

**Deutsche Kälte-  
und Klimatagung**



# **Deutsche Kälte- und Klimatagung 2023**

**Hannover**

**22. – 24. November 2023**

## **Kurzfassungen**

### **Veranstalter:**

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

Theodorstraße 10

30159 Hannover

T. +49 (0) 511 897 0814

F. +49 (0) 511 897 0815

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

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

#### **Maritim Airport Hotel Hannover**

Maritimstraße 1

30855 Langenhagen

T. +49 (0) 511 9737-0

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

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

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Studierendenvorträge.....</b>	<b>3</b>
<b>Arbeitsabteilung I. ....</b>	<b>9</b>
Kryotechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.1 .....</b>	<b>19</b>
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung II.2 .....</b>	<b>36</b>
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
<b>Arbeitsabteilung III .....</b>	<b>51</b>
Kälteanwendung	
<b>Arbeitsabteilung IV1 .....</b>	<b>66</b>
Klimatechnik	
<b>Arbeitsabteilung IV2 .....</b>	<b>73</b>
Wärmepumpenanwendung	
<b>Sonderveranstaltung .....</b>	<b>89</b>
„Energieeffiziente Klimatisierung in Rechenzentren“	

## Hinweis:

\* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

S.01

## Indizierung und Charakterisierung eines halbhermetischen Hubkolbenverdichters

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

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik  
[knle1015@h-ka.de](mailto:knle1015@h-ka.de)

Für die Charakterisierung des Verdichtungsprozesses eines Hubkolbenverdichters stehen in aller Regel nur wenige Kennwerte zu Verfügung. Einige dieser Kennwerte lassen sich durch die gemessenen thermodynamischen Größen am Ein- und Auslass auf einfache Weise bestimmen und geben einen guten Einblick über die nach Norm zu ermittelnden Leistungsdaten des Verdichters. Da diese Kennwerte meist keinen direkten Einblick in das Vorgehen im Arbeitsraum des Verdichters liefern, bietet sich die Aufzeichnung eines sogenannten Indikatordiagrammes an. Zur Bestimmung des Indikatordiagrammes muss der Zylinderinnendruck in Abhängigkeit vom Kolbenstand (Volumen) im Arbeitsraum bekannt sein. Aus dem abgeleiteten Indikatordiagramm kann die Bestimmung der tatsächlich am Kältemittel verrichteten Arbeit erfolgen. Dies erlaubt eine sehr viel detailliertere Aufschlüsselung einzelner Verluste des Verdichters. Des Weiteren ist die Aufnahme des Zylinderinnendrucks für die Betrachtung diverser Fehlerzustände hilfreich.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden die gängigen Messprinzipien zur Untersuchung des Zylinderinnendrucks und zur Bestimmung des Kurbelwellenwinkels untersucht und eine konkrete Messung zur Indizierung eines halbhermetischen Hubkolbenverdichters exemplarisch vorgestellt.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Indizierung, Indikatordiagramm, Zylinderdruckmessung

S.02

## Analyse der Einspritzcharakteristik von flüssigem Kältemittel zur Anwendung in Hubkolbenverdichtern

Jiyan Akyol, Robin Heinzlmann, Jonas Schmitt, Tobias Pfliehringer, Robin Langebach

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

Der Kaltdampfkompressionsprozess ist ein weitverbreitetes Verfahren in der Kältetechnik zur Kälteerzeugung. Für die Verdichtung wird typischerweise ein isentroper Vergleichsprozess zugrunde gelegt. Dies führt insbesondere bei Kältemittel mit einem anterogradem Verlauf der Taulinie – wie z. B. R717 und R744 – zu hohen Verdichtungsendtemperaturen. Eine Steigerung der Effizienz wird erreicht durch eine weitgehende Annäherung an den Carnot-Prozess. Dazu muss der Verdichtungsprozess in einen isentropen und einen isothermen Anteil unterteilt werden. Diese Prozessführung ermöglicht erweiterte Einsatzgrenzen und größere Druckdifferenzen pro Verdichtungsstufe, da die maximale Kältemitteltemperatur im Vergleich zum isentropen Prozess reduziert wird. Die Annäherung des realen Prozesses an den Carnot-Prozess kann durch eine gezielte Einspritzung von flüssigem Kältemittel in den Arbeitsraum eines Hubkolbenverdichters und die resultierende Verdampfung erreicht werden. An der Hochschule Karlsruhe ist im Rahmen eines Projektes und in Anlehnung an das Arbeitsprinzip eines Verbrennungsmotors ein Versuchsstand zur Untersuchung der Einspritzcharakteristik aufgebaut worden. Hierbei wird das Kältemittel zunächst auf einen höheren Druck gebracht und anschließend in einer Einspritzdüsenkonfiguration in einen Modellarbeitsraum entspannt. Die Untersuchung umfasst zum einen die experimentelle Sprayanalyse der Kältemittel R134a und R290 und die theoretische Betrachtung der Einspritzcharakteristik von ausgewählten Kältemitteln bei unterschiedlichen Einspritzbedingungen. Es werden

die experimentellen und theoretischen Ergebnisse sowie die zu erwartende Verdampfung und geforderte Einspritzdruckdifferenzen diskutiert.

**Stichwörter:**

Kältemittleinspritzung, Carnot-Prozess, isotherme Verdichtung, Hubkolbenverdichter, Prüfstand, Untersuchung Einspritzcharakteristik

S.03

## Messung der Druckverluste zweiphasiger, adiabater Strömung von R134a in Offset-Lamellen

I. Selcuk\*, K. Hatesuer\*\*, A. Luke\*

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

\*\* AKG Verwaltungsgesellschaft mbH, Am Hohlen Weg 31, 34369 Hofgeismar, [katerina.hatesuer@akg-gruppe.de](mailto:katerina.hatesuer@akg-gruppe.de)

Die zunehmende Elektrifizierung auch im mobilen Bereich erfordert neue Kühlkonzepte, die eine große Herausforderung sind. Aufgrund hoher Energiedichten sind einphasige Wärmetransporte nicht mehr ausreichend, daher weicht man zunehmend auf zweiphasigen Wärmetransport aus, d.h. das Kühlkonzept besteht im Wesentlichen aus Komponenten klassischer linksläufiger Prozesse (Kälte- bzw. Wärmepumpenprozesse). Kondensator und Verdampfer sind Grundelemente dieser Systeme, deren Auslegung mit herkömmlichen Methoden für die geforderte sehr kompakte Bauweise begrenzt wird. Da im zweiphasigen Bereich Druckverlust und Wärmetransport eng gekoppelt sind, wird zunächst nur der Druckverlust in kompakten Plattenwärmeübertragern mit Offset-Lamellen näher analysiert.

Diese Studie untersucht die Druckverluste in der zweiphasigen, adiabaten Strömung von R134a in einer mit je einer Offset-Lamelle bestückten Passage eines Plattenwärmeübertragers. Ziel der Untersuchung ist, das Verständnis der zweiphasigen Strömung in solchen Lamellen zu verbessern und relevante Daten für die Auslegung und Optimierung von Plattenwärmeübertragern zu liefern. Dazu wird eine vorhandene Technikumsanlage so modifiziert, dass die den Druckverlust beeinflussenden Parameter reproduzierbar eingestellt werden können. Massenstromdichte, Dampfgehalt, Lamellengeometrie sowie Ausrichtung zur Schwerkraft werden variiert. Die Ergebnisse zeigen den bekannten Zusammenhang, dass der Druckverlust mit zunehmender Massenstromdichte und zunehmendem Dampfgehalt steigt. Die neuen Ergebnisse fließen in eine Korrelation ein und werden mit der Literatur verglichen.

