Beitrag wird die Planung und das Messprinzip eines sicherheitstechnischen Versuchsstands vorgestellt, mit welchem ein bereits existierendes theoretisches Modell validiert werden soll. Dabei sollen besonders der Einfluss von Superisolation auf den an das Helium übertragenen Wärmestrom und die Vorgänge im Heliumbehälter untersucht werden.

### **Stichwörter:**

Flüssighelium, Versuchsstand, Wärmestrom, Druckanstieg, Superisolation

## Auslegung eines Gasanwärmers für kryogenes Helium

Michael Schrank\*, Alexander Reiner

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Physik (ITEP)  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
[michael.schrank@kit.edu](mailto:michael.schrank@kit.edu), [alexander.reiner@kit.edu](mailto:alexander.reiner@kit.edu)

\* Korrespondenzautor

Der in diesem Beitrag betrachtete Gasanwärmer ist Teil eines Kühlkreislaufs zur Versorgung einer Kryopumpe, die auf einer Argonfrostschiicht bei 3 K Tritiumgas adsorbiert. Dazu wird ein Flüssighelium Reservoir mit einer Vakuumpumpe auf einen Siededruck von 240 mbar abgepumpt. Das abdampfende Gas muss zunächst auf 300 K erwärmt werden bevor es von der Pumpe auf Umgebungsdruck komprimiert wird. Vakuumpumpen sind sehr empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Zusammen mit der Forderung, die Temperatur im Kühlkreislauf sehr konstant zu halten, stellt dies hohe Anforderungen an den Gasanwärmer.

In Kälteanlagen werden gewöhnlich Wasserbad-Wärmetauscher eingesetzt. Dieses einfache System kann den gestellten Anforderungen leider nicht gerecht werden. Im Dauerbetrieb verschlechtert sich der Wärmeübergang durch Festfrieren von Wasser an den Rohren. Außerdem kann die Temperatur des Wasserbads nur sehr träge reguliert werden und wegen des Unterdrucks wird bei einer Leckage Wasser in den Heliumkreislauf gedrückt. Der ausgelegte Gasanwärmer befindet sich deshalb in einem Vakuumbehälter. Kupferrohre werden elektrisch beheizt und die Austrittstemperatur mithilfe mehrerer Temperatursensoren geregelt. An diesem Beispiel werden Auslegungskriterien eines Wärmetauschers wie Druckverlust, Wärmeübertragung und Temperaturregelung diskutiert.

## Cryopreservation of electro-spraying alginate encapsulated mesenchymal stem cells

O. Gryshkov<sup>1\*</sup>, D. Pogozykh<sup>1,3</sup>, N. Hofmann<sup>1</sup>, T. Mueller<sup>2</sup>, B. Glasmacher<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Multiphase Processes, Leibniz University Hannover, 30167 Hannover, Germany  
[gryshkov@imp.uni-hannover.de](mailto:gryshkov@imp.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Institute for Transfusion Medicine, Hannover Medical School, 30625 Hannover, Germany

<sup>3</sup> Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the NAS of Ukraine,  
61015 Kharkiv, Ukraine

\*corresponding author

Perspectives of application of stem cells in regenerative medicine require improving of cryopreservation protocols for long term storage, especially for tissue-imitating 3D constructs containing cells. Encapsulation of stem cells into alginate-based 3D constructs that repeat an extracellular matrix may provide a mild environment during cryopreservation as well as the possibility for large-scale expansion. The gel-like structure and mild environment inside alginate beads may affect the metabolic activity of encapsulated cells post-cryopreservation. The effects of high voltages, alginate encapsulation and pre-incubation time on morphology, viability and proliferation of MSCs post-cryopreservation were evaluated.

Mesenchymal Stem Cells derived from the Common marmoset monkey *Callithrix jacchus* (cjMSC) were encapsulated into 1.5 % (w/v) sterile medium viscosity unmodified alginate (Sigma Aldrich, filter-sterilized using 0.8-0.45-0.22 um filter set) with a concentration  $1 \cdot 10^6$  cells per ml of initial alginate solution using electro-spraying. Final alginate beads (300 um in diameter) were obtained under

different applied voltages (15, 20, 25 kV). As a negative control to high voltages, air flow encapsulation was run in parallel. Beads (0.5 ml) containing MSCs ( $0.5 \cdot 10^6$  cells) were either immediately frozen after encapsulation (0 h) or cultured overnight prior to cryopreservation (24 h). Cryopreservation was conducted with  $1^\circ\text{K}/\text{min}$  cooling rate down to  $-80^\circ\text{C}$  with 10 % Me2SO (v/v) as a cryoprotective agent. After 24h of storage at  $-80^\circ\text{C}$  beads were thawed at  $37^\circ\text{C}$  with further removing of alginate using 55mM sodium citrate for 2 min. Then MSCs were either seeded for MTT test at  $10^4$  cells/well immediately after thawing or cultured for 5 days followed by MTT. Membrane integrity of encapsulated cells before cryopreservation and after thawing was evaluated by Trypan Blue assay. Metabolic activity and proliferation activity of MSCs were measured using MTT Proliferation Assay (Promega, USA). The MTT data were normalized on respective control.

MSCs can be encapsulated into alginate beads with desired concentration and without significant changes in viability and metabolic activity post-encapsulation. MSCs showed normal morphology, attached and proliferated well after thawing. The incubation of MSCs inside alginate beads prior to cryopreservation resulted in lower proliferation rate as compared to native control ( $18 \pm 6\%$  and  $45 \pm 8\%$ ) and at the same rate as frozen control. The same behavior was observed for re-passage efficiency of encapsulated and frozen MSCs. Immediately frozen cells after encapsulation recovered at the same rate as native control, indicating an effectiveness of cell cryopreservation inside alginate beads. This study shows an importance of cell cryopreservation inside unmodified alginate directly after encapsulation. Due to toxic effect of Me2SO, cryopreservation of MSCs inside alginate beads using other less toxic CPAs will be conducted.

Acknowledgements: This work is supported by funding from the Cluster of Excellence REBIRTH (DFG EXC 62/1)

**Keywords:**

Cryopreservation, Alginate encapsulation, Proliferation, MSC

I.11

## Investigation of epigenetic changes caused by cryopreservative procedures

A. Chatterjee<sup>1</sup>, D. Saha<sup>1</sup>, T. Müller<sup>2</sup>, M. Dorsch<sup>3</sup>, H. Niemann<sup>4</sup>, B. Glasmacher<sup>1</sup>, N. Hofmann<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Multiphase Processes, Leibniz Universitaet Hannover, 30167 Hannover  
[hofmann@imp.uni-hannover.de](mailto:hofmann@imp.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Institute for Transfusion Medicine, Hannover Medical School,

<sup>3</sup> Institute for Laboratory Animal Science and Central Animal Facility, Hannover Medical School,

<sup>4</sup> Institute of Farm Animal Genetics, Friedrich-Loeffler-Institute

\* corresponding author

Cryopreservation techniques allow the long term storage of a wide variety of biological materials without significant deterioration in quality. Immediate post-thaw survival is most often used to assess the effect of freeze-thaw process on cells.

This parameter however provides no information on possible subtle effects of cryopreservation, including DNA damage, alteration of mRNA levels and protein function. Exposure to DMSO which is the most commonly used cryoprotective agent (CPA) has been shown to have an impact on the epigenetic profile in mouse embryoid body. Epigenetics describes heritable alterations in gene expression or cellular phenotype, occurring without changes in the DNA sequence. Epigenetic modifications affect gene expression by altering eukaryotic transcriptional regulation. Factors involved in such modifications include DNA methylation, histone modifications, RNA interference, and genomic imprinting.

Mesenchymal stem cells (MSCs) from the common marmoset monkey, *Callithrix jacchus* were frozen under optimal conditions using a controlled rate freezer using different concentrations of dimethyl sulfoxide (DMSO). The effect of on cell viability, proliferation and DNA methylation patterns of the different cell samples were studied.

Cell viability was tested by analyzing the membrane integrity (by trypan blue staining) and cell activity (using MTT assay) after cryopreservation. The functional integrity of cryopreserved cells was tested by analyzing the ability of these cells to differentiate into adipocytes, chondrocytes and osteocytes.

The mRNA and protein expression of epigenetic proteins of marmoset MSCs exposed to pre-established optimal and suboptimal cryopreservation protocols are being studied using PCR and western blotting. Epigenetic regulation factors that are being analyzed include DNA methyltransferases and histone modification enzymes such as histone methyl transferases, histone deacetylases and histone acetyl transferases. The global acetylation and methylation patterns of the different histone proteins are being analyzed with a mass-spectrometric approach.

Previous studies indicate that the incorporation of compounds like proline and ectoine in cryopreservative media may improve post-thaw cell survival. Hence, the performance of these compounds is being compared to DMSO for effects on cell viability, differentiation capability and in particular the epigenetic regulation of cryopreserved stem cells.

**Keywords:**

Cryopreservation, DMSO, epigenetics

I.12

## **Kryokonservierung von humanen Zellen und Gewebe mittels kontrollierter Nukleation**

**L. Lauterböck\*, R. Spindler, N. Hofmann, B. Glasmacher**

Institute für Multiphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover  
lauterboeck@imp.uni-hannover.de

\* Korrespondierender Autor

Die Konservierung von Zellen und Gewebe in flüssigen Stickstoff ist für die Langzeitlagerung dieser Biomaterialien der Stand der Technik. Bei der Kryokonservierung müssen mehrere Faktoren wie Gefrierschutzmittelkonzentration, Kühl-/ Auftaurate und Nukleation beachtet werden, da diese Parameter großen Einfluss auf die Überlebensrate von Zellen haben.

Die Nukleation ist ein Prozess, bei dem sich an einem gebildeten Eiskristall weitere Wassermoleküle ansammeln und somit der Kristall in seiner Größe wächst. Dieser Prozess, auch spontane Nukleation genannt, passiert stochastisch beim Abkühlen von Flüssigkeiten. Die spontane Nukleation jedoch hat bei den meisten Zelltypen negative Auswirkungen auf die Überlebensrate. Um diese zu verbessern ist eine gezielt ausgelöste Nukleation vorzuziehen.

Es gibt verschiedene Methoden, wie z. B. Elektrofreenzing, „seeding“ oder chemische Induktion (z. B. kristallines Cholesterol) um gezielt eine Nukleation auszulösen. Beim Elektrofreenzing wird die Eiskristallbildung mit einem hochenergetischen Impuls ausgelöst. Seeding beschreibt den Prozess bei dem ein -196° C kalter Punkt an der Wand des Kryoröhrchens induziert wird. Mit diesen Methoden kann die Nukleationstemperatur verschiedenster Zelltypen bestimmt und optimiert werden.

Um den Effekt der induzierten Nukleation auf die Vitalität der Zellen zu bestimmen, wurden mesenchymale Stammzellen (MSCs) des Weißbüschelaffens (*Callithrix jacchus*) in einem Nukleationsgerät (Elektrofreenzing, Seeding) und einem gesteuerten Einfriergerät (CM2000) mit verschiedenen Nukleationstemperaturen eingefroren.

Die Qualität der derart eingefrorenen Zellen wurde nach dem Auftauen über die Membranintegrität durch Trypan blau Färbung und ihre Aktivität mittels Alamar Blue® Assay bestimmt. Die Funktionalität der Stammzellen wurde durch ihre Differenzierung in Knochen- bzw. Fettzellen ermittelt.

**Schlüsselwörter:**

Kryokonservierung, Nukleation, mesenchymale Stammzellen

I.13

## Prinzipien moderner Biobanken

N. Klopp

Hannover Unified Biobank HUB, Hannover

I.14

## Hygiene im Stickstofftank

Michael Ramin, Johannes Schenkel\*

Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg (DKFZ), Kryokonservierung W430,  
Im Neuenheimerfeld 280, 69120 Heidelberg

\* Korrespondenzautor

Mittels Kryokonservierung können Biomaterialien konserviert, langfristig ohne großen Aufwand gelagert und später revitalisiert werden, z. B. humane Keimzellen, die vor einer schwerwiegenden Therapie dem Patienten entnommen werden, die Sicherung von besonders ertragreichen Tieren in der Landwirtschaft oder von Tiermutanten, vor allem Mausmutanten.

Um lebende Labornager zu revitalisieren, muss ein Embryotransfer vorgenommen werden, dieser führt zur Sanierung, einer Entfernung der meisten Pathogene. Das ist bedeutsam, da Nagerhaltungen nicht effektiv mit Medikamenten behandelt werden können. Das Potential mikrobiologischer Kontaminationen kann nur schwer eingeschätzt werden, es besteht folgende Problematik:

- Wegen der Verdampfung des flüssigen Stickstoffs kommt es zum Gasaustausch mit der Umwelt, Raumluftkeime können aspiriert werden. Die Lagertanks werden unsteril geöffnet.
- Nagerproben werden unsteril entnommen; Kontaminationen werden durch Waschen reduziert.
- Proben werden sorgfältig verschlossen, Leckagen sind aber möglich.
- Der Transport im Dryshipper ist sehr sinnvoll, erfolgt aber nicht unter sterilen Bedingungen.

Kreuzkontaminationen sind unter allen Umständen zu verhindern. Zur Abschätzung möglicher Gefahren wurden folgende Analysen an Mausmutanten vorgenommen:

Das Infektionspotential im Probengefäß wurde mittels Multiplex-PCR zum Nachweis von mehr als 20 DNA- oder RNA-Viren an kryokonservierten, lange gelagerten Maus Embryonen, Spermatozoen und ES-Zellen getestet. Viren oder Bakterien waren im Probengefäß nicht nachweisbar.

Im LN2-Behälter-Innenen wurden an verschiedenen Stellen Umweltkeime gefunden, die auch im Raum nachweisbar sind. Viren wurden nicht nachgewiesen.

Aktive Kontamination im LN2 mit *Staphilococcus aureus* und *Citrobacter freundii* infizierte Filterblättchen können im LN2 sterile Filterblättchen kontaminieren und überleben.

Kulturmedien: Bei der Aufbereitung und Revitalisierung genutzte Medien wurden nach dem letzten Aufarbeitungsschritt getestet: Bakterien: negativ, Viren: nicht nachweisbar.

Nach einem Embryotransfer zwecks Sanierung wurden die Ammen und die geworfenen Jungtiere hygienisch untersucht. Meistens war der Embryotransfer erfolgreich, in wenigen Fällen wurden aber Mikroorganismen nachgewiesen, die bei Nichtentdecken fatale Folgen haben können: Pseudomonaden, *Staphilococcus aureus*, Noroviren, Maus Hepatitis Virus.

### Zusammenfassung

Die meisten Proben, die nach strikten Protokollen präpariert werden, sind mikrobiologisch einwandfrei, in Einzelfällen wurden aber Erreger gefunden, deren Infektionen gefürchtet sind. Es ist davon auszugehen, dass Waschschritte mit nachfolgendem Embryotransfer zur Sanierung einen hochgradigen Erfolg haben, aber ein Risiko besteht bleibt, mit dem umgegangen werden muss.

## **Kryokonservierung in der Reproduktionsmedizin beim Menschen**

**Dr. med. N. Saymé**

Team Kinderwunsch Hannover

Bereits im 18 Jhd. konnte Spallanzani zeigen, dass tierische Spermien, welche stark abgekühlt und wieder erwärmt wurden ihre Motilität behalten und diesen Prozess überleben. Erst nach fast 200 Jahren wurde diese Erkenntnis auf den Menschen übertragen und 1938 wurden das erste Mal menschliche Spermatozoen erfolgreich eingefroren und wieder aufgetaut. Die Entdeckung der kryoprotektiven Eigenschaften von Glycerol durch E.J.C. Polge war ein weiterer großer Schritt in der Kryokonservierung von Spermien. Schon 1953 wurde die erste Samenbank gegründet und schon kurze Zeit später das erste menschliche Baby durch Spermien aus dieser Samenbank geboren. Erst in den 70er Jahren konnte die Technik der Kryokonservierung erfolgreich bei Mäusen auch auf die weit komplexeren Oocyten übertragen werden. In Australien wurde dann 1984 das erste Baby aus einem zuvor kryokonservierten Embryo geboren. Schon zwei Jahre später wurde eine erfolgreiche Schwangerschaft durch unbefruchtete kryokonservierte Oocyten erzielt. Seit dem wurden die Methoden der Kryokonservierung weiter verbessert und auf ganze Gewebe erweitert.

So hat sich die Kryokonservierung von menschlichen Zellen und Geweben zu einer wichtigen – eigentlich unverzichtbaren – Methode in der Reproduktionsmedizin entwickelt. Viele verschiedene Protokolle, die sich in Einzelheiten bei der Behandlung der zu konservierenden Proben vor, während und nach der Kryokonservierung unterscheiden, haben sich etabliert. Dabei lassen sich zwei grundlegende Verfahren differenzieren, zum einen das konventionelle „slow-freezing“ und zum anderen die Vitrifikation („rapid-freezing“).

Im Rahmen der konventionellen Methode wird die zu konservierende Probe langsam bei Kühlraten zwischen 0,1 K und 10 K pro min in Gegenwart von 5 % - 10 % membranpermeablen Kryoprotektiva (Glycerol, DMSO, etc.) gefroren. Im Gegensatz dazu werden bei der Vitrifikation möglichst hohe Kühlraten und teilweise sehr hohe Konzentrationen von Kryoprotektiva angewendet.

Anfänglich begrenzte sich im Bereich der Reproduktionsmedizin die Kryokonservierung nur auf Spermien und überzähliger befruchteter Eizellen bzw. Embryonen. Durch die rasante Entwicklung auf diesem Gebiet und der Veränderung der gesellschaftlichen Strukturen gewinnt diese Technik im Hinblick auf den Aufbau einer Fertilitätsreserve sowohl aus gesundheitlichen, als auch aus sozialen Gründen immer mehr Bedeutung. So ermöglicht die Kryokonservierung jungen Frauen und Männern Ihre Eizellen bzw. Spermien oder sogar ovariales bzw. testikuläres Gewebe einzufrieren, wenn sie auf Grund von Erkrankungen mit einer späteren Infertilität rechnen müssen oder eigentlich noch nicht an Familienplanung denken („social-freezing“).

I.16

## **Safe the cats: Gewinnung und Kryokonservierung von Eizellen gefährdeter Katzenarten**

**K. Jewgenow**

Leibniz Institut für Zoo und Wildtierforschung, Berlin

I.17

## **Untersuchungen zur Modellierung pharmazeutischer Einfrierprozesse**

**J. Heidingsfelder\*, H. Reinsch**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden

\* Korrespondenzautor

Das Einfrieren proteinhaltiger Produktlösungen in Flaschen ist eine einfache und kostengünstige Methode zur Stabilisierung pharmazeutischer Proteine in Produktlösungen aus dem biotechnologischen Herstellungsprozess. Im gefrorenen Zustand ist der Wirkstoff unempfindlich gegenüber physikalischen, chemischen und enzymatischen Abbauprozessen und kann zum Zwecke einer zeitlich entkoppelten Weiterverarbeitung gesammelt, gelagert und transportiert werden. Flascheneinfrierprozesse erlauben die zeitgleiche Prozessierung verschiedener Produkte oder Produktchargen und stellen für wissenschaftliche Labore und Kleinunternehmen oft die einzige verfügbare Methode dar, biotechnologisch erzeugte Proteinwirkstoffe lagerfähig zu machen.

Trotz der weiten Verbreitung ist das Einfrieren von Produktlösungen in Flaschen ein Prozess, der wissenschaftlich wenig untersucht und noch immer unzureichend verstanden ist. So kommt es trotz physiologischer Pufferung der Produktmedien und eines teilweisen Einsatzes von Kryoadditiven oftmals zu Produktverlusten, wenn im Gefrierprozess unerwartet physikalisch-chemische Stabilitätsgrenzen des Proteinwirkstoffs lokal überschritten werden.

Die Ergebnisse des am Beispiel eines Modellsystems<sup>1</sup> untersuchten Bottle-Freezing Prozesses stellen die räumliche Verteilung von Stoffkonzentrationen und pH-Wert dar. Die Verwendung von Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Minimierung des Produktverlustes in pharmazeutischen Einfrierprozessen wurde geprüft. Ein Vergleich der Umverteilung von Wirkstoff und löslichen Medienkomponenten bei verschiedenen Prozesstemperaturen wurde durchgeführt. Möglichkeiten für eine Prozessmodellierung werden vorgestellt.

---

<sup>1</sup> Intermediate Bulk – Medium aus dem biotechnologischen Herstellungsprozess einer rekombinanten Meerrettichperoxidase mit *Pichia pastoris*

I.18

## **Messunsicherheit und Temperaturlösung in der kryogenen Temperaturmessung**

**M. Süßer**

KIT Karlsruhe, Institut für Technische Physik ITEP

Die Messunsicherheit drückt die bekannte Tatsache aus, dass Messungen keinen exakten Wert liefern, sondern dass der Wert innerhalb eines Werteintervalls liegt. Sie bezeichnet einen Kennwert der dem Ergebnis einer Messung zugeordnet ist und stellt eine Stärke des Vertrauens dar. Eine hohe Temperaturlösung ist Voraussetzung, allerdings keine Garantie für eine kleine Messunsicherheit. Die Temperaturlösung wird bestimmt durch die Empfindlichkeit des Temperaturfühlers und die Auflösung des Messwertes durch das Messsystem.

Der Beitrag diskutiert die beiden Begriffe im Hinblick auf die Aufstellung eines Unsicherheitsbudgets für die kryogene Temperaturmessung.

I.19

## **Study of strain transmission of surface bonded FBG based long range displacement sensor for cryogenic application**

**R. Ramalingam**

Institut für Technische Physik (ITEP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

It is essential to measure the shrinkage/ expansion of the magnets during its operation. Also positioning/ aligning of the magnets can play a vital role in some experiments. So a displacement sensor that can work under extreme environmental conditions is needed to measure the displacement of the magnets. Fiber Bragg grating (FBG) have been considered as excellent sensor elements, as it appears to be useful for a variety of applications. In this paper, a Fiber Bragg Grating sensor is designed according to the requirement of maximum stroke of 500 mm with 1 mm accuracy over the complete stroke range. For achieving the specifications of the sensor, a signal transducing sensitivity part of the sensor was designed, and the fiber was then attached on the surface with a two component adhesive. A study of strain transmission of surface bonded FBG was conducted. The influence of bonding thickness and the bonding length was reported. The design and its performance of the long range displacement sensor were reported.



## Messtechnische Untersuchungen am Kryodruck-Wasserstofftank

Thomas Funke\*, Christoph Haberstroh

TU Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01069 Dresden, Deutschland  
[thomas.funke@tu-dresden.de](mailto:thomas.funke@tu-dresden.de), [christoph.haberstroh@tu-dresden.de](mailto:christoph.haberstroh@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Von den bekannten Wasserstoff-Speichern für den Fahrzeugeinsatz erreichen kryogene Wasserstoffspeicher die höchsten gravimetrischen und volumetrischen Speicherdichten.

Für die Ermittlung der Füllmasse in einem Kryodruck-Tank ist die Bestimmung der mittleren Dichte des gespeicherten Wasserstoffs notwendig, da derzeit kein anderes Massenbestimmendes Verfahren (z. B. Online-Wägung) bekannt ist, das unter den Randbedingungen eines bewegten Fahrzeuges eine ausreichend genaue Füllmassenbestimmung zulässt. Die Bestimmung der mittleren Dichte des überkritischen Wasserstoffs gelingt durch eine ausreichend genaue Messung des Tankdrucks und der mittleren Tanktemperatur. Letztere ist wegen starker thermischer Schichtung in verschiedenen Betriebszuständen schwierig.

Erste Simulationsrechnungen haben diese These bestätigt. Die Temperaturschichtung im Kryodruck-Wasserstofftank ist in einer Serie von Versuchen messtechnisch erfasst worden. Dazu sind im Tankinneren 6 Temperaturmessstellen installiert. Die Versuchsführung umfasst Befüll- und Entnahmeprozesse mit variierenden Randbedingungen vor allem hinsichtlich des Tankzustands zu Beginn der Betankung. Dabei auftretende Temperaturgradienten und deren Ausgleichzeiten bis zum nahezu vollständigen Abbau der thermischen Schichtung sind Teil der vorliegenden Untersuchung.

## Kühlbäder – automatisiertes Kaltdehnen in der Serienfertigung

Dipl.Ing. (FH) Wolfgang Flohr

Cryotherm GmbH & Co. KG, Produktentwicklung, 57074 Kirchen (Sieg)  
[wolfgang.flohr@cryotherm.de](mailto:wolfgang.flohr@cryotherm.de)

Die Herstellung formschlüssiger Verbindungen mittels Kaltdehnen durch den Einsatz von tiefkalt verflüssigtem Stickstoff ist in der Metallverarbeitung mittlerweile zu einem gängigen Verfahren geworden.

Allerdings hat dieses Verfahren aufgrund seiner Vorzüge den Stand der Einzelproduktion, dem eben mal Eintauchen einer Welle in einen mit flüssigen Stickstoff gefüllten Dewar verlassen und wird zunehmend weiter verbreitet in automatisierte Produktions-Anlagen und -Prozesse integriert.

Diese Integration der cryotechnischen Anforderungen in die automatisierten Produktionsanlagen fordert eine sehr spezielle Abstimmung zwischen der Cryotechnik, dem Anlagenbauer und dem Anwender.

Hierbei muss sich die Cryotechnik oft als sehr anpassungsfähig beweisen, ohne jedoch auf die cryotechnisch notwendigen Rahmenbedingungen zu verzichten.

Aufgezeigt werden einige konkrete Realisierungen und verschiedene Verfahrensvarianten.

### Stichwörter:

Kühlbäder, Kaltdehnen, flüssiger Stickstoff, Cryotechnik, Automatisierung, Serienfertigung

**Notizen**

**II.1.01**

## **Grundlagen von Ferroic Cooling**

**M. Acet**

Universität Duisburg-Essen, Experimentalphysik

**II.1.02**

## **Magnetokalorische Materialien und deren Anwendung**

**O. Gutfleisch**

TU Darmstadt, Institut für Materialwissenschaften

**II.1.03**

## **Kühlen mit NiTi– Grundlagen des elastokalorischen Kühlprozesses**

**S. Seelecke**

Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Unkonventionelle Akustik  
Campus, 66123 Saarbrücken  
Tel.: 0049-681-30271340, Fax: 0049-681-30271341  
E-Mail: [stefan.seelecke@mmsl.uni-saarland.de](mailto:stefan.seelecke@mmsl.uni-saarland.de)

Der Vortrag stellt ein neuartiges, FCKW-freies Kühlverfahren vor, das auf Phasenübergängen im Kristallgitter bestimmter Festkörper, sogenannter Formgedächtnislegierungen basiert. Der bekannteste Vertreter dieser Materialien ist NiTi; es zeichnet sich durch besonders große latente Wärmen aus (~25 kJ/kg), die bei mechanischer Be- und Entlastung abgegeben oder absorbiert werden.

Der Vortrag behandelt die Grundlagen eines auf diesem Prinzip basierenden Prozesses und erstellt dabei insbesondere eine Analogie zum konventionellen Kühlprozess. Ausgehend von einer kurzen Einführung in das Materialverhalten wird dann eine Methode vorgestellt, die es gestattet, die erforderlichen Arbeiten in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm sowie die absorbierten Wärmemengen in einem Temperatur-Entropie-Diagramm sichtbar zu machen und somit eine graphische Interpretation der erreichbaren Kühlleistungszahlen zu erhalten.

Ein typisches Zahlenbeispiel illustriert abschließend, dass mit diesem Prozess Leistungsziffern erreichbar sind, die idealerweise etwa doppelt so groß sein können wie beim Kompressionsverfahren.

II.1.04

## Magnetokalorische Kälteerzeugung – Eine Option für Haushaltskühlgeräte?

Robin Langebach\*, Christoph Haberstroh, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden, BITZER-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden  
[robin.langebach@tu-dresden.de](mailto:robin.langebach@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Kältemaschinen, die unter Ausnutzung des magnetokalorischen Effekts arbeiten, besitzen theoretisch das Potential, den Systemwirkungsgrad gegenüber heutigen konventionellen Anlagen signifikant zu steigern. Bei der praktischen Umsetzung der Maschinen deuten sich jedoch in vielerlei Hinsicht große Herausforderungen an.

In der Literatur werden bereits Aufbauten vorgestellt und diskutiert, die unter Verwendung verschiedener Varianten der Prozessumsetzung Kälteleistung im aktiven magnetischen Regenerator bereitstellen. Zumeist unberücksichtigt bleibt jedoch der nicht minder anspruchsvolle Schritt, die dort bereitgestellte Kälteleistung für eine nachgeschaltete Anwendung auszukoppeln – so zum Beispiel für ein Haushaltskühlgerät.

Im Rahmen dieser Arbeit werden bisher veröffentlichte experimentelle Aufbauten gegenübergestellt und deren Leistungsdaten sowie wichtige Kenngrößen analysiert. Anhand dieser Analyse soll ein virtuelles Kältemodul abgeleitet werden, welches eine magnetokalorische Kältemaschine mit gegenwärtig darstellbaren Leistungsdaten repräsentiert. Mit diesem Kältemodul wird eine Potentialanalyse für den Einsatz in Haushaltskühlgeräten durchgeführt.

**Stichwörter:**

Magnetokalorik, Haushaltskühlgerät

II.1.05

## Aufbau und Inbetriebnahme einer Absorptionskältemaschine

Michael Olbricht<sup>1\*</sup>, Stefan Scholl<sup>1</sup>, Andrea Luke<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik, 38106 Braunschweig  
[m.olbricht@tu-braunschweig.de](mailto:m.olbricht@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup> Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik, 34125 Kassel

\* Korrespondenzautor

Steigende Energiekosten und eine zunehmende Verknappung der Ressourcen stellen alle technischen Prozesse vor die Herausforderung energetisch effizienter und kostengünstiger zu werden. Im Bereich der Kältebereitstellung bestehen durch alternative Regelkonzepte und Kälteprozesse große Potenziale zur Bewältigung dieser Aufgaben. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen, bei denen in den verschiedenen Produktionsschritten sowohl große Abwärmemengen anfallen als auch der Bedarf an Kälteleistung vorhanden ist, bietet der Einsatz von Absorptionskältemaschinen. Besonders problematisch sind derzeit jedoch immer noch die Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit gerade bei kleineren Anlagen.

Zur Untersuchung der Phänomene im Absorptionskälteprozess wird eine Absorptionskältemaschine mit entsprechender Versuchsumgebung entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die kon-

strukturelle Ausführung sowie die ersten Erfahrungen bei der Inbetriebnahme der Anlage sollen veranschaulicht und diskutiert werden. Es wird gezeigt, dass die Verwendung des Arbeitsstoffpaares Wasser/Lithiumbromid hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit und hoher Dichte im Unterdruckbereich große Anforderungen an die Versuchsanlage stellt. Erste Messungen im Rahmen der Inbetriebnahme werden präsentiert. Weitere Untersuchungen die zukünftig mit der Anlage möglich sein werden und das methodische Vorgehen sollen abschließend aufgezeigt werden.

**Stichwörter:**

Absorption, Absorptionskältemaschine, AKM, Wasser/Lithiumbromid

II.1.06

## **Entwicklung und Erprobung einer 50 kW DE-Wasser/LiBr Absorptionskälteanlage**

**Mathias Safarik\*, Lutz Richter**

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, 01309 Dresden  
[mathias.safarik@ilkdresden.de](mailto:mathias.safarik@ilkdresden.de)

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen eines vom Verbundprojektes mit den Partnern TU Braunschweig und der Fa. Mithras haben die Fa. EAW und ILK Dresden ein Versuchsmuster einer Double-Effect (DE) Absorptionskältemaschine (AKM) mit 50 kW Kälteleistung entwickelt. Double-Effect AKM mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser/LiBr erreichen ein Wärmeverhältnis von  $\sim 1,2$  gegenüber  $\sim 0,75$  bei einstufigen Anlagen, d. h. aus einer kWh Antriebswärme können mit einer DE-AKM 1,3 kWh Kälte erzeugt werden. Durch das höhere Wärmeverhältnis sinken auch der spezifische, auf die Kälte bezogene Rückkühlbedarf sowie der elektrische Hilfsenergiebedarf. DE-AKM sind bisher nur mit wesentlich größeren Leistungen erhältlich.

Zielstellung des Verbundprojektes ist die Kopplung von neuartiger konzentrierender Solarkollektoren (Parabolrinnen) mit der DE-AKM. Das Versuchsmuster der DE-AKM wurde mit einem dampfbeheizten Generator ausgeführt. Alternativ kann die AKM auch mit einem thermoöl- oder druckwasserbeheiztem Generator ausgestattet werden.

Im Vortrag werden erste Ergebnisse der Anlagenvermessung dargestellt.

II.1.07

## **Analyse der Verteilung der Wärmedurchlässigkeiten zur Verschiebung der Betriebspunkte im Lösungsfeld für einstufiger H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskälteanlagen**

**Sarah Hunt\*, Stefan Petersen, Jan Albers, Felix Ziegler**

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
[sarah.hunt@tu-berlin.de](mailto:sarah.hunt@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

In Absorptionskälteanlagen zur Gebäudeklimatisierung ist Lithiumbromid/Wasser aufgrund seiner stofflichen und kalorischen Eigenschaften das meistverwendete Stoffpaar. Eine prozesstechnische Schwäche liegt in der möglichen Kristallisation des Lösungsmittels.

In der Literatur wird häufig beschrieben, dass hohe Rückkühltemperaturen zu höheren LiBr-Massenanteilen führten. Mathematisch thermodynamische Grundüberlegungen in der vorliegenden Arbeit zu den Einflüssen externer Temperaturen, sowie Vermessungen an unterschiedlichen Anlagentypen an der TU Berlin zeigen, dass höhere Kühlwassertemperaturen mögliche Anlagenzustände eher zu niedrigen LiBr-Anteilen hin verschieben. Durch Anhebung der Heißwassertemperatur wird das Betriebsfeld hingegen in Richtung höherer LiBr-Massenanteile erweitert. Die Lage innerhalb des möglichen Betriebsfeldes wird durch die Wärmedurchlässigkeiten (UA-Werte) der Wärmeübertrager bestimmt.

Höhere Wärmedurchlässigkeiten im Desorber/Kondensator führen dabei zu höheren LiBr-Massenanteilen, wohingegen höhere Wärmedurchlässigkeiten im Absorber/Verdampfer Verschiebungen zu niedrigeren LiBr-Massenanteile bewirken.

Die mögliche Verschiebung des Betriebspunktes einer H<sub>2</sub>O/LiBr-Absorptionskälteanlage im Lösungsfeld durch unterschiedliche Anordnung der Wärmedurchlässigkeiten wurde für Anlagen mit gleicher Betriebscharakteristik durchgeführt. Eine Absenkung der LiBr-Massenanteile in Betriebspunkten mit hohen Heißwassertemperaturen von über 60 % auf z. B. 55 % wird gezeigt.

Diese Erkenntnisse wurden bei Auslegung neuer Absorptionskälteanlagen genutzt. Eine entsprechend entwickelte Absorptionskälteanlage erlaubt höhere Heißwassertemperaturen und damit auch Kühlwassertemperaturen von bis zu ca. 50 °C am Absorbereintritt. Dadurch wird die Kombination mit trockenen Rückkühlwerken oder der Betrieb als Wärmepumpe für Niedertemperaturheiznetze mit Temperaturspreizungen von z. B. 55/45 °C möglich.

**Stichwörter:**

Absorptionskälteanlage, Kristallisation, Rückkühlung, Wärmepumpe, Entwicklung

II.1.08

## **Effizienzsteigerung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine**

**M. Müller\*, K. Spindler**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart  
Tel.: 0049-711-685-63369, Fax: 0049-711-685-63503  
E-Mail: [mueller@itw.uni-stuttgart.de](mailto:mueller@itw.uni-stuttgart.de)

\* Korrespondenzautor

Das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschinen im Leistungsbereich bis 12 kW.

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 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Absorptionskältemaschine vorgestellt und bewertet. Ein entscheidender Punkt ist dabei der Austreiber der Absorptionskältemaschine. Er wurde in den vorhergehenden Anlagengenerationen des ITW in Behälterbauweise realisiert. Der Austreiber stellte dabei das größte und teuerste Bauteil der Anlage dar und bot somit das größte Optimierungspotenzial. Aufgrund seines Volumens war er außerdem mit einer großen Menge Ammoniak/Wasser gefüllt. In der letzten Anlagenkonfiguration konnte der Austreiber mit einem Plattenwärmeübertrager realisiert werden, wodurch Anlagengewicht und Anlagenvolumen deutlich reduziert werden konnten. Die Ammoniakmenge im System hat sich von 15 kg auf 4 kg verringert, wodurch das Gefahrenpotenzial der Anlage stark verringert und der Umgang mit dem System erleichtert wurde. Die Leistung des Systems konnte im Zuge dieser Umbauten trotz der beschriebenen Einsparungen weiter gesteigert werden.

Durch die vorgestellten Maßnahmen basieren alle wärmeübertragende Bauteile der Absorptionskältemaschine auf Plattenwärmeübertragern, wodurch die spezifischen Kosten (€/kW) entscheidend reduziert werden konnten.

II.1.09

## **Einfluss der Oberflächenstruktur auf das Benetzungsverhalten und den Wärme- und Stoffübergang an Rohrbündelabsorbern**

**Cord Tomforde\*, Andrea Luke**

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

\* Korrespondenzautor

Die Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsprozessen ist eine der Schlüsselaufgaben in den Ingenieurwissenschaften, um auf die Verknappung natürlicher Ressourcen und den Klimawandel zu reagieren. Dies gilt insbesondere für die Kältetechnik, da für die Kältebereitstellung ein signifikanter Anteil des gesamten deutschen Strombedarfs benötigt wird. Der Einsatz von Absorptionskältemaschinen anstelle von konventionellen Kompressionskältemaschinen ist in diesem Zusammenhang ein möglicher Lösungsansatz, da hierbei als Antriebsenergie die in nahezu allen industriellen Prozessen anfallende Abwärme eingesetzt werden kann, wodurch sich eine signifikante Einsparung an elektrischer Energie ergibt. Aktuell erreichen Absorptionskältemaschinen jedoch keine mit Kompressionskältemaschinen vergleichbare Zuverlässigkeit und Effizienz. Als den Prozess limitierende Komponente hat sich in verschiedenen Untersuchungen der Absorber erwiesen.

Daher wird in dieser Arbeit der Einfluss von mikrostrukturierten Rohroberflächen auf die auf die Benetzung und den Wärme- und Stoffübergang horizontaler Rohrbündelabsorber untersucht und daraus Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung der Apparate diskutiert. Dabei werden zunächst die betrachteten Oberflächenstrukturen detailliert hinsichtlich ihrer Topographie und der Rauheitsparameter charakterisiert und ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur und dem Benetzungsverhalten hergestellt. Im Anschluss wird die Hydrodynamik des Rieselfilms im gesamten Rohrbündel untersucht und die Auswirkungen der Oberflächenmodifikationen auf den Wärme- und Stoffübergang am horizontalen Rohrbündelabsorber diskutiert. Die Ergebnisse werden mit Erkenntnissen aus der Literatur verglichen.

**Stichwörter:**

Absorber, Benetzbarkeit, Oberflächenstruktur, Wärme- und Stoffübergang

II.1.10

## **Betriebserfahrungen mit Gasabsorptionswärmepumpen**

**José Luis Corrales Ciganda, Rupert Graf, Annett Kühn\*, Felix Ziegler**

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
Fon: 030/314-28482, Fax: 030/314-22253  
E-Mail: [annett.kuehn@tu-berlin.de](mailto:annett.kuehn@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautorin

Gaswärmepumpen können im Auslegungspunkt die eingesetzte Primärenergie deutlich effizienter nutzen als die modernsten Brennwertkessel. Aber genauso wie Kessel oft einen gegenüber dem Normnutzungsgrad niedrigeren Jahresnutzungsgrad aufweisen, ist der Jahresnutzungsgrad von Gaswärmepumpen abhängig von Installation, Verschaltung und Regelung und kann dadurch deutlich schlechter als erwartet sein. Im Rahmen eines durch die Europäische Union und das Land Berlin im Umweltentlastungsprogramm II mit der Fördernummer 11320UEPII/2 finanzierten Projektes soll das Energieeinsparpotenzial von Gaswärmepumpen anhand von drei Einsatzbeispielen untersucht und insbesondere die Regelungsstrategie optimiert werden.

Die Ergebnisse der ersten Monitoringphase zeigen, dass installierte Anlagen nur dann hohe thermische Effizienzen erreichen können, wenn sie sinnvoll hydraulisch und regelungstechnisch integriert werden. Wie auch bei Kesseln und elektrischen Wärmepumpen mangelt es jedoch oft am fachgerechten hydraulischen Design und einer angepassten Regelungsstrategie, was insbesondere zu häufigem Takten der Wärmepumpen und damit verbundenen Effizienzeinbußen führt. Der Stromverbrauch der Gasabsorptionswärmepumpen ist zwar gering, aber eine primärenergetische Betrachtung der Effizienz zeigt, wie wichtig es ist, auch den Strombedarf weiterer systembedingter Verbraucher wie Pumpen und Ventilatoren gering zu halten.

## II.1.11

## Demonstrationsanlage zur Solaren Kühlung in Ägypten

Peter Schwerdt

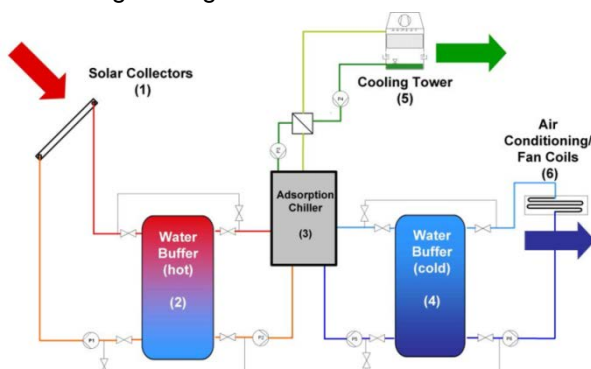
Fraunhofer UMSICHT Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik  
 Bereich Energie, Abt. Thermische Speicher und Systeme  
 Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen  
[peter.schwerdt@umsicht.fraunhofer.de](mailto:peter.schwerdt@umsicht.fraunhofer.de)

Wie viele in den ariden Gebieten der Welt liegende Länder besitzt auch Ägypten eine eher schwache Struktur der elektrischen Netze, die häufig insbesondere durch den Stromverbrauch der stetig wachsenden elektrisch betriebenen Klimakälteerzeugung überlastet werden. Da auch der damit verbundene steigende Primärenergiebedarf das Land vor immer größere Probleme stellt, könnten zukünftig mit Sonnenwärme angetriebene Kältemaschinen eine Primärenergie sparende, umweltfreundliche und CKW-freie Alternative zur konventionellen Kompressionskälteerzeugung darstellen.

Zur Demonstration und Erprobung der „Solaren Kühlung“ unter den realen strukturellen und klimatischen Bedingungen Ägyptens wurde in einem Kooperationsprojekt von Fraunhofer UMSICHT und der Universität von Assiut eine funktionsfähige Anlage errichtet (s. Bild 1). Betrieben wird die Adsorptionskältemaschine deutschen Ursprungs mit 75-90 °C heißem Wasser aus einer 40 m<sup>2</sup> Vakuumröhren-Solarkollektoranlage. Sie erbringt eine Nennkälteleistung von 7,5 kW, die zur Kühlung eines Seminarraums eingesetzt wird. Mit je einem Warm- und Kaltwasserspeicher lassen sich Unterschiede zwischen Heizwärmeangebot und Kältebedarf ausgleichen und die Raumkühlung auch in die Abendstunden verlängern. Ein kleiner Nasskühlturm auf dem Dach des Gebäudes dient als Rückkühler, der der Kältemaschine auch bei Temperaturen von über 40 °C ausreichend Kühlwasser bereitstellt. Ein Datenerfassungssystem mit zahlreichen Messstellen ermöglicht eine umfassende Betriebsüberwachung und automatische Steuerung.

Nach endgültiger Fertigstellung und erfolgreicher Inbetriebnahme im Mai 2012 begann der erste mehrmonatige Kühlbetrieb, der im Sommer 2013 fortgesetzt wird. Herausfordernd ist die hohe Staubbelastung der Stadtluft, die ein häufiges, schonendes Reinigen der CPC-Kollektoren erfordert. Verbesserungsbedürftig ist auch der hohe Wasserverbrauch der Rückkühlung.

Betrieb und Untersuchungsprogramm sind in den Lehrplan der Fakultät eingebunden und sollen auch in den folgenden Jahren zur wissenschaftlichen und praktischen Ausbildung des ingenieurwissenschaftlichen Nachwuchses sowie für die Information von Unternehmen, Verbänden und Verwaltungen fortgesetzt werden.



**Bild 1:** Vereinfachtes Anlagen-Schema der solaren Kühlung an der Universität von Assiut



## Möglichkeiten und Einsatzpotentiale neuer Absorptionskälteanlagen

**Christopher Paitazoglou\*, Jan Albers, Christian Hennrich, Walther Hüls, Sarah Hunt, Wolfgang Lanser, Stefan Petersen, Martin Schröder, Felix Ziegler**

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
[christopher.paitazoglou@tu-berlin.de](mailto:christopher.paitazoglou@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Thermisch angetriebene Kälteanlagen und hier vor allem Absorptionskälteanlagen moderner Bauart [1] können mit einer neuen volumetrischen Leistungsdichte, Steigerung gegenüber dem Markt um mehr als 25 %, und niedrigem Investitionskostenpotential, Verringerung gegenüber verfügbaren Anlagen um bis zu 50 % im kleinen Leistungsbereich, eine technische und wirtschaftliche Alternative zu elektrisch betriebenen Systemen in der Gebäudeklimatisierung darstellen.

Die konzeptionelle Entwicklung neuer Absorptionskälteanlagen wurde 2012 abgeschlossen und wird in 2013 ff. in einem breit angelegten Feldtestvorhaben neben den Optimierungsmöglichkeiten bisheriger Anwendungsfelder auch für diese Anlagentechnologie neue Einsatzfelder aufzeigen. Das Vorhaben wird im Rahmen des BMWi Programms EnEff Wärme in Begleitung durch den Projektträger Jülich umgesetzt.

Verschiedene Feldinstallationen, darunter Absorptionskälteanlagen mit trockener Rückkühlung bei bis zu 38 °C Umgebungstemperatur, Anlagen, die den Fernwärmerücklauf bei 60 °C als Antrieb zur Kühlung von Technikzentralen nutzen und Anwendungen mit Wärmepumpenbetrieb für Heizungsnetze auf Niedertemperaturstandard mit 55/45 °C unterstreichen das neue erweiterte Anwendungspotenzial thermisch angetriebener Kälteanlagen.

Neben der Erweiterung der thermischen Betriebsgrenzen erlaubt die Modularität der Anlagen unterschiedliche Verschaltungsvarianten, so dass modulare Systeme über den gesamten Betriebsbereich bei Umgebungstemperaturen zwischen 10 und 40 °C sich den Bedingungen anpassen, um wahlweise die jeweils beste Leistung oder Effizienz zu erreichen.

### **Stichwörter:**

Wärmepumpe, Fernwärmeauskühlung, Leistungsdichte, Effizienz, Betriebsführung

- [1] Petersen, S., Hansske, A., Hennrich, C., Hüls, W., Stangl, J., Mittermaier, M., Helm, M., Zachmeier, P., Natzer, S., Lanser, W., Ziegler, F.: Development of a 50 kW absorption chiller. 23<sup>rd</sup> IIR Int. Congr. of Refrigeration, 21.-26. Aug. 2011, Prague, Czech Republic.

II.1.13

## Optisch- und CFD-gestützte Entwicklung eines Ammoniak-Kanalabsorbers

Gerwin Schmid<sup>1\*</sup>, Christoph Reichl<sup>1</sup>, Thomas Fleckl<sup>1</sup>,  
Werner Pink<sup>2</sup>, Christian Halmdienst<sup>2</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department,  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
Tel.: +43 (0) 50550 6303, E-mail: [gerwin.schmid@ait.ac.at](mailto:gerwin.schmid@ait.ac.at)

<sup>2</sup> Pink GmbH, Bahnhofstrasse 22, 8665 Langenwang, Österreich  
E-Mail: [w.pink@pink.co.at](mailto:w.pink@pink.co.at)

\* Korrespondenzautor

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

Diese Arbeit behandelt die Untersuchung von Absorptions-Blasenströmungen in Kanälen mit einem Querschnitt 1-20 mm<sup>2</sup> und die daraus resultierende Entwicklung eines Kanalabsorbers für Ammoniak-Anwendungen. Die Untersuchungen erfolgten dabei sowohl mit gängigen Methoden, wie Temperatur-, Druck- und Massendurchflussmessung, als auch mit optischer Bilderfassung mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera. Dabei wurden neben den unterschiedlichen Kanalquerschnitten auch verschiedene Kanalgeometrien untersucht, wie zum Beispiel teilweise verbundene Kanäle. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse waren Grundlage für die Entwicklung und den Bau eines Kanalabsorbers aus mehreren geätzten Kanalplatten. Dieser Absorber wurde im realen Betrieb in zwei verschiedenen Anlagen, i. e. eine gasbefeuerte Absorptionswärmepumpe und eine heißwasserbetriebene Absorptionskältemaschine, vermessen. Neben den Ergebnissen aus den Absorbertesten wird in dieser Arbeit außerdem auf die aufgetretenen Probleme und deren Lösungen eingegangen.

**Stichwörter:**

Absorption, Ammoniak, Blasen, Kanal, Plattenwärmeübertrager,

II.1.14

## Absorptionswärmewandlungs- und die Erweiterung als Absorptionswärmewandler

Falk Cudok\*, Felix Ziegler

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Marchstraße 18, 10587 Berlin

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Effizienz und Betriebssicherheit von Energiesystemen mit saisonaler Energiespeicherung in Aquiferen für Stadtquartiere“ (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie) wird an der Technischen Universität Berlin ein Absorptionswärmewandler aufgebaut und untersucht. Unter dem Begriff Absorptionswärmewandler ist eine Anlage zu verstehen, die sowohl als Absorptionswärmepumpe bzw. -kälteanlage als auch als Wärmewandlungs- (auch als Wärmepumpe Typ II bekannt) betrieben werden kann. Mit Hilfe des Wärmewandlungs- ist es möglich, einen Teil eines Wärmestroms auf ein höheres Temperaturniveau zu heben und die Energieeffizienz durch Wärmerückgewinnung zu steigern. Durch die

Kombination der drei Prozesse in einer Anlage ergibt sich ein größeres Feld von möglichen Betriebspunkten und die Auslastung einer einzelnen Anlage kann somit erhöht werden.

In diesem Beitrag wird der Versuchsstand und der Absorptionswärmewandler, welcher aus einer - sich im Feldtest befindlichen - Kälteanlage abgeleitet wird, vorgestellt. Dabei wird der Prozess des Absorptionswärmetransformators vorgestellt und dem der Wärmepumpe bzw. Kälteanlage gegenübergestellt. Des Weiteren wird auf die Verschaltung eingegangen, die den Wechsel zwischen den Betriebsarten ermöglicht.

**Stichworte:**

Absorptionswärmepumpe, Absorptionskälteanlage, Wärmepumpe Typ II

**II.1.15**

**Prediction of the overall heat transfer coefficient  
for the condensation on horizontal integral finned tubes  
with internal helical ribs**

**Alaa Ruhma Al-Badri\*, Andreas Paul Fröba**

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT), Universität Erlangen-Nürnberg,  
Am Weichselgarten 8, D-91058 Erlangen

\* Korrespondenzautor

A prediction method for the overall heat transfer coefficient (HTC) during the condensation on single integral finned tubes was developed. Inside the tubes, the convective heat transfer for cooling water is enhanced by helical ribs. The prediction method takes into account the annular temperature distribution around the tube wall and the longitudinal temperature distribution for the cooling water. The tube is divided into cross sections of a width which equals to one fin pitch. The local heat transfer rate is determined from the first cross section at the cooling water inlet to the last section at the outlet and, thus, the total heat transfer rate is accessible. This allows the determination of the overall and of the condensation HTC. The calculations are based on our element by element prediction model for the condensation HTC and a modified correlation for the convective HTC inside the tubes. Experiments were conducted for the condensation of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) on a copper integral finned tube at a saturation temperature of 37 °C. The heat flux ranges between 11.8 and 102.4 kW m<sup>-2</sup> by varying the cooling water velocity between 0.5 and 5.5 m.s<sup>-1</sup> and by changing the inlet temperature between 16.2 and 35.5 °C. For low heat fluxes, the experimental results show an enhancement of the condensation HTC with increasing flow velocity of cooling water. The overall HTC increases remarkably with increasing velocity of the cooling water when the flow changes from the transition mode to the turbulent one. In comparison to our experimental data, the mean absolute percentage deviation of the predicted results for the heat flux, overall, and condensation HTCs are 4.1 %, 6.4 %, and 12.9 %, respectively.

II.1.16

## Zum Einfluss von Oberflächenstrukturen auf den Wärmeübergang beim Sieden

Björn C.F. Müller, Andrea Luke\*

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

\* Korrespondenzautorin

Die Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz von Kälteanlagen hängt u. a. von den im Verdampfer erzielten Wärmeübergangskoeffizienten ab. Gezielte Steigerungen des Wärmeübergangskoeffizienten werden durch Modifikation der Oberflächen von Verdampferrohren erzielt. Deshalb werden Berechnungsmethoden für den Einfluss von Oberflächenstrukturen (Rauheit, Rippenstrukturen und hinter-schnittene 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 lieferten für Glattrohre und die als Kältemittel in Frage kommenden reinen Flüssigkeiten relativ gute Ergebnisse für einen begrenzten Bereich von Druck und Wärmestromdichte. 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.1.17

## Experimentelle Untersuchungen zur Drallströmung in Spot-Verdampfern bei hohen Wärmestromdichten

Frank Humpfer<sup>1\*</sup>, Tobias Knipping<sup>1</sup>, Michael Arnemann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Institute of Materials and Processes (IMP), 76133 Karlsruhe  
[tobias.knipping@hs-karlsruhe.de](mailto:tobias.knipping@hs-karlsruhe.de), [frank.humpfer@hs-karlsruhe.de](mailto:frank.humpfer@hs-karlsruhe.de)

<sup>2</sup> Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU), 76133 Karlsruhe  
[michael.arnemann@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.arnemann@hs-karlsruhe.de)

\* Korrespondenzautor

Spot-Verdampfer sind Verdampfer zur punktuellen Kühlung bei hohen Wärmestromdichten in kleinen Bauräumen. Anwendungsgebiete sind die Kühlung von Kunststoffspritzgusswerkzeugen oder von Leistungselektronik bzw. Antriebstechnik. Die Funktionsweise beruht auf der Kombination einer Spraykühlung mit einer gewöhnlichen Rohrströmung. Die Spraykühlung erreicht auch bei in

Rohrströmungen überkritischen Wandüberhitzungen hohe Wärmestromdichten. Im Rohrströmungsteil hingegen treten die bekannten Phänomene einer Siedekrise bei Überschreiten der kritischen Wärmestromdichte auf.

Um auch im Rohrströmungsteil der Spot-Verdampfer hohe Wärmestromdichten bei hohen Wandüberhitzungen zu erreichen, soll die kritische Wärmestromdichte durch geeignete Maßnahmen erhöht werden. Nach Abwägen verschiedener Methoden wird auf die Erzeugung einer Drallströmung im Rohrströmungsteil zurückgegriffen. Grundlegende Geometrieparameter werden anhand einer Betrachtung des Modells von Yagov [1] abgeleitet. Es werden 2 Methoden zur Erzeugung der Drallgeometrie experimentell untersucht, wobei eine durch den Einsatz kostengünstiger Normteile darstellbar ist.

Die experimentellen Untersuchungen ergeben Steigerungen der mittleren kritischen Wärmestromdichte der Spot-Verdampfer mit Drallgeometrie um bis zu 80 %. Durch diese geometrischen Änderungen kann das Kühlvermögen der Spot-Verdampfer im Vergleich zu Spot-Verdampfern ohne Drallströmung bei hohen Wärmestromdichten erheblich gesteigert werden.

**Stichwörter:**

Spot-Verdampfer, Spraykühlung, Drallströmung, R404A

**Literaturverzeichnis**

- [1] Yagov, V., 2005: Heat transfer and crisis in swirl flow boiling; Experimental Thermal and Fluid Sciences 29, S. 871-883

II.1.18

## Auswahl und thermodynamische Systemsimulation von Arbeitsfluiden für Hochtemperaturwärmepumpen

Florian Reißner<sup>1\*</sup>, Bernd Gromoll<sup>1</sup>, Vladimir Danov<sup>1</sup>, Jochen Schäfer<sup>1</sup>, Jürgen Karl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siemens AG, Corporate Technology, 91058 Erlangen  
[florian.reissner.ext@siemens.com](mailto:florian.reissner.ext@siemens.com)

<sup>2</sup> Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik, 90429 Nürnberg

\* Korrespondenzautor

Die Umwelteigenschaften von Arbeitsfluiden für die Kälte- und Wärmepumpentechnik werden derzeit stark diskutiert. Aufgrund gesetzlicher Rahmenbedingungen müssen alternative Fluide identifiziert und bewertet werden. Speziell für den Einsatz in Hochtemperaturwärmepumpen (>100 °C) gibt es derzeit einen Mangel an geeigneten Arbeitsfluiden. In dieser Arbeit wird eine Vielzahl von Arbeitsfluiden nach Kriterien bewertet. Die Auswahl der Kriterien wird im Detail beschrieben. Weiter wird eine thermodynamische Systemsimulation durchgeführt, um die Leistungszahl und volumetrische Heizleistung zu bestimmen. Dabei werden neben den gängigen Kreisläufen mit näherungsweise isothermen Wärmeübergängen (Verdampfung und Kondensation) auch Arbeitsfluide im überkritischen Zustand betrachtet. Als Fazit aus den Kriterien und der Systemsimulation wird eine Auswahl an Arbeitsfluiden mit zukunftssicheren Umwelteigenschaften und vielversprechenden thermodynamischen Leistungsdaten für den Einsatz in Hochtemperaturwärmepumpen identifiziert.

**Stichwörter:**

Arbeitsfluid, Hochtemperaturwärmepumpe, Umwelteigenschaften, Leistungszahl

II.1.19

## **Eignungsuntersuchungen und thermodynamisches Verhalten von Kältemittel-Öl-Gemischen für R245fa Anwendungen**

**Steffen Feja<sup>1\*</sup>, Christian Puhl<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> FUCHS EUROPE SCHMIERSTOFFE GMBH, Friesenheimer Str. 19, 68169 Mannheim  
[christian.puhl@fuchs-europe.de](mailto:christian.puhl@fuchs-europe.de)

\* Korrespondenzautor

Im Vortrag wird auf die Auswahl von Ölen und auf die thermodynamischen Eigenschaften von Ölen in Organic Rankine Cycle (ORC) und Wärmepumpen-Anwendungen mit dem Arbeitsstoff R245fa eingegangen. Verschiedene Öle werden bezüglich Ihrer Eignung mit R245fa in den genannten Anwendungen aufgeführt. Anhand ausgewählter thermodynamischer Eigenschaften werden die verschiedenen Öltypen analysiert. Bei dieser auf Literaturdaten basierenden Vorauswahl werden Viskosität, Polarität und Mischbarkeit berücksichtigt. Fehlende Mischbarkeitsdaten mit R245fa, insbesondere bei höheren Temperaturen über 100 °C, wurden für einige Öle durch Experimente bestimmt, um die Auswahl besser einschränken zu können.

Für die darauf folgenden umfassenden experimentellen Untersuchungen wurden dann ausgewählte Ölkandidaten im Gemisch mit R245fa untersucht. Als erstes wurden Mischbarkeitsuntersuchungen bis 120 °C durchgeführt. Danach wurde die Dichtefunktion der Mischungen ermittelt und die für die weiteren Untersuchungen verwendete Temperatur-Konzentrations-Funktion der Dichte aufgestellt. Der Dampfdruck der Gemische wurde bei Temperaturen von bis zu 120 °C bestimmt. In einer neuartigen Apparatur konnte die Viskosität der Gemische bis zu dieser Temperatur im Bereich von bis zu 0,25 mPa s bestimmt werden.

Im Vortrag werden Messmethoden beschrieben, welche die Ermittlung der thermodynamischen Eigenschaften von reinen Kältemitteln und Ölen und ihrer Mischungen ermöglichen. Neben der Bestimmung der Mischungslücken geht der Vortrag auch auf die Messung der Dichte, des Dampfdruckes und der Viskosität ein. Vorgestellt werden Apparate, welche die Bestimmung der thermodynamischen Daten bis zu Temperaturen von 120 °C und Drücken von bis zu 150 bar ermöglichen. Diese Messmethoden wurden am ILK neu aufgebaut, teilweise wurden kommerzielle Geräte weiterentwickelt.

II.1.20

## **Praktische Anwendung numerischer Strömungssimulationen**

**Andreas Zürner**

Güntner AG & Co. KG, Grundlagenentwicklung, 82256 Fürstenfeldbruck  
[andreas.zuerner@quentner.de](mailto:andreas.zuerner@quentner.de)

Die rasante Entwicklung im Bereich der Chipherstellung macht es zunehmend möglich, selbst mit normalen Desktop-PCs in annehmbarer Zeit numerische Strömungssimulationen von durchaus hoher Qualität durchzuführen. Zusammen mit Ergebnissen aus realen Versuchen lässt sich so mit vertretbarem Aufwand der Erkenntnisgewinn vervielfachen und Aussagen werden möglich, die durch echte Messungen nur sehr zeitaufwendig und kostenintensiv zu gewinnen sind. Selbst einfache, isotherme Simulationen liefern dabei wertvolle Informationen für die Entwicklung, den Betrieb und die richtige Aufstellung von Verdampfern, Verflüssigern und Rückkühlern in der stationären Kältetechnik.

Konkrete Anwendung bei Güntner findet die numerische Strömungssimulation zunehmend bei der Produktentwicklung (z. B. neue Containerversion des GFD/GVD oder auch neues Hydro-Spray-System), sowie bei kundenspezifischen Problemen, wie die richtige Aufstellung von Geräten. Allerdings können auch ganz grundlegende Fragen, wie beispielsweise die Wurfweite bestimmter Geräte geklärt werden. Die Verwendung einer frei verfügbarer Open Source Software ermöglicht es, das Simulationsprogramm individuell an spezifische Bedürfnisse anzupassen und ohne hohe Lizenzkosten von den enormen Möglichkeiten, die die numerische Strömungssimulation bietet, zu profitieren.

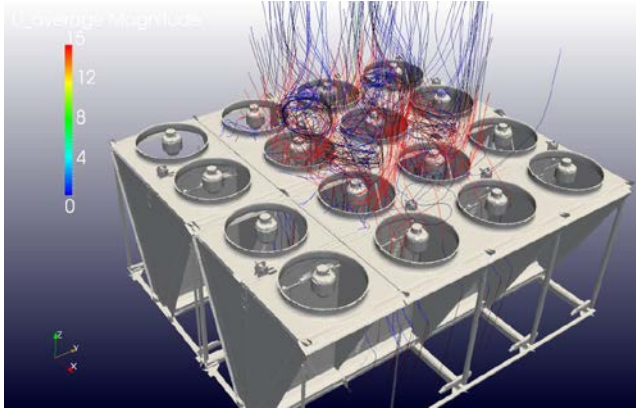


Abb. 1: Simulation der isothermen Luftströmung durch eng beieinander stehende V-förmige Rückkühler. Aus dieser Rechnung kann beispielsweise der zusätzliche Druckverlust, den diese Art der Aufstellung verursacht ermittelt werden.

**Stichwörter:**

numerische Strömungssimulation, CFD, isotherme Strömung

II.1.21

## Co-Simulation des dynamischen Wärmeübertragungsverhaltens einer Kühlplatte

Jan Philipp Rückert\*, Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz

Institut für Thermofluidynamik, Technische Thermodynamik,  
Technische Universität Hamburg-Harburg, Denickestraße 17, 21073 Hamburg  
[jan.rueckert@tu-harburg.de](mailto:jan.rueckert@tu-harburg.de)

\* Korrespondenzautor

In der Automobilindustrie wird mehr und mehr eine ganzheitliche Simulation des Fahrzeuges angestrebt. Dazu ist es notwendig, u. a. die Klimatisierung des Fahrzeuges für jeden möglichen Betriebszustand abbilden zu können. Hierbei stellen die neue Energiespeicher bei Hybrid- und Elektro-Fahrzeugen neue Anforderungen an das Klimasystem und seiner Modellierung, da diese Komponenten stets in einem engen Temperaturbereich von ca. 20-40 °C gehalten werden müssen.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher, das dynamische Wärmeübertragungsverhalten der Kühlplatte einer Fahrzeug-Batterie zu bestimmen. Dazu wird zum einen eine geeignete Simulation erstellt und durchgeführt und zum anderen ein Teststand aufgebaut und vermessen.

Für die Abbildung des dynamischen Systems des Kühlkreislaufes eignet sich eine objektorientierte, akausale Modellierungssprache wie Modelica. Die Modellierung erfolgt auf Basis der Modelica-Bibliothek AirConditioning. Für die örtliche Auflösung der Temperatur innerhalb der Kühlkomponente wird das FEM-Programm COMSOL Multiphysics verwendet. Feld- und Systemsimulation werden über MATLAB gekoppelt.