**Stichwörter:**

Plattenwärmeübertrager, Druckverlust, Offset-Lamelle, zweiphasige adiabate Strömung

S.04

## Idee und Funktionsprinzip von Sprayverdampfern

Robin Heidt

Student TU Darmstadt (ehem. Hochschule Karlsruhe), Kiefernweg 8a, 64331 Weiterstadt, Deutschland

[robin.heidt@outlook.com](mailto:robin.heidt@outlook.com)

Um die Wirtschaftlichkeit bestehender Kälteanlagen im Zuge der steigenden Kältemittelpreise zu erhalten, wird das Prinzip des Sprayverdampfers mit dem Ziel entwickelt, die Kältemittelfüllmenge bei gleichzeitig hoher Effizienz zu reduzieren. In diesem Kontext wird das Verteilverhalten des Kältemittels zur Benetzung von durchströmten Rohren in Rohrbündelwärmeübertragern mit Spraydüsen untersucht. Hierzu werden sowohl Abscheidesysteme für den Kältemitteldampf als auch die Geometrien unterschiedlicher Düsen mithilfe von experimentellen Messreihen analysiert. Weiterhin wird eine Parameterstudie durchgeführt, mit der die

Hauptinflussfaktoren der Betriebsparameter ermittelt werden. Als quantitativer Vergleichswert der Benetzung wird der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  berechnet.

Auf Basis dieser Überlegungen werden keine spezifischen Einflussfaktoren in Bezug auf die Düsengeometrie oder die Abscheidesysteme diskutiert (Betriebsgeheimnisse). Stattdessen werden allgemeine physikalische Einflüsse beleuchtet, um ein grundlegendes Verständnis für die auftretende Problematik zu erhalten. Eine zu hohe Strömungsgeschwindigkeit resultiert in dem Einbruch des Sprühwinkels. Ein hoher Flüssigkeitsanteil bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Düse liefert die höchsten  $k$ -Werte. Die Dampfabscheidung spielt in Bezug auf das Sprühbild und die Verteilung je nach Düsentyp eine unterschiedliche Rolle.

Bei der Parameterstudie erweist sich die Strömungsgeschwindigkeit des Sekundärfluids als Hauptinflussfaktor. Dieser Zusammenhang verhält sich nicht linear. Einen hohen Einfluss haben außerdem die Temperaturniveaus beider Fluide. Der Einsatz von reinem Wasser als Sekundärfluid steigert zudem den  $k$ -Wert im Vergleich zur Verwendung eines Wasser–Glykol–Gemischs im Mischungsverhältnis 80 %vol/20 %vol.

**Stichwörter:**

DKV, Student, Sprayverdampfer, Rohrbündelwärmeübertrager

S.05

## **Voruntersuchungen zur thermischen Stratifikation in horizontalen kryogenen Speicherbehältern**

**Malte Radecke**

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kalte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01062 Dresden, Deutschland  
[malte.radecke@outlook.de](mailto:malte.radecke@outlook.de)

Thermische Stratifikation ist ein relevantes Problem bei der Flüssigspeicherung kryogener Fluide. Aufgrund ständigen Wärmeeintrags in das tiefkalte System kommt es schon nach kurzer Zeit zur Ausbildung einer stabilen thermischen Schichtung des Fluids im Speicherbehälter. Diese Schichtung betrifft sowohl die Flüssig- als auch die Gasphase. Durch eine ausgebildete thermische Stratifikation sinkt die sogenannte *Hold-Time* des Speicherbehälters, bis zu welcher das Fluid ohne Druckentlastung verlustfrei gespeichert werden kann. In herkömmlichen Dewar-Behältern, die in ihrer Geometrie einem vertikalen Zylinder ähneln, sind die auftretenden Effekte grundsätzlich bekannt. In horizontalen Flüssigwasserstoff-Speichertanks hingegen, wie sie in Zukunft in diversen mobilen Anwendungen (LKW, Flugzeug, etc.) eingesetzt werden sollen, sind die Verhältnisse bei ausgeprägter Stratifikation weitgehend unbekannt. Im Rahmen dieser Studienarbeit wurde vorwiegend messtechnische Vorarbeiten für zukünftige Forschung an der Professur geleistet. Es wurde eine entsprechende Apparatur zur Abtastung der Temperatur im dreidimensionalen Gasphasenraum entwickelt und erste Messergebnisse im horizontalen zylinderförmigen Dewar erzielt.

**Stichwörter:**

Thermische Stratifikation, horizontaler kryogener Speicherbehälter, experimentelle Untersuchung

## **Integration und Bewertung einer dichtebasierten Messmethode zur experimentellen Untersuchung von Kältemittel-Öl-Interaktionen in Kältekreisen von Wärmepumpen**

**Anna Halle<sup>1\*</sup>, Tim Klebig<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52064 Aachen, Deutschland  
[anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:anna.halle@eonerc.rwth-aachen.de)

In Kältekreisen von Wärmepumpen wird Öl zur Schmierung des Verdichters verwendet. Dabei stehen Öl und Kältemittel in Kontakt miteinander. Beim Austritt aus dem Verdichter transportiert dampfförmiges Kältemittel flüssiges Öl in den Kältekreis. Im Öl ist flüssiges Kältemittel gelöst, sodass dieser Anteil des Kältemittels nicht am Phasenwechselprozess innerhalb des Kältekreises teilnimmt und so die Wärmeübertragung und dadurch die Effizienz der Wärmepumpe verringert. Potentiale zur Effizienzsteigerungen in Kältekreisen liegen in einem fundierten Verständnis über die thermophysikalischen Wechselwirkungen zwischen den verwendeten Arbeitsmitteln Kältemittel und Öl. Diese Zusammenhänge werden aufgrund des Mangels an experimentellen Daten in aktuellen Simulationsmodellen nicht abgebildet. Um grundlegende Interaktionen und Verlustmechanismen zu verstehen und in Simulationen übertragen zu können sind exakte Messungen der Ölumlauftrate notwendig. Dessen Kenntnis ermöglicht eine detaillierte Analyse des Ölverhaltens und der Leistungsberechnung. Dafür ist die Umsetzung und Integration einer möglichst realitätsnahen und exakten Messmethode der Ölumlauftrate notwendig.

In dieser Arbeit deshalb eine dichtebasierte Methode zur Messung der Ölumlauftrate in einen bestehenden Wärmepumpenprüfstand integriert, analysiert und bewertet. Die Messung der Ölumlauftrate wird hinter dem Flüssigkeitssammler durchgeführt, da dieser Schwankungen des Massenstroms und der Temperatur ausgleicht und somit zu Messungen einer konstanten Dichte innerhalb des dafür verwendeten Coriolissensors führt. Durch diese Methode ist die Messung der Ölumlauftrate mit einer Unsicherheit von 0,55 %-Punkten möglich. Die dichtebasierte Methode bietet dabei gegenüber anderen Methoden den Vorteil, dass die Messung auf Basis der Reinstoffdaten erfolgt und somit die Messung nicht für eine spezifische Kältemittel-Öl-Paarung konfiguriert werden muss.