Zur Validierung der Modelle wird an dem Teststand das Wärmeübertragungsverhalten, d. h. der Verlauf von Temperatur, Druck, Verlustwärme und Massenstrom gemessen.



Aus dem Vergleich von Simulation und Messung sollen neben der Validierung der Simulation auch Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie die Kühlplatte rein objektorientiert durch Modelica abgebildet werden kann, um die Einbindung eines rechenintensiven FEM-Programmes zu vermeiden.

**Stichwörter:**

Wärmeübertragung, Batteriekühlung, Automobil, Co-Simulation

II.1.22

## **Entwicklung und Erprobung der Vakuumeistechnologie zur Erzeugung von Eis-Wasser-Gemischen**

**Marcus Honke\*, Mathias Safarik**

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, 01309 Dresden  
[marcus.honke@ilkdresden.de](mailto:marcus.honke@ilkdresden.de)

\* Korrespondenzautor

Am ILK Dresden wird eine Technologie zur energieeffizienten Erzeugung von Eis-Wasser-Gemischen entwickelt, welche auf der ILK-Turboverdichtertechnologie aufbaut. Die Eiserzeugung findet durch Direktverdampfung von Wasser im Vakuum statt. Wasser ist gleichzeitig Kältemittel und Kälte Träger. Die Verdampfungstemperatur liegt nur geringfügig unterhalb von 0 °C. Dadurch liegt die Effizienz des Eiserzeugungsverfahrens deutlich über der herkömmlicher Eisspeicher oder Eis-Slurry Erzeuger.

Im Vortrag werden der aktuelle Stand der Entwicklung und erste Ergebnisse dargestellt.

II.1.23

## **Messverfahren für Adhäsionskräfte von Eiskristallen**

**Jakob Schaaf\*, Michael Kauffeld**

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

\* Korrespondenzautor

Eisbrei, ist ein Zweiphasengemisch aus Wasser, kleinen Eispartikeln und einem gefrierpunktsenkendem Zusatzstoff wie z. B. Salz, Glykol oder Ethanol. Die kleinen Eispartikel werden durch Eisbreigeneratoren erzeugt. Die heterogene, mechanische Eiskristallerzeugung ist die am häufigsten eingesetzte Methode. Hierbei werden Eiskristalle an einer gekühlten Oberfläche erzeugt und mechanisch abgelöst, wodurch ein Energieeintrag in das System erfolgt. Der Energieeintrag, der notwendig ist um die Adhäsionskräfte zwischen den Eiskristallen und der Oberfläche mechanisch zu lösen wird in diesem Forschungsprojekt ermittelt.

Im weiteren Verlauf soll ein Verfahren entwickelt werden, welches die entstandenen Eispartikel durch einen kurzen Wärmeimpuls von der Wand ablöst. Kern des Forschungsprojektes ist die Untersuchung des Energieeintrages bei dieser thermischen Überwindung der Adhäsionskräfte. D.h. es wird ein Wärmestrom in die Adhäsionsstelle induziert, der eine grenzschichtnahe Phasenumwandlung des Eises bewirkt, so dass das Eiskristall von der Oberfläche entfernt werden kann. Der Wärmeenergieeintrag durch die thermische Kristallablösung wird mit der mechanischen Kristallablösung verglichen.

In dem Paper werden die Verfahren zur Messung der Adhäsionskräfte verglichen sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren gegenüber gestellt. Für das Forschungsprojekt wird ein Verfahren zur mechanischen Ermittlung der Adhäsionskräfte anhand der Bewertungskriterien ausgewählt.



## **Partikelgrößenverteilung in Eisbreigemischen – Methoden der Eispartikelmessung in Eisbreigemischen**

**Matthias Koffler\*, Michael Kauffeld**

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

\*Korrespondenzautor

Eisbrei ist ein zukunftssträchtiger Kälteträger mit großem Potenzial. Um dieses Potenzial möglichst optimal nutzen zu können, sind Kenntnisse über die Eispartikelgröße und deren Größenverteilung wichtige Faktoren.

Es wurden bereits einige Studien über die Partikelgrößenverteilung, die verwendeten Messverfahren und die Schlüsse für die Anwendung von Eisbrei veröffentlicht. Auf Basis dieser Veröffentlichungen lässt sich schlussfolgern, dass die beschriebenen Methoden sich auf die Analyse der von den Partikeln projizierten Fläche beziehen. Hierdurch entsteht ein Verlust an Informationen über die wahre Form der Partikel. Somit lassen sich die zum Teil abweichenden Ergebnisse in verschiedenen Studien erklären.

An der Hochschule Karlsruhe wird eine Methode entwickelt, die Oberfläche und das Volumen der Partikel exakter zu bestimmen und somit genauere Aussagen über das Wachstum oder das physikalische Verhalten unter verschiedenen Einflüssen treffen zu können. Der Prototyp des entstandenen Prüfstands wird beschrieben. Die ersten Messungen und Vergleiche mit Literaturwerten werden aufgezeigt.

Ein Ausblick auf weitere Optimierungen des Prüfstands und die folgenden Untersuchungen wird gegeben.

Notizen

II.2.01

## Reformierung der Kältetechnik und Energiewende

Dr.-Ing. H. Förster

IFM – Ing.-Büro Magdeburg, Bahrendorfer Str. 4, 39112 Magdeburg

Die Prozessabläufe in der Absorptionskältetechnik sind für viele Anwender eine Sphinx, ein „Buch mit sieben Siegeln“. Das kann hinderlich werden für die Einführung von Techniken, die für die Energiewende unverzichtbar sein sollten. Substitution von elektrischer Energie durch bereits vorhandene Wärmen und Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in die Atmosphäre sind Ziele, die mit der Energiewende neben den erneuerbaren Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung auf der Tagesordnung stehen. Für den Anwender von Kälte führen die hohen Betriebskosten durch steigende Stromtarife der Kompressionskältetechnik zu Zwängen, neue Wege zu suchen und die Chancen der Absorptionskälte zu testen. Worin bestehen Risiken, wie kann man vermeintliche Risiken beseitigen?

Der Beitrag zeigt Wege auf für den Parallelbetrieb bestehender Kompressionskältetechnik mit Absorptionskälteanlagen. Durch diese Redundanzen werden Risiken, wie z. B. beim Ausfall der Wärmeversorgung der AKA beseitigt und gleichzeitig der Vorteil geringen Stromverbrauches und drastisch reduzierter Betriebskosten gewonnen. Im Mittelpunkt des Beitrages stehen Koppelsysteme von Absorptions- und Kompressionskälteanlagen die gleichzeitig höhere Sicherheit und stark verbesserte Energieeffizienz der Kälteerzeugung sichern. Die Kältetechnik kann sich von hohen Strompreisen ohne Risiko abkoppeln.

Bestehende Kompressionskälteanlagen werden solange in Reserve gehalten, wie es das Sicherheitsbedürfnis der Betreiber verlangt.

II.2.02

## Zunahme des Stromverbrauchs von Haushaltskältegeräten durch Alterung

Andreas Elsner\*, Michael Müller, Andreas Paul, Jadran Vrabec

Universität Paderborn, Lehrstuhl für Thermodynamik und Energietechnik, 33098 Paderborn  
[elsner@thet.uni-paderborn.de](mailto:elsner@thet.uni-paderborn.de)

\* Korrespondenzautor

In einer Langzeituntersuchung wurde die Energieaufnahme von fünf handelsüblichen Haushaltskühl- und Gefriergeräten über einen Zeitraum von 18 Jahren beobachtet. Innerhalb dieser Zeitspanne betrug die effektive Betriebsdauer unter realitätsnahen Bedingungen 14 Jahre. Die Ermittlung der Energieaufnahme erfolgte in den Jahren 1994, 1997 und 2012 unter Laborbedingungen bei Umgebungstemperaturen von 16, 25 und 32 °C.

Bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C wurde bereits nach einem dreijährigen Betrieb ein Mehrverbrauch von über 10 % festgestellt, über den gesamten Untersuchungszeitraum nahm der Stromverbrauch der Geräte zwischen 23 und 33 % zu, was vor allem auf das Schaummaterial in der Isolation zurückgeführt wird. Je nach Gerät verschlechterte sich dadurch die Energieeffizienzklasse um eine bis drei Stufen

Der erhöhte Stromverbrauch führt in Verbindung mit dem Strompreisanstieg von 2000 bis 2012 dazu, dass sich eine Geräteneuanschaffung viel eher amortisiert, als bei einer Betrachtung die nur die Energieaufnahme im Neuzustand und den aktuellen Strompreis berücksichtigt.

### Stichwörter:

Haushaltskältegeräte, Energieaufnahme, Alterung

II.2.03

## Der Einfluss von Teillast auf die energetische Bewertung von Kälteanlagen

Michael Arnemann

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft  
Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU)  
76133 Karlsruhe, Deutschland  
[michael.arnemann@hs-karlsruhe.de](mailto:michael.arnemann@hs-karlsruhe.de)

Kälteanlagen werden für Vollastbetrieb ausgelegt; die meisten Anlagen arbeiten allerdings im Jahresverlauf hauptsächlich im variierenden Teillastbetrieb mit unterschiedlichen inneren und äußeren Kühllasten sowie sich ändernden Umgebungsbedingungen. Diese Betriebsbedingungen bestimmen daher die Gesamtenergieeffizienz, die sich im Laufe eines Jahres einstellt.

Zunächst werden die prinzipiellen Zusammenhänge dargestellt. Anschließend werden Methoden und Kennzahlen zur Bewertung der Energieeffizienz vorgestellt, wie sie in deutschen, europäischen und Normen beschrieben sind. In einer Übersicht werden u. a. behandelt und bewertet: COP, EER, Arbeitszahl, SEER, SCOP, IPLV; IEER, ESEER.

**Stichwörter:**

Kälteanlagen, Energetische Bewertung, Teillast

II.2.04

## Praxisbericht Diagnosetechnologie an Kälteanlagen ohne kommunizierendes Regelsystem

Dipl.-Betriebswirt (FH), M.A. Ruben Peußner

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Forchtenberg

Seit geraumer Zeit sammelt KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH zusammen mit interessierten Kälteanlagebauern in mehreren Dutzend vorhandenen und neu aufgebauten Anlagen im Feld Erfahrungen über Anwendung und Nutzen des Verdichter-Schutz-Systems INT69 Diagnose.

Im Schwerpunkt sind dies Kälteanlagen, bei welchen den Kälte-Klima-Spezialisten bisher keine Analysedaten zur Verfügung stehen. Entweder, weil kein leistungsfähiges Regel- und Steuersystem vorhanden ist - oder weil diese Daten für den Kälte-Klima-Spezialisten nicht verfügbar sind.

Erwartungsgemäß arbeiten die allermeisten mit Diagnose-Technologie überwachten Anlagen innerhalb normaler Parameter. Bei der einen oder anderen Anlage bestehen jedoch teils erhebliche Abweichungen. Diese Abweichungen wurden zum Teil bereits vor dem Einsatz des Verdichter-Schutz-Systems vermutet, allerdings erst durch die vorliegenden Diagnosedaten validiert. Es handelt sich dabei z.B. um Kühlung im industriellen Umfeld oder Tiefkühlung in der Fleischverarbeitung. Auf Basis dieser Daten konnte der Kälteanlagenbauer konstruktiv Lösungen erarbeiten.

Inhalt des Vortrags sind ausgewählte Erfahrungsberichte aus der Praxis mit Beschreibung der Anlagen, Analysedaten und Konsequenzen.

## **Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen während des Betriebs - Theorie und Praxiserfahrung**

**M.Sc. Thomas Köberle\*, M.Sc. Daniel Rettich, Prof. Dr.-Ing. Martin Becker**

Hochschule Biberach (HBC), Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE),  
Karlstraße 11, D-88400 Biberach

[koeberle@hochschule-bc.de](mailto:koeberle@hochschule-bc.de), [rettich@hochschule-bc.de](mailto:rettich@hochschule-bc.de), [becker@hochschule-bc.de](mailto:becker@hochschule-bc.de)

\* Korrespondenzautor

Der energieeffiziente Betrieb und damit einhergehend die Bewertung der Energieeffizienz im laufenden Betrieb von Kälteanlagen spielt mit steigenden Energiekosten und höherem Umweltbewusstsein eine immer größere Rolle.

Da im Bereich der systematischen Bewertung von Anlagen während des Betriebs noch wenig Erfahrung und kaum belastbare Daten vorhanden sind, werden an der Hochschule Biberach aktuell mehrere Forschungsprojekte zu diesem Thema durchgeführt<sup>1, 2</sup>.

Ziel der Forschungsarbeiten ist es, u. a. standardisierte Methoden und Verfahren zum Energie-Monitoring in Form von Monitoring-Leitfäden zu entwickeln. Ebenso besteht die Herausforderung darin, zugeschnitten auf die unterschiedlichsten Anwendungsfelder wie Klimakälte, Gewerbekälte und Industriekälte passende Messmethoden und Bewertungsverfahren für die Nachrüstung in bestehenden und für die Planung von neuen Anlagen zu entwickeln und in der Praxis zu testen. Ein weiteres Ziel ist es, mit diesen Verfahren gezielte Analysen für eine optimierte Betriebsführung und verbesserte Diagnose von Kälteanlagen durchführen zu können.

In dem Beitrag wird der aktuelle Stand der Forschung und Technik im Bereich der Messmethoden und der Messtechnik beschrieben und es werden am Markt verfügbare Werkzeuge vorgestellt. Des Weiteren wird auf Messtechnik eingegangen, die sich speziell für die Nachrüstung in Bestandanlagen eignet. Neben der Messtechnik werden Messergebnisse zum Energie-Monitoring und zur Betriebsanalyse von Gewerbe- und Klimakälteanlagen vorgestellt. Hier wird auf die Möglichkeiten bei der Auswertung vorhandener Messdaten und die Auswertung von Optimierungsmaßnahmen eingegangen. Zusätzlich zur Betriebsanalyse wird auf die Energieeffizienzbewertung von Kälteanlagen nach VDMA 24247 eingegangen, ebenso auf die Randbedingungen in der praktischen Umsetzung.

### **Stichwörter:**

Energieeffizienz, Anlagenbetrieb, Energie-Monitoring, optimierte Betriebsführung, VDMA 24247, Optimierung

---

<sup>1</sup> ENBEKA: Energieeffizienz und optimierte Betriebsführung von gewerblichen Kälteanlagen; gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Laufzeit 2012-2015

<sup>2</sup> EMeBKA: Entwicklung und exemplarische Anwendung von Methoden zur energetischen Bewertung von Kälteanlagen im laufenden Betrieb; gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Laufzeit 2012-2015

II.2.06

## Scroll-Verbundschaltungen für hocheffiziente Flüssigkeitskühlsätze

Dipl.-Ing. (FH) Rolf Blumhardt

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, Eschenbrünnlestraße 15, 71065 Sindelfingen  
[rolf.blumhardt@bitzer.de](mailto:rolf.blumhardt@bitzer.de)

Hermetische Scrollverdichter werden in Flüssigkeitskühlsätzen oft in Verbundschaltungen eingesetzt. Dabei soll eine einfache Leistungsregelung und hohe Leistungszahl (ESEER) bei einfacher Verrohrung möglich werden. Die aktuellen Erfahrungen mit den Scrollverdichtern von BITZER in diesen Schaltungen in Bezug auf Voll- und Teillasteffizienz, Betriebssicherheit und Regelbarkeit werden dargestellt. Grundlegende Probleme der Leistungsregelung und Abstufung im Verbund und deren Lösung werden diskutiert. Beispiele von Schaltungen mit Verdichtern von BITZER werden erläutert.

**Stichwörter:**

Scrollverdichter, Verbundschaltung, Flüssigkeitskühlsätze, einfache Leistungsregelung, hohe Leistungszahl (ESEER), hohe Voll- und Teillasteffizienz, Praxiserfahrungen, Betriebssicherheit

II.2.07

## Entwicklung der Energieeffizienz von Kältemittelverdichter

Christian Edler

ILK Dresden gGmbH, 01309 Dresden  
[Christian.Edler@ilkdresden.de](mailto:Christian.Edler@ilkdresden.de)

Der Verdichter bestimmt wesentlich die Energieeffizienz des Kompressionskältekreislaufs. Bei der Auswahl des geeigneten Verdichters sind neben den konstruktiv begründeten Unterschieden der einzelnen Bauarten und damit verbunden bevorzugten Einsatzbedingungen herstellerbedingte Effizienzunterschiede zu beachten.

Aktuelle, in die statistische Auswertung aufgenommene Verdichterleistungsmessungen ermöglichen weiterführende Trendanalysen. Die Messungen erfolgten unter Normbedingungen nach DIN EN 13771-1, insbesondere im Rahmen des Marktüberwachungsprogrammes der ASERCOM.

Im Mittelpunkt der Auswertung stehen die Bewertung der zeitlichen Entwicklung der die Effizienz beschreibenden Parameter Liefergrad und isentroper Gütegrad, bauartbedingte Unterschiede dieser Parameter sowie der Einfluss des Kältemittels. Interessante Messungen mit Low-GWP-Kältemitteln werden vorgestellt. Zusätzlich wird die Teillast-Effizienz regelbarer Verdichter betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen beispielsweise eine beachtliche Streuung zwischen den Herstellern und eine differenzierte Entwicklung der Leistungszahl.

II.2.08

## Numerische Simulation eines Hubkolbenverdichters unter Berücksichtigung der Ventilbewegung

Carsten Möhl\*, Robin Langebach, Ullrich Hesse

Technische Universität Dresden,  
BITZER-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden  
[carsten.moehl@tu-dresden.de](mailto:carsten.moehl@tu-dresden.de), [robin.langebach@tu-dresden.de](mailto:robin.langebach@tu-dresden.de)  
[ullrich.hesse@tu-dresden.de](mailto:ullrich.hesse@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Neben den Verlusten durch Temperaturengleichvorgänge zwischen Arbeitsmedium und Zylinderwand besitzt der Druckverlust, der beim Ladungswechsel infolge von Strömungsreibung auftritt, einen signifikanten Anteil am Liefergrad von Kolbenverdichtern. Optimierungsbemühungen basieren üblicherweise auf experimentellen Methoden. Die numerische Simulation stellt ebenfalls einen sinnvollen Ansatz dar, einen tieferen Einblick in die strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb des Arbeitsraums von Verdichtern während eines Arbeitsspiels zu erhalten. Die dabei zu berücksichtigende Dynamik essentieller Komponenten wie Kolben oder Ventile erhöht dabei die Anforderungen an den Modellierungs- und Berechnungsaufwand, eröffnet im Gegenzug jedoch deutliche Optimierungspotentiale.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Berechnung der Strömungs- und Wärmetransportvorgänge an einem konkreten Beispiel für einen Arbeitsraum durchgeführt. Die ermittelten integralen Ergebnisse werden mit gängigen Berechnungsverfahren aus der Fachliteratur validiert.

Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt dabei auf dem erfolgreichen Einsatz bewegter Netze für die Berücksichtigung der Ventildynamik sowie auf den prinzipiellen Einflüssen konvergenzkritischer Parameter.

**Stichwörter:**

CFD, FSI, Hubkolbenverdichter, Ventildynamik

II.2.09

## Optimierung von Hubkolben-Verdichtern für R407A und R407F

Ing. Igor Majer<sup>1\*</sup>, Ing. Zdeněk Slavík<sup>1</sup>, Dr.-Ing. Norbert Kämmer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emerson Climate Technologies s.r.o., Mikulov, Czech Republic

<sup>2</sup> Emerson Climate Technologies GmbH, Aachen

\* Korrespondenzautor

Mit dem zunehmenden Interesse an niedrigen GWP-Kältemitteln sind R407A und R407F immer beliebtere Optionen bei Kälteanwendungen. Da die R407-Serie zu höheren Verdichtertemperaturen führen, erfordern sie eine zusätzliche Kühlung oder Einschränkungen des Anwendungsbereiches bei niedrigen Verdampfungstemperaturen, die nicht für die zur Zeit verwendeten Kältemittel mit höherem GWP notwendig sind. Die Verwendung von Zylinderkopfkühlung und / oder Flüssigkeitseinspritzung wird bei diesen Kältemitteln erforderlich, um das bestehende Niveau an Zuverlässigkeit und Energieeffizienz zu beizubehalten. Dabei müssen Kompromisse eingegangen werden zwischen dem Auftragen von flüssigen Injektionen ist eine reduzierte Effizienz des Systems und erhöhte Instabilität des Systems.

Dieser Artikel beschreibt eine Untersuchung, in der die Anforderungen und Optimierung von Flüssigkeitseinspritzung (Demand-Cooling) am Beispiel einer neuen Generation von semi-

hermetischen Kompressoren entwickelt wurden. Einschränkungen des Anwendungsbereiches wurden bewertet Blick auf die Kompromisse zwischen Umschlag Größe, super Wärme und Flüssigkeit Injektion. Die Konfiguration der Einrichtung zur Flüssigkeitseinspritzung wurde dann für die aktuelle Baureihe optimiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen im Hinblick auf die Lage der Einspritzstellen, Ventil- und Düsenausführung, sowie die Regeleinheit mit dem Ziel einer verbesserten Temperaturverteilung, reduzierte Einspritzmassenstrom und eines verbesserten isentropen Wirkungsgrad werden dargestellt.

## II.2.10

# Analysis and Performance of a Novel Rotating Spool Compressor

Craig R. Bradshaw<sup>1</sup>, Eckhard A. Groll<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Torad Engineering LLC, Alpharetta, GA 30004, USA  
[craig.bradshaw@toradengineering.com](mailto:craig.bradshaw@toradengineering.com)

<sup>2</sup> Purdue University, Ray W. Herrick Laboratories, West Lafayette, IN 47907, USA  
[groll@purdue.edu](mailto:groll@purdue.edu)

\*Corresponding Author

A comprehensive simulation model of a novel rotating spool compressor is presented. The spool compressor provides a novel rotating mechanism with easily manufactured components. Compared with other rotary compressors, the spool compressor presents the additional advantage of the relocation of the face sealing surfaces to the outer radius of the device. This relocation allows the spool compressor to implement more advanced sealing technologies than other rotary compressors. The model developed here incorporates all of the major components of the spool compressor including sub-models for geometry, leakage, heat transfer, and friction. Particular emphasis was placed on the impact of the face seal model on the compressor performance. The results of the compressor model were validated using experimental data from a prototype spool compressor developed by Torad Engineering. The prototype compressor has an overall displacement of  $23.9 \text{ cm}^3$ , and was operated at rotational speeds between 1750 and 3250 rpm. The model results showed good agreement when validated against the experimental results at a variety of rotation speeds and operating conditions. Parametric studies were performed with the validated simulation model to evaluate the effect of varying geometric parameters on compressor performance.

**Keywords:**

Spool Compressor, Novel Compression Concept, Compressor Simulation, Compressor Performance



II.2.11

## Überarbeitete und energieoptimierte Trennhaubenverdichter

Alexander Baumhake

Frigopol Kälteanlagen GmbH, Gamser Straße 21, 8523 Frauental, Österreich  
Tel.: +43 (0) 3462 70000, Fax: +43 (0) 3462 70000 50  
E-Mail: [office@frigopol.com](mailto:office@frigopol.com), Website: [www.frigopol.com](http://www.frigopol.com)

### Einleitung

Konstruktionsmerkmale die sich über Jahrzehnte bewährt haben, sind nach wie vor bestehend. Das Alleinstellungsmerkmal (USP) des Frigopol Kompressors, die „**Trennhaube**“, ist ein Bauteil (ähnlich Spaltrohr) im Kompressor, der den kältemittelführenden Teil von der Motorwicklung trennt.

Durch die Trennhaube gibt es keine **Wellenabdichtung**, die einen eventuellen **Verlust** von Kältemittel verursachen könnte. Außerdem gibt es keine **Kabeldurchführungen**, die ebenfalls Kältemittelverluste herbeiführen könnten.

Im Falle eines Motorbrandes, kann der Stator des Verdichters mit wenigen Handgriffen ausgetauscht werden, ohne vorherige Reinigung des Verdichters bzw. der Anlage. Infolge gibt es auch **keine Verschmutzung** des Kältesystems bei Durchbrennen des Stators.

### Überarbeitete Verdichterserie

Neben den allgemeinen technischen Anforderungen an Kompressoren hinsichtlich Leistungsdaten und Zuverlässigkeit, haben sich auch andere Parameter wie z. B.: Vorschriften in Bezug auf den Umweltschutz, Energieeffizienz und die der Schallemission herauskristallisiert. Diese Ansprüche bzw. auch Inputs von Kunden, haben uns Grund für eine neuerliche Überarbeitung der Verdichterserie Typ 30L-46L gegeben.

Bei der Weiterentwicklung im Jahre 2012, standen schwerpunktmäßig die Schalloptimierung sowie auch die Energieoptimierung im Vordergrund. Parallel dazu war die Vorgabe, alle Optimierungsschritte auch in den für das natürliche Kältemittel geeigneten Verdichter, einfließen zu lassen.

Eine akustische Überprüfung der Verdichterreihe 30L-46L gab Aufschluss bzw. Ansätze zur möglichen Optimierung.

### Änderungen|Ergebnisse

Ein neuer Gleitlagerwerkstoff sorgt durch geringste Reibungswiderstände für absolute Laufruhe. Auch in extremen Situationen gewährleistet eine PEEK-PTFE Beschichtung sehr gute Notlaufeigenschaften, was insbesondere bei kurzzeitigem Öl-mangel bzw. auch nach längerem Stillstand des Kompressors zum Tragen kommt.

Diese Gleitlagertechnologie verhindert einen Verschleiß in der Anlaufphase, bzw. überbrückt durch die PEEK-PTFE Beschichtung eine Trockenreibung.

Dieses Gleitlager wird in Kompressoren für alle gängigen Kältemittel und Kältemaschinenöle, aber auch für Kompressoren mit dem Kältemittel Ammoniak eingesetzt.

Ein Kompromiss zwischen der vorzüglichen Wärmeabfuhr des bisherigen Al-Zylinderdeckels und des schalltechnisch günstiger gestalteten NH<sub>3</sub>-Zylinderdeckels, führte zu einem strömungsoptimierten Graugusszylinderdeckel. Die derart verbesserten Dämpfungseigenschaften machen sich vor allem durch den wesentlich niedrigeren Schalldruckpegel bemerkbar.

Der Anschlusskasten für den Stator ø250mm wurde akustisch optimiert.

Der Deckel des Anschlusskastens ist mit einer zusätzlichen Resonanzdämpfung (Schalldämmmatte) ausgestattet.

Ein optimierter Blechschnitt der Stator- und Rotorplatinen sowie auch die Änderung der Elektroblechqualität steigern zusätzlich die Effizienz des Verdichters.

### Beispiele für ökoeffiziente Anwendungen

- Alternatives Kältemittel [NH<sub>3</sub>]
- Geringe KM-Füllmenge
- Aufstellung im Freien – Wetterschutzgehäuse
- Angebauter Schaltschrank



### II.2.12

## Heat Rejection Influence on CO<sub>2</sub> Trans-Critical Compressor Reliability and Performance

Giacomo Pisano

Officine Mario Dorin S.p.A., Compiobbi, Italien

Carbon dioxide (R744 - CO<sub>2</sub>) is nowadays considered one of the most attractive long term solutions for commercial and industrial refrigeration applications, as well as for hot water heat pumps.

This refrigerant thermodynamic characteristics lead to somewhat high discharge temperatures (up to 200 °C), this having a significant impact on both oil temperature, thus affecting its lubricity, and refrigerant suction temperature and density, thus affecting compressor volumetric and isentropic efficiency. Therefore, improving discharge gas heat rejection it is possible to increase both compressor reliability and efficiency.

This work is aiming to offer a qualitative analysis of how different design concepts impact on compressor heat transfer and dissipation, leading to diverse performances both in terms of reliability and efficiency.

### II.2.13

## Leistungsmessungen: R744 Verdichter, 380cm<sup>3</sup> Hubvolumen

Armin Hafner<sup>1\*</sup>, Christian Schmäzle<sup>2</sup>, Ingrid Camilla Claussen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

<sup>2</sup> OBRIST Engineering GmbH, 6890 Lustenau, Austria.  
[office@obrist.at](mailto:office@obrist.at)

\* Korrespondenzautor

Der hocheffiziente 6-Zylinder Hubkolbenverdichter, der einen variablen Volumenstrom von 18 bis 90 m<sup>3</sup>/h ermöglicht und von einem Permanentmagnetmotor angetrieben wird, wurde bei unterschiedlichsten Referenzbedingungen experimentell untersucht.

Die Ergebnisse zeigen den Gesamtwirkungsgrad, Liefergrad und den Ölwurf des Verdichters bei unterschiedlichen Drucklagen, Druckverhältnissen und Drehzahlen von 800-4000 min<sup>-1</sup>. Mit Hilfe von Simulationsprogrammen werden die internen Verluste analysiert und die Verbesserungspotentiale von Designänderungen ermittelt.

II.2.14

## Ölfreier CO<sub>2</sub>-Verdichter für Wärmepumpen

F. Dietmann

Universität Stuttgart, Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium  
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart  
Tel.: 0049-711-685-63542, Fax: 0049-711-685-69440  
E-Mail: [dietmann@itsm.uni-stuttgart.de](mailto:dietmann@itsm.uni-stuttgart.de)

Bedingt durch die Forderung, zunehmend umweltverträglichere und klimaschonendere Prozessmedien zu verwenden, wird derzeit verstärkt bei der Entwicklung von Wärmepumpen die Frage nach Alternativen zu den bisherigen Kältemitteln wie beispielsweise R134a gestellt. Neue Wärmepumpenkonzepte sollten hierbei sowohl ökologische wie auch ökonomische Vorteile gegenüber bisher verfügbaren Produkten aufweisen. Hierzu werden am Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart (ITSM) Arbeiten zur aerodynamischen Entwicklung eines ölfreien CO<sub>2</sub>-Kompressors für CO<sub>2</sub>-Großwärmepumpen im Rahmen eines vom BMWF geförderten Projektes durchgeführt.

Der vorgestellte Beitrag diskutiert generelle und konzeptionelle Aspekte für die Verwendung von CO<sub>2</sub> als Prozessmedium in einem Wärmepumpenprozess. Als charakteristische Merkmale derartiger Prozesse können hohe Drücke und geringe Volumenströme aufgeführt werden. In Kombination mit der physikalischen Eigenschaft, dass sich CO<sub>2</sub> in dem relevanten Bereich als Lösungsmittel für Fette und Schmiermittel verhält, ergeben sich neue Problemstellungen für die Gestaltung des Verdichters innerhalb des Wärmepumpensystems. Dies erfordert eine gezielte Auswahl des Kompressortyps zur Verdichtung des Mediums, wobei aufgrund der Forderung nach einem ölfreien Betrieb auf eine Turbomaschine zurückgegriffen wird. Es wird weiterhin aufgezeigt, weshalb zur Bereitstellung von Wärmemengen im Bereich von 40-100 kW schnelldrehende Turbomaschinen entwickelt werden müssen und welche Herausforderungen beim Entwurf derartiger Mikrokompressoren in den Vordergrund treten.

II.2.15

## Effizienzsteigerung von Kolbenverdichtern durch optimierte Zylinderkopfeinheit

Andreas Brandl\*, Roland Cesak, Martin Lachmann

HOERIGER Kompressortechnik GmbH, Im Forchet 5, 86956 Schongau

\* Korrespondenzautor

Lamellenventile haben sich in Kolbenkompressoren der Kälte- und Klimatechnik sowie im Nutzfahrzeubbereich aus gutem Grund durchgesetzt. Sie erfüllen höchste Dichtheitsanforderungen, sind äußerst robust und durch ihre modulare Bauweise sowie durch die Vielzahl an Gestaltungsparameter kann für jeden Einsatz bis hin zu höchsten Drehzahlen die effizienteste Ventillösung gefunden werden.

Damit die Leistungsfähigkeit der Ventile voll ausgeschöpft werden kann, ist es unerlässlich das Gesamtsystem Zylinderkopf bestehend aus Ventilen, Zylinderkopf und mechanischer Leistungsregelung gemeinsam zu betrachten.

So liegt ein nicht unerheblicher Teil des Verbesserungspotentials in der Gestaltung des Zylinderkopfes. Durch geringere Sauggasaufheizung im Zylinderkopf können Kälteleistung und Effizienz verbessert, sowie die Verdichtungsendtemperaturen gesenkt werden. Druckseitig können Pulsationen und Strömungsverluste neben anderen negativen Auswirkungen zu stark erhöhter Leistungsaufnahme führen.