Diese Arbeit ermöglicht die Messung der Ölumlauftrate im Kältekreis einer Wärmepumpe. Die experimentell gewonnenen Daten ermöglichen detaillierte Untersuchungen von grundlegenden thermophysikalischen Gesetzmäßigkeiten im Kältekreis und dienen der Verbesserung von Simulationsmodellen und damit der Effizienzsteigerung von Wärmepumpen.

### **Stichwörter:**

Dichtemessung, Experiment, Ölumlauftrate, Kältemittel-Öl-Interaktion, Wärmepumpe

## **Einfluss von Netzinteraktionen auf die Auslegungsoptimierung von Wärmepumpensystemen**

**Nina Müller-Späth\*, Fabian Wüllhorst<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52064 Aachen, Deutschland  
[nina.mueller-spaeth@rwth-aachen.de](mailto:nina.mueller-spaeth@rwth-aachen.de)

Um das 1,5 °C Klimaziel bis 2045 in Deutschland zu erreichen, ist eine weitgehende Elektrifizierung der Wärmeversorgung des Gebäudesektors notwendig. Smart Grid Technologien sind dabei wichtig, um die steigende

Anzahl elektrischer Verbraucher und Erzeuger zu managen. Aktuelle Forschungsbeiträge beschäftigen sich mit der Auslegung von Wärmepumpensystemen anhand der Bivalenztemperatur, allerdings ohne Berücksichtigung möglicher Netzinteraktionen durch Smart Grids. Deshalb werden im Rahmen der Arbeit zwei Netzinteraktionsszenarien definiert und die Einflüsse auf die Auslegung anhand zwei verschiedener Heizstabregelung untersucht. Als Netzinteraktionsszenarien werden EVU-Sperrzeiten und eine netzdienliche Regelung, welche die Spitzenlastzeiten im Sommer reduziert, implementiert. Die Auswirkungen auf die Zielfunktionen Komfort, Wirtschaftlichkeit, Effizienz und Netzbelastung werden mit einem Volfaktorplan in dynamischen Jahressimulationen untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch Berücksichtigung von EVU-Sperren besonders in Kombination mit einer bivalent parallelen Heizstab Regelung größere Wärmepumpen und Speicher eingesetzt werden müssen, um die Komfortbedingung einzuhalten. Mit der zeitbasierten Heizstabregelung sind niedrigere Bivalenztemperaturen durch die Berücksichtigung von EVU-Sperrzeiten wirtschaftlicher und effizienter. Die Berücksichtigung des Wärmepumpenstromtarifs verschiebt den Auslegungspunkt nur in einem Einzelfall. Für die bivalent parallele HS Regelung sind durch EVU-Sperrzeiten leicht höhere Bivalenztemperaturen wirtschaftlicher und effizienter. Die Speicher sind hinsichtlich Wirtschaftlichkeit im Falle der zeitbasierten Heizstab Regelung minimal auszuliegen und werden bei einer bivalent parallelen Regelung durch die Komfortnebenbedingung größer dimensioniert.

Auf die Auslegung hinsichtlich minimaler Netzbelastung ist der Einfluss der Sperrzeiten gering und zeigt eine stärkere Abhängigkeit von der Heizstabregelung. Im Rahmen der Arbeit verwendete Bewertungskriterien die Netzanschlussleistung, der maximale Leistungspeak und die relative 5000 W-Peak-Zeit können die Netzbelastung gut bewerten. Die implementierte netzdienliche Regelung hat keinen Einfluss auf die Auslegungsoptimierung des Wärmepumpensystems. Das Ziel der Regelung wird durch ein Absinken des Strombedarfs um bis zu 3 % und die Reduktion der Lastspitzen im Sommer erreicht. Mit diesen Ergebnissen leistet die Arbeit einen Beitrag zur optimierten Auslegung von bivalenten Wärmepumpensystemen.

**Stichwörter:**

Gebäudeenergiesysteme, SG-Ready, Netzdienlichkeit, Elektrifizierung

S.08

## **Simulative Entwicklung und experimentelle Erprobung eines Reinforcement-Learning-Agenten zur effizienten Abtauung von Luft-Wasser-Wärmepumpen**

**Janik Horst<sup>1\*</sup>, Jonas Klingebiel<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52064 Aachen, Deutschland

[janik.horst@rwth-aachen.de](mailto:janik.horst@rwth-aachen.de)

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen kann es bei bestimmten Witterungen zu Reifbildung am Wärmeübertrager kommen, wodurch die Leistungszahl der Wärmepumpe sinkt. Um die Effizienz der Wärmepumpe wiederherzustellen, ist ein energieaufwändiger Abtauvorgang erforderlich. Die durchschnittliche Leistungszahl der Wärmepumpe hängt vom Zeitpunkt der Abtauung ab. Durch die Bestimmung der optimalen Abtauzeitpunkte kann die Effizienz der Wärmepumpe gesteigert werden. Häufig wird die Abtauung zeitgesteuert eingeleitet. In der Literatur werden bedarfsabhängige Abtauregelungen vorgeschlagen, die oft zusätzliche Sensorik erfordern. Ein Beispiel ist eine Regelung, die den Druckverlust des Luftstroms am Verdampfer misst und bei Überschreiten eines Schwellenwertes den Abtauvorgang einleitet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Reinforcement Learning-Agent (RL-Agent) zur Bestimmung der optimalen Abtauzeitpunkte an einer Luft-Wasser-Wärmepumpe entwickelt und erprobt. Da für das Training große Datenmengen erforderlich sind, werden die Trainingsdaten in einer heuristischen Simulation generiert. Es wird ein RL-Agent entwickelt, der in der Lage ist, das Optimierungsproblem aus der Simulation zu abstrahieren und auf reale Prüfstandsdaten zu projizieren. Anschließend erfolgt eine experimentelle Validierung an einem Wärme-

pumpen-Prüfstand. Es werden drei dynamische 24 h Versuche mit unterschiedlichen Reifwachstumsgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Validierung erfolgt im Vergleich zu einem zeitbasierten Regler (R1), einem nach Literaturempfehlungen ausgelegten druckdifferenzbasierten Regler (R2). Im Vergleich zu R1 ist die durchschnittliche Leistungszahl des RL-Reglers bei schnellem Reifwachstum um 7,1 % höher, bei langsamem Reifwachstum jedoch um 0,7 % niedriger. Im Vergleich zu R2 ist die durchschnittliche Leistungszahl des RL-Reglers zwischen 3,3 % und 9,1 % besser.

**Stichwörter:**

Reinforcement Learning, Experiment, Reifbildung, Abtauung, neuronale Netze

S.09

## **Modelica-basierte Simulation eines Flüssigkühlsystems für ein Brennstoffzellen-Stack im Flugzeug**

**Max Friedemann**

Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
01062 Dresden, Deutschland

[max.friedemann@mailbox.tu-dresden.de](mailto:max.friedemann@mailbox.tu-dresden.de)

Die Brennstoffzellentechnik hat das Potential, die Dekarbonisierung der Luftfahrtindustrie voranzutreiben. Aufgrund der hohen abzuführenden Wärmeströme und der Temperaturempfindlichkeit von Brennstoffzellen werden hohe Anforderungen an das Thermomanagement gestellt. Zusätzlich kommt dem Gewicht des Kühlsystems in einer Luftfahrtanwendung eine übergeordnete Rolle zu.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell eines Flüssigkühlsystems für ein 1 MW Brennstoffzellenstack zur Verwendung als Auxilliary Power Unit in Dymola aufgebaut. Mithilfe des Modells werden dynamische Simulationen anhand unterschiedlicher Lastfälle durchgeführt und ausgewertet. Es wird gezeigt, dass das System fähig ist, sich an die veränderten Umgebungsbedingungen im Flug anzupassen und die Brennstoffzellentemperatur unterhalb der kritischen Betriebstemperatur von 100 °C zu halten. Der Druckverlust im Rückkühler stellt dabei die kritische Größe dar. Im Rahmen der Arbeit werden sowohl das Gewicht des Flüssigkühlsystems als auch mögliche alternative Kühlungslösungen diskutiert.

**Stichwörter:**

Brennstoffzellenkühlung, Flüssigkühlung, Dymola.

## Kryogener Wasserstoffkühler für die Betankung von Fahrzeugen

**F. Herzog<sup>1</sup>, F. Gockel<sup>1</sup>, S. Altindal<sup>1</sup>**

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

Bei der Wasserstoffbetankung von Fahrzeugen strömt der Energieträger von einem Hochdruck-Vorratsbehälter über einen Dispenser in den Fahrzeugtank. Wegen des negativen Joule-Thomson-Koeffizienten und durch die Kompression des Gases im Tank erwärmt sich dabei der Wasserstoff. Um eine möglichst zügige und vollständige Betankung zu gewährleisten ist deshalb eine Kühlung erforderlich.

Die aktuell verwendeten Kühlsysteme sind jedoch teuer, wartungsintensiv und nicht besonders zuverlässig. Deshalb wurde ein Kühler entwickelt, der mit flüssigem Stickstoff betrieben wird und somit ohne Kältemaschinen auskommt.

Der Apparat besteht aus einem Behälter mit einer Hochdruck-Spirale zur Durchleitung des Wasserstoffs und Kühlrohren für flüssigen Stickstoff. Er wird mit einem Wasser/Glykol-Gemisch befüllt, sodass alle Wasserstoff- und Stickstoffrohre vollständig in dieses Speichermedium eintauchen.

Im Betrieb wird zunächst das Speichermedium eingefroren, je nach Mischungsverhältnis bei einer Temperatur zwischen -10°C und -55°C. Beim Tankvorgang strömt der Wasserstoff dann durch die Hochdruckspirale. Bei diesem Vorgang schmilzt das Wasser/Glykol-Gemisch bei (nahezu) konstanter Temperatur. Somit ist die Wasserstofftemperatur am Kühleraustritt auch bei instationären Strömungsvorgängen nahezu konstant.

### **Stichwörter:**

Wasserstofftankstelle, Refueling, Flüssigstickstoff-Kühlung, Latentkältespeicher, Kältepuffer

## Tribologische Untersuchungen unter LH<sub>2</sub>-Bedingungen

**Géraldine Theiler, Thomas Gradt**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
[geraldine.theiler@bam.de](mailto:geraldine.theiler@bam.de)

Die Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung ist gegenwärtig eine der größten Herausforderungen für Industrie und Forschungseinrichtungen. Laut der Nationalen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung\* kommt dem Energieträger Wasserstoff eine zentrale Rolle bei der Energiewende zu. Aufgrund der daraus folgenden weiteren Verbreitung der Wasserstofftechnologie sind die sicherheitstechnischen Aspekte von besonderer Relevanz. Im Fall des Versagens von Bauteilen besteht die Gefahr des unkontrollierten Entweichens von Wasserstoff, wodurch es zur Bildung zündfähiger Gasgemische kommen kann. Vor allem tribologisch beanspruchte Bauteile wie Ventile, Kupplungen und Dichtungen als verschleißbehaftete Komponenten sind besonders kritisch. Daher sollten die Materialeigenschaften in solchen tribologischen Systemen untersucht werden.

In diesem Beitrag werden Untersuchungen an Polymerwerkstoffen auf ihre Eignung für Reibsysteme in gasförmigem und flüssigem Wasserstoff vorgestellt. Dabei wird der Einfluss der Wasserstoffumgebung in Bezug auf die Materialzusammensetzung diskutiert. Weiterhin zeigen die Experimente in LH<sub>2</sub> einen deutlichen Einfluss der Temperatur, der jedoch bei den verschiedenen Polymerverbundwerkstoffen unterschiedlich stark ausgeprägt ist.

\* Die Nationale Wasserstoffstrategie, Publ. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWK), 2020

## Die «Economy of Scale» der Wasserstoffverflüssigung

L. Decker, B. Zinzius

Linde Kryotechnik AG, Dättlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz

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

Die weltweiten Kapazitäten zur Verflüssigung von Wasserstoff sind in jüngster Zeit sprunghaft angestiegen. Die Folgen des Klimawandels und aktuelle politische Umbrüche drängen weiterhin auf einen beschleunigten Ausbau noch größerer Kapazitäten. Gleichzeitig wird der Ruf nach Effizienzsteigerungen bei der energieintensiven Verflüssigung lauter. Über die Effizienz moderner Verflüssiger liegen nur wenige Daten vor, verschiedene akademische Studien propagieren 6,4 kWh/kg Wasserstoff als Zielwert für den spezifischen Energieverbrauch der Verflüssigung und skizzieren dabei äußerst komplexe und investitionsintensive Prozesse. Der Markt für Wasserstoffmobilität erfordert jedoch vor allem eine deutliche Senkung der Gesamtkosten (Investition und Betrieb) dieser Anlagen. Bei den heutigen, eher kleinen Anlagen (bis ca. 5 Tonnen Flüssigwasserstoff pro Tag [tpd]) bestimmen die Investitionen die Gesamtkosten. Der Wirkungsgrad spielt eine untergeordnete Rolle. Zukünftige, größere Verflüssigungsanlagen erlauben es, den Fokus auf den Wirkungsgrad zu legen. Dem steht die Forderung entgegen, nur technisch erprobte Lösungen zu installieren, da sich die Anlage betriebswirtschaftlich rechnen muss. Die ersten mittelgroßen Anlagen (15 - 50 t/d) werden in Kürze in Betrieb gehen und Fortschritte aufzeigen. Der oben propagierte Zielwert ist technisch erreichbar, aber nur mit dem wiederholten Bau großer Anlagen (200 tpd und mehr) und grossem technischen Aufwand. Dies setzt eine gleichzeitige Steigerung der Verbrauchsmengen und geeignete wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen voraus.