Neben den Ventilen und dem Zylinderkopfdesign selbst ist die mechanische Liefermengenregelung die dritte leistungsbestimmende Komponente im Zylinderkopf. Die stufenlose Liefermengenregelung durch elektromechanische Saugventilabhebung stellt ebenso wie die quasi-stufenlose Regelung durch hochdynamische Zylinderbankabschaltung energetisch eine sehr gute Lösung dar.

## II.2.16

### **Reduction of the acoustic emission of refrigerant system in environment: attenuation of compressor noise**

**Pierre Poysat<sup>1\*</sup>, Roman Hajek<sup>2</sup>, Norbert Kaemmer<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Emerson Climate Technologies GmbH, Welkenraedt, Belgium

<sup>2</sup> Emerson Climate Technologies s.r.o, Mikulov, Czech Republic

<sup>1,3</sup> Emerson Climate Technologies GmbH, Aachen, Germany

\* Korrespondenzautor

Zum Schutze der Bevölkerung gibt es einen allgemeinen Trend in Europa, Vorschriften zu erlassen, die die Geräuschemission von im Freien aufgestellten Komponenten von Kühlanlagen begrenzen. Eine übliche Schutzmaßnahme gegen zu hohe Geräuschemissionen ist es, eine Lärmschutzhülle um eine gesamte Anlage zu bauen. Diese Lösung ist in der Regel teuer, voluminös und komplex. Schallschutzmaßnahmen können auch direkt auf dem Kältemittelverdichter angebracht werden und so die Geräusentwicklung direkt an der Quelle beeinflussen. Die akustische Dämpfung kann so gewählt werden, dass eine Installation des Systems sogar im Wohngebiet ermöglicht wird. Allerdings erfordert die Entwicklung einer solchen Lösung detaillierte Untersuchungen, um zu überprüfen, dass der Betrieb, die Leistungseigenschaften und Zuverlässigkeit des Kompressors nicht durch seine Verwendung negativ beeinflusst werden. Weitere wichtige Aspekte wie Material, Feuerbeständigkeit, Montage und Wartungsfreundlichkeit sind zu berücksichtigen.

Dieser Beitrag zeigt die Vorteile, aber auch die Grenzen einer solchen Lösung im Vergleich mit einem traditionellen Schallschutz für die ganze Anlage. Die Untersuchungen, die zur Qualifizierung dieses Schallschutzes für einen Kältemittelkompressor durchgeführt wurden, werden dargestellt und erläutert.

## II.2.17

### **Auslegung von Multi-Ejektor R744 Anlagen**

**Krzysztof Banasiak\*, Armin Hafner, Anne Karin Hemmingsen**

SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norwegen

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

\* Korrespondenzautor

DESIGN OF THE MULTIPLE-EJECTOR EXPANSION WORK RECOVERY SYSTEMS FOR R744 REFRIGERATION INSTALLATIONS IN SUPERMARKETS

The ejector geometry optimization procedure was performed in order to design the ejector-based expansion work recovery systems for R744 refrigeration installations in two newborn supermarkets, to be built in 2014, located in distinct climate conditions (cold climate and warm climate). A mathematical model of R744 refrigeration installation using commercial software for the system analysis was formulated. Based on simplified operation characteristics of all the installation components, preliminary system simulations were performed for both supermarkets, for the individual load profiles and ambient

conditions, aimed at the overall COP maximization. Thanks to this procedure a set of annual profiles of boundary conditions for the expansion work recovery system were determined. Next, according to the estimated profiles, the number of ejector units per each expansion work recovery system was specified. Finally, based on a 1D code, numerical simulations for the optimum geometry of both vapour and liquid ejectors were carried out, aimed at maximization of the ejector efficiency.

## II.2.18

# Numerische und experimentelle Untersuchung eines CO<sub>2</sub>-Ejektors

**Christian Lucas<sup>1\*</sup>, Andreas Schröder<sup>1</sup>, Henrik Rusche<sup>2</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer Straße 5, 38106 Braunschweig  
[ch.lucas@tu-bs.de](mailto:ch.lucas@tu-bs.de)

<sup>2</sup> WIKKI GmbH, Görgestraße 24, 38118 Braunschweig

\* Korrespondenzautor

Eine vielversprechende Methode zur Steigerung der Effizienz von CO<sub>2</sub>-Kältekreisläufen ist die Verwendung eines Ejektors anstelle des Expansionsventils. Dabei verwendet der Ejektor einen Teil der ansonsten im Expansionsventil dissipierte Energie, um dem vom Verdampfer kommenden Massenstrom zu verdichten und somit die notwendige Verdichterleistung zu reduzieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine experimentelle Untersuchung einer optimierten Ejektorgeometrie vorgestellt. Dabei wurden für verschiedenen Treibdüsen Eintrittstemperaturen und verschiedene Verdampfungsdrücke eine Hochdruckvariationen durchgeführt. Ejektoreffizienzen von bis zu 35 % werden gezeigt.

Darüber hinaus wird eine numerische Untersuchung des Ejektors mittels CFD vorgestellt. Für diese Untersuchung wurde ein HEM (Homogeneous Equilibrium Method) Solver, der in OpenFOAM implementiert wurde, verwendet. Die Validierung der numerischen Ergebnisse erfolgt über die messtechnischen Daten und eine akzeptable Übereinstimmung zwischen der CFD Simulationen und den messtechnischen Daten wird gezeigt.

### **Stichwörter:**

Zweiphasen CO<sub>2</sub>-Ejektor, CFD, Drosselverlustrückgewinnung

## II.2.19

# Experimentelle Untersuchung eines regelbaren CO<sub>2</sub>-Ejektors

**Andreas Schröder\*, Christian Lucas, Jürgen Köhler**

TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik,  
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig  
[an.schroeder@tu-bs.de](mailto:an.schroeder@tu-bs.de)

\*Korrespondenzautor

Ejektoren werden zur Steigerung der Effizienz von CO<sub>2</sub>-Kältemittelkreisläufen anstatt eines Expansionsventils eingesetzt. Dabei sind unregelmäßige Ejektoren mit festen geometrischen Verhältnissen auf

einen Auslegungspunkt hin optimiert. In diesem Punkt kann die ansonsten im Expansionsventil dissipierte Energie mit dem besten Wirkungsgrad wieder zurückgewonnen werden.

Wärmepumpen bzw. Kältekreisläufe können jedoch, auf Grund unterschiedlicher Anforderungen nicht immer im optimalen Betriebspunkt arbeiten. Um den Wirkungsgrad des Ejektors in diesen Arbeitspunkten zu erhöhen, sollte der Ejektor verstellbar sein.

In dieser Arbeit wird eine Untersuchung eines Ejektors mit veränderbarer Treibdüsen-Querschnittsfläche vorgestellt. Die Treibdüse wurde mit einer Nadel versehen mit welcher der Kältemittelmassenstrom in den Ejektor beeinflusst werden kann. Dieser Ejektor wurde für zwei Verdampfungsdrücke und unterschiedliche Hochdrücke vermessen um den Einfluss der verringerten Treibdüsen-Querschnittsfläche auf den Wirkungsgrad des Ejektors zu untersuchen. Es wird außerdem eine Korrelation zur Berechnung des Treibmassenstromes in Abhängigkeit der Nadelposition und den Ejektoreintrittszuständen vorgestellt.

**Stichwörter:**

R744, Ejektor, Regelung

II.2.20

## **Zweiphasige Kältemittelströmung in Drosselkapillaren an Haushaltskältegeräten**

**Thomas Tannert\*, Ullrich Hesse**

Technische Universität Dresden,  
Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, 01062 Dresden  
[thomas.tannert@tu-dresden.de](mailto:thomas.tannert@tu-dresden.de), [ullrich.hesse@tu-dresden.de](mailto:ullrich.hesse@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

In Haushaltskältegeräten wird üblicherweise der Kaltdampfprozess zur Kälteerzeugung, unter Verwendung von Isobutan (R600a) als Kältemittel, realisiert. Prozessbedingt erfährt das Kältemittel beim Durchströmen der Kreislaufkomponenten, insbesondere der Wärmeübertrager (Verdampfer, Verflüssiger), einen Phasenwechsel zwischen flüssigem und gasförmigem Aggregatzustand. Als Drosselorgan werden zumeist Kupferkapillarrohre angewendet. In Abhängigkeit unterschiedlicher Faktoren tritt ein Phasenwechsel ebenso beim Durchströmen solcher Drosselkapillaren auf. Einflussgrößen dafür sind einerseits die thermodynamische Prozessgestaltung sowie die Umgebungsbedingungen, aber auch Einflüsse durch enthaltene Fremdgase und umlaufendes Kältemittelöl. Daraus resultiert, dass die Ausbildung von Zweiphasenströmungsformen innerhalb der Drosselkapillare, sowohl in ihrer Art als auch im örtlichen und zeitlichen Erscheinen variiert. Die instationäre Veränderung der zweiphasigen Kältemittelströmung in der Drosselkapillare kann dynamische Vorgänge im gesamten Kältekreislauf bewirken.

Entsprechende Untersuchungen an geeigneten Versuchsaufbauten beinhalten visuelle Beobachtungen der Strömungsformen in unterschiedlichen Abschnitten des Kältekreislaufs und ermöglichen Studien über die Abhängigkeit von Auftreten und Art bestimmter Strömungsformen von verschiedenen, einstellbaren Randbedingungen. Die Gegenüberstellung der Beobachtungen erfolgt mit Berechnungsergebnissen aus bekannten Strömungsformkarten. Als Ergebnis wird ein Messaufbau zur kombinierten und zeitlich synchronen Messung unterschiedlicher physikalischer Parameter, sowie optischer Bildaufnahme vorgestellt.

**Stichwörter:**

Zweiphasenströmung, Strömungsformen, Drosselkapillare, Haushaltskältegerät, optische Bildaufnahme

II.2.21

## Ein physikalisches Simulationsmodell für thermostatische Expansionsventile

Norbert Stulgies\*, Wilhelm Tegethoff, Manuel Gräber

TLK-Thermo GmbH, 38106 Braunschweig  
[n.stulgies@tlk-thermo.de](mailto:n.stulgies@tlk-thermo.de)

\* Korrespondenzautor

Eine wesentliche Komponente in Kältekreisläufen ist das thermostatische Expansionsventil (TXV). Es hat sowohl starken Einfluss auf die Dynamik eines Kreislaufs als auch auf die stationären Betriebspunkte und damit die Energieeffizienz. Mit der dynamischen Systemsimulation können Fragestellungen aus beiden Bereichen beantwortet werden, wie zum Beispiel die Dimensionierung von Komponenten für verschiedene stationäre Betriebspunkte oder aber die Untersuchung von dynamischen Anfahrvorgängen.

Bisherige Modellierungsansätze von TXV lassen sich im Wesentlichen in zwei Gruppen einteilen: detaillierte physikalische und vereinfachte empirische Beschreibungen. Sehr detaillierte Modelle haben in der Regel den Nachteil, dass sie hohe Rechenzeiten erfordern, und sind daher für die Systemsimulation nur bedingt geeignet. Empirische Modelle zeichnen sich zwar durch eine geringe Rechenzeit aus, sind aber nur gültig für den Bereich, in dem sie an Messdaten angepasst sind.

Unser Modellansatz beruht auf physikalischen Grundzusammenhängen, allerdings mit möglichst geringem Detaillierungsgrad. Das dynamische Modell kann mit wenigen Parametern auf Messdaten angepasst werden und besitzt dennoch eine gute Extrapolationsfähigkeit für Betriebspunkte außerhalb des Messbereichs.

Die Modellgleichungen werden detailliert hergeleitet und vollständig beschrieben. Für ein konkretes TXV werden Simulationsergebnisse mit Messdaten verglichen. Anhand dieses Vergleiches werden die Anwendbarkeit und die erzielbare Genauigkeit des Modells diskutiert.

**Stichwörter:**

Simulation, Modellierung, Modelica

II.2.22

## Die richtige Wasserqualität für die verschiedenen Kühlturmtypen

Dipl. Ing. Versorgungstechnik Hartwig Gohr

Schweitzer-Chemie GmbH, Benzstraße 12, 71691 Freiberg/N.  
[h.gohr@schweitzer-chemie.de](mailto:h.gohr@schweitzer-chemie.de)

Der folgende Fachbeitrag gibt Hinweise, welche Wasserbehandlungen und -aufbereitungen für welches Kühlsystem geeignet sind.

Um einen Kühlturmkreislauf sicher und effizient zu betreiben, sind die Wasservorbehandlung (Wasseraufbereitung wie Enthärtung, Filtration oder Umkehrosmose), die Wasserbehandlung (Einsatz von Produkten zur Minimierung von Korrosion, Ablagerungen und biologischem Wachstum), die behördlichen Vorgaben bezüglich der Abwasserqualität und die Wasser- und Abwasserkosten wichtige Faktoren.

Jeder Betreiber wird seine eigenen Schwerpunkte in Betrachtung ziehen. Daher sind die folgenden Vorschläge als Möglichkeiten zu sehen, die sich aber in den meisten Fällen mit den Vorgaben der



Hersteller decken. Ziel jedes Betreibers ist es die Wärmeübergangsflächen der Wärmetauscher sauber zu halten.

Damit sich auf den Austauschflächen keine störenden Ablagerungen bilden oder die Oberflächen durch Korrosion angegriffen werden, muss der Betreiber einer Kälteanlage/Kühlsystems die vorhandene Wasserqualität mit der richtigen Wasserbehandlung kombinieren oder umgekehrt. Eine optimale Kombination ist von vielen Faktoren abhängig. Die wichtigsten sind: wasserberührte Materialien, Kontakttemperaturen, die Qualität des Zusatzwasser, die Konstruktion des Kühlturms, der Kältemaschine und der Wärmetauscher sowie die Betriebsstunden der einzelnen Anlagenbereiche.

**Stichwörter:**

Kühlturmtypen, Wasseraufbereitung, Wasserbehandlung, passende Kombination

**II.2.23**

## **Luftkühleroptimierung**

**Dipl.-Ing. Ceslovas Kizlauskas\*, Dipl.-Ing. Steven Duncan**

GEA Küba GmbH, Kühler Weg 1, 82065 Baierbrunn  
[Ceslovas.Kizlauskas@gea.com](mailto:Ceslovas.Kizlauskas@gea.com), [Steven.Duncan@gea.com](mailto:Steven.Duncan@gea.com)

\*Korrespondenzautor

Angesichts der neuen Regelung zur Mindestenergieeffizienz bei Ventilatoren wurden alle Luftkühlerbaureihen zur Erfüllung der Erp 2013/2015 überarbeitet. Neben der Effizienz der Ventilatoren, wurden auch andere Bauteile eines Luftkühlers für eine neue Luftkühlergeneration auf den Prüfstand gestellt und optimiert.

Hierzu gibt es auf der Luftseite von Ventilatorluftkühlern verschiedene Stellschrauben:

- Luftmenge
- luftseitiger Druckabfall
- Wärmeübertragergeometrie
- Energieverluste zum Beispiel bei der Abtaugung.

Unter diesen Aspekten entstand eine neuartige Kombination aus klappbarem Ventilator mit optimierter Einlaufdüse, Luftgleichrichter, Textilschlauchanschluss und neuartiger Ventilatorringbeheizung zur Verhinderung eines Anfrierens des Lüferrads bei der Abtaugung. Es wurde auch versucht eine effizientere Wärmeübertragergeometrie zu ermitteln, ohne Bauteile wie Rohre oder Lamellen anzutasten, dazu Kennzahlen festgelegt und den alten Baureihen gegenübergestellt.



**Notizen**

## Effizienzbewertung von Wärmepumpen in Hybridfahrzeugen mit Hilfe der physikalischen Modellierung des Verdichters

Felix Schedel<sup>1\*</sup>, Gerrit Suck<sup>1</sup>, Sven Försterling<sup>2</sup>, Christian Strupp<sup>2</sup>, Jürgen Köhler<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BMW, 80788 München

[Felix.Schedel@bmw.de](mailto:Felix.Schedel@bmw.de), [Gerrit.Suck@bmw.de](mailto:Gerrit.Suck@bmw.de)

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

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

<sup>3</sup> Institut für Thermodynamik, 38106 Braunschweig

[juergen.koehler@tu-bs.de](mailto:juergen.koehler@tu-bs.de)

\*Korrespondenzautor

Zur weiteren Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Personenkraftwagen rückt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zunehmend in den Fokus aktueller Fahrzeugentwicklungen. Für Pluginhybrid- und Elektrofahrzeuge besteht bei rein elektrischem Betrieb ohne vorhandene Verbrennerabwärme die Notwendigkeit, den Fahrzeuginnenraum elektrisch zu beheizen. Zur Verringerung des damit verbundenen Reichweitenverlustes wird zunehmend der Einsatz von Wärmepumpen diskutiert. Die Gesamtenergieeffizienz des Systems ist dabei maßgeblich von der jeweiligen Kreislaufverschaltung, der Regelung und den Komponenten des Wärmepumpensystems, insbesondere des Verdichters, abhängig.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein verlustbasiertes physikalisches Modell für einen elektrisch angetriebenen, drehzahlregelten Fahrzeugverdichter nach dem Scroll-Prinzip erstellt. Anhand von Prüfstandsmessungen wird eine Validierung für unterschiedliche Einsatzrandbedingungen des Klima- und Wärmepumpenbetriebs durchgeführt. Mit Hilfe des Verdichtermodells erfolgt schließlich die Analyse von Wärmepumpentopologien für Plugin-Hybridfahrzeuge. Schwerpunkt der Untersuchung ist die Erweiterung einer herkömmlichen Luft-Wasser-Wärmepumpe um die Kopplung mit dem Verbrennungsmotor. Mit Hilfe einer intelligenten Vorkonditionierungsstrategie lässt sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines solchen Systems bei einer Außentemperatur von -7°C im Vergleich zu einer rein elektrisch betriebenen Heizung um bis zu 14% und im Vergleich zu einer konventionellen Luftwärmepumpe um 4% reduzieren.

### Stichwörter:

Scrollverdichter, Modellierung, Elektrofahrzeug, Wärmepumpe

III.02

## **Simulation des Aufheizvorganges einer Fahrzeugkabine mit Hilfe eines Wärmepumpenkreislaufes**

**Dennis Wleklík\*, Dr. Werner Hünemörder, Dr. Tibor Györög**

Denso Automotive Deutschland GmbH, Abteilung AC R&D,  
Freisinger Str. 21, 85386 Eching  
[d.wleklík@denso-auto.de](mailto:d.wleklík@denso-auto.de)

\* Korrespondenzautor

Das Beheizen der Fahrzeugkabine batterie-elektrisch angetriebener Fahrzeuge verursacht bei ausschließlicher Nutzung der in der Batterie gespeicherten elektrischen Energie eine deutliche Reduzierung der Reichweite des Fahrzeuges. Diese Problematik kann durch effizientere Heiz-Konzepte wie z. B. einer Wärmepumpe verbessert werden.

Im Rahmen interner Untersuchungen der Fa. Denso Automotive Deutschland GmbH wurden experimentelle Daten zum Aufheizverhalten verschiedener Wärmepumpenkonzepte gewonnen.

Anhand dieser Daten wurde von der Fa. XRG ein auf der Human Comfort Library basierendes Fahrzeugkabinenmodell abgeglichen und für weitere Optimierungen der Energieeffizienz des Systems mit dem Simulationstool Dymola verwendet.

Ausgehend von einer Luft/Luft und einer Luft/Wasser Wärmepumpe werden in dieser Veröffentlichung anhand von Variationsrechnungen Möglichkeiten zur Optimierung der Energieeffizienz des Systems vorgestellt.

**Stichwörter:**

Pkw, Fahrzeug, Kabine, Innenraum, Wärmepumpe, Simulation, Dymola, Human Comfort Library

III.03

## **Vergleich und Bewertung innovativer Antriebskonzepte für Kältemittelverdichter in Elektrofahrzeugen**

**Dipl.-Ing. Jörg Aurich\*, Dr.-Ing. Rico Baumgart, Dipl.-Ing. Christoph Danzer**

Technische Universität Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe, Chemnitz  
Tel.: 0371/531-38763, E-Mail: [joerg.aurich@mb.tu-chemnitz.de](mailto:joerg.aurich@mb.tu-chemnitz.de)

\* Korrespondenzautor

Bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen stellt die energieeffiziente Klimatisierung des Innenraums noch immer eine große Herausforderung dar, da sowohl die Kühlung als auch die Beheizung der Fahrgastzelle zu einer teilweise erheblichen Reduzierung der Reichweite führen.

Als Kältemittelverdichter kommen in Elektrofahrzeugen zumeist Scrollkompressoren mit separatem Elektromotor zum Einsatz. Diese Lösung ist jedoch hinsichtlich des Bauraums, der Kosten und des Gewichtes als kritisch zu bewerten. Aus diesem Grund werden derzeit an der TU Chemnitz innovative Antriebsstrangstrukturen für E-Fahrzeuge entwickelt, mit denen die Möglichkeit besteht, den Kältemittelverdichter direkt in den Antriebsstrang einzubinden.

Im Tagungsbeitrag sollen verschiedene innovative Konzepte zur Anbindung des Kältemittelverdichters miteinander verglichen und bewertet werden. Dabei werden auch Komfortansprüche, wie z. B. die Möglichkeit zur Klimatisierung im Stand, berücksichtigt. Des Weiteren sollen in den Untersuchungen auch unterschiedliche Verdichtertypen betrachtet werden.

Zur Untersuchung dieser Konzepte wurde das an der TU Chemnitz entwickelte Simulationsmodell verwendet, welches die gesamte Klimaanlage einschließlich der Fahrgastzelle beschreibt. Dieses Modell wurde mit einem Programm gekoppelt, mit dem sich wiederum der gesamte Antriebsstrang von Elektrofahrzeugen simulieren lässt.

Durch die kombinierte Betrachtung von Antriebsstrang und Klimaanlage kann letztendlich ein minimaler Gesamtenergieverbrauch und somit eine größtmögliche Reichweite von E-Fahrzeugen realisiert werden.

Im Vortrag werden zunächst die oben genannten Simulationsmodelle kurz vorgestellt. Anschließend werden die unterschiedlichen Antriebskonzepte des Kältemittelverdichters aufgezeigt und anhand der erzielbaren Reichweite sowie des Innenraumkomforts bewertet.

### III.04

## **Einfluss des Frostwachstums im Wärmepumpenbetrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen**

**Dipl.-Ing. (FH) Leonhard Hörth\*, Dr.-Ing. Markus Spinnler,  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Sattelmayer**

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

\* Korrespondenzautor

Durch die Problematik der Beheizung von Elektro- und Hybridfahrzeugen und die damit verbundenen energetischen Einbußen, setzen derzeit einige Fahrzeughersteller und -lieferanten auf Kältekreise mit integrierten Wärmepumpenfunktionen. Durch Ausnutzung einer oder mehrere Wärmequellen ist es damit möglich im Vergleich zu elektrischen Heizmethoden bis zu 60 % der Heizenergie einzusparen.

Grundsätzlich ist es möglich im Fahrzeug die Wärmequellen Antriebsstrang und Batterie auszunutzen, die aber aufgrund des hohen Antriebswirkungsgrad nicht immer zur Verfügung stehen. Je nach Fahr- und Umgebungsbedingungen kann durchaus die Wärmequelle „Umgebungsluft“ im Vergleich zu den anderen Wärmequellen zu einer höheren Wärmepumpenziffer führen.

Bei der Ausnutzung der Umgebung als Wärmequelle kann es unterhalb von ca. 5 °C Außenlufttemperatur zur Frostbildung am Verdampfer des Kältekreises kommen. Aufgrund der wachsenden Frostsicht wird die Effizienz der Wärmepumpe unter Umständen signifikant beeinträchtigt. Es ist daher notwendig einen Abtauvorgang zu vorzusehen, um diese Frost- bzw. Eisschicht wieder zu entfernen.

In Verbindung eines Frostwachstumsmodells sowie des dynamischen Kältekreismodells wird dieser Vorgang nachgebildet, um den Einfluss der Frostsicht auf den Kälteprozess zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen die Auswirkungen der Frostsicht bei unterschiedlichen kritischen Bedingungen, wobei das verwendete Frostwachstumsmodell mit Experimenten validiert wurde. Die mit den daraus ermittelten Erkenntnissen werden Empfehlungen zur optimierten Regelung des Heizbetriebs sowie zum Abtauen des Verdampfers vorgeschlagen.

#### **Stichwörter:**

Wärmepumpe, Klimatisierung, Elektrofahrzeug, Simulation, Experiment , Vereisung, Frostwachstum

III.05

## **PKW-Klimatisierung: aktuelle Trends in der automobilen Kältekreislaufentwicklung**

**Dr. Peter Heyl\*, Marc Graaf**

Visteon GmbH, Kerpen

\* Korrespondenzautor

Aktuelle Trends in der Fahrzeugentwicklung, wie z. B. das Downsizing der Verbrennungsmotoren, schärfere Emissionsanforderungen und zusätzliche Nebenaggregate führen zu kleineren verfügbaren Bauräumen und stellen den Ingenieur bei der Auslegung einer Klimaanlage vor neue Herausforderungen, die bei gleichzeitig konstanten bzw. steigenden Leistungs- und Effizianz Anforderungen realisiert werden sollen.

Lösungsansätze sind zum Beispiel der Einsatz von wassergekühlten Kondensatoren, um die an die Motorkühlung gestellten Anforderungen neuer hochentwickelter Verbrennungsmotoren erfüllen zu können, oder der Einsatz von extern regelbaren Expansionsventilen zur Effizienzsteigerung.

Der Einfluss dieser Maßnahmen auf Leistung und Effizienz des Kältekreislaufs wird mittels Simulationsrechnungen und Versuchsdaten bewertet.

III.06

## **Verbrauchsanalyse von PKW-Klimaanlagen**

**Daniel Rohde\*, Armin Hafner**

SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway

[Daniel.Rohde@sintef.no](mailto:Daniel.Rohde@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

Die Berechnung des jährlichen Verbrauchs von PKW-Klimaanlagen wird mit Hilfe von dynamischen Simulationsmodellen durchgeführt.

Klimaanlagen in PKW tragen maßgeblich zum Treibstoffverbrauch und damit zum Schadstoffausstoß bei. Dieser Mehrverbrauch kann mit stationären Messungen nur schwer erfasst werden, da er stark von den Umgebungsbedingungen und der Fahrweise abhängt. Daher wird eine Berechnung des jährlichen Mehrverbrauchs unter realistischen Bedingungen benötigt, um unterschiedliche wärme-pumpende Systeme und Konzepte zu vergleichen. (CO<sub>2</sub>, HFO, etc.).

Im Rahmen des EU-Projekts TIFFE (Thermal Systems Integration For Fuel Economy) wurde eine solche Berechnungsmethode entwickelt. Dafür wurden dynamische Simulationsmodelle für zwei verschiedene Systeme in Dymola erstellt, die den Verbrauch der Klimaanlage im Heiz- bzw. Kühlmodus berechnen können. Da dieser stark von den Anfangsbedingungen und der Fahrweise abhängt, wurde eine ausführliche Parameterstudie durchgeführt, die den Verlauf des Treibstoffverbrauchs bei unterschiedlichen Anfangsbedingungen und Fahrzyklen aufzeichnete. Die Ergebnisse dieser Studie wurden als Basis für eine mehrdimensionale Interpolationsmethode verwendet, die aus diesen Daten den Verbrauch über das gesamte Jahr berechnet. Ein dynamisches Modell zur Berechnung der PKW-Temperatur während des Parkens wurde dafür ebenfalls erstellt. Als Eingabeparameter stehen der Standort des PKW sowie ein detaillierter wöchentlicher Fahrzyklus zur Verfügung. Dadurch ist es möglich, den Einfluss von z. B. der Fahrdauer oder der Parkposition auf den jährlichen Mehrverbrauch in verschiedenen Klimazonen zu analysieren.

Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Erwartungen überein. Kurze Fahrten und extreme Temperaturen führen zu einem starken Anstieg des Gesamtverbrauchs (bis zu 50 %). Von den untersuchten Systemen zeigte das TIFFE System eine bessere Leistung, vor allem aufgrund des Wärmepumpensystems zur Aufheizung des PKW.

## Pneumatisch angetriebenes Kaltdampfkühlsystem für die Flugzeugklimatisierung

Steffen Golle<sup>1\*</sup>, Ullrich Hesse<sup>1</sup>, Mario Raddatz<sup>2</sup>, Enrico Klausner<sup>2</sup>, Frank Klimpel<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik, Münchner Platz 3, 01062 Dresden  
[Steffen.Golle@tu-dresden.de](mailto:Steffen.Golle@tu-dresden.de), [Ullrich.Hesse@tu-dresden.de](mailto:Ullrich.Hesse@tu-dresden.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Thermische Energiemaschinen und -anlagen, Helmholtzstraße 14, 01062 Dresden  
[Enrico.Klausner@tu-dresden.de](mailto:Enrico.Klausner@tu-dresden.de), [Mario.Raddatz@tu-dresden.de](mailto:Mario.Raddatz@tu-dresden.de)

<sup>3</sup> Airbus Operations GmbH, Spezialist Kaltluftklimaanlage,  
Kreetslag 10, 21129 Hamburg-Finkenwerder  
[Frank.Klimpel@airbus.com](mailto:Frank.Klimpel@airbus.com)

\* Korrespondenzautor

Die Flugzeugklimaanlage stellt ein wesentliches Teilsystem von Flugzeugen dar. Im Gegensatz zu konventionellen Klimaanlagen, die nur zur Einstellung der gewünschten Temperatur verwendet werden, muss das Klimasystem in Flugzeugen zusätzliche Aufgaben erfüllen. Dazu gehören die Einstellung des geforderten Kabinendruckes und der Luftfeuchtigkeit. Außerdem wird über das Klimatisierungssystem die Frischluft- bzw. Sauerstoffzufuhr gewährleistet. Die ganzen Anforderungen müssen bei sehr unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erfüllt werden. Zum einen sind damit die Umgebungszustände von Flug- und Bodenfall und zum anderen die verschiedenen Klimazonen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) gemeint. Zudem müssen die vorhandenen Schnittstellen zum Flugzeug berücksichtigt werden.

Stand der Technik in heutigen Passagierflugzeugen ist ein Klimatisierungssystem, welches auf dem Kaltluftprozess basiert und durch Zapfluft aus dem Triebwerk angetrieben wird. Dieser erreicht im Gegensatz zum Kaltdampfprozess allerdings nur eine deutlich niedrigere Kälteleistungszahl für die gegebenen Randbedingungen. In einem Forschungsprojekt mit dem Kooperationspartner Airbus wird deshalb die mögliche Anwendung des Kaltdampfprozesses in der Flugzeugklimatisierung betrachtet. Die in der Studie entwickelte Prozessarchitektur soll sich dabei als Ersatz des bestehenden Kaltluftkühlsystems (Retrofit-Lösung) eignen. In einem detaillierten Simulationsmodell werden die Prozessgrößen des Systems für verschiedene Betriebsfälle bestimmt. Anschließend werden mit den Berechnungsergebnissen die zentralen Bauelemente, wie beispielsweise Wärmeübertrager und Turbomaschinen, eingehender untersucht und ausgelegt. Nach der Optimierung der Systemparameter und der Einzelkomponenten erfolgt der Vergleichstest mit der bestehenden Anlage. Dieser zeigt eine signifikante Einsparung von ungefähr 30 % Zapfluft für die Referenzfälle am Boden und im Flug.

### Stichwörter:

Flugzeugklimatisierung, Kaltdampfprozess, Retrofit, Zapfluft

## Energetische Optimierung einer zweistufigen Laboranlage mit R744 für die Transportkühlung

Dipl.-Ing. A. Möhlenkamp\*, Dr.-Ing. N. Lemke, Prof. Dr.-Ing. J. Köhler

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

\* Korrespondenzautor

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 natürliche Kältemittel R744. Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften im Bereich Transportkühlung stellt das Kältemittel R744 eine Alternative gegenüber den überwiegend eingesetzten synthetischen Kältemitteln R404A und R410A mit hohem **Global Warming Potential** (GWP) dar.

Eine zweistufige Laboranlage mit internem Wärmeübertrager auf Mitteldruckniveau und dem Kältemittel R744 ist im Labor errichtet und vermessen worden, die kontinuierlich Kälte für die Normal- und Tiefkühlung bereitstellt. Der Laboraufbau orientiert sich an einer Referenzanlage für Motorwagen und entspricht somit den Praxisbedingungen. Erste Messergebnisse sind bereits in der Vergangenheit diskutiert worden.

In dieser Publikation wird ein physikalisches Modell der zweistufigen Laboranlage vorgestellt, welches in der Modellierungssprache Modelica mit der Komponentenbibliothek TIL erstellt und an den Messdaten validiert ist. Optimierungspotentiale im Bezug auf die energetische Effizienz werden benannt und mittels Simulation abgeschätzt.

### Stichwörter:

Zweistufiger Kältekreislauf, natürliche Kältemittel, R744, Transportkühlung, Experiment, Validierung, Simulation, Energetische Effizienz

## Einsatz von brennbaren Kältemittel in der Transportkälte Standardrecherche und Risikobewertung

Dipl. Ing. Holger König\*, Dipl. Ing. Thomas Enkemann

ref-tech engineering, Kressbronn  
[Holger.Koenig@ref-tech.de](mailto:Holger.Koenig@ref-tech.de)

\* Korrespondenzautor

Zu den Anwendungen der Transportkälte gehören gekühlte Lkw und Anhänger, Kühlcontainer, Kühlwaggons, marine Kälteanlagen und der Luftverkehr.

Transport Kälteanlagen weisen deutlich höhere Anforderungen auf die Robustheit auf als stationäre Kälteanlagen. Aus diesem Grund erfordern alternative Kältemittel besondere Sorgfalt hinsichtlich der Eignung der Komponenten und des Gesamtsystems; weiterhin eine Bewertung der Risiken bei der Verwendung in den verschiedenen Betriebsarten und über die gesamte Lebensdauer.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur Risikobewertung von brennbaren Kältemittel ISO 817 Klasse A2 (R152a, R32, R1234yf) und A3 (R290, R1270) bei den spezifischen Betriebsbedingungen vorgestellt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse einer Gesetze-, Normen- und Standard-

Recherche für Sicherheitsanforderungen diskutiert. Die Recherche basiert auf nationalen und internationalen Gesetzen und Standards mit Relevanz für die Sicherheit in der Transportkälte.

Darüber hinaus werden Ergebnisse einer Risikomanagement Studie unter Berücksichtigung der verschiedenen operativen Betriebsmodi für die gesamte Lebensdauer diskutiert.

Die Analyse der internationalen Standards als auch Gesetze zeigt, dass ein sicherer Betrieb mit brennbaren Kältemitteln in der Transportkälte als bereits bekannt und umsetzbar anzusehen ist.

Das Gesamtergebnis zeigt, dass die Verwendung von brennbaren Kältemitteln der Gruppe A2 und A3 unter Berücksichtigung aller Betriebsmodi realisiert werden kann. Hierbei sind vor allem gemeinsam mit den Hersteller, dem Betreiber und den Kunden alle Risiken und Betriebsarten kombiniert und weiterhin der sogenannte vorhersehbaren Fehlgebrauch zu bewerten. Die sich hieraus ableitenden konstruktiven Anpassungen als auch während des Betriebs führen unter statischen Gesichtspunkten auf vergleichbare Wahrscheinlichkeiten und Risiken beim Einsatz von brennbaren Kältemitteln im Vergleich zu A1 Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial.

### III.10

## Supermarktkälteerzeugung mit R744 Ejektor Booster

**Jonas Schönenberger<sup>1\*</sup>, Krzysztof Banasiak<sup>2</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>, Sergio Girotto<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> FRIGO-CONSULTING LTD., 3073 Gümligen, Switzerland.  
[j.schoenenberger@frigoconsulting.ch](mailto:j.schoenenberger@frigoconsulting.ch)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

<sup>3</sup> Enex srl, Via Veneto 12, 31038 Padernello di Paese (TV) – Italy  
[sergio.girotto@enex-ref.com](mailto:sergio.girotto@enex-ref.com)

\* Korrespondenzautor

Der durchschnittliche Energiebedarf eines Supermarkets liegt in Europa bei jährlich 300 bis 600 kWh/m<sup>2</sup>, rund die Hälfte davon wird von den Kältemaschinen benötigt. Die große Mehrheit dieser Systeme, die in Europäischen Supermärkten verbaut sind, verwenden FKW R-404A als Arbeitsfluid. Mittlere jährliche Leckageraten in Europa werden auf einen Bereich von 15 - 20 % der Gesamtfüllmenge beziffert. Weltweit wird der Wert auf ungefähr 30 % geschätzt, wobei das FCKW R-22 das überwiegend verwendete Kältemittel ist. Deshalb ist die Entwicklung von effizienten alternativen Systemen mit natürlichen Kältemitteln von großer Bedeutung.

Inzwischen gibt es in Europa mehr als 2000 Supermarktkälteanlagen, die R-744 als Kältemittel verwenden, wobei die meisten Anlagen in Mittel- und Nordeuropa zu finden sind. Die Effizienzsteigerung der Gesamtanlage bei erhöhten Außentemperaturen ist eine technisch lösbare Herausforderung. Als Beispiel wird eine reelle R744 Ejektor Booster Feldanlage vorgestellt, die in einem größeren Supermarkt installiert ist. Erste Messergebnisse werden vorgestellt und analysiert.



III.11

## **A case study on a Supermarket with heat recovery using CO<sub>2</sub> as refrigerant**

**T. Funder-Kristensen<sup>1\*</sup>; G. Fösel<sup>2</sup>, P. Bjerg<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ph.d. Head of Public & Industry Affairs, Danfoss, Nordborg, 6430, Denmark.

<sup>2</sup> Dipl.-Ing. (FH) Innovation Expert – Systems & Technology, Danfoss, Nordborg, 6430, Denmark.

<sup>3</sup> M.Sc. Lead Application Specialist, Danfoss, Nordborg, 6430, Denmark.

\*Corresponding Author

This paper describes a case study made in a midsized supermarket equipped with a CO<sub>2</sub> refrigeration system and additionally heat recovery for space heating and hot tap water. During a ½ year period a thorough data acquisition has been made on the energy flows in the system and on line COP calculations have been done for low temperature and medium temperature levels of the system. The efficiency for cooling and combined heating and cooling is shown and the results are discussed in the context of external parameters as temperature and humidity. Furthermore the economic and environmental aspects are quantified. Future system improvements with regards to unexploited system capacity in cold periods are discussed.

**Key words :**

Heat recovery, CO<sub>2</sub> refrigeration, Cogeneration Cooling and Heating, Supermarket

III.12

## **Entwicklung und Simulation einer Supermarkt-Klimaanlage und deren Einsparungspotential**

**Maren Titze<sup>1\*</sup>, Nicholas Lemke<sup>2</sup>, Armin Hafner<sup>3</sup>, Jürgen Köhler<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik  
38106 Braunschweig, Deutschland  
[M.Titze@tu-bs.de](mailto:M.Titze@tu-bs.de)

<sup>3</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

Supermärkte tragen in Europa bis zu 5 % des nationalen Gesamtenergieverbrauchs bei. Neben Kälteanlagen und Beleuchtung geht dieser zu einem Großteil auf die Klimageräte zurück. Der Hauptgrund für erhöhten Energiebedarf liegt allerdings in der Regel nicht in der geringen Effizienz der Einzelkomponenten begründet, sondern in der unzureichend umgesetzten Wärmerückgewinnung und Integration der einzelnen Systemkomponenten. Somit liegt das Hauptaugenmerk der Arbeit darauf, die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu betrachten und zu optimieren.

Obwohl aktive Wärmerückgewinnung bereits in einigen Supermärkten zum Einsatz kommt, wird diese in vielen Fällen nur zeitweise und teilweise wenig effizient genutzt. Ziel der Arbeit ist es daher, ein intelligentes Wärmerückgewinnungssystem mit einer zentralen Regelungseinheit zu entwickeln. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Optimierung der Klimaanlage Die Anlage wurde in Bezug auf die technische Verschaltung und der Regelung genau auf die Anforderungen eines Supermarktes abgestimmt. Das Regelungskonzept wurde derart ausgelegt, dass die vorhandene Abwärme so effizient wie möglich genutzt wird. Im Fall eines höheren Wärmebedarfs soll die zusätzliche Wärme von der Umgebung möglichst Effizient genutzt werden.

Die Technische Universität Braunschweig und das norwegische Forschungsinstitut SINTEF arbeiten im Rahmen des CREATIV<sup>1</sup> Projektes an der Entwicklung eines neuen Supermarkt Konzeptes. Dabei befasst sich die hier vorliegende Arbeit insbesondere mit der Entwicklung eines dynamischen Modells zur Entwicklung und Auswertung des Konzeptes. Es wurden sowohl verschiedene Regelungsstrategien bei verschiedenen Bedingungen getestet, als auch verschiedene Verschaltungen des Gesamtsystems sowie der einzelnen Komponenten. Dabei wurde hier das Teilmodell für die Klimaanlage betrachtet. Erste Simulationen zeigen die Energieeinsparungen des entwickelten Konzeptes im Vergleich zu einer Referenzklimaanlage. Für die Simulationen wurde die an der technischen Universität Braunschweig und der TLK-Thermo GmbH entwickelte Bibliothek TIL Suite genutzt, welche auf der objektorientierten Sprache *modelica* basiert.

### III.13

## SuperSmart-Energiebenchmarkttool für Supermärkte

Nicolas Fidorra<sup>1\*</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik  
38106 Braunschweig, Deutschland  
[n.fidorra@tu-braunschweig.de](mailto:n.fidorra@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway

\* Korrespondenzautor

Supermärkte sind ein wichtiger Verbraucher elektrischer Energie und haben großes Potential zur Optimierung ihrer Energieeffizienz. Die TU Braunschweig und SINTEF arbeiten an neuen Konzepten zur Reduzierung des Energieverbrauchs in Supermärkten. Innerhalb des CREATIV-Projekts wird eine Software zur Berechnung des Jahresenergieverbrauchs verschiedener Supermarktsysteme entwickelt: Das SuperSmart-Energiebenchmarkttool.

SuperSmart wird den Nutzern beim Design und der Analyse von Supermarktsystemen aus energetischer Sicht unterstützen, insbesondere in Hinblick auf den Jahresenergieverbrauch. SuperSmart wird den gesamten Supermarkt inklusive der Gebäudestruktur, der Klima- und Kälteanlage sowie weiterer relevanter Einflussgrößen wie Standort, Klimabedingungen, Kundenaufkommen, Öffnungszeiten etc. simulieren.

Das Konzept wird im Detail vorgestellt.

### III.14

## Temperaturverteilung in Verkaufskühlmöbeln

Lukas Patryarcha\*, Heiko Dreisbach

<sup>1</sup> Wurm GmbH & Co. KG Elektronische Systeme – Forschung / Systementwicklung  
Morsbachtalstraße 30, 42857 Remscheid  
[patryarcha@wurm.de](mailto:patryarcha@wurm.de); [dreisbach@wurm.de](mailto:dreisbach@wurm.de)

\* Korrespondenzautor

Derzeit wird die Temperatur an ein bis zwei Stellen in einem Verkaufskühlmöbel gemessen. Je nach eingestellter Wichtung wird eine repräsentative Warentemperatur berechnet, nach der geregelt wird und an der sich die Betreiber von Verkaufskühlmöbeln und Lebensmittelkontrolleure orientieren.

---

<sup>1</sup> CREATIV: <http://www.sintef.no/Projectweb/CREATIV/>

In jedem Verkaufskühlmöbel liegt eine Lufttemperaturverteilung vor, die durch diese Technik nicht genügend gut bestimmt werden kann jedoch einen direkten Einfluss auf die Warentemperaturen hat. Das Projektziel war die Temperaturverteilung in einem Verkaufskühlmöbel in Abhängigkeit von verschiedenen Bedingungen zu analysieren und eine Messtechnik bzw. Regelungstechnik zu entwickeln, um die Temperaturverteilung zu berücksichtigen und sich daraus ergebende Vorteile zu nutzen. Die Vorteile sind unter anderem:

1. Mehr Produktsicherheit für Lebensmittel,
2. Adaptiver und energieeffizienter Betrieb von Verkaufskühlmöbeln bei reduziertem Parametrierungsaufwand,
3. Identifizierung und Bewertung von bisher nicht detektierbaren Störeinflüssen,
4. Besseres Abbild der Vorgänge in einem Verkaufskühlmöbel.

Im Labor wurde der Einfluss von Lüfterausfällen, Verdampfervereisungen und zugestellten Rückluftkanälen auf die Temperaturverteilung in einem offenen und einem isolierverglasten Kühlmöbel untersucht. Die Auswirkungsstärke von Störungen auf die Temperaturverteilung in einem Verkaufskühlmöbel ist unter anderem vom Kühlmöbeltyp und seinen Betriebsbedingungen abhängig. Eine Veränderung der Temperaturverteilung ist mit einer Veränderung der Luftströmung gekoppelt und hat direkten Einfluss auf die Warentemperaturverteilung (Prüfpakete) in einem Verkaufskühlmöbel.

Im Markt wurde die Temperaturverteilung eines offenen Verkaufskühlmöbels mit Kundenverkehr und realer Ware untersucht. Je nach Warenverteilung und Kundenverkehr kann eine Störung des Lüftschleiers auch dauerhaft stattfinden und sich auf die Temperaturverteilung in einem Verkaufskühlmöbel auswirken.

Auf Grundlage der Messergebnisse wird eine Erweiterung der bisherigen Messtechnik vorgeschlagen, um die Temperaturverteilung in einem Verkaufskühlmöbel besser abbilden und die sich daraus ergebenden Vorteile nutzen zu können.

**Stichwörter:**

Verkaufskühlmöbel, Temperaturverteilung, Temperaturmessung, Luftströmung, Regelungstechnik

III.15

## Neue Kältemittelgemische mit niedrigem GWP

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

<sup>1</sup> Mexichem Fluor, The Heath Technical & Business Park, Runcorn, UK

<sup>2</sup> Mexichem Fluor, Oberer Kalbacher Weg 6 B, 60437 Frankfurt am Main, Deutschland  
Fon 069 5000 6740, E-Mail: [karsten.schwennesen@mexichem.com](mailto:karsten.schwennesen@mexichem.com)

\* Korrespondenzautor

Im Rahmen der umfassenden Bemühungen die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren wird auch die Reduktion des Einflusses von Kälte- und Klimaanlage angestrebt.

Der Einfluss dieser Anlagen hängt nicht nur vom direkten Erderwärmungspotential (GWP) des jeweiligen Kältemittels, sondern auch von den Kältemittelleigenschaften und der daraus resultierenden Energieeffizienz im Betrieb ab.

Durch die gezielte Entwicklung von Gemischen können die technischen Eigenschaften von Kältemitteln mit sehr niedrigem GWP sowohl im Hinblick auf Sicherheit (zum Beispiel Entzündlichkeit) als auch durch Anpassung der thermophysikalischen Eigenschaften des Kältemittels verbessert werden.

Beispiele für diesen Entwicklungsansatz werden diskutiert und Entwicklungsergebnisse für Kältemittel zur zukünftigen Anwendung in Kälte- und Klimaanlage dargestellt. Dadurch wird deutlich, dass die vermeintlichen technischen Nachteile von Kältemittelgemischen durch deutliche Verbesserungen bei Leistung und/oder Sicherheit aufgewogen werden können.

Die Anwendung in mobilen Klimaanlage dient als Beispiel für die vielfältigen Sachzwänge bei der Auswahl und Optimierung von Kältemitteln.

III.16

## **Kohlenwasserstoffe als Kältemittel in ausgewählten Anwendungen**

### **Stand und Perspektiven für Kohlenwasserstoffe als Kältemittel in Deutschland**

**Thomas Kimmel**

Öko-Recherche, Jonathan Heubes, HEAT

Da die gewöhnlich verwendeten fluorierten Kältemittel zum Treibhauseffekt beitragen, sind ihre Emissionen soweit wie möglich zu minimieren. Dies ist vor allem in Neuanlagen durch den Einsatz von alternativen Kältemitteln mit geringerer Klimawirkung realisierbar. Gegenstand des Vortrags sind zum einen die Verwendungsmöglichkeiten und Vorteile von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln, zum anderen werden Hindernisse aufgezeigt, die eine Verbreitung von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln erschweren, sowie mögliche Maßnahmen, um denen zu begegnen.

Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen ist in Deutschland bisher oft auf wenige Anwendungen mit geringer Kühlleistung beschränkt. Im Zuge eines laufenden Forschungsvorhabens werden weitere Verwendungsmöglichkeiten von Kohlenwasserstoffen als Kältemittel untersucht. Der Vortrag bietet zunächst einen Einblick in die technischen Annahmen zum Einsatz von Kohlenwasserstoffen im Vergleich zu HFKW in ausgewählten Klima- und Kälteanwendungen (Wärmepumpen und Flüssigkeitskühlsätze). Beispiele für heute am Markt erhältliche Produkte und Systeme werden genannt. Mit Hilfe eines Rechenmodells wird das Potenzial zur Verringerung von Treibhausgasemissionen aufgezeigt, das sich durch den Einsatz von Kohlenwasserstoff-Technologien erzielen lässt.

Die weitere Verbreitung von Kohlenwasserstoff-Kältemitteln wird derzeit durch verschiedene Hindernisse erschwert. Nach einer umfassenden Übersicht werden die wichtigsten Hemmnisse erläutert. Darüber hinaus werden, am Beispiel einer ausgewählten Anwendung, konkrete Maßnahmen aufgezeigt, die einen vermehrten Einsatz von KW-Kältemitteln in Deutschland ermöglichen und somit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

III.17

## **Das Kältemittel Luft Historie – Gegenwart - Zukunft**

**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)

Kältemittel sollen umweltverträglich sein und zum energieeffizienten Betrieb der Kältemaschine beitragen. Die Diskussion über die Auswahl des richtigen Kältemittels ist nicht zuletzt wegen der bestehenden und kommenden gesetzlichen Richtlinien in vollem Gang. Unter diesen Gesichtspunkten bietet sich Luft als natürliches Kältemittel durchaus als interessante Alternative zu den synthetischen Kältemitteln an.

In dem Vortrag wird ausgehend von Veröffentlichungen ab dem Jahr 1850 zusammengefasst, welche wechselvolle Geschichte Luft als Kältemittel bis heute hat, welche Arten der Prozessführung diskutiert und welche technischen Lösungen realisiert wurden. Durch die thermodynamische Analyse der Prozessführung werden wichtige Vorgaben für die Komponenten abgeleitet, die notwendig sind, um seine funktionierende Kaltluft-Kältemaschine zu bauen und diese effektiv zu betreiben.

Es wird aufgezeigt, in welchen Bereichen Kaltluft-Kältemaschinen in der Vergangenheit genutzt wurden und wo sie heute gebräuchlich sind. Dabei wird der Bogen von der Tieftemperaturkälteanwendung, der Bergwerksbewetterung über Sonderanlagen in Raumstationen bis zur Klimatisierung

von Fahrzeugen und Flugzeugen gespannt. Zum Abschluss wird ein Ausblick darüber gegeben, welche Einsatzmöglichkeiten sich in der Zukunft abzeichnen könnten.

**Stichwörter:**

Kältemittel Luft, Historie, Kälteanwendung

III.18

## Stand der derzeitigen Entwicklung bei Wärmepumpen

**Dr.-Ing. Rainer M. Jakobs**

DMJ Beratung, Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik e.V.  
Kreuzfeldstr. 10a, 64747 Breuberg  
[Dr.Rainer.Jakobs@t-online.de](mailto:Dr.Rainer.Jakobs@t-online.de)

Im Oktober 2013 wird in Nürnberg der dritte European Heat Pump Summit abgehalten. Dieser Vortrag fasst u.a. die Ergebnisse dieser Veranstaltung zusammen.

Ein kurzer Überblick zur Entwicklung der WP-Märkte in und außerhalb Europas zeigt die derzeitige Bedeutung der Wärmepumpen auf.

Die Herausforderungen umfassen u.a. die Eco-Effizienz Richtlinien, die geplante Revision der F-Gasverordnung, die Aufgaben und Möglichkeiten bei der Energiewende sowie die bivalenten Nutzungen von unterschiedlichen Energieträgern.

Die Komponentenentwicklung schreitet voran: vom Verdichter über die Wärmeübertrager, die Ventilatoren und Pumpen bis hin zu neuen integrierten Regelsystemen sowie die notwendige mögliche Anbindung an das Smart Grid.

Die Nutzung der WP im gewerblichen und industriellen Bereich hat ein hohes Potenzial. 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:**

Markt für Wärmepumpen, Herausforderungen für WP, Technische Entwicklungen bei WP; Wärmepumpenanwendung; Forschung und Entwicklung

III.19

## Wärmepumpentrocknung: Prozesssimulation einer industriellen Konvektionstrocknung für Klippfisch

**Michael Bantle**

SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Michael.Bantle@sintef.no](mailto:Michael.Bantle@sintef.no)

Die Wärmepumpeneinheit einer industriellen Anlage zur Trocknung von norwegischem Trockenfisch wurde in einer dynamischen Prozesssimulation analysiert. Die feuchte und kalte Luft am Ende des Trocknungsprozesses wird hierbei mittels einer Wärmepumpe entfeuchtet und im Anschluss auf die notwendige Trocknungstemperatur erwärmt. Hierbei wird sowohl spezifische als auch latente Wärme zwischen Kältemittel und Trocknungsluft ausgetauscht.

Ein Model für die Klippfischtrocknung wurde anhand von experimentellen Daten entwickelt. Die Wärmepumpe, bestehend aus den Komponenten Verdampfer, Kompressor, Kondensator (intern und extern), Expansionsventil, sowie der Trocknungstunnel, wurden für ein 250 kW System ausgelegt. Als Kältemittel wurde Ammoniak (R717) gewählt. Die Trocknungsleistung der Wärmepumpe wurde mit einem herkömmlichen Konfektionstrockner mit elektrischer Aufwärmung verglichen.

Der Energieverbrauch in der Wärmepumpentrocknung wurde auf 195.5 kWh pro Tonne produzierten Klippfisch berechnet. Im Vergleich dazu beträgt der Energieverbrauch im herkömmlichen Konfektionstrockner 973.8 kWh pro Tonne produzierten Klippfisch. Das Feuchtprofil im Trocknungstunnel wurde mit dem vorgeschlagenen Model korrekt ermittelt. Maßnahmen zur Prozessverbesserung wurden anhand der ermittelten Daten von Energieverbrauch, spezifische Entfeuchtungsrate und Wärmeströme besprochen.

Weiterhin wird eine mögliche Nutzung der überschüssigen Energie des externen Kondensators für den Trocknungsprozess analysiert. Hierzu wird der Trocknungsprozess in eine Haupttrocknung und eine anschließende Lagerdrying aufgeteilt, welche jeweils über die internen und externen Kondensatoren Trocknungsenergie erhalten. Bei gleichbleibender Größe des Wärmepumpentrockners kann durch das vorgeschlagene System die Produktivität der Anlage um 40 % gesteigert werden, während sich die Produktionskosten um den gleichen Faktor verringern.

### III.20

## **Technische, ökologische und ökonomische Analyse des Einsatzes einer Wärmepumpe zur Nutzung von industrieller Abwärme in einem metallverarbeitenden Betrieb**

**Gerald Zotter\*, René Rieberer**

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

\* Korrespondenzautor

„Hochtemperatur-Wärmepumpen“ - für Wärmesenktemperaturniveaus über 70° C - ermöglichen die Nutzung von i.d.R. ungenutzter Abwärme aus Industrieprozessen für die innerbetriebliche Wärmeversorgung. Somit könnte eine bis dato brachliegende, aber aufgrund des Temperaturniveaus interessante Ressource erschlossen werden.

In dieser Arbeit wurde eine Machbarkeitsstudie für die Anwendung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Nutzung von Abwärme in einem metallverarbeitenden Betrieb durchgeführt, wobei verschiedene Systeme hinsichtlich technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte bewertet bzw. priorisiert.

Im Konkreten sollte bisher ungenutzte Kondensationsabwärme eines bestehenden Kaltwassersatzes von einem Temperaturniveau von ca. 45° C mittels einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe auf ein nutzbares Temperaturniveau von ca. 80° C angehoben und zur Beheizung von Galvanikbecken verwendet werden. Die messtechnische Erhebung des zeitlich verfügbaren Abwärmepotentials und des Bedarfsprofils während eines repräsentativen Zeitraums zeigte, dass durchschnittlich ca. 75 kW mit einer hohen Auslastung von mehr als 4000 Volllaststunden pro Jahr nutzbar sind. Verschiedene Systeme wie z. B. Add On-, hybride Kompressions/Absorptions-Wärmepumpen etc. wurden dafür via Simulation hinsichtlich der zu erwartenden Jahresarbeitszahl miteinander verglichen und jeweilige Einbindungskonzepte in die Infrastruktur erarbeitet. Neben den technischen Kriterien, wie z. B. Effizienz, Regelbarkeit oder sicherheitstechnische Aspekte für die eingesetzten Kältemittel, war vor allem die wirtschaftliche Darstellbarkeit für den Industriebetrieb entscheidend.

Die durchgeführte Studie zeigt, dass trotz der für dieses Temperaturniveau unüblich kleinen Leistungsklasse eine Wärmepumpe am Markt erhältlich ist, die sich für diese Anwendung innerhalb von 7 Jahren (dynamisch) amortisieren würde. Eine detaillierte Sensitivitätsanalyse ergab, dass sich



bei einem Anstieg des Gaspreises gegenüber der ursprünglichen Annahme um 25 % diese Wärmepumpenanwendung schon in weniger als 4 Jahren amortisieren kann.

Aus ökologischer Sicht könnten durch die innerbetriebliche Abwärmenutzung mittels Wärmepumpe im Vergleich zum bestehenden Gaskessel über 60 % der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden, weshalb diese Studie neben den ökonomischen Vorteilen vor allem das ökologische Potential von Wärmepumpen in der Industrie verdeutlicht.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Industrielle Abwärme, Simulation, Ökonomische Analyse

III.21

## **Kosten senken und Qualität steigern durch Adsorptionskälte in der Kunststoffverarbeitung**

**André Weiß**

SorTech AG, Zscherbener Landstr. 17, 06126 Halle (Saale)  
Fon: +49 345 279809-12, Fax: +49 345 279809-98, Mobile [D]: +49 174 3090197  
E-Mail: [Andre.Weiss@sortech.de](mailto:Andre.Weiss@sortech.de), Website: <http://www.sortech.de>

Kälte- und Klimaanlage machen etwa 20 – 25 Prozent der Energiekosten eines durchschnittlichen Kunststoff-Extrusionsbetriebes aus. Die Steigerung der Energieeffizienz in der Kunststoffverarbeitung ist seit einigen Jahren eines der wesentlichen Themen innerhalb der Branche, nicht zuletzt getrieben durch die politischen Forderungen der Energiewende.

Großes Effizienz-Potenzial besteht meist in der kritischen Betrachtung der Prozessführung sowie der Verfahrenstechnik selbst. Neben vielen anderen Ansatzpunkten steht auch die Nutzung von während Extrusionsprozessen anfallenden Abwärmepotenzialen im Fokus. Vorgestellt wird ein Konzept zur Nutzung der im Produkt enthaltenen thermischen Energie, unter anderem zur Erzeugung von Prozesskälte. Eine überzeugende Gesamtlösung entsteht beispielsweise mit dem Einsatz von Adsorptionskälteaggregaten.

III.22

## **Effizienzsteigerung der Kälteerzeugung am Beispiel eines komplexen Kühlwassersystems**

### **Möglichkeiten und Vorgehensweise beim Einsatz von Simulationswerkzeugen**

**Achim Brenner<sup>1</sup>, Stefan Kirschbaum<sup>2</sup>, Helmut Lepple<sup>1</sup>, Michael Zens<sup>\*3</sup>**

<sup>1</sup> Robert Bosch GmbH, D-72762 Reutlingen  
[achim.brenner@de.bosch.com](mailto:achim.brenner@de.bosch.com), [helmut.lepple@de.bosch.com](mailto:helmut.lepple@de.bosch.com)

<sup>2</sup> Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFai), D-12489 Berlin  
[kirschbaum@gfai.de](mailto:kirschbaum@gfai.de)

<sup>3</sup> perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, D-52066 Aachen  
[m.zens@perpendo.de](mailto:m.zens@perpendo.de)

Große Kühlwassersysteme bestehen zu meist aus mehreren Kältezentralen mit unterschiedlichen Arten von Kältemaschinen. Die von den Kältemaschinen zu erzeugende Leistung variiert auf Grund von schwankenden Produktionsauslastungen und des Einflusses der Witterung auf die Klimatisierung.

Die Reihenfolge der in Betrieb zu nehmenden Maschinen sollte nicht allein vom Leistungsbedarf bestimmt werden. Randbedingungen wie das Teillastverhalten, die Wirkungsgrade, hydraulische Anforderungen, die Rückkühsituation, Witterung und Wärmerückgewinnungspotenzial bestimmen wesentlich die Effizienz des Gesamtsystems und müssen ebenfalls berücksichtigt werden.

Die Aufgabe, eine solche Kälteversorgungszentrale möglichst energieeffizient zu betreiben, kann vor diesem Hintergrund als sehr komplex bezeichnet werden. Die optimale Betriebsweise der Gesamtanlage kann zumeist auf Grund der hohen Komplexität mit analytischen Methoden nicht bestimmt werden. Simulationswerkzeuge können an dieser Stelle eine wesentliche Hilfestellung leisten: Insbesondere dann, wenn es gelingt, mittels geeigneter Lösungsalgorithmen ein mathematisches Optimum für die Betriebsweise des Gesamtsystems zu ermitteln.

In dem konkreten Anwendungsfall ist die Kälteversorgungszentrale der Robert Bosch GmbH am Standort Reutlingen untersucht worden, um den Energiebedarf der insgesamt 13 Kältemaschinen mit einer Gesamtkälteleistung von 27 MW zu reduzieren. In diesem Fall war als weitere Einflussgröße für die Optimierung zu beachten, dass aus einem Teil der Rückkühleinrichtungen eine Wärmerückgewinnung für mehrere große Lüftungsanlagen betrieben wurde.

Der aktuelle Vortrag stellt die Aufgabenstellung und die Vorgehensweise zur Optimierung mittels einer Simulation vor. Es werden die Schwierigkeiten bei der Modellierung solch komplexer Systeme und die erarbeiteten Lösungen diskutiert. Abschließend wird ein Ausblick auf die geplante Umsetzung der Verbesserungsvorschläge und den Entwicklungsbedarf im Bereich der Simulationswerkzeuge gegeben.

**Stichwörter:**

Effizienzsteigerung, Großkälteanlage, Wärmerückgewinnung, Simulation

III.23

## **Systematische Analyse und Bewertung von Energiekonzepten bei Supermärkten und Discountern**

**M. Sc. Daniel Rettich\*, M. Sc. Thomas Köberle, Prof. Dr.-Ing. Martin Becker**

Hochschule Biberach (HBC), Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE),  
Karlstraße 11, 88400 Biberach

[rettich@hochschule-bc.de](mailto:rettich@hochschule-bc.de); [koeberle@hochschule-bc.de](mailto:koeberle@hochschule-bc.de); [becker@hochschule-bc.de](mailto:becker@hochschule-bc.de)

\* Korrespondenzautor

Im Lebensmitteleinzelhandel (Supermärkte, Discounter, ...) spielt bei einer gesamtenergetischen Betrachtung neben dem Energieverbrauch für die Gebäudetechnik (Heizung, Klimatisierung, Lüftung, Beleuchtung, etc.), der Energieverbrauch für die Gewerbekälte zur Kühlung der eingelagerten Lebensmittel in Kühltheken, Kühlmöbeln und Kühlräumen eine besonders große Rolle. Insbesondere bei Supermärkten mittlerer Größe benötigen die für die gewerbliche Kältetechnik üblicherweise eingesetzten elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen, typischerweise ca. 60 % der gesamten benötigten elektrischen Energie. Aus diesem Grund ist speziell der effizienten Kältenutzung für die Lagerkühlung, unter Beachtung der sinnvollen energetischen Kopplung zu den anderen Gewerken, besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

In der Praxis sind in letzter Zeit unterschiedlichste innovative Gesamtenergiekonzepte entwickelt worden, die sich jedoch auf den ersten Blick nur schwer miteinander vergleichen lassen. Es fehlt an einer systematischen Klassifizierung und Methodik zur vergleichenden Bewertung von Energiekonzepten, beispielsweise hinsichtlich Energieverbrauch und Energieeffizienzkriterien, wie dies z. B. bei Bürogebäuden bereits üblich ist. Auch sollten diese neuen Konzepte mit bestehenden Energiekonzepten im Gebäudebestand hinsichtlich eines Benchmarkings vergleichbar sein.