Durch kontinuierliche Verbesserungen und Innovationen konnte der Wirkungsgrad des neuen 5 tpd-Wasserstoffverflüssigers von Linde in Leuna/D auch unter wirtschaftlichen Bedingungen deutlich gesteigert werden. So konnte die spezifische Leistungsaufnahme für den eigentlichen Kältekreislauf (< 80 K) um ganze 30 % gesenkt werden.

Stichwörter:

Flüssig-Wasserstoff, Wirkungsgrad, Größenvorteil

## Flüssigluft-Energiespeicherung als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

(Modellbasierte Analyse des Systems als Energiespeicherung für den industriellen Bereich)

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

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

Eine der größten Herausforderungen bei der Umstellung der Energiegewinnung auf erneuerbare Energien stellt die Volatilität dieser dar. Hierbei können Energiespeicher helfen, welche die mittels erneuerbaren Energien generierte elektrische Energie bei Überschuss ein- und bei Bedarf wieder ausspeichern. Die in diesem Beitrag behandelte Flüssigluft-Energiespeicherung (Liquid Air Energy Storage) stellt dabei eine vielversprechende Methode dar.

Bei dieser Technologie wird der überschüssige Strom verwendet, um Umgebungsluft über einen entsprechenden Prozess zu verflüssigen. Die flüssige, tiefkalte Luft wird so lange in einem Kryotank gelagert, bis Strombedarf herrscht. Zur Ausspeicherung wird die Luft regasifiziert, wodurch diese elektrische Energie über einen Clausius-Rankine-Prozess bereitstellt. Häufig behandeln Untersuchungen hinsichtlich Liquid Air Energy Storage die Technologie ausschließlich oder primär als Speichermethode für elektrische Energie. Durch die im Prozess

anfallende thermische Energie kann das System aber auch als sektorenübergreifende Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Fokus auf der thermischen Energie konzipiert werden. Einerseits entsteht nutzbare Kompressionswärme im Verflüssigungsprozess. Andererseits kann die tiefkalte, flüssige Luft bei ihrer Regasifizierung als Wärmesenke zu Kühlzwecken bei unterschiedlichen Temperaturen bis in den kryogenen Bereich verwendet werden. Zweckmäßig dabei ist die Integration der Energiespeichermethode in Anwendungen aus dem industriellen Bereich, welche einen entsprechenden Bedarf an Wärmequellen und -senken aufweisen.

Dieser Beitrag liefert erste Ergebnisse einer modellbasierten Analyse des Potentials der sektorenübergreifenden Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung von Liquid Air Energy Storage. Es zeigt sich, dass eine gewichtete Leistungszahl von bis zu 0.83 (äquivalent zu einem Wirkungsgrad von 83 %) unter Berücksichtigung des zusätzlichen Nutzens in Form von thermischer Energie erreicht werden kann. Um dieses Potential ausschöpfen zu können, ist aber vor allem das Lastprofil der industriellen Anwendung, in welche das System integriert wird, von entscheidender Bedeutung.

**Stichwörter:**

Flüssigluft-Energiespeicherung, sektorenübergreifende Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, kryogene Kühlung, Modellierung, industrielle Anwendungen

I.05

## **500 W Kälteanlage für die Versorgung der Großforschungseinrichtung Ultra Cold Neutrons (UCN) am Paul Scherrer Institut (PSI)**

**Daniel Deak \*, Dr. Burkhard Zinzus \*\***

\* PSI Paul Scherrer Institut, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Schweiz  
[daniel.deak@psi.ch](mailto:daniel.deak@psi.ch)

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

Für das Paul Scherrer Institut (PSI), Sektion Kälteanlagen wurde eine flexible Helium-Kälteanlage mit 500 W bei 4,5 K und 1000 W bei etwa 60 K im Volllastbetrieb von Linde Kryotechnik AG geliefert und in Betrieb genommen. Diese Anlage ersetzt die alte Kälteanlage, die 1977 von Sulzer geliefert wurde und inzwischen veraltet ist; die aktuellen Anforderungen hinsichtlich Leistung und Energieeffizienz werden damit nicht mehr erfüllt. Diese Kälteanlage dient zur Versorgung der Großforschungseinrichtung UCN (Ultra Cold Neutrons) mit Helium von 4,5 K, um einen 30 Liter Behälter, der mit 5 kg Deuterium gefüllt ist, unter minus 255 °C abzukühlen.

An die neue Kälteanlage wurden sehr hohe Anforderungen im Bereich der Energieeffizienz gestellt.

Das neue System ist ausgelegt für einen flexiblen Betrieb, um die spezifischen Anforderungen im Volllast- und Teillastbetrieb sowie bei weiteren Lastfällen und zusätzlich im Verflüssigungsbetrieb zu erfüllen. In den verschiedenen Betriebsmodi werden die Prozessdrücke und die Massenströme optimiert, um einen exergetisch optimalen und stabilen Betrieb zu erzielen.

Das System wird gesteuert durch eine kommerzielle PLC und ist verknüpft mit dem EPICS Control System des PSI.

Der Artikel beschreibt die neue Kälteanlage für die Versorgung der Großforschungseinrichtung UCN, die wesentlichen Funktionen, Innovationen und speziellen Eigenschaften verglichen mit dem vorherigen System und zeigt den aktuellen Stand der Linde Helium-Kälteanlagen auf.

**Stichwörter:**

Helium-Kälteanlage, Helium-Verflüssiger, Kryo-Infrastruktur, Schildkühlung, Ultra Cold Neutrons

## Test des supraleitenden SIS300 Beschleuniger-Dipolmagneten am ILK Dresden

Ulrich Zerweck-Trogisch, Norbert Gust, Felix Donat, Thomas Jande, Andreas Wesenbeck, Andreas Kade

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[ulrich.zerweck@ilkdresden.de](mailto:ulrich.zerweck@ilkdresden.de)

Am ILK Dresden ist ein supraleitendes Segment eines Teilchenbeschleunigers getestet worden, dessen Strom im Gegensatz zu konventionellen Dipolmagneten im gepulsten Modus innerhalb Sekunden von 3 kA auf 9 kA und zurück geregelt wird. Zur gleichmäßigen Temperierung der 6 t kalte Masse wurde eine Umwälzungskühlung mit flüssigem Helium bei 4,5 K realisiert. Die magnetische Flussdichte von 4,5 T im Strahlrohr wird durch einen Spulenstrom von 9 kA erzeugt, die dabei gespeicherte magnetische Energie von rund 0,5 MJ stellt ein vom ILK entwickelter rekuperativer 4-Quadranten-Steller mit 5 MJ Kondensatorbank bereit. Im Falle eines Quenchzustandes des Supraleiters wird die volle Stromstärke innerhalb 5 ms auf einen Bremswiderstand geschaltet und damit der Magnet in 200 ms entladen.

## CMRC-gekühlte Stromzuführungen zur Erprobung in COMPASS

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

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

<sup>2</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),  
Engler-Bunte-Ring 21, 76331 Karlsruhe, Deutschland  
[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Stromzuführungen zu supraleitenden Magneten oder Kabeln tragen maßgeblich zur Wärmelast auf kryogene Systeme bei. Die Optimierung von Stromzuführungen erfordert dabei aus thermodynamischer Sicht eine Kühlung entlang der gesamten Länge der Stromzuführung. Technologisch wird eine solche Kühlung derzeit in Form von offenen Stickstoff-Prozessen, oder über geschlossene Helium-Rückverflüssigungsanlagen, die jedoch vor allem für große Systeme in Frage kommen, umgesetzt.