Im Rahmen eines Forschungsprojekts<sup>2</sup> wird der Versuch unternommen, die verschiedenen Energiekonzepte bei bestehenden, sowie neu gebauten Supermärkten vergleichend und hinsichtlich einer energetischen Bewertung systematisch zu klassifizieren. Dabei werden typische kältetechnische Anlagenkonzepte kategorisiert und durch einheitliche RI-Schemata abgebildet. Zudem werden Supermärkte und Discounter hinsichtlich ihrer Typisierung der Gebäude- und Energietechnik in Steckbriefen erfasst, nach üblichen Varianten eingeordnet und das Energieverbrauchsprofil für Wärme, Strom, Kälte (Gebäudekühlung, Lagerkühlung) im Detail ermittelt und klassifiziert. Eine solche Typisierung bietet die Basis für die Entwicklung von standardisierten Monitoring-Leitfäden, mit einem auf die Anlagentypisierung in Art und Umfang abgestimmten Messkonzept und definierten Bilanzgrenzen. Außerdem bietet diese Typisierung eine methodische Grundlage für ein darauf aufbauendes Energie-Benchmarking für Supermärkte bzw. Discounter.

**Stichwörter:**

Energiekonzept, Energieeffizienz, Optimierte Betriebsführung, Monitoring, Anlagentypisierung

III.24

## Effizienzsteigerung von Kälteanlagen durch Absenkung der Verflüssigungstemperatur

Stefan Buffler\*, Volker Siegismund, Alexander Floß

Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, 88400 Biberach  
[buffler@hochschule-bc.de](mailto:buffler@hochschule-bc.de)

\* Korrespondenzautor

Zahlreiche Kälteanlagen im gewerblichen und industriellen Bereich werden das gesamte Jahr über betrieben. In der Praxis ist es üblich, unabhängig von der Außentemperatur die Verflüssigungstemperatur lediglich bis auf etwa 25 °C abzusenken, was im Wesentlichen mit der Mindestdruckdifferenz über das Expansionsventil begründet wird. Die Folge dieser Begrenzung ist, dass während 8000 Stunden eines Jahres von einer effizienzsteigernden Reduzierung der Verflüssigungstemperatur kein Gebrauch gemacht wird.

Im vorliegenden Beitrag wird eine theoretische Betrachtung des Energieeinsparpotentials durch eine verstärkte Absenkung der Verflüssigungstemperatur vorgestellt. Hierbei werden Mehraufwendungen für den Ventilatorstrom am Verflüssiger genauso berücksichtigt wie die Einsatzgrenzen von Expansionsventilen und Verdichtern. Es wurden mehrere Simulationen mit verschiedenen Begrenzungen der minimalen Verflüssigungstemperatur durchgeführt und die Jahresarbeitszahlen gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass gegenüber der Standardbegrenzung von mindestens 25 °C Verflüssigungstemperatur ein jährliches Energie-Einsparpotential an der gesamten Kälteanlage von bis zu 15 % möglich ist.

Die Betrachtungen zeigen, dass eine Absenkung der Verflüssigungstemperatur unter die heute in der Praxis üblichen 25 °C ohne Probleme durchführbar ist. Speziell in Verbindung mit effizienten Verflüssiger-Ventilatoren bietet dies ein beachtliches Energie-Einsparpotential. Die Lösung liegt in der Verwendung von elektronisch betriebenen Expansionsventilen und einer neuen Herangehensweise bei deren Auslegung.

**Stichwörter:**

Minimale Verflüssigungstemperatur, Expansionsventile, effiziente Ventilatoren, Einsatzgrenzen

---

<sup>2</sup> EnOB:MONITOR: Begleitforschung zu den Demonstrationsprojekten innerhalb des Förderkonzepts Energieoptimiertes Bauen (EnOB); Teilprojekt: Untersuchungen zur integralen Systemkopplung von Gebäude, Gebäudetechnik und Gewerbekälte bei Supermärkten als Basis für „Niedrigstenergiegebäude“ bzw. „Nullenergiegebäude“; gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Laufzeit 2012-2014.

III.25

## **EU F-Gase-Verordnung 842/2006 - eine europäische Erfolgsgeschichte**

**Aktuelle Daten und Fakten zu den Leckageraten  
an stationären Kälte- Klimaanlage in Deutschland**

**Wolfgang Zaremski\*, Volker Hudetz**

VDKF Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.  
Josef-Biber-Haus, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 53113 Bonn

\* Korrespondenzautor

Die am 17. Mai 2006 verabschiedete Regelung des europäischen Parlaments und des Rates zur Reduzierung bestimmter florierter Treibhausgase steht aktuell zur Revision an. Diverse Vorschläge unterschiedlicher Arbeitsgruppen des EU Parlaments sind zurzeit immer noch in der Diskussion. Im Rahmen dieses Vortrags werden brandaktuelle Daten und Fakten über die tatsächlichen Belastungen durch F-Gase Emissionen der stationären Kälte- und Klimatechnik in Deutschland vorgestellt. Die Daten sind sicherlich weitgehend reproduzierbar auf weitere EU-Länder und können zur Versachlichung der europäischen F-Gase Ausstiegs-Diskussion sehr hilfreich sein. Ebenso muss sich gerade Deutschland als führender europäischer Hersteller von Komponenten und Anlagentechnik für die Kälte- und Klimatechnik die Frage stellen, inwieweit ein überhasteter Ausstieg aus den F-Gasen umweltpolitisch sinnvoll und wirtschaftlich ohne Schaden für die deutsche Volkswirtschaft gestemmt werden kann.

Die aktuellen LEC-Auswertungen des II. Quartal 2013 belegen, dass der Anteil der F-Gase-Emissionen in der deutschen stationären Kälte- und Klimatechnik im Vergleich zu anderen F-Gase-Anwendungen besonders in Deutschland stark rückläufig ist. Hierzu hat maßgeblich die aktuelle F-Gase-Verordnung beigetragen. Insoweit liefert der VDKF mit seinen Ergebnissen aus der deutschen LEC-Branchensoftware-Auswertung statistisch abgesicherte und damit belastbare Entscheidungshilfen zur Revision der Verordnung für die beteiligten deutschen und europäischen politischen Gremien und Entscheidungsträger.

### **Stichwörter**

EU F-Gase-Verordnung, LEC Branchensoftware, florierete Treibhausgase vermeiden, Anlagendichtigkeit, F-Gase Leckageraten, Kältemittelbestand, VDKF

III.26

## **Nationale Kältemittel-Emissionen**

**Jörn Schwarz**

Ice-TeX Ingenieurbüro, Rühlower Damm 36, D-17039 Rühlow  
Tel.: 0049-39606-29871, E-Mail: [icetex@web.de](mailto:icetex@web.de)

Das „Rahmeneinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen“ verpflichtet seit 1994 die Mitgliedsstaaten, die nationalen Emissionen aller Treibhausgase jährlich zu erheben und die Ergebnisse an die Europäische Kommission sowie an das Klimasekretariat der Vereinten Nationen zu übermitteln. In Deutschland ist das Umweltbundesamt (UBA) mit der Erhebung der Treibhausgasemissionen beauftragt.

Bei den F-Gas-Kältemitteln werden die Emissionen mit Hilfe von Rechenmodellen bestimmt. Diese beruhen auf Annahmen, Schätzungen und Marktdaten. Hinsichtlich der Genauigkeit der berechneten Werte finden sich in Veröffentlichungen des UBA Eigenaussagen zu einer „gewissen Verlässlichkeit“ und dazu, dass „reale Veränderungen der spezifischen Emissionen nicht erfasst werden“.

Das Deutsche Statistische Bundesamt (DESTATIS) erhebt im Rahmen des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) die Herstellung, die Ein- und Ausfuhr sowie die Verwendung von F-Gasen. Hinsichtlich der Genauigkeit der DESTATIS-Daten ist in der Einleitung der jährlichen Berichte zu lesen: „Die Ergebnisse der Erhebung ... können als sehr genau angesehen werden, da sie auf einer Totalerhebung der Verwender sowie der herstellenden, ein- und ausführenden Unternehmen beruhen.“

Ein Vergleich der beiden Erhebungen zu den nationalen Kältemittel-Emissionen zeigt große Unterschiede: die Betriebsemissionen der gesamten Kältetechnik sind gemäß UBA 2½-mal so groß wie diejenigen gemäß DESTATIS.

Aus diesem Grund wurden die Genauigkeit der Emissionsermittlungs-Modelle und die daraus resultierenden Resultate überprüft.

### III.27

## **Überarbeitung der EU F-Gas-Verordnung: Wie wirken sich die neuen Regelungen auf Deutschland aus?**

**Barbara Gschrey\*, Winfried Schwarz (Öko-Recherche)**

\* Korrespondenzautorin

Die Revision der europäischen F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 ist im Gange und soll über das bisherige Maß hinaus zur Verminderung der Emissionen fluoriierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF6) in Europa beitragen. Kerninhalte der Überarbeitung sind europäische Mengenbeschränkungen für fluorierte Kohlenwasserstoffe (Phase down), verstärkte Maßnahmen zur Emissionsrückhaltung, ein Verbot der Vorbefüllung von Geräten, ein Nachfüllverbot für F-Gase mit hohem Treibhauspotenzial (GWP) sowie einige Verwendungsverbote von fluorierten Gasen. Voraussichtlich ist aufgrund dieser Maßnahmen mit etlichen Veränderungen für verschiedene Branchen, vor allem für die Kältebranche, zu rechnen.

Je nach Stand des politischen Prozesses werden die wichtigsten Inhalte des letzten Entwurfs der Neuregelung bzw. der abschließenden Fassung kurz vorgestellt. Anschließend werden Ergebnisse eines Vorhabens des Umweltbundesamtes gezeigt. Dieses Vorhaben beschäftigt sich mit der Frage, wie sich die neuen Regelungen langfristig auf die Nachfrage nach F-Gasen in Deutschland auswirken könnten. Dabei spielt Verbreitung von Alternativen zu HFKW-Anwendungen eine wichtige Rolle. Annahmen zur künftigen Marktdurchdringung von Alternativtechnologien auf Basis von CO<sub>2</sub>, Ammoniak, Kohlenwasserstoffen sowie ungesättigten HFKW (HFOs) wurden im Herbst/Winter 2012 mit zahlreichen Industrieexperten diskutiert und werden im Vortrag für verschiedene Kälte-Sektoren dargestellt. Die Beschränkungen der HFKW-Mengen für den europäischen Markt werden mit Nachfrage-Szenarien für Deutschland verglichen.

**Notizen**

IV.01

## **Sorptionsgestützte Klimatisierung und Membran- Kühldecken**

**Kühldecke mit kondensatfreier Luftentfeuchtung – Pilotanwendung  
für dezentrale Flüssigsorption**

**Dipl.-Ing. (FH) Hannes Rosenbaum**

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

Tel.: 0351 4081-667, Fax: 0351 4081-655, E-Mail: [hannes.rosenbaum@ilkdresden.de](mailto:hannes.rosenbaum@ilkdresden.de)

Thermische Behaglichkeit, Hygiene, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit sind allesamt entscheidende Zielgrößen für gebäudetechnische Systeme zur Raumklimatisierung. Die hohen Anforderungen an Temperatur, Luftfeuchte, Zugluftrisiko und Luftqualität im Raum sollen zum einen mit kleinstmöglichem Energieeinsatz und zum anderen mit möglichst geringen Investitions- und Betriebskostenaufwendungen erreicht werden. Besonderes Optimierungspotenzial besteht nach wie vor für Luftbehandlungsprozesse zur Luftentfeuchtung. Der Entfeuchtungsprozess selbst stellt vor allem dezentrale und stille Systeme zur Raumklimatisierung vor teils unüberwindbare Herausforderungen und setzt ihnen technische Leistungs- und Einsatzgrenzen. Entweder er ist nicht realisierbar (Kühldecken, thermische Bauteilaktivierung) oder wird gezielt vermieden, um den enormen technischen Aufwand zur Kondensatabfuhr zu umgehen (dezentrale Klimageräte, Fassadenklimageräte). Das Resultat sind letztendlich Kompromisse zulasten der Behaglichkeit (Hygieneanforderungen, Raumtemperatursollwerte), mit denen Planer und Nutzer gleichermaßen umgehen müssen.

Flüssigsorptionsprozesse über semipermeable Membranen bieten einen Lösungsansatz, der insbesondere im Hinblick auf dezentrale und stille Systeme zur Raumklimatisierung weit über die technischen Möglichkeiten und Grenzen des Standes der Technik hinausgehen. Der Vortrag konkretisiert diesen Lösungsansatz am Beispiel der Entwicklung eines „membranbasierten Kühldeckensystems“ und stellt Anlass, Verfahren, Testergebnisse sowie Herausforderungen dezentraler Flüssigsorptionsprozesse vor.

IV.02

## **VRF Luft/Luft-Wärmepumpen der neuesten Generation**

**Neue Technologien für unterbrechungsfreien Heizbetrieb, saisonale Effizienz und Komfort**

**Dipl. -Ing. (FH) Thomas Graupensberger**

Daikin Airconditioning Germany GmbH, Inselkammerstr. 2, 82008 Unterhaching

Die VRF Technologie ist mittlerweile 30 Jahre alt und hat sich vom Exoten zum festen Bestandteil weltweit in der technischen Gebäudeausstattung entwickelt. Allein in Deutschland sind in den letzten drei Jahren über 40.000 Systeme eingebaut worden. Ein großer Teil der Anlagen wird in monovalenten Anwendungen betrieben. Speziell im konservativen deutschen Markt haben VRF-Systeme in Bezug auf Energieeffizienz und Komfort gelegentlich immer noch mit Vorbehalten zu kämpfen. Dabei wurden die Geräte gerade in diesem Bereich stark optimiert und brauchen den Vergleich mit der „klassischen“ Klima- und Wärmetechnik nicht scheuen.

So ist die neueste Generation der VRF-Wärmepumpe in der Lage die Abtauenergie nicht mehr durch Kreislaufumkehr zu gewinnen, sondern bezieht diese aus einem PCM-Speicher in der Außeneinheit. Dadurch wird der Einfluss der Abtauung für den Nutzer kaum mehr spürbar. Durch neue, innovative Regelstrategien wird die erforderliche Leistung nicht nur durch die Invertersteuerung der Kompressoren erreicht, sondern auch durch die permanente Anpassung der Zieltemperaturen im Kältekreislauf, abhängig vom aktuellen Bedarf des Gebäudes. Durch diese beiden Maßnahmen wird sowohl im

Kühlfall als auch im Heizfall bester Komfort sichergestellt. Gerade die variable Kältemitteltemperatur ist auch dafür verantwortlich, dass zum Beispiel im Kühlbetrieb SEER-Werte von 7,5 erreicht werden.

Die Energiewende in Deutschland, die Klimaziele der EU und die Umsetzung der nZEB Anforderung ab 2019 stellen für die Wärmepumpenbranche eine große Herausforderung und Chance zugleich dar.

Können VRF-System dazu beitragen die zukünftigen Anforderungen zu erfüllen? Kann durch den Betrieb von VRF-Anlagen der Primärenergiebedarf und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines Gebäudes reduziert werden? Wie kann der Anteil von regenerativer Energie in einem Gebäude durch Kopplung zweier Systeme, wie z. B. PV-Anlage, noch weiter gesteigert werden?

Rund um diese Fragen wird der 30 Minuten lange Vortrag aufgebaut sein.

### IV.03

## **Kosteneffizientes Energieverbrauchs-Mangement mittels WEB-basierender Echtzeit-Analyse von Energieverbrauchsdaten für automatisierte Vorhersagen beim Betrieb von Anlagen**

**Dipl. Ing. Holger König\*, Dipl. Inf. Andreas Müller**

KWIQly GmbH, Niederreid 3835, Bern, Schweiz  
[Holger.Koenig@kWIQly.com](mailto:Holger.Koenig@kWIQly.com)

\* Korrespondenzautor

Der globale wirtschaftliche Verlust durch die Verschwendung von Energie (Waste Energy) in Gebäuden und Anlagen wird mit 1.5 Milliarden USD beziffert.

Eine große Schwierigkeit bei der Vermeidung von Wast-Energy stellt die Identifizierung des Fehlbetriebs von Verbrauchern im Betrieb und bei der Benutzung dar, die auf realen Energie-Verbrauchsdaten basieren. Die Bewertung von Verbrauchsdaten erfolgt bisher vor allem durch manuelle Auswertung und lokale Beurteilung bzw. Begutachtung der Verbraucher.

Die riesige Anzahl von Gebäuden und energieverbrauchende Anlagen entziehen sich allerdings einer lokalen Beobachtung und Betreuung aufgrund der großen Anzahl und der Komplexität der Zusammenhänge, insbesondere bei ineinander übergreifenden Gewerken.

In dieser Arbeit wird eine neue Analysetechnik vorgestellt, mit der die Energie-, Gas-Verbrauchsdaten mittels nichtlinearer stochastischer Systemanalyse hinsichtlich Anomalien untersucht und mit Außentemperaturgängen in Beziehung gesetzt wird. Hierzu werden virtuelle mathematische Verbraucher, z. B. virtuelle Gebäude erzeugt, deren Verbrauchsdaten auf kritische Verwendung oder Fehlbetrieb durchmustert werden. Die Analysetechnik arbeitet quasi in Echtzeit, im wesentlich vollautomatisch und damit kostengünstig und ermöglicht darüber hinaus eine Anpassung des Energiemanagements, z. B. nach ISO 50001.

Es werden Ergebnisse für 150 Schulgebäude exemplarisch dargestellt, die erreichten Einsparungen dokumentiert. Grundsätzlich wird mit Einführung dieser Analysetechnologie eine weitgehende Vermeidung von aufwendigen Messkampagnen an Energieverbrauchern ermöglicht, vor allem aber der Betrieb von Anlagen erheblich optimiert. Beim Einsatz der kWIQly Technologie sind Einsparungen bis zu 30 % nur aufgrund der Betriebsoptimierung bereits dokumentiert.

## HeatMap - Visualisierung von Heizenergieverschwendungen in öffentlichen Gebäuden durch eine Heatmap

Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller<sup>1\*</sup>, M. Eng. Maxim Geier<sup>1</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Schimkat<sup>2</sup>, Peter Rothmeier<sup>3</sup>, Jens Freinatis<sup>4</sup>,  
Dipl.-Ing. Narcisse Djakam<sup>2</sup>, Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Ing. Mathias Fraaß<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin  
Wilhelminenhofstraße 75A, Gebäude C, Raum 214, 12459 Berlin  
Tel.: +49-30-5019-3488, Fax: +49-30-5019-483488  
E-Mail: [birgit.mueller@htw-berlin.de](mailto:birgit.mueller@htw-berlin.de)

<sup>2</sup> Beuth Hochschule für Technik Berlin, FB IV, Architektur und Gebäudetechnik  
Labor für Elektro-, Mess- und Regelungstechnik, Luxemburger Str. 10, 13353 Berlin  
Tel.: +49 30 4504 2533, -2534, Fax: +49 30 4504 -662534  
E-Mail: [fraass@beuth-hochschule.de](mailto:fraass@beuth-hochschule.de)

<sup>3</sup> inhouse engineering GmbH, Köpenicker Strasse 325 / Haus 41, 12555 Berlin

<sup>4</sup> Deos Control Systems GmbH, Rheine, Niederlassung Berlin

\* Korrespondenzautor

Im Forschungsvorhaben **HeatMap** werden Überhitzungen und die damit verbundenen Verschwendungen von Heizenergie in webfähigen farbigen Grundrissen, sog. *Heatmaps* visualisiert. In den grundrissbasierten *Heatmaps* geht es um den Abbau von Verschwendungen durch Einbeziehung der Nutzer und unterstützende Maßnahmen seitens der Verwaltung und der Firmenpartner. An der Beuth HS und der HTW Berlin werden über zwei Heizperioden hinweg ausgedehnte Untersuchungsbereiche eingerichtet. Dabei wird untersucht, wie die *Heatmap* zum Bestandteil eines Energiemanagementsystems nach ISO 50001 werden kann und welches Mindestmaß an organisatorischem und technischem Aufwand erforderlich ist. Um die Verbreitung des Modells zu fördern, findet am Ende des Forschungsvorhabens ein Workshop in der Beteiligten Hochschulen statt. In Berlin sollen die *Heatmaps* im Hochschulbereich fest etabliert und in eine regionale *Heatmap* überführt werden, die sich für das stadtweite Energiemanagement in öffentlichen Gebäuden eignet.

Mit der Messdatenerfassung sollen neben den Raumtemperaturen auch die Außenwandtemperaturen (Aufheiz- und Abkühlverhalten), die Vor- und Rücklauftemperaturen (Leistungsabgabe der Heizflächen in Verbindung mit ihren Kennwerten), sowie die Fensteröffnungen laufend erfasst werden, um die Aussagekraft ambulant gewonnener Temperaturmesswerte zu beurteilen und zu untersuchen, inwieweit die Fensteröffnungen auch anhand der Raumtemperaturverläufe detektiert werden können.

Aus den Messdaten werden Verschwendungsprofile als Häufigkeitsverteilungen der eingetretenen Überhitzungen erzeugt. Anhand der Verschwendungsprofile werden Merkmale typischer Nutzungsarten identifiziert, die *Heatmap* nach Nutzungsarten klassifiziert und geeignete Vergleichsabfragen und Übersichten entwickelt, bevor in der nächsten Heizperiode die Nutzer einbezogen werden.

### Stichworte:

Energiemanagement, Heatmap, Nutzerverhalten, Energieeinsparung

## 3D Ganzjahresenergiesimulation

Tunc Askan<sup>1\*</sup>, Bahar Saeb Gilani<sup>2</sup>, Martin Kriegel<sup>3</sup>

Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut,  
Fachgebiet Gebäude-Energie-Systeme, 10587 Berlin  
[tunc.askan@tu-berlin.de](mailto:tunc.askan@tu-berlin.de), [bahar.saebgilani@tu-berlin.de](mailto:bahar.saebgilani@tu-berlin.de), [m.kriegel@tu-berlin.de](mailto:m.kriegel@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK) weisen 11 % des Stromverbrauchs der EU im Jahr 2007 aus <sup>(1)</sup>. Ganzjahresenergiesimulationen von Gebäuden und Anlagen werden zunehmend bei der Optimierung des Energiebedarfs eingesetzt.

Für diese Simulationen werden vorübergehend eindimensionale Methoden verwendet. Numerische Strömungssimulationen (CFD) <sup>(2)</sup> auf der anderen Seite finden u. a. Anwendung, um 3D Strömungsphänomene, z.B. die Innenraumluft zu berechnen und thermische Behaglichkeit vorauszusagen. Ganzjahres-CFD-Simulationen einzelner Räume oder sogar ganzer Gebäude sind aufgrund begrenzter Rechenleistungen heute praktisch nicht möglich.

Im Hermann-Rietschel-Institut, Fachgebiet Gebäude-Energie-Systeme, der Technischen Universität Berlin wurde eine Berechnungsmethode zur Jahresenergiesimulation entwickelt, mit welcher es auf Basis vorhandener CFD-Modelle möglich ist, 3D Ganzjahresenergiesimulationen in akzeptierbaren Berechnungszeiten durchzuführen. Mit dieser Methode ist es ebenfalls einfach möglich, Strömungssimulationen für die kritischen Zonen innerhalb eines Gebäudes unter Berücksichtigung der Ganzjahresenergiesimulationen im Detail durchzuführen.

Der Vergleich erster Ergebnisse mit dem eindimensionalen Berechnungstool Dymola weisen besonders im Sommermonaten deutlich unterschiedliche Werte aus, welcher höchstwahrscheinlich an dem Detaillierungsgrad der Berechnung vom Strahlungsaustausch liegen. Momentan laufende Vergleichsmessungen an einem Teststand im Hermann-Rietschel-Institut sollen die Genauigkeit der neuen Berechnungsmethode weiter validieren.

### Stichwörter:

3D Ganzjahresenergiesimulation; Jahresenergiesimulation; Ganzjahres-CFD-Simulation; CFD; Computational Fluid Dynamics; Dymola; STAR-CCM+; HRI; Hermann-Rietschel-Institut; Gebäude-Energie-Systeme; HVAC; Heating, Ventilation and Air Conditioning; HLK; Heizung, Lüftung und Klimatisierung

<sup>(1)</sup> EC Joint Research Centre, Institute for Energy, 2009

<sup>(2)</sup> Computational Fluid Dynamics

## Emulation 2.0 – Combined Energy Lab für die integrale Analyse von gebäudetechnischen Anlagen entlang der Bedarfskette

Dipl.-Ing. A. Buchheim\*, Dr.-Ing. habil. J. Seifert

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik  
Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, Mommsenstr. 9, 01069 Dresden  
[Alexander.Buchheim@tu-dresden.de](mailto:Alexander.Buchheim@tu-dresden.de), [Joachim.Seifert@tu-dresden.de](mailto:Joachim.Seifert@tu-dresden.de)

\* Korrespondenzautor

Aufgrund der momentanen und künftig zu erwartenden energiepolitischen Rahmenbedingungen ist in Deutschland eine Trendwende in der Energieversorgung zu verzeichnen. Der Ausstieg aus der Kernenergienutzung in Verbindung mit einem sukzessiven Ausbau von regenerativen Energien und



einer zunehmenden Förderung von KWK im kleinen bis mittleren Leistungsbereich führt einerseits zu einer Dezentralisierung und andererseits zu größer werdenden Diskontinuitäten der Energiebereitstellung und damit letztlich auch der Preisgestaltung. Hieraus resultieren neue Anforderungen an die energetische Bewertung von gebäudetechnischen Anlagen entlang der Bedarfskette.

Diesen Ansprüchen kann nur durch eine flexible Gestaltung der relevanten Eingangsgrößen entsprochen werden. Eine bewährte Methode ist dabei die Nutzung einer „Emulation“, d. h. einer Kopplung von Gebäude- und Anlagensimulation mit real existierender Energieerzeugungsstruktur bzw. mit einem real existierenden Gebäude(-teil). Hierzu soll ein Konzept eines sich derzeit im Aufbau befindlichen Versuchstandes vorgestellt werden, mit dessen Hilfe umfassende und flexible Analysen von der Energieerzeugung (-wandlung) bis hin zur Wärmeübergabe im Raum realisiert werden können.

#### IV.07

## Dynamische Untersuchung der Gleichzeitigkeit in Kältenetzen

**Marcus Fuchs\*, Rita Streblow, Dirk Müller**

RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center,  
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, 52074 Aachen  
[mfuchs@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:mfuchs@eonerc.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

Um ihren Kältebedarf für die Raumklimatisierung zu decken, verfügen moderne Bürogebäude in vielen Fällen über eigene Anlagen zur Kältebereitstellung. In einer Gruppe solcher Gebäude laufen diese Anlagen aufgrund der verschiedenen Gebäudeeigenschaften und Belegungen mit verschiedenen Lastkurven. In günstigen Fällen kann daher eine zentrale Versorgung über ein Kältenetz kleiner dimensioniert und effizienter betrieben werden, wenn die verschiedenen Lastkurven versetzte Volllastzustände und einen geringen Gleichzeitigkeitsfaktor aufweisen. Ziel dieses Beitrags ist es deshalb, das Potential einer zentralen Versorgung für eine Gruppe von Bürogebäuden aufzuzeigen, indem die Gleichzeitigkeit der Lastzustände in einem Kältenetz dynamisch analysiert wird.

Zur Analyse der Gleichzeitigkeit in Kältenetzen wurden Messdaten ausgewertet und dynamische Gebäudesimulationen eingesetzt. Aus den so erhaltenen Lastkurven wurde die dynamische Gleichzeitigkeit der Lastzustände aller Gebäude im Kältenetz bestimmt. Zusammen mit den zeitlichen Verzögerungen zwischen Kälteeinspeisung und der Kältelieferung an die Gebäude ergab sich daraus die Lastanforderung an der Einspeisestelle. Die Untersuchungen zeigen, dass eine Berücksichtigung des dynamischen Verlaufs der Gleichzeitigkeit zu einer effizienteren Anlagenauslegung führen kann als eine getrennte Versorgung der einzelnen Gebäude über eigenen Anlagen.

### **Stichwörter:**

Kältenetz, Dynamische Simulation, District Energy System, District Cooling

IV.08

## Dynamisches Modell zur optimierten Auslegung komplexer Nahwärmenetze

Dipl. Ing. Georg K. Bestrzynski<sup>1\*</sup>, Amru Rizal Razani<sup>1,2</sup>,  
Prof. Dr. Ing. Holger Janßen<sup>1</sup>, Prof. Dr. Ing. habil. Andrea Luke<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Institut für Energie und Klimaschutz, Ricklinger Stadtweg 120, 30459 Hannover  
[g.bestrzynski@tu-braunschweig.de](mailto:g.bestrzynski@tu-braunschweig.de)

<sup>2</sup> Fernwärme-Forschungsinstitut, Max-von-Laue-Straße 23, 30966 Hannover

<sup>3</sup> Fachgebiet für Technische Thermodynamik Kassel, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel

\* Korrespondenzautor

Die Darstellung des räumlich und zeitlich hoch aufgelösten thermohydraulischen Netzzustandes von Nahwärmenetzen ist Grundlage für deren optimierte Auslegung und zuverlässigen Betrieb. Dies gilt umso mehr, wenn diese Netze mehrere Wärmequellen haben und Vermaschungen aufweisen. Bestehende Softwarelösungen weisen hier jedoch erhebliche Defizite auf. Thermische Unterversorgungen sind die Folge, wodurch der zuverlässigen Betrieb dieser neuartigen Schlüsseltechnologie auf dem Weg zu einem nachhaltig tragbaren Energieversorgungskonzept in der Bundesrepublik Deutschland nicht gegeben ist. Zudem mindert dies die Breitenakzeptanz dieser Technologie.

Abhilfe soll durch die Entwicklung eines Simulationswerkzeugs geschaffen werden, welches auf Basis einfacher thermohydraulischer Modelle für die Wärmenetzbestandteile Wärmequelle, Wärmeabnehmer, Wärmeverteilnetz und Wärmespeicher, kritische Betriebszustände des Netzes darstellt und einer Bewertung zugänglich macht. Das von dem Europäischen Fond für Regionale Entwicklung geförderte Forschungsprojekt zu den „Möglichkeiten und Grenzen von Nahwärmenetzen in ländlich strukturierten Gebieten unter Einbeziehung regenerativer Energien“, wird dabei unter Federführung der Hochschule Hannover in einem Forschungsverbund durchgeführt. Erste Simulationsergebnisse und daraus abgeleitete Hinweise für die Regelungsstrategie komplexer Nahwärmenetze sollen hier dargestellt werden.

### Stichwörter:

Kraft-Wärme-Kopplung, KWK, Wärmenetze, Energieeffizienz

IV.09

## Untersuchung regelungstechnischer Zielstellungen für zwei baugleiche Feldtestanlagen

Jan Albers\*, Stefan Petersen, Christian Hennrich, Sarah Hunt,  
Walther Hüls, Wolfgang Lanser, Christopher Paitazoglou, Martin Schröder

TU Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin  
[jan.albers@tu-berlin.de](mailto:jan.albers@tu-berlin.de)

\* Korrespondenzautor

Ziel der Regelung von Absorptionskälteanlagen ist die Deckung eines Kältebedarfs, der charakterisiert ist durch eine geforderte Kälteleistung und ein erforderliches Temperaturniveau des Kaltwassers. Die Kombination aus beiden Anforderungen (Leistung / Temperatur) wird als Lastfall bezeichnet.

Üblicherweise werden Absorptionskälteanlagen so geregelt, dass zu einer konstanten Kühlwasser-eintrittstemperatur in den Absorber  $t_{Ai}$  die Heizwasser-eintrittstemperatur in den Desorber  $t_{Di}$  so eingestellt wird, dass die Kaltwasseraustrittstemperatur  $t_{Eo}$  dem geforderten Sollwert  $t_{Eo,soll}$  entspricht.

Untersuchungen in [1] haben jedoch gezeigt, dass durch die gleichzeitige Regelung von Heiz- und Kühlwassereintrittstemperatur eine weitere Zielstellung berücksichtigt werden kann. Dieser Freiheitsgrad ist z. B. zur thermodynamischen oder technischen oder wirtschaftlichen Verbesserung der Kältebereitstellung nutzbar.

Im Verwaltungsgebäude der Vattenfall Europe AG am Syringenplatz in Berlin sowie im Umweltbundesamt in Dessau sind seit ca. zwei Jahren zwei baugleiche Feldtestanlagen einer neu entwickelten Absorptionskälteanlage im Einsatz [2]. Am Syringenplatz wird als technische Zielstellung die Sicherstellung einer maximalen Rücklauftemperatur als Regelstrategie verfolgt. Hierdurch kann eine höhere Fernwärmeauskühlung und damit eine verbesserte Netzauslastung erreicht werden. Im Umweltbundesamt werden dagegen Heiz- und Kühlwassertemperatur so geregelt, dass minimale Kältegestehungskosten erzielt werden (wirtschaftliche Randbedingung).

Neben der Untersuchung dieser unterschiedlichen regelungstechnischen Zielstellungen soll auch über die insgesamt erzielten Betriebsergebnisse z.B. im Hinblick auf die thermische und elektrische Energieeffizienz berichtet werden.

**Stichwörter:**

Absorptionskälteanlage, Regelung, Fernwärmeauskühlung, charakteristische Gleichung

- [1] Albers, J.: Erweiterung einer Berechnungsmethode für die Regelung von Absorptionskälteanlagen. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Institut für Energietechnik, Bearbeitungsstand April 2013
- [2] Petersen, S., Hansske, A., Hennrich, C., Hüls, W., Stangl, J., Mittermaier, M., Helm, M., Zachmeier, P., Natzer, S., Lanser, W., Ziegler, F.: Development of a 50 kW absorption chiller. 23<sup>rd</sup> IIR Int. Congr. of Refrigeration, 21.-26. Aug. 2011, Prague, Czech Republic.

IV.10

## **Theoretische Analyse zur Effizienzsteigerung durch Drehzahlregelung und Economizer-Schaltung bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe**

**Franz Hengel\*, Andreas Heinz, René Rieberer**

Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik,  
Inffeldgasse 25 B, 8010 - Graz, Österreich  
[franz.hengel@tugraz.at](mailto:franz.hengel@tugraz.at)

\* Korrespondenzautor

Die Auslegung von Luft/Wasser (LW) Wärmepumpenanlagen bei monovalentem Betrieb erfolgt i.d.R. unter Verwendung der Norm-Außentemperatur, welche für die Berechnung des Norm-Wärmeverlustes verwendet wird. Da diese Temperatur nur für relativ kurze Zeit innerhalb der Heizperiode auftritt, ist auch der Wärmeverlust des Gebäudes über einen langen Zeitraum entsprechend geringer. Im Gegensatz zum sinkenden Wärmeverlust des Gebäudes steigt bei konstanter Drehzahl die Leistungsabgabe der Wärmepumpe mit steigender Außentemperatur, mit der Notwendigkeit eines „ausgeprägten“ Taktbetriebes und daraus resultierend einer eventuellen Beeinträchtigung der Lebensdauer des Kompressors. Drehzahlgeregelte Kompressoren bieten hingegen die Möglichkeit die Leistung der Wärmepumpe annähernd auf den Bedarf des Gebäudes anzupassen. Dadurch können mit einem leistungsgeregelten Kompressor die Start-Stopp-Verluste minimiert werden bzw. dessen Lebensdauer und die Effizienz erhöht werden.

In Regionen mit sehr geringen Außentemperaturen und Gebäuden mit hohen Vorlauftemperaturen des Heizungssystems erreichen konventionelle LW-Wärmepumpen aufgrund des Betriebs bei hohen Druckverhältnissen nur eine relativ geringe Effizienz. Durch den sinkenden Verdampfungsdruck steigt auch die Austrittstemperatur am Kompressor bei niedrigen Außentemperaturen stark an. Bei zu hohen Temperaturen kann es zu einer Zersetzung des im Kreislauf mitgeführten Öles kommen. Durch die

Anwendung zweistufiger Wärmepumpenprozesse, z. B. Economizer-Schaltung, kann die Austritts-temperatur reduziert, und die abgegebene Leistung und die Effizienz gesteigert werden.

Diese Arbeit befasst sich mit einer detaillierten simulationstechnischen Betrachtung einer L/W-Wärmepumpe bei unterschiedlichen Randbedingungen. Dabei werden der Einsatz eines drehzahlgeregelten Kompressor und einer Economizer-Schaltung analysiert und anhand der erreichbaren Jahresarbeitszahl (JAZ) im Vergleich zu einem Standard-Kreislauf bewertet.

**Stichwörter:**

Luft/Wasser – Wärmepumpe, Economizer, drehzahlgeregelter Kompressor

IV.11

## **Bedeutung von Hocheffizienz-Wärmepumpen bei der energetischen Gebäudesanierung**

**Dirk Gebhardt\*, Ralf-Günter Wein, Jutta Wein**

BRUGG Rohrsysteme GmbH, Produktmanager GECO<sub>2</sub>, 31515 Wunstorf  
[Dirk.gebhardt@brugg.com](mailto:Dirk.gebhardt@brugg.com)

\* Korrespondenzautor

Die umfassende energetische Gebäudesanierung mit dem Ziel, die Energiekosten und den Primärenergieverbrauch eines solchen Gebäudes so zu verringern, dass es mit aktuellen Neubaustandards vergleichbar ist, kann nur durch eine Kombination von Maßnahmen an der Gebäudehülle (Isolierung) und der Erneuerung der Heizung (Erneuerbare Energien) erreicht werden.

Am Beispiel eines freistehenden 350 m<sup>2</sup> Einfamilienhauses, Baujahr 1994, wird gezeigt, wie man unter Verwendung aller staatlichen Fördermaßnahmen und durch Einsatz modernster Technologien und hohem persönlichem Engagement des Eigentümers aus einem Altbau mit hohen Energiekosten ein umweltfreundliches Plus-Energiehaus realisieren kann.

Eine Kombination modernster Isolierwerkstoffe, wie z. B. Spaceloftmatten (WLB016) oder eine Aerogel-Einblasdämmung (WLG021), mit hocheffizienten Vakuum-Solarkollektoren und einer energetisch optimierten, Inverter geregelten Direktkondensations-Wärmepumpe mit stromlos arbeitenden GECO<sub>2</sub>-Erdwärmerohren, die zusammen mit dem wasserführenden Kamin auf einen großen Kombinationsspeicher geschaltet wurden, reduziert den Primärenergieeinsatz von 70.620 kWh/a auf 13.100 kWh/a. Das ergibt eine prozentuale Einsparung von 81,5 %. Dem sanierten Haus wurde aufgrund dessen der „KfW-Effizienzhaus-Standard“ bescheinigt, so dass der KfW Investitionszuschuss gewährt werden konnte.

Eine bereits vorhandene Photovoltaikanlage mit 11 kWp ist nun in der Lage, das Gebäude vollständig mit Strom zu versorgen und sogar noch einen Überschuss zu produzieren, der ins öffentliche Netz eingespeist wird.

Neben anderen effizienten Wärmeerzeuger wurde eine erdgebundene CO<sub>2</sub>-Direktkondensations-Wärmepumpe eingesetzt. Sie verwendet selbsttätig arbeitende GECO<sub>2</sub>-Erdwärmerohre, die ohne Quellenpumpe auskommen und den Strombedarf der Wärmepumpe gegenüber herkömmlichen Sole-Wärmepumpen um etwa 5 % reduzieren. Die besonders guten Wärmeübertragungseigenschaften der CO<sub>2</sub>-Erdwärmerohre aus spiralgewelltem Edelstahlrohr mit Phasenwechsel halbieren den Bohrlochwiderstand gegenüber herkömmlichen Solesonden und reduzieren den Energieverbrauch etwa um weitere 10 %. Der Kombinationsspeicher mit Direktkondensations-Wärmetauscher bringt weitere signifikante Einsparungen. Zusammen mit einem Inverter geregelten Wärmepumpenverdichter führt dies insgesamt zu einer Steigerung der energetischen Effizienz um mehr als 40 % gegenüber herkömmlichen Sole-Wärmepumpen.

Eine spezielle, von Hauseigentümer selbst entwickelte Software integriert alle Steuer- und Regelfunktionen der Energieerzeuger und Verbraucher und erlaubt einen witterungsgeführten, optimalen Betrieb der Anlage.

Die in der vergangenen Heizperiode gemessenen Werte bestätigen die Erwartungen. Das Ziel, den Primärenergieverbrauch des Gebäudes deutlich zu senken, wurde erfüllt. Die dadurch gegenüber der auf Öl basierenden früheren Heizung drastisch gesenkten Energiekosten machen eine Amortisation des eigenen Kapitals in etwa 8,5 Jahren möglich. Darin noch nicht berücksichtigt sind die Fördermittel der BAFA und KfW. Dies konnte allerdings nur erreicht werden durch einen sehr hohen Eigenanteil bei der Durchführung der einzelnen Maßnahmen durch den Eigentümer. Sein Engagement wurde belohnt durch den 3. Platz beim Wettbewerb des RWE Innovationspreises 2012.

**Stichwörter:**

GECO<sub>2</sub> Erdwärmepumpe CO<sub>2</sub> Photovoltaik, Solarthermie Inverter energetische Gebäudesanierung

IV.12

## Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln

Markus Müller<sup>1\*</sup>, René Paatzsch<sup>1</sup>, Kerstin Martens<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gemeinnützige GmbH, 01309 Dresden  
[markus.mueller@ilkdresden.de](mailto:markus.mueller@ilkdresden.de)

<sup>2</sup> Umweltbundesamt, 06844 Dessau-Roßlau  
[Kerstin.Martens@uba.de](mailto:Kerstin.Martens@uba.de)

\* Korrespondenzautor

Auf den Gebäudebereich entfallen rund 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und etwa ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Wärmepumpen werden zukünftig einen großen Teil der Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung und wenn möglich der Prozesswärmebereitstellung übernehmen, da sie energieeffizient Strom aus erneuerbaren Energien nutzen können. Momentan werden Hauswärmepumpen fast ausschließlich mit fluorierten FKW/HFKW-Kältemitteln (FKW, HFKW) betrieben, die ein hohes Treibhauspotenzial besitzen, wenn diese durch Leckagen oder bei der Entsorgung in die Atmosphäre gelangen.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt die Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH Dresden mit einer Studie zu Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln beauftragt.

Im Vortrag sollen folgende Themen der Studie vorgestellt werden:

- (1) Marktübersicht von Hauswärmepumpen mit und ohne natürliche Kältemittel und vergleichende ökologische und ökonomische Bewertung.
- (2) Ermittlung von Markthemmnissen für eine größere Verbreitung von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln und Vorschläge für die Beseitigung bzw. Verringerung der Hemmnisse.
- (3) Untersuchungen zu Industrierärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln und Vergleich mit konventionellen Wärmepumpen.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, natürliche Kältemittel, Ammoniak, Propan, Kohlendioxid

IV.13

## **Abluftwärmepumpe für ein Einfamilienhaus. Prozessberechnungen mit R 290 und R 717**

**Uwe Sievers\*, Alexander Singh**

Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg, Department Maschinenbau und Produktion,  
Institut für Energiesysteme und Brennstoffzellentechnik, Berliner Tor 21, 20099 Hamburg  
[uwe.sievers@haw-hamburg.de](mailto:uwe.sievers@haw-hamburg.de)

\* Korrespondenzautor

Zur Beheizung und Warmwasserbereitung für Einfamilienhäuser werden u. a. Wärmepumpen eingesetzt. In dieser Arbeit wird eine Kompressionswärmepumpe untersucht, welche die Abluft des Einfamilienhauses als Wärmequelle nutzt. Sie kommt zum Einsatz, wenn aufgrund besonderer Gegebenheiten z. B. Grundwasser oder Erdreich als Wärmequellen nicht zur Verfügung stehen. Über Lüftungskanäle wird die Abluft aus den Räumen des Hauses zum Verdampfer der Wärmepumpe geführt, dort abgekühlt, dabei teilweise entfeuchtet und anschließend in die Umgebung geleitet. Zusammen mit der vom Arbeitsfluid der Wärmepumpe im Verdichter aufgenommenen Leistung wird der der Abluft entzogene Wärmestrom zur Beheizung eines Kombispeichers für Heiz- und Warmwasser eingesetzt. Der Heizwärmestrom wird in einem Schlangrohrwärmeübertrager im äußeren Doppelmantel des Kombispeichers auf das Heizwasser übertragen. Durch die Wand des darin eingesetzten Warmwasserspeichers kann ein Wärmestrom zwischen Heiz- und Warmwasser transportiert werden.

Der elektrische Jahresenergiebedarf für Beheizung und Warmwasserbereitung und die Jahresarbeitszahl dienen zur energetischen Bewertung der Wärmepumpe. Sie sollen für verschiedene Standorte mit einem vorhandenen Simulationsmodell vorausberechnet werden, welches das instationäre Verhalten einer bivalenten Wärmepumpe und den Verlauf der Außenlufttemperatur im Laufe eines (Referenz-) Jahres berücksichtigt. Für die dabei auftretenden Zustände werden thermodynamische Berechnungen für den Wärmepumpenkreisprozess mit den Arbeitsfluiden R 290 bzw. R 717 bei unterschiedlichen Temperaturen des Heizwassers durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Bezug auf Auslegung und Betrieb der Wärmepumpe vorgestellt und für beide Arbeitsfluide mit einander verglichen.

IV.14

## **Hochtemperatur-Absorptionswärmepumpen**

**Christoph Heyse<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Tranter Solarice GmbH, Am Kalkfeld 7, 06556 Artern  
[Christoph.Heyse@esak.de](mailto:Christoph.Heyse@esak.de)

<sup>2</sup>SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

Derzeit werden Wärmepumpen hauptsächlich im privaten Bereich zur Trink- oder Heizungswassererwärmung genutzt. Im Jahr 2012 wurden in Deutschland 4,4 Prozent mehr Heizungswärmepumpen als im Vorjahr verkauft [Rehfeld 2013]. Dieser Trend zeigt sich seit etwa 5 Jahren. Die erzeugten Temperaturniveaus liegen dabei zwischen 35 °C bis höchstens 70 °C Warmwassertemperatur. Typische Wärmequellen sind dabei die Umgebungsluft, Wasser und das Erdreich.

Für die Wärmepumpentechnik besteht ein weiteres sehr großes Potential in der Bereitstellung industrieller Wärmemengen bei Temperaturniveaus zwischen etwa 80 °C und 150 °C. Derzeit existieren allerdings nur wenige leistungsfähige Wärmepumpen in diesem Hochtemperaturbereich. Um den Verbrauch an Primärenergie industrieller Prozesse zu senken, ist es notwendig, die nicht vermeidbare Abwärme bei niedriger Temperatur mehrfach zu nutzen. Mit der Einbindung von Hochtemperaturwärmepumpen in industrielle Abwärmeströme könnte aus derzeit nutzlos erscheinenden Luft- und Wassermengen kostbare Heizenergie für Produktionsprozesse entstehen. In diesem Zusam-

menhang ist es erforderlich solche Systeme mit Nutztemperaturen ab etwa 80°C weiterzuentwickeln und geschickt zu vermarkten.

Der folgende Beitrag stellt den Stand der Technik sowie potentielle Anwendungsgebiete der Hochtemperaturwärmepumpen dar. Insbesondere werden die Möglichkeiten der Absorptionswärmepumpen zur Erzeugung von Temperaturen über 100 °C mittels industrieller Abwärme bei niedrigeren Temperaturen beleuchtet.

**Stichwörter:**

Industrielle Abwärme, Hochtemperatur-, Absorptions-, Hybridwärmepumpe

[Rehfeld 2013] Dirk Rehfeld: *Pumpe kommt an*, „Die Kälte + Klimatechnik“, 2/2013, S.12

IV.15

## **Untersuchung der Abtauung von Verdampfern in Wärmepumpen-Feldtests sowie Laborversuchen zu alternativen Abtauverfahren**

**Thore Oltersdorf<sup>1\*</sup>, Thomas Göbel<sup>1</sup>, Marek Miara<sup>1</sup>, Hans-Martin Henning<sup>1</sup>,  
Prof. Gerhard Schmitz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Gruppe Wärmepumpen, 79110 Freiburg  
[thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de](mailto:thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de), [hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de](mailto:hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> TU Hamburg-Harburg, 21073 Hamburg-Harburg

\* Korrespondenzautor

Der notwendige Abtauprozess in luftbeaufschlagten Verdampfern ist eine der Ursachen für die schlechtere Effizienz in Wärmepumpenanlagen. In dieser Arbeit wird der Energieaufwand für mehrere Anlagen aus dem Feld ermittelt sowie Ergebnisse von Laboruntersuchungen für zwei alternative Abtauverfahren präsentiert. Bei diesen Verfahren handelt es sich um einen um ein neu entwickeltes Abtauverfahren auf Basis eines 3-Fluid-Verdampfers für hybride Solar-Wärmepumpensysteme und zum anderen um die bereits bekannte Abtauung mittels Naturumlauf. Auf Basis der Ergebnisse aus beiden Untersuchungen wird eine Potenzialanalyse durchgeführt zur Ermittlung einer möglichen Effizienzverbesserung gegenüber der konventionellen Abtauung durch Prozessumkehr. Ein Vorschlag für eine kombinierte, betriebsautonome Regelstrategie auf Basis der untersuchten Abtauverfahren schließt die Arbeit ab.

**Stichwörter:**

3-Fluid-Verdampfer, Abtauung, Wärmepumpe, Naturumlauf, Feldtest, Energieeffizienz, Frost, Regelstrategie



## **Detaillierte Betriebsanalyse von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden**

**Simon Winiger\*, Doreen Kalz, Marika Vellei**

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Abteilung für Thermische Anlagen und Gebäude,  
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg  
[simon.winiger@ise.fraunhofer.de](mailto:simon.winiger@ise.fraunhofer.de)

\* Korrespondenzautor

In der Arbeit wird ein Quervergleich von 15 erdgekoppelten reversiblen Wärmepumpenanlagen in Nichtwohngebäuden vorgestellt. Seit der Vorstellung auf der DKV-Tagung 2012 wurde dieser um weitere Gebäude ergänzt und die Auswertemethodik signifikant erweitert: Aufbauend auf den bereits präsentierten Ergebnissen hinsichtlich der Wärme-/Kälte-bereitstellung und der Energieeffizienz, werden nun detaillierte Resultate in Bezug auf Taktverhalten, Temperaturverlauf auf primär- und sekundärseite und Speichermanagement präsentiert sowie jeweils in Bezug zur Effizienz der Wärmepumpenanlage gebracht.

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf mehrjährigen Monitoringkampagnen, die unter anderem im Rahmen der Förderprogramme EnOB „Energieoptimiertes Bauen“ des BMWi und LowEx:Monitor ([www.enob.info](http://www.enob.info), [lowexmonitor.ise.fraunhofer.de](http://lowexmonitor.ise.fraunhofer.de)) durchgeführt wurden. Für die messtechnische Betriebsanalyse wurde ein detailliertes Anlagenmonitoring durchgeführt: Systemtemperaturen, Volumenströme, bereitgestellte Wärme und Kälte, elektrischer Energieaufwand für die Wärmepumpe, elektrischer Hilfsenergieaufwand für die Pumpen, Betriebszeiten und Betriebszustände der (reversiblen) Wärmepumpen wurden in hoher zeitlicher Auflösung aufgezeichnet und analysiert.

Die standardisierte und automatisierte Auswertung aller Gebäude ermöglicht einen direkten Vergleich der hochdetaillierten Ergebnisse: Während in den meisten Gebäuden die Wärmepumpen mit typischen Taktzeiten von 20 – 60 Minuten arbeiten und in der Übergangszeit 15 – 30 mal pro Tag starten, ist in einem Gebäude die Wärmepumpe in den Wintermonaten im Mittel 10 Stunden durchgängig in Betrieb. Ein weiteres Resultat ist, dass das Erdsondenfeld während eines Heiz-Taktzyklus im Mittel nur um 1 – 2 Kelvin binnen 30 Minuten auskühlt. Entscheidender für die Effizienz der Wärmepumpe ist also die sekundärseitige Rücklauftemperatur, die in einigen Gebäuden während eines Zyklus signifikant steigt, was zu einer deutlichen Abnahme der Leistungszahl führt. In anderen Gebäuden bleibt die sekundärseitige Rücklauftemperatur länger niedrig und damit die Leistungszahl hoch. Entscheidend ist hier der Volumenstrom durch den Speicher.

Für eine Interaktion mit dem „Smart Grid“ werden größere Speicher und flexible Taktzeiten gefordert. Die Ergebnisse dieses Quervergleichs zeigen, welche Punkte bei Planung und Betrieb eines netzreaktiven Gebäudes besonders zu beachten sind, damit diese Anforderungen keine negativen Auswirkungen auf die Effizienz der Wärmepumpenanlage mit sich bringen.

### **Stichwörter:**

Monitoring, Wärmepumpe, Nichtwohngebäude, Energieeffizienz, Betriebsoptimierung, Netzreaktive Gebäude



## **Erstellung eines Leitfadens zur Raumluftkonditionierung in Schulen unter Beachtung ökonomischer, ökologischer und soziokultureller Aspekte**

**M. Eng. Maxim Geier, M. Eng. Philipp Krimmel, Prof. Dr.-Ing. habil. Birgit Müller\***

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin,  
Wilhelminenhofstraße 75A, Gebäude C, Raum 214 12459 Berlin  
Telefon: +49-30-5019-3488, Telefax: +49-30-5019-483488,  
Homepage: <http://www.htw-berlin.de/>

E-Mail: [Maxim.Geier@HTW-Berlin.de](mailto:Maxim.Geier@HTW-Berlin.de), E-Mail: [Philipp.Krimmel@HTW-Berlin.de](mailto:Philipp.Krimmel@HTW-Berlin.de)

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

\* Korrespondenzautor

Ein großer Teil der im Bestand vorhandener Schulgebäude befindet sich heute in einem sanierungsbedürftigen Zustand. Solche Gebäude weisen einen überdurchschnittlich hohen Energieverbrauch in Bezug auf Heizung und Strom auf. Der Nutzerkomfort wird im Sommer durch Überwärmung und im Winter durch die hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenräumen, infolge nicht ausreichender Lüftung, stark beeinträchtigt.

Lüftungstechnische Maßnahmen sind unerlässlich um eine nutzerunabhängige, dauerhafte Luftqualität mit geringer CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erreichen. Ein bestehendes Schulgebäude mit einer Lüftungsanlage auszurüsten stellt eine große Herausforderung dar. Die Investitionskosten, Instandhaltung und der Betrieb einer RLT-Anlage sind nicht unerheblich und müssen bei der Planung für den jeweiligen Schulbautyp berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer Kooperationsvereinbarung mit der SenStadtUm wird in gemeinsamer Arbeit mit der HTW Berlin ein Leitfaden erstellt, der möglichst für einen großen Teil der Schultypen Empfehlungen zur Raumluftkonditionierung geben soll.

Zur Bearbeitung der Aufgabe werden an mehreren Berliner Schulen, die sich in bestimmten Merkmalen hinsichtlich des Gebäudetyps, der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und Lüftungsart unterscheiden, Luftqualitätsuntersuchungen durchgeführt. Zeitgleich werden Ergebnisse bundesweit stattgefundener Projekte ausgewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für die Empfehlungen bezüglich der Raumlufthqualität in Schulen dienen.

Mit Hilfe von Simulationsmodellen werden für die vorhandenen Schultypen unterschiedliche Lüftungssysteme nach ökologischen und ökonomischen Aspekten untersucht. Der Leitfaden wird sämtliche Untersuchungsergebnisse beinhalten und soll Empfehlungen bei Sanierungsmaßnahmen und Neubau geben.

IV.18

## **Aufbau eines hochmodularen Prüfraumes zur Bewertung des thermischen Komforts in Raumluftrömungen**

**Martin Möhlenkamp\*, Martin Schmidt, Dirk Müller**

RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen  
[mmoehlenkamp@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:mmoehlenkamp@eonerc.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

Die Bewertung und Vorhersage des lokalen Komforts in Raumluftrömungen wird durch neue Belüftungskonzepte und den Einsatz von Komfortmodellen immer komplexer. Dabei können verschiedene Innenraumkonfigurationen mithilfe von Probanden bewertet werden. Die Reproduzierbarkeit von unterschiedlichen Randbedingungen stellt hierbei ein Hindernis dar, um genaue Ergebnisse zu erhalten.

Ein hochmodularer Komfortkubus wird aufgebaut, um unterschiedliche Innenraumsituationen abzubilden. Der Komfortkubus hat eine Grundfläche von 2 m x 2 m und eine Höhe von 2,5 m. Die Temperatur kann für jede Oberfläche separat geregelt werden. Von den vier Seitenwänden in Umfangsrichtung sind drei in Höhenrichtung feiner unterteilt. Insgesamt können 16 Flächensegmente separat temperiert werden. Die Segmentierung ermöglicht die Berücksichtigung von Einflüssen wie Strahlungsasymmetrien und Temperaturgradienten.

Durch ein variables Lüftungssystem können verschiedene Belüftungskonzepte wie Misch- und Quelllüftung umgesetzt und hinsichtlich ihres thermischen Komforts bewertet werden. Des Weiteren kann die Lufttemperatur in einem weiten Bereich geregelt werden.

Die reproduzierbaren Randbedingungen ermöglichen die Vergleichbarkeit der Untersuchungen und tragen zur Vorhersage des thermischen Komfortempfindens bei. Auf Basis der experimentellen Untersuchungen kann das 33 Knotenkomfortmodell (33NCM), welches im Rahmen früherer Projekte am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik entwickelt wurde, in seinen Randbereichen und mit höheren Temperaturgradienten erweitert werden. Abschließend werden erste Versuchsergebnisse am Komfortkubus vorgestellt.

**Stichwörter:**

Thermische Behaglichkeit, Raumluftrömung, thermische Komfortmodelle

IV.19

## **Selbstlernende Einzelraumregelung im Feldversuch**

**Michael Adolph\*, Nina Kopmann, Dirk Müller**

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

\* Korrespondenzautor

Bevor die Wärmeversorgung optimiert wird, sollte zuerst vor allem sichergestellt werden, dass die Sollwerte korrekt eingestellt sind. Auch wenn dies selbstverständlich klingt, ist dies für Heizungen leider häufig nicht der Fall. Untersuchungen haben gezeigt, dass viele Nutzer ein Thermostatventil falsch oder so gut wie gar nicht bedienen. Auch programmierbare Thermostatventile werden selten eingesetzt und noch seltener wird ihre Programmierung veränderten Lebensumständen angepasst.

Ein adaptives Einzelraumregelungssystem wurde am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH-Aachen entwickelt und in einem Feldversuch untersucht. Dieses System versucht eine

möglichst einfache Bedienung bereitzustellen. Der Nutzer muss nichts Weiteres tun, als im Falle von thermischem Unbehagen über einen Taster eine Rückmeldung an das System zu geben. Daraufhin erstellt das System selbsttätig ein Solltemperaturprofil. Die grundsätzliche Funktionalität wurde bereits anhand von Simulationen gezeigt: Eine Einsparung von 10 % bei gleichbleibendem thermischen Komfort ist möglich. Für die möglichen Einsparungen ist allerdings vor allem das Nutzerverhalten Ausschlag gebend.

Um den Einfluss realer Nutzer auf das System, die Nutzerakzeptanz und die Bedienbarkeit zu testen, wurde ein Feldtest durchgeführt. Hierzu wurde das System in 7 unterschiedlichen Wohnungen eingesetzt und für mehrere Monate getestet und anhand der gewonnen Erkenntnisse fortlaufend verbessert. Fokus bei diesem Feldtest lag auf den unserer Meinung nach wichtigsten Kriterien, um eine Weiterverbreitung zu ermöglichen: Beibehalten oder verbessern des thermischen Komforts und eine simple Bedienung ohne aufwendiges Setup. Da von den Wohnungen keine Energieverbrauchsdaten vorlagen, konnte eine Energiebedarfsanalyse nicht durchgeführt werden. Der Vergleich der mittleren Raumtemperatur vor Einsatz des Systems und nach Einsatz des Systems lässt jedoch Rückschlüsse auf die energetischen Effekte des Systems zu.

Um den thermischen Komfort der Nutzer und die Nutzerakzeptanz im Hinblick auf das System nachzuweisen wurden die Nutzer gebeten, einen Fragebogen auszufüllen. Insgesamt konnte der thermische Komfort in den meisten Fällen eingehalten werden, insbesondere nach Verwendung eines erweiterten Algorithmus. Auch die Bedienbarkeit wurde als gut bewertet.

**Stichwörter:**

Adaptive Einzelraumregelung, Feldversuch, Nutzerakzeptanz, funkfähige Messtechnik

IV.20

## **Entwicklung einer Testumgebung für das hydraulische Heizungsnetz einer Wohnung unter dynamischen, simulierten Randbedingungen**

**Nina Kopmann\*, Michael Adolph, Dirk Müller**

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

\* Korrespondenzautor

Um Energieeinsparungen bei der Raumbeheizung zu realisieren, spielt die Optimierung der Einzelraumtemperaturregelung eine wichtige Rolle. Untersuchungen zeigen, dass die an einem klassischen Thermostatventil eingestellten Solltemperaturen kaum oder gar nicht an den Nutzer angepasst sind, und auch die P-Regelung der klassischen Thermostatventile bietet Optimierungspotential.

Mittlerweile haben sich viele Firmen mit diesem Thema beschäftigt, und neue Systeme oder Komponenten zur optimierten Einzelraumregelung auf den Markt gebracht. Um die Vorteile dieser Systeme oder Komponenten herausarbeiten und ggf. Schwachpunkte finden zu können, wurde am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen ein Hardware-in-the-Loop-Prüfstand entwickelt, der das hydraulische Heizungsnetz einer Wohnung abbildet. Durch die Kopplung mit einer Simulation in Modelica können dem Prüfstand dynamische, kontrollierte Randbedingungen aufgeprägt werden.

Der Prüfstand besteht aus vier Räumen, in denen jeweils ein typischer Heizkörper und das Stellventil integriert sind. Um den Platzbedarf des Prüfstandes zu verringern, wurde das Volumen der Räume auf 3 – 4 m<sup>3</sup> verkleinert, da lediglich das den Heizkörper umschließende Raumvolumen von Interesse ist. Damit dem Heizkörper die gleichen Randbedingungen aufgeprägt werden, wie in einem normalgroßen Raum, werden abhängig von der Wärmeabgabe des jeweiligen Heizkörpers die einzustellenden Randbedingungen der Zuluft (Volumenstrom und Temperatur) und der Wände (Oberflächentemperaturen) mit Hilfe der Simulation berechnet und am Prüfstand emuliert. Die Bereitstellung der Wärme kann entweder direkt über ein an den Prüfstand gekoppeltes Brennwertgerät erfolgen, oder

die Vorlauftemperaturen werden je nach Wärmeerzeuger in der Simulation berechnet und dem Prüfstand aufgeprägt.

Somit bietet dieser Prüfstand eine Plattform um die Einflüsse auf ein Heizungsnetz in einer Wohnung unter definierten Randbedingungen zu testen: hydraulische Verstimmung bzw. hydraulischer Abgleich, Interaktion der Räume bei der Einregelung des Systems, Taktung des Brennwertgerätes.

**Stichwörter:**

Einzelraumregelung, HiL-Prüfstand, hydraulisches Netz, Thermostatventil

IV.21

## **Ganzheitliche Sanierung und Monitoring für Bestandswohngebäude der 1950/60-er Jahre**

**Tanja Osterhage\*, Davide Cali, Dirk Müller**

RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen  
[tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:tosterhage@eonerc.rwth-aachen.de)

\* Korrespondenzautor

Im Zuge eines öffentlich geförderten Forschungsprojektes wurden drei Gebäuderiegel in Karlsruhe, welche in den 1950er Jahren erbaut wurden, baukonstruktiv und anlagentechnisch saniert. In enger Zusammenarbeit mit der Volkswohnung Karlsruhe wurden sieben unterschiedliche Sanierungen für drei Gebäuderiegel durchgeführt. Jeder Gebäuderiegel verfügt über drei Eingänge mit jeweils zehn identischen Wohnungen auf fünf Etagen. Der erste Gebäuderiegel wurde nach den Standardvorgaben der Volkswohnung Karlsruhe saniert. Der zweite und dritte Gebäuderiegel erhalten jeweils pro Hauseingang unterschiedliche Sanierungsvarianten. Während bei der Sanierung des zweiten Gebäuderiegels Dämmmaterialien und Anlagentechnik, die dem Stand der Technik entsprechen, zum Einsatz kommen, wird bei dem dritten Gebäuderiegel auf eine innovative Dämmung in Kombination mit innovativer Anlagentechnik, die zum Teil noch nicht am Markt verfügbar ist, zurückgegriffen.

Zur Überprüfung der prognostizierten Energieeinsparung und Bewertung der Effizienz wurde ein umfangreiches, zeitlich hoch auflösendes Monitoring in den Gebäuden sowie Wohnungen installiert. Die komplette Anlagentechnik (Heizung, Trinkwarmwasser, Lüftung) wird von der Erzeugung über die Speicherung und Verteilung bis zur Übergabe aufgezeichnet. Um den Umgang mit dieser großen Datenmenge und deren Auswertung zu ermöglichen wurde eine HDF5-Datenbank generiert. Die Auswertung der Daten wird mit Hilfe eines selbst entwickelten HDF5-Viewers durchgeführt.