Zur Kühlung von Stromzuführungen in kompakten Anlagen bieten auf dem Joule-Thomson-Effekt basierende kryogene Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) eine kostengünstige, effiziente und beliebig skalierbare Alternative zu etablierten Lösungen. Der im Linde-Hampson-Prozess eingesetzte innere Wärmeübertrager kann dabei die Funktion des Rekuperators mit der einer Stromzuführung vereinen.

In diesem Beitrag wird ein Prototyp für eine mit einem Gemischkältekreislauf gekühlte kompakte, mikrostrukturierte 10 kA-Stromzuführung vorgestellt. Der Prototyp soll zukünftig in dem derzeit im Aufbau befindlichen Compact Accelerator Systems Test Stand (COMPASS) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) experimentell untersucht werden.

### Stichwörter:

Gemischkältekreislauf, Auslegung- und Dimensionierung, Stromzuführungen, Supraleiter

I.08

## Wärmeübertrager für kryogene Fluide

Moritz Kuhn, Erik Neuber

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

Wärmeübertrager für kryogene Fluide weisen oft eine sehr hohe Temperaturdifferenz zwischen Heizfläche und Fluid auf. Insbesondere dann, wenn Komponenten (wissenschaftliche Instrumenten, Supraleiter, ...) oder auch Wärmeträgeröle mit kryogenen Fluiden abgekühlt werden müssen, besteht die Gefahr, dass die kritische Wärmestromdichte erreicht wird und der Wärmeübergang sich schlagartig verschlechtert. Dieser Vorgang ist auch als Leidenfrost-Phänomen bekannt. Der Beitrag zeigt an Beispielen, worauf bei der Auslegung kryogener Wärmeübertrager zu achten ist und welche Formeln aus der Literatur zur Anwendung kommen können, um die kritische Wärmestromdichte vorherzusagen zu können und so die Sicherheit bei der Auslegung zu erhöhen.

I.09

## 80K-Helium/LN<sub>2</sub>-System für SEALab

mit zweistufigem Turboverdichter und Dreistrom-Wärmeübertrager

Jochen Heinrich<sup>1\*</sup>, Sven Erdmann<sup>1</sup>, Svenja Heling<sup>1</sup>, Karsten Janke<sup>1</sup>, Stefan Rotterdam<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Bereich BE-IAS,  
Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin, Deutschland  
[jochen.heinrich@helmholtz-berlin.de](mailto:jochen.heinrich@helmholtz-berlin.de)

Das Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) errichtet das *Superconducting rf Electron Accelerator laboratory* (SEALab) als Fortführung von bERLinPro. Das Anwendungsspektrum dieses Beschleunigers soll weiterentwickelt werden vom Hochstrom-SRF-basierten Energierückgewinnungskonzept bis zur ultraschnellen Elektronenbeugung (UED) zur Erzeugung kürzester Elektronenimpulse.

Das Labor beinhaltet bis zu drei kryogene Module mit supraleitenden Komponenten. Die Kälteleistung bei 1,8 K und 4,5 K wird von einer Helium-Kälteanlage bereitgestellt. Die Kälteleistung für die Strahlungsschilde und die thermische Abfangung weiterer Komponenten auf ca. 80 K Niveau kann diese nicht zusätzlich aufbringen. Aufgrund baulicher Entscheidungen kommt auch keine direkte Flüssigstickstoffkühlung in Betracht. Daher hat man sich für einen Kreislauf mit Helium bei ca. 80 K entschieden. Mittels zweier Mikro-Turbokompressoren wird Heliumgas im Kreis bewegt. Der Helium-Vorlauf wird in zwei Wärmeübertragern gekühlt. Erstens in einem Verdampfer am Flüssigstickstoff und zweitens in einem Dreistrom-Wärmeübertrager am Helium-Rücklauf und am verdampften Stickstoff. Dadurch wird nicht nur die latente Kälte, sondern auch die sensible Kälte des Stickstoffs genutzt.

Der Beitrag gibt einen Überblick zu den Ideen, zur Theorie und zu ersten Betriebserfahrungen mit der Anlage.

### Stichwörter:

Kryotechnik, Dreistrom-Wärmeübertrager, Turbokompressoren, Helium, Flüssigstickstoff

## Kryokonservierung mit Hilfe mikrofluidischer Systeme

Ricarda Brunotte<sup>1\*</sup>, Tim Rittinghaus<sup>1</sup>, Diaa Khayyat<sup>1</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1</sup>

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

Blut muss nach der Entnahme mit gerinnungshemmenden und haltbarkeitsverlängernden Substanzen stabilisiert werden, um eine generelle Lagerung in Beuteln bei Temperaturen von bis zu -196°C zu ermöglichen und eine möglichst hohe Überlebensrate zu gewährleisten. Die Nachteile dieser Kryoprotektiva sind die Zytotoxizität bei nicht kryogenen Temperaturen und der osmotische Stress durch die Zugabe und anschließender Entfernung dieser Substanzen aus den Zellen.

In dieser Studie wird ein Konzept für die Kryokonservierung von porcinem Vollblut unter Verwendung eines mikrofluidischen Systems (MFS) ohne den Einsatz von Kryoprotektiva vorgestellt. Das hergestellte mikrofluidische System verwendet eine Kanalstruktur und eine Trägerflüssigkeit (Perfluortributylamin), um die Bildung von Bluttröpfchen in kleinen Volumina zu fördern. Anschließend sollen die Tröpfchen mit einer Vorfriereinheit auf etwa -4 °C vorgekühlt werden. Die Abtrennung der Trägerflüssigkeit vom Blut erfolgt mit Hilfe einer netzgespannten Modulkette. Das vollständige Einfrieren der Tröpfchen wird in der modifizierten Gefriereinheit, dem Floatfreezer realisiert. Hier wird Stickstoffdampf von oben in die Kammer eingeblasen und ermöglicht eine Kühlung bis -40°C.

Die Ergebnisse zeigen eine Ausbildung von Mikrobluttröpfchen im MFS und somit eine verbesserte Wärmeübertragung. Die gewünschten Ergebnisse können mit beiden Gefriereinheiten erreicht und mit experimentellen Untersuchungen belegt werden.

### Stichwörter:

Kryokonservierung, mikrofluidisches System, Floatfreezer, Blutkonservierung, Perfluortributylamin

## Kryokonservierung tierischer Eizellen und Embryonen: Aktueller Stand und zukünftige Perspektiven

Christine Wrenzycki

Tierklinik für Reproduktionsmedizin und Neugeborenenkunde, Professur für Molekulare Reproduktionsmedizin,  
Justus-Liebig-Universität Gießen, Frankfurter Str. 106, 35392 Gießen  
[Christine.Wrenzycki@vetmed.uni-giessen.de](mailto:Christine.Wrenzycki@vetmed.uni-giessen.de)

Die Kryokonservierung boviner Embryonen erlangt immer größere Bedeutung in der assistierten Reproduktionsmedizin. Die Anzahl der in vitro produzierten Embryonen stieg in den letzten Jahren deutlich an. Nach wie vor ist jedoch die Qualität in vitro produzierter Embryonen den in vivo generierten unterlegen. Dies zeigt sich unter anderem an einer verzögerten Entwicklung, an schlechteren Trächtigkeitsraten nach Transfer auf ein Empfängertier sowie an reduzierten Überlebensraten nach der Kryokonservierung.