Die Gebäude waren vor der Sanierung bis zum Jahre 2008 mit einer Gasetagenheizung pro Wohnung ausgestattet. Der Primärenergieverbrauchswert für den Zeitraum 2005 bis 2007 liegt zwischen 154 und 171 kWh/(m<sup>2</sup>a). Nach der Sanierung reduziert sich der Primärenergieverbrauch für die Gebäuderiegel um durchschnittlich 60 %, dies liegt unterhalb der prognostizierten Einsparung. Der „Rebound-Effekt“ für den ersten Riegel kann hierbei mit 4,9 % quantifiziert werden. Riegel 2 hingegen lässt einen Rebound-Effekt von 11 % (zum Teil aufgrund technischer Probleme) und Riegel 3 hingegen von über 30 % erkennen. Für Riegel 3 sind durch die messtechnische Analyse Fehlfunktionen in der Anlagentechnik festgestellt worden. Das Jahr 2013 wird zeigen, welche Werte sich bei einem reibungslosen Betrieb einstellen.

Wir danken dem BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Förderkennzeichen 03ET1105A) und E.ON New Build and Technology für die finanzielle Unterstützung.

**Stichwörter:**

Sanierung, EnEV, Nutzerverhalten, Messtechnik, Rebound-Effekt

IV.22

## Design of a Combined Cooling, Heating and Power Unit driven by IC Engine

Jiazhen Ling<sup>1</sup>, Kyle Gluesenkamp<sup>2</sup>, Suxin Qian<sup>1</sup>, Yunho Hwang<sup>1</sup>, Reinhard Radermacher<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Center for Environmental Energy Engineering, University of Maryland, College Park,  
4164 Glenn L. Martin Hall Bldg., MD 20742, USA  
[raderm@umd.edu](mailto:raderm@umd.edu)

<sup>2</sup> Building Equipment Research, ETSD Division, Oak Ridge National Lab,  
Oak ridge, TN 37831, USA  
[gluesenkampk@ornl.gov](mailto:gluesenkampk@ornl.gov)

\* Correspondent author

American homes consume roughly 6.5% of their primary energy in space heating, water heating and air-conditioning units. Most of the rest is for non-thermal electrical loads. Residential combined heating and power (CHP) systems that provide electricity, space heating and domestic hot water (DHW) have been shown to save 5-30 % primary energy compared to conventional on-grid separate generation in the heating season. This paper investigates a combined cooling, heating and power system (CCHP) in the cooling season. The prime mover of the CCHP system was a commercially available 4 kW internal combustion (IC) engine with heat recovery from the coolant, exhaust, oil, and generator. The engine waste heat was utilized to produce DHW and to drive a prototype adsorption chiller. A novel dynamic test facility was constructed to evaluate the performance of the CCHP system according to a thermal load profile representing moderate Maryland summer air conditioning loads and typical North American single-family DHW demand. A control strategy for the chiller was also developed in order to optimize its COP under various operating conditions. In the summer condition test, the system consumed up to 36 % less fuel than off-grid separate generation and up to 29 % less fuel than off-grid CHP without thermally driven cooling. Compared with a conventional on-grid system, the CCHP system consumed 16 % more cooling season primary energy. By utilizing different components, a residential CCHP system could save up to 42 % primary energy relative to a conventional on-grid system during the cooling season.

**Keywords:**

CCHP, adsorption, control strategy, waste heat utilization

IV.23

## Optimierte NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Absorptionskälteanlage für die Kopplung an Blockheizkraftwerke

„Wirtschaftliche Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Lebensmittelbranche“

Dr. Klaus Ramming

AGO AG Energie + Anlagen, F + E / Vertrieb, 95326 Kulmbach  
[klaus.ramming@ago.ag](mailto:klaus.ramming@ago.ag)

Durch den steigenden Preisunterschied zwischen Strom und Gas wird die dezentrale Eigenstromversorgung auf Basis von Blockheizkraftwerken (BHKWs) in vielen Industrieunternehmen immer interessanter. Für die Wirtschaftlichkeit ist es allerdings erforderlich, neben dem Strom auch die gleichzeitig anfallende Wärme auszunutzen. Für viele Unternehmen, insbesondere in der Lebensmittelbranche, ist die Kälteerzeugung mit Hilfe einer Absorptionskälteanlage oft die einzige Möglichkeit die Motorkühlwärme unter 100 °C sinnvoll einzusetzen.

Die AGO AG hat das Prinzip der Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlage dahingehend weiter entwickelt, um die gesamte Nutzwärme eines Standard-Blockheizkraftwerkes, auch die Motorkühlwärme, Ölkühlung und Gemischkühlung 1. Stufe als Antrieb einsetzen zu können und damit Kälte bis ca. -8 °C bereitzustellen.

Die Schwierigkeit der Kopplung von NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O-Absorptionskälteanlagen an BHKWs liegt in der für die Austreibung relativ niedrigen zur Verfügung stehenden Temperatur. Durch die Einführung einer Mitteldruckstufe im Lösungsmittelkreislauf, in der die reiche Lösung nach dem Absorber nochmals angereichert und die arme Lösung nach dem Austreiber nochmals abgereichert wird, konnte zum einen die genutzte Konzentrationsdifferenz am Absorber und Austreiber erhöht werden. Hierdurch reduzieren sich der Lösungsmittelumlauf und damit auch die Pumpleistung der Lösungsmittelpumpe. Zum anderen wird eine höhere Ammoniakkonzentration vor dem Austreiber erreicht, wodurch mit relativ niedrigen Heizmediumtemperaturen bereits Ammoniak aus der Lösung ausgekocht werden kann.

Das Ergebnis ist, dass durch die weiterentwickelte Ammoniak/Wasser-Absorptionskälteanlage das Wärmeverhältnis bezüglich Standardkreisläufe und damit auch die Kälteausbeute bei gleicher Heizleistung erhöht und zudem die Stromaufnahme reduziert werden konnte.

**Stichwörter:**

Absorptionskälte, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Ammoniak

S.01

## Exergetische Analyse zur Bewertung der Energieeffizienz von Kälteanlagen

Stefan Eisenhauer

Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft  
Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland  
[eist1013@hs-karlsruhe.de](mailto:eist1013@hs-karlsruhe.de)

Energieeffizienz und die Einsparung von Energie werden in der heutigen Zeit immer bedeutsamer. Die Ermittlung der Energieeffizienz bei kältetechnischen Anlagen ist unter Umständen nicht einfach. Mittels einer exergetischen Analyse sind die detaillierte Erfassung der einzelnen Verluste und eine einheitliche thermodynamische Bewertung unabhängig von der jeweiligen Energieform möglich.

Zunächst werden die Merkmale der Exergie bei Prozessen unter der Umgebungstemperatur analysiert. Anschließend werden für die einzelnen Komponenten die exergetischen Ströme berechnet. Anhand von mehreren praxisnahen Anlagenschaltungen werden die Verluste innerhalb und außerhalb von Kälteanlagen aufgezeigt.

Ein Schwerpunkt liegt hierbei in der Ausnutzung von zusätzlichen Exergieströmen bspw. um Brauchwasser zu erwärmen. Zusätzlich wird mittels des aufgestellten Berechnungsmodells der Einfluss von ausgewählten Parametern auf die Kälteanlagen analysiert.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt mit maßstäblichen Exergieflussbildern.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Exergie, exergetische Analyse, Simulation, Kälteerzeugung

S.02

## Konzeptionierung von Kryostatvariationen zur Kühlung einer supraleitenden Spule in einer off-shore Windkraftanlage

Benjamin Radel

KIT, Institut für Technische Physik, Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland  
[benjamin.radel@student.kit.edu](mailto:benjamin.radel@student.kit.edu)

Im Rahmen des EU-Projektes SUPRAPOWER soll ein rotierender Kryostat für eine supraleitende Spule entwickelt werden, die mittels eines GM-Kühlers auf 20 Kelvin gekühlt wird. Diese supraleitende Spule ist Teil eines neuartigen Generators für eine 10 MW off-shore Windkraftanlage.

Durch den Einsatz von supraleitenden Spulen in dem Generator einer Windkraftanlage soll das Gewicht reduziert und Leistungen bis zu 10 MW erreicht werden.

Als Ausgangspunkt diente der Kryostat, der im Rahmen eines Patentes der Fa. Tecnalia beschrieben wurde. Dieser Kryostat wurde hinsichtlich des Wärmeeinfall auf die Spule untersucht. Ausgehend von diesem Kryostaten wurden alternative Bauweisen evaluiert um das Gewicht und den Wärmeeinfall durch den Einsatz eines aktiv gekühlten Schildes zu reduzieren. Insbesondere wurden dazu die Verwendung dünnwandiger runder Wände für die Vakuumkammer und der Einsatz von GFK Materialien zur Abstützung der Spule untersucht. Abschließend wurden die Ergebnisse im Hinblick auf den Wärmeeinfall und die Gewichtseinsparung miteinander verglichen.

**Stichwörter:**

Kryostat, Suprapower, Wärmeeinfall, Supraleitung, Windkraftanlage



S.03

## Auslegung und Konzeptionierung eines Leistungsprüfstandes für Kältemittelkompressoren an Kleinkälteanlagen

Alexander Horn

Technische Universität Dresden,  
Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik  
01062 Dresden  
[horn\\_alexander@gmx.de](mailto:horn_alexander@gmx.de)

Zahlreiche Hersteller bieten Kältemittelverdichter für Kleinkälteanlagen zum Verkauf an. Dabei handelt es sich im Anwendungsbereich der Haushaltskühlgeräte vorrangig um vollhermetische Hubkolbenverdichter, Rollkolbenverdichter oder auch Linearverdichter.

Um unterschiedliche Kompressoren hinsichtlich ihrer Leistung und Effizienz miteinander vergleichen zu können ist ein Leistungsprüfstand erforderlich. Für die Auslegung eines solchen Prüfstandes liefert die Norm DIN EN 13771-1 eindeutige Richtlinien, welche bei der Umsetzung berücksichtigt werden müssen.

Anhand der normativen Vorgaben wurde ein geeignetes Prüfverfahren für den gewünschten Leistungsbereich ausgewählt. Es soll die Kombination einer Durchflussmessung mittels Coriolis-Massenstrommessgerätes in der Flüssigkeitsleitung und eines Verdampfer-Kalorimeters umgesetzt werden. Als Kondensator kommt ein luftgekühlter Lamellenwärmetauscher in Frage.

Für die Hauptbestandteile erfolgt eine rechnerische Komponentenauslegung. Dies betrifft insbesondere das Kalorimeter, welches speziell für den Prüfstand angefertigt werden muss. Die Erarbeitung eines Mess- und Regelungskonzeptes sowie eines konstruktiven Erstentwurfs erfolgt unter Berücksichtigung von wesentlichen sicherheitstechnischen und funktionellen Anforderungen.

**Stichwörter:**

Kältemittelverdichter, Leistungsprüfstand, Kleinkälteanlagen

S.04

## CO<sub>2</sub>-Klimaanlagen für ein Regionalverkehrsfahrzeug

Johannes Schwan<sup>1\*</sup>, Lutz Boeck<sup>1</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faiveley Transport Leipzig GmbH & Co KG  
[Johannes.Schwan@faiveleytransport.com](mailto:Johannes.Schwan@faiveleytransport.com), [Lutz.Boeck@faiveleytransport.com](mailto:Lutz.Boeck@faiveleytransport.com)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
[Armin.Hafner@sintef.no](mailto:Armin.Hafner@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

Klimaanlagen sind heute integraler Bestandteil in neugebauten Schienenfahrzeugen. Bisher werden diese Anlagen mit synthetischen Kältemittel wie R134a betrieben. Der Einsatz natürlicher Kältemitteln für die Klimatisierung im Bahnbereich beschränkt sich auf Luft in der ICE3 Flotte der DB AG und auf einzelne Erprobungsträger mit CO<sub>2</sub> in verschiedenen Fahrzeugen.

Auf der Suche nach alternativen Lösungen sollen im Rahmen der Arbeit mögliche Ausführungsvarianten einer CO<sub>2</sub> Klimaanlage mit den heute verfügbaren Komponenten untersucht werden. Wesentlicher Bestandteil ist die Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten als Wärmepumpe für die Beheizung des Fahrzeuges.



Die Betrachtungen werden für 2 verschiedene Klimazonen (Klimazone I und III nach EN 14750-1) durchgeführt, um die unterschiedlichen Betriebsbedingungen für den Kühl- und Heizbetrieb zu berücksichtigen. Dabei werden auch verschiedene Fahrzeugkonzepte berücksichtigt und mit den bisherigen Lösungen hinsichtlich des Jahresenergieverbrauches und des Umwelteinflusses verglichen.

S.05

## Bewertung von weiterentwickelten R744 Supermarktkälteanlagen für warme Klimazonen

Adinda Van de Ven<sup>1\*</sup>, Armin Hafner<sup>2</sup> Trygve M. Eikevik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Biberach  
adindake@hotmail.com

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, 7465 Trondheim, Norway  
Armin.Hafner@sintef.no

<sup>3</sup> Norwegian University of Science and Technology, Energy and Process Engineering, 7491 Trondheim, Norwegen  
trygve.m.eikevik@ntnu.no

\* Korrespondenzautor

Kälteanlagen mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel sind nichts Außergewöhnliches in Europa, allerdings befinden sich solche Anlagen hauptsächlich in Regionen mit mildem und kaltem Klima, d.h. in Mittel- und Nordeuropa. In diesem Beitrag werden die Leistungsfähigkeit und der Energiebedarf von unterschiedlichen R744-Supermarktkälteanlagekonzepten bei höheren Außentemperaturen und unterschiedlichen Lastanforderungen, wie sie in Südeuropa auftreten, theoretisch anhand von Modellen untersucht.

Es wird die Theorie des transkritischen R744-Kreislaufes und die Änderungen in Vergleich zu einem subkritischen prozessverlauf erläutert. Weiterhin werden unterschiedliche Schaltungen bei gleichen Randbedingungen mit einem Standardsystem verglichen. Folgende Konzepte werden untersucht:

- Standard R744 Boosteranlage
- Anlage mit einem Expander
- Anlagen mit Economiser (Parallele Verdichtung)
- Anlage mit Ejektor
- Standardsystem mit mechanischer Unterkühlung

S.06

## Konzeptionierung und Regelstrategie eines solarstrombetriebenen Impfstoffkühlers

Jakob Sablowski

TU Dresden, Bitzer-Stiftungsprofessur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik  
[jakob.sablowski@mailbox.tu-dresden.de](mailto:jakob.sablowski@mailbox.tu-dresden.de)

Bei der Durchführung von Impfprogrammen in Regionen mit unzuverlässiger Stromversorgung stellt die Kühlung der Impfstoffe eine besondere technische Herausforderung dar. Für diesen Anwendungsfall wurde ein solarstrombetriebener Impfstoffkühler konzeptioniert, der die Kühlung zu Zeiten geringer Sonneneinstrahlung über einen Latentwärmespeicher sicherstellt.

Ausgehend von den Anforderungen der WHO an derartige Geräte, wurden die einzelnen Komponenten des Kühlers näher betrachtet. Schwerpunkte waren die Auslegung des Verdichters, des Kondensators, sowie die Entwicklung eines Konzeptes für das Speichersystem. Außerdem wurden die Anforderungen an die Solarstromversorgung und die Regelung des Impfstoffkühlers dargestellt.

Das vorgeschlagene Speicherkonzept nutzt einen Roll-Bond Verdampfer in Kombination mit dem Paraffin Tetradekan als Speichermedium. Aufgrund der günstigen Schmelztemperatur von Tetradekan (4 – 6 °C) kann erwartet werden, dass das Einfrieren der Impfstoffe verhindert werden kann.

Abschließend wurde ein Gesamtkonzept für einen Impfstoffkühler mit einer Kapazität von 60 l vorgeschlagen.

**Stichwörter:**

Impfstoffkühlung, Latentwärmespeicher, Inselsystem

S.07

## Funktion und Anwendung einer modernen Datenfernübertragung für Kälte- und Klimaanlage

Sebastian Groß-Hardt<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. (FH) Stefan Bollmann<sup>2</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Dominik Cibis<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tekloth GmbH, Schlavenhorst 25, 46395 Bocholt, Deutschland  
[s.gross-hardt@tekloth.de](mailto:s.gross-hardt@tekloth.de)

<sup>2</sup> Tekloth GmbH, Schlavenhorst 25, 46395 Bocholt, Deutschland  
[s.bollmann@tekloth.de](mailto:s.bollmann@tekloth.de)

<sup>3</sup> Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung, Akademieleiter, 63477 Maintal, Deutschland  
[dominik.cibis@esak.de](mailto:dominik.cibis@esak.de)

An Kälteanlagen werden hohe Anforderungen in Bezug auf ihre Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit gestellt [dena 10]. Darüber hinaus sind geringe Investitions-, sowie niedrige Betriebskosten wesentliche Anliegen des Betreibers. Durch aktuelle gesetzliche Vorgaben werden zusätzliche ökologische Kriterien immer wichtiger.

Dies ist nur eine kurze Auflistung von Ansprüchen an ein Kältesystem. Eine Möglichkeit die genannten Faktoren, unabhängig von ihrer Anwendung, zu optimieren und aufeinander einzustellen, besteht in der Einrichtung einer sicheren und modernen Datenfernübertragung. Mit ihr wird ein zeitlich unbegrenzter Überblick über alle aktuellen und vergangenen Messwerte gewährleistet und das aufwendige Einrichten von Datenloggern, verbunden mit kostspieligen Ortsbesuchen, entfällt. Diese jederzeitige Einsicht ermöglicht es, dass ein bestmöglicher Betriebspunkt gewählt ist. Außerdem erlaubt die Datenfernübertragung Notfallszenarien automatisch einzuleiten, Fehler- und Frühwarnmeldungen weiterzusenden, unterschiedliche Zugangsberechtigungen zu vergeben und vieles mehr.

Der nachfolgende Fachbeitrag gibt einen Einblick in die Funktion und Anwendung einer Datenfernübertragung für Kälte- und Klimaanlage. Ein Hauptschwerpunkt ist hierbei der Aufbau eines geschützten, zuverlässigen Systems. Des Weiteren wird neben den Vorteilen für den Betreiber einer Kälteanlage auch der Nutzen für den Fachunternehmer dargestellt. Für Letzteren bieten sich sowohl Chancen in der Optimierung des Betriebsablaufes, eine Stärkung der Kundenbindung sowie einige weitere Potentiale.

**Stichwörter:**

Datenfernübertragung, Systemoptimierung, Serviceleistung, Kundenbindung

## Analyse der Unterkühlung wässriger Lösungen mit verschiedenen Additiven und Wärmeübertrageroberflächen

Yannick Friess<sup>1\*</sup>, Prof. Dr.-Ing. Trygve M. Eikevik<sup>2</sup>, Dr.-Ing. Armin Hafner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 76133 Karlsruhe  
[friessyannick@aol.com](mailto:friessyannick@aol.com)

<sup>2</sup> Norwegian University of Science and Technology, Energy and Process Engineering,  
7491 Trondheim, Norwegen  
[trygve.m.eikevik@ntnu.no](mailto:trygve.m.eikevik@ntnu.no)

<sup>3</sup> SINTEF Energy Research, Energy Efficiency, 7465 Trondheim, Norwegen  
[armin.hafner@sintef.no](mailto:armin.hafner@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

Wird Wasser mit einem den Gefrierpunkt senkenden Stoff - wie z. B. Ethanol, Glykol oder Salz - gemischt und unterkühlt, kann Eisbrei erzeugt werden, ein umweltfreundlicher zweiphasiger Kälteträger. Durch die im Phasenwechsel gespeicherte latente Wärme hat Eisbrei eine hohe Energiedichte und im Vergleich zu einphasigen Kälteträgern einen doppelt so hohen Wärmeübergang. Er eignet sich als Kälteträger, zur Energiespeicherung oder zur Direktkontaktkühlung.

Ein Grund, weshalb Eisbrei noch nicht in der breiten industriellen Anwendung vorhanden ist, ist der Herstellungsprozess. Zur Eisbreierzeugung werden häufig Wärmeübertrager herabgekühlt, sodass es auf deren Oberfläche zur Eisbildung kommt. Durch mechanische Einwirkung schabender Elemente wird diese Eisschicht kontinuierlich entfernt. Die hierfür verwendeten Bauteile verschleifen und benötigen einen elektrischen Antrieb, und erhöhen dadurch die Investitions- sowie Betriebskosten. Deshalb soll ein Eisbreierzeuger entwickelt werden, dessen Wärmeübertrageroberfläche dauerhaft eisfrei bleibt, sodass auf die mechanischen Bauteile verzichtet werden kann.

Der neue Herstellungsprozess besteht aus einer Kombination aus Zusatzstoff, Strömungsform, Zusatzstoffgehalt, Eisanteil, Wärmeübertrageroberfläche und Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertrageroberfläche und Fluid, bei der es zu keiner Eisbildung auf der Wärmeübertrageroberfläche kommt. In dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse aus Untersuchungen mit verschiedenen Additiven und unterschiedlichen Wärmeübertragern beschrieben. Bei Experimenten „ohne Eispartikel“ konnte festgestellt werden, dass sich die Additive Glykol und Salz hin zu höheren Additivgehalten günstiger als der bisher verwendete Ethanol verhalten. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass eine Verbesserung der Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertrageroberfläche und Fluid, unter Verwendung oberflächenbehandelter Wärmeübertrager, nicht erkennbar ist.

### Stichwörter:

Eisbrei, Kristallisation, Eisbreierzeugung, Unterkühlung, Wärmeübertrager

# Analyse der Unterkühlung unter Verwendung verschiedener ein- und zweiphasiger Propylenglykol Lösungen

Tobias Beuttel<sup>1\*</sup>, Prof. Dr.-Ing. Trygve M. Eikevik<sup>2</sup>, Armin Hafner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, 76133 Karlsruhe  
[tobiasbeuttel@gmail.com](mailto:tobiasbeuttel@gmail.com)

<sup>2</sup> Norwegian University of Science and Technology, Energy and Process Engineering,  
7491 Trondheim, Norwegen  
[trygve.m.eikevik@ntnu.no](mailto:trygve.m.eikevik@ntnu.no)

<sup>3</sup> SINTEF Energy Research, Energy Efficiency, 7465 Trondheim, Norwegen  
[armin.hafner@sintef.no](mailto:armin.hafner@sintef.no)

\* Korrespondenzautor

In der Kältetechnik unterscheidet man zwischen ein- und mehrphasigen Kälteträgern. Bestehen die Phasen aus Eis und einer flüssigen Phase, so spricht man von Eisbrei oder Ice Slurry. Eisbrei ist ein umweltfreundlicher zweiphasiger Kälteträger der im Vergleich zu einphasigen Kälteträgern einige Vorteile mit sich bringt. Vielseitig einsetzbar, eignet er sich als Kälteträger, zur Direktkontaktkühlung und zur Speicherung von Energie. Der Wärmeübergang von Eisbrei ist zweimal höher als der eines vergleichbaren einphasigen Kälteträgers. Das Resultat der beim Phasenwechsel gespeicherten latenten Wärme ist eine deutlich höhere Energiedichte von Eisbrei gegenüber einphasigen Kälteträgern ohne Phasenübergang.

Die derzeitige Eisbreierzeugung beruht zum großen Teil aus Kratzkühlern die, bestehend aus Verdampfer und schabenden Elementen, kontinuierlich Eis erzeugen. Der beim Abschaben der stetig wachsenden Eisschicht entstehende Verschleiß und die notwendige elektrische Antriebsleistung erhöhen die Betriebs- und Investitionskosten der gesamten Kälteanlage erheblich. Erklärtes Ziel ist es einen Eisbreierzeuger zu entwickeln der ohne schabende Elemente auskommt da die Eiskristalle direkt aus dem Fluid wachsen. Die bereits in der Anlage befindlichen Eiskristalle bieten die notwendigen Keimstellen um bei ausreichender Unterkühlung neue Kristalle wachsen zu lassen.

Um eine dauerhaft eisfreie Wärmeübertrageroberfläche zu garantieren darf die zulässige Wandunterkühlung nicht unterschritten werden. Da aus energetischer Sicht eine maximale Wandunterkühlung, bei der es nicht zu Eisbildung kommt, sinnvoll erscheint ist es notwendig diesen Betriebspunkt zu ermitteln. Die optimale Unterkühlung wird unter Veränderung verschiedener Parameter wie Eisgehalt, Additiv, Additivgehalt, Strömungsform und Wärmeübertrageroberfläche ermittelt.

In dieser Arbeit werden die Ergebnisse aus der Untersuchung verschiedener Propylenglykol Konzentrationen veröffentlicht.

## **Stichwörter:**

Eisbrei, Kristallisation, Eisbreierzeugung, Unterkühlung, Wärmeübertrager

## **Simulation einer adiabaten Flash-Verdampfung innerhalb einer Drossel-Kapillare mittels CFD-Berechnungen**

**Christoph Wursthorn**

KIT, Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik, Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe  
[christoph.wursthorn@live.de](mailto:christoph.wursthorn@live.de)

Kapillaren werden häufig als Drosselorgane bei Kaltdampfprozessen im Bereich kleiner Kälteleistungen eingesetzt. Dabei durchströmt das anfangs unterkühlte Kühlmittel die Kapillare und durch Reibung senkt sich der Druck entlang dieser. Fällt der Druck unter den Sättigungsdruck bei der vorherrschenden Temperatur, verdampft das Kühlmittel. Das Fluid kühlt sich ab.

Die Auslegung von Drossel-Kapillaren ist eine große Herausforderung, da es keine geschlossene analytische Lösung gibt. Aus diesem Grund sind numerische Lösungsmethoden notwendig. Eine Möglichkeit stellt die numerische Strömungsmechanik (computational fluid dynamics, CFD) dar. In dieser Arbeit wurde das kommerzielle Software-Paket ANSYS verwendet, um die adiabate Flash-Verdampfung in einer Drossel-Kapillare zu simulieren. Die Simulationsergebnisse werden mittels Messergebnissen eines Versuchstandes des Instituts für Thermodynamik und Kältetechnik am KIT validiert und die eingesetzten Methoden erläutert.

## **Umlaufverdampfung von natürlichen Kältemitteln in senkrechten Kanälen**

**Frauke Poblitzki**

Universität Kassel, FG Technische Thermodynamik, 34125 Kassel  
[Frauke.Poblitzki@web.de](mailto:Frauke.Poblitzki@web.de)

Kettle-Verdampfer bieten in der Kälte- und Prozesstechnik ein weites Einsatzspektrum. Der klassische Aufbau dieser Verdampfer erfolgt mit einem U-Rohr Bündel welches in einem Mantelrohr in ein zu verdampfendes Fluid eingetaucht wird. Die Beheizung des U-Rohr Bündels erfolgt z. B. mit Dampf auf der Innenseite. Die Verdampfung des Produktes im Mantelraum erfolgt durch freie Konvektion bzw. durch Blasensieden auf der Außenseite des U-Rohr Bündels, wie in einem Naturumlauferdampfer. In dieser Präsentation wird ein umfassender Überblick über das Umlaufverhalten von Kettle-Verdampfern aufgezeigt.

S.12

## **Thermische Behaglichkeit unter Berücksichtigung flexibler Energiebereitstellung**

**Christine Knaus**

Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen Institut für Energietechnik  
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung  
Mommssenstraße 13, 01069 Dresden

Menschen in Industrieländern verbringen etwa 90 % ihrer Zeit in Gebäuden oder Transportmitteln. Dies hat wachsende Anforderungen an den thermischen Komfort in Innenräumen zur Folge, der im Allgemeinen nur durch die Klimatisierung der Gebäude gewährleistet werden kann. Dies wiederum erfordert entsprechende energetische Aufwendungen. Jedoch ist im Zusammenhang mit dem Umbau der Energieversorgung in der Bundesrepublik Deutschland, gekennzeichnet u.a. durch eine verstärkte Nutzung regenerativer Energiequellen und dem Trend zu einer deutlich dezentraleren Ausrichtung der Energiebereitstellung, davon auszugehen, dass die für die Versorgung notwendige Energie sowie das im Gebäudebereich erschließbare Potential zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (Solarstrahlung, Außenluft) zeitlich nur eingeschränkt verfügbar und nicht kontinuierlich vorhanden ist.

Vor diesem Hintergrund wird eine Potentialabschätzung der Energieeinsparung durchgeführt, die sich aus der Ausnutzung von (bekannten) instationären Behaglichkeitskriterien ergibt. Im Fokus der Betrachtungen stehen dabei zunächst die Identifizierung von technisch und wirtschaftlich sinnvollen Konfigurationen und Betriebsweisen von Heizungsanlagen sowie eine Einordnung der durchgeführten Untersuchungen in den Gesamtkontext. Außerdem werden Rückschlüsse auf weitere Untersuchungen (Probandenbefragungen, Gebäude- und Anlagensimulation) und Fallbetrachtungen (Klimatisierung im Sommerfall) vorgestellt.

S.13

## **Untersuchung eines Plus-Energiehauses mit PV-Anlage, Wärmepumpe und Akkumulator**

**S. Oechsle**

Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik  
Pfaffenwaldring 6, D-70550 Stuttgart  
[stephan.oechsle@yahoo.de](mailto:stephan.oechsle@yahoo.de)

Eine der Kernaufgaben der heutigen Wissenschaft ist es, dem stetig ansteigenden Energiebedarf gerecht zu werden oder ihm sogar entgegenzuwirken. Eine Möglichkeit, um diese Herausforderung zu bewältigen, ist es, die Energieeffizienz von Gebäuden zu erhöhen und zusätzlich die Energieversorgung von fossilen Energieträgern zu entkoppeln. Weist ein Gebäude eine positive Energiebilanz auf, das heißt es wird mehr Primär- und Endenergie gewonnen als verbraucht, so spricht man von einem Plus-Energiehaus. Eine Möglichkeit ein solches Gebäude praktisch umzusetzen ist die Kombination einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) mit einem Akkumulator und einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe. Die richtige Dimensionierung der eingesetzten Komponenten sowie ein passendes Energiemanagement sind Grundvoraussetzung für eine optimale Energieeffizienz eines solchen Hauses. Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurden Untersuchungen zum beschriebenen Gesamtsystem durchgeführt. Hierzu werden in einem ersten Schritt detaillierte technische Informationen zu den eingesetzten Komponenten Wärmepumpe, Akkumulator und PV-Anlage ermittelt. Unter Verwendung dieser Daten wurde anschließend ein Berechnungsmodell erstellt, welches die energetischen und wirtschaftlichen Einsparpotentiale ermittelt. Zusätzlich wurde mit diesem Modell ein geeignetes Energiemanagement des Hauses entwickelt. Dabei wurden verschiedene Wärmequellen für die Wärmepumpe (Erdwärme, Außenluft, Grundwasser) in das Modell eingebunden und verglichen.

## **Einfluss von isothermen Haltezeiten auf Kälteschäden von humanen Endothelzellen**

**Roman Biniek<sup>1</sup>, Ralf Spindler<sup>1</sup>, Lutz Dreyer<sup>1,2\*</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Mehrphasenprozesse, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover  
[dreyer@imp.uni-hannover.de](mailto:dreyer@imp.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Institut für Biophysik, Leibniz Universität Hannover, 30419 Hannover

\* Korrespondenzautor

Die Kryobiologie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die sich mit den praktischen und theoretischen Fragen der Auswirkung von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auf biologisches Material beschäftigt. Die Lagerung von Zellen und Gewebe erfolgt überwiegend in flüssigem Stickstoff mit einer Temperatur von -196 °C. Das Ziel der Kryobiologie ist die bestmögliche Erhaltung der Vitalität von biologischem Material wie Gewebe oder Zellen während und nach Einwirkung von tiefen Temperaturen. Dieses wird durch verschiedene Kryoprotektiva erreicht, deren Wirkweisen nur teilweise bekannt sind. Eines der am häufigsten verwendeten Gefrierschutzmittel ist Dimethylsulfoxid (DMSO), das in physiologischen Temperaturbereichen allerdings auch eine toxische Wirkung besitzt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Reaktion von humanen pulmonalen mikrovaskulären Endothelzellen (HPMEC) auf unterschiedlich lange hypotherme Haltezeiten. Dazu wurden adhärente HPMEC mit DMSO-Konzentrationen zwischen 0 und 35 vol.% versetzt und von 1 Minute bis zu 24 Stunden auf Eis gelagert. Durch nachfolgende Einfärbung von Zytoskelett und Zellkernen mittels Fluoreszenzfarbstoffen konnten Veränderungen der Zytoskelettstruktur verfolgt werden. Es konnte gezeigt werden, dass hohe DMSO-Konzentrationen auch über 24 Stunden Haltezeit im hypothermen Temperaturbereich den Abbau des Zytoskeletts verhindern und so Zellmorphologie und -volumen aufrecht erhalten. Das lässt darauf schließen, dass DMSO direkt oder indirekt auf den Abbau der Proteinuntereinheiten der Aktin-Filamente der Zellen Einfluss hat. Die Ergebnisse können zum Verständnis der zell-protectiven Wirkung von DMSO beitragen und somit einen Beitrag zum Grundlagenverständnis in der Kryobiologie leisten.

### **Stichwörter:**

DMSO, Kälteschädigung, Endothelzellen, Cytoskelett