Zur Kryokonservierung von Embryonen werden zwei Hauptverfahren verwendet, die konventionelle Kryokonservierung (langsames Einfrieren) und die Vitrifikation. Die konventionelle Kryokonservierung, bei der Embryonen durch langsame Kühlraten in speziellen Gefrierautomaten auf Temperaturen unter den Gefrierpunkt heruntergekühlt und dann in flüssigen Stickstoff verbracht werden, wird heutzutage sowohl bei in vitro als auch in vivo generierte Embryonen standardmäßig eingesetzt. Die Vitrifikation stellt hingegen eine ultraschnelle Gefriermethode dar, bei der Embryonen durch hohe Konzentrationen an Kryoprotektiva und extrem hohe Kühlraten in einen amorphen, glasähnlichen Zustand überführt werden. Der große Vorteil der Vitrifikation ist, dass durch die hohen Kühlraten und die hohen Konzentrationen der Kryoprotektiva keine intrazellulären

Eiskristalle entstehen, welche die Zellmembran schädigen könnten. Dadurch lassen sich nach dem Erwärmen im Vergleich zur konventionellen Kryokonservierung gleich gute oder bessere Überlebensraten erzielen.

Ein Nachteil bei der Vitrifikation besteht jedoch darin, dass die eingesetzten Kryoprotektiva in hohen Konzentrationen zelltoxisch wirken. Um die toxischen Effekte möglichst gering zu halten, werden meist Gemische aus penetrierenden und nicht-penetrierenden Kryoprotektiva verwendet. Penetrierende Kryoprotektiva, wie zum Beispiel Glycerin, Dimethylsulfoxid (DMSO) oder Ethylenglykol (EG), zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Fähigkeit haben, durch die Zellmembran zu diffundieren, um intrazellulär einen Schutz vor der Bildung schädlicher Eiskristalle zu bewirken. Nicht-penetrierende Kryoprotektiva, wie zum Beispiel Saccharose, Ficoll oder Polyvinylpyrrolidon (PVP), erhöhen die extrazelluläre Osmolarität, wodurch Wasser aus der Zelle transportiert wird. Die geringere intrazelluläre Wasserkonzentration bewirkt dabei ebenfalls einen Schutz vor der Bildung schädlicher Eiskristalle. Ein weiteres Problem der Vitrifikation ist das Fehlen eines praxistauglichen One-step-Verfahrens, welches den direkten Transfer des erwärmten Embryos darstellt.

Neben den Anpassungen bei den Gefriermedien wurde außerdem die Kryotoleranz verbessert. Zum Einsatz kamen Substanzen, die das Zytoskelett stabilisieren sowie Antioxidantien. Außerdem wurde die Lipidzusammensetzung verändert. Methodisch erfolgte u.a. die Anpassung des Hochdruckgefrierens an Embryonen. Bei Spermien konnte die Gefriertrocknung etabliert werden.

Zusammenfassend muss jedoch festgehalten werden, dass es trotz der vielen Verbesserungen und Neuerungen das "perfekte" Einfrierprotokoll nach wie vor nicht gibt.

Finanziell unterstützt durch die Firma Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH

**Stichwörter:**

Kryokonservierung, Vitrifikation, Embryo

I.12

## MSC Vitrification: Regenerative Potential

**Oleksandra Hubenia<sup>1,2\*</sup>, Natalia Trufanova<sup>1</sup>, Alexander Petrenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institute for Problems of Cryobiology and Cryomedicine of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute for Multiphase Processes, Leibniz University Hannover, Garbsen, Germany  
[hubenia@imp.uni-hannover.de](mailto:hubenia@imp.uni-hannover.de)

Mesenchymal stromal cells (MSCs) derived from humans are widely recognized as a highly promising cell type for use in regenerative medicine. Although storing cells at room temperature may facilitate the transportation of preserved samples and circumvent some of the drawbacks associated with cryopreservation techniques, it is not suitable for long-term storage of cells.

Here we study the viability, metabolic activity, and reactive oxygen species (ROS) of MSCs during storage at ambient temperature and after vitrification in the form of the suspension, and encapsulated in alginate capsules (AMS). Viability and metabolic activity of MSCs in suspension decreased by more than 2 times at day 7 of storage. Encapsulated cells were more resistant and had significantly higher values of viability and metabolic activity. It was found that 64 % of cells released from AMS showed ability to adhere to plastic and following proliferation. The study of MSCs response on H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> exposure showed that the metabolic activity of cells in the suspension was less than 30 % at concentration of 400 µM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Cells in AMS were more resistant to the injured effect of ROS induction and kept metabolic activity higher 80 % up to 500 µM of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The basal and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-induced level of ROS was significantly lower in encapsulated MSCs compared to control.

For cryopreservation of MSCs in AMS by the vitrification method, a protocol developed for suspension of MSCs was used, namely, two-stage exposure in cryoprotectants with an extended exposure time of two times (10 % DMSO 1.4 M/l, 20 % Ethylene glycol 4 M/l, 20 % 1,2-Propanediol 2.6 M/l, Sucrose 0.5 M/l and 10 % DMSO 1.4 M/l, 15 % Ethylene glycol 2.4 M/l, 15 % 1,2-Propanediol 2 M/l, Sucrose 1 M/l) with subsequent immersion of cryotubes in liquid nitrogen. After vitrification, cell viability and metabolic activity of MSCs in AMS did not differ from the cells in suspension and were 74.4±6.6 % and 52.9±9.7 %, respectively.

## **Auswirkung von Einfriergeräten, Lagerungs- sowie Auftautemperaturen auf die Wiederfindungsrate kryokonservierter equiner dendritischer Zellen**

**Tarek Deeb<sup>1,2\*</sup>, Felix Schwebel<sup>3</sup>, Tim Rittinghaus<sup>1</sup>, Birgit Glasmacher<sup>1,2</sup>**

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

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

<sup>3</sup> PetBioCell GmbH, Schillerstr. 17, 37520 Osterode am Harz, Deutschland

Zelltherapien haben in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung in der Tumorbehandlung gewonnen. Die Behandlung mit dendritischen Zellen als Alternative zu herkömmlichen Therapien wird aktiv erforscht und zeigt vielversprechende Ansätze.

Durch die Anwendung der Kryokonservierung soll eine bessere Verfügbarkeit dieser Zelltherapie gewährleistet werden.

Im Vorfeld wurde ein Kontrollprotokoll für die Kryokonservierung von dendritischen Zellen von Pferden unter Verwendung eines Kryoprotektivums, bestehend aus 10 % (v/v) DMSO und 90 % (v/v) autologem Serum und einer Abkühlungsrate von 1 K/min entwickelt.

Das aktuelle Projekt zielt auf die Validierung der Verwendung höherer Auftaugeschwindigkeiten unter Verwendung passiver Erwärmungstechniken ab. Hier konnten wir zeigen, dass das Auftauen der Proben im Wasserbad bei relativ hohen Temperaturen (323,15 K & 338,15 K) die Wiederfindungsraten deutlich erhöht.

Außerdem konnten wir zeigen, dass die Verwendung von passiven Kühlgeräten anstelle von Gefriergeräten mit kontrollierter Abkühlrate und die Lagerung der Proben bei 193,15 K für maximal 12 Wochen die Wiederfindungsrate nicht signifikant beeinflusste.

Des Weiteren wird eine DMSO-freie Kryokonservierung untersucht und für die oben genannten Bedingungen validiert.

### **Stichwörter:**

Kryokonservierung, dendritische Zelltherapie, equine Zellen, Auftautemperatur, Lagerungsbedingung

## **Umzug einer Biobank – lessons learned**

**Vincent von Walcke-Wulffen<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> BioKryo GmbH, Zinzinger Straße 34, 66117 Saarbrücken  
[walcke@biokryo.de](mailto:walcke@biokryo.de)

Im Jahr 2021 mußte die BioKryo GmbH Ihren Standort von Sulzbach nach Saarbrücken verlegen. In diesem Vortrag geht es um die baulichen Maßnahmen sowie die regulatorischen Abnahme durch die Behörden am neuen Standort, die Darstellung der Risikoanalyse zum Umzug sowie die Durchführung des Umzuges einer halben Million Proben unter Einhaltung der Kühlkette und der GMP-Vorgaben. Die Proben werden unterhalb von -130°C in Kryotanks bzw. bei ca. -80°C in elektronischen Freezer gelagert. Dabei handelte es sich um Arzneimittel, MCBs, WCBs, Stammzelltransplante und Proben aus klinischen Studien zur Biomarkervalidierung.

Der Umzug erfolgte in Kooperation mit einem Spezialunternehmen. Dabei wurden die verschiedenen Probenbehälter evaluiert und auf Basis der erwähnten Risikoanalyse individuell überführt bzw. teilweise in speziellen

Transportbehältnissen überführt. An beiden Standorten gab es Back-up-Kapazitäten, um im Falle eines Unfalles oder Havarie sofort die Sicherstellung der Kühlkette gewährleisten zu können.

Der Vortrag schließt mit einer Übersicht von Empfehlungen ab.

**Stichwörter:**

GMP, Umzug, Kühlkette, Biobank, Risikoanalyse

I.15

## Ausbau des Kryosystems an der JGU Mainz

Gerhard Selle\*, Dr. Timo Stengler, Philipp Treite

Linde Kryotechnik AG, Dättlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz

[gerhard.selle@linde-kryotechnik.ch](mailto:gerhard.selle@linde-kryotechnik.ch)

Johannes-Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Johann-Joachim-Becher-Weg 45, 55128 Mainz

[tstengle@uni-mainz.de](mailto:tstengle@uni-mainz.de)

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

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

**Stichwörter:**

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

I.16

## Modellierung und Optimierung kryogener Gemischkältekreisläufe

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

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

[friederike.boehm@kit.edu](mailto:friederike.boehm@kit.edu)

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

[steffen.grohmann@kit.edu](mailto:steffen.grohmann@kit.edu)

Für eine Vielzahl technischer Anwendungen, z. B. bei Supraleitern, ist eine verlässliche Kühlung bei unter 100 K unverzichtbar. Da diese die Betriebskosten maßgeblich beeinflusst und steigende Energiekosten in allen Sek-

toren zu spürbaren Preissteigerungen führen, ist eine möglichst energieeffiziente Kühlung wünschenswert. Eine Option hierzu stellen kryogene Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) auf Basis des Joule-Thomson-Effekts dar. Der Vorteil dieser Kreisläufe liegt hierbei in der Kombination von guter Skalierbarkeit der Kälteleistung, Anpassbarkeit des Gemischs an die spezifische Anwendung und einem einfachen und somit günstigen Prozessaufbau.

In diesem Beitrag wird ein erstelltes Simulationsmodell für solche Kreisläufe sowie ein zugehöriger Optimierungsalgorithmus vorgestellt. Erste Ergebnisse werden präsentiert und weitere Möglichkeiten des entwickelten Systems aufgezeigt.

**Stichwörter:**

Gemischkältekreisläufe, Systemoptimierung

I.17

## Kryokühler Entwicklung

**Gunar Schroeder, Moritz Kuhn, Andreas Kade**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[gunar.schroeder@ilkdresden.de](mailto:gunar.schroeder@ilkdresden.de)

Pulsröhrenkryokühler (PTR) werden seit ihrer Erfindung durch Gifford und Longworth in den frühen 1960er Jahren bis heute immer weiter verbessert. Wesentliche Etappen in der Entwicklung sind dabei der Basis-, der Orifice-, der Double-Inlet-, der Four-Valve- und der Active-Buffer-PTR wobei Leistung und Effizienz immer weiter gesteigert werden konnte.

Am ILK Dresden wird unter anderem ein neuer Ansatz zur weiteren Verbesserung von PTR verfolgt. Dabei wird eine Datenbank mit Design und Leistungsparametern verfügbarer Kryokühler mit einem experimentellen Versuchsfeld zur Erprobung einzelner Komponenten sowie vollständiger Kryokühler und ein umfangreiches Software-Auslegungstool miteinander kombiniert. So können neue Ideen simuliert, mit bestehenden Lösungen verglichen, bewertet und zügig praktisch erprobt werden.

So wurden bisher bereits eigene Heliumverdichter unter Verwendung gängiger Komponenten aus der Kälte- und Klimatechnik entwickelt. Mit einer ebenfalls eigens entwickelten Ventileinheit und zugehöriger programmierbarer elektronischen Steuereinheit können die zeitliche Abfolge der Ventilsteuerzeiten völlig unabhängig voneinander vorgegeben bzw. optimiert werden.

Bisher wurden mehrere PTR aufgebaut, in verschiedenen Konfigurationen getestet und nach Effizienz, Kühlleistung, Anzahl der Einzelkomponenten sowie der Steuerbarkeit bewertet.

Besonders hervorzuheben ist hier auch die Entwicklung eines einstufigen PTR mit in die Kaltfläche integriertem Wärmeübertrager (z. B. als Verflüssiger), hergestellt in einem metallischen Laser-3D-Druck-Verfahren.

II.1.01

## Wärmeübergang bei der Verdampfung von Methanol und n-Pentan in Kapillarstrukturen

Hendrik Margraf, Andrea Luke

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

Das treibende Temperaturgefälle bei der Verdampfung in kälte- und klimatechnischen Anlagen ist oft der limitierender Faktor bei der Steigerung der Energieeffizienz. Die Modifizierung der Makro- und Mikrostruktur der Oberfläche eines Verdampfers ist eine Möglichkeit zur Verbesserung des Wärmeübergangs. Dabei ist das Ziel die Erhöhung der Keimstellendichte bzw. die Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kapillarwirkung als weitere Maßnahme zur Steigerung des Wärmeübergangs vorgestellt. Dazu wird der Wärmeübergang in offenporigen Strukturen, sog. Kapillarstrukturen, auf der Verdampferoberfläche beim Sieden in freier Konvektion mit Methanol und n-Pentan in einer Standardsiedeanlage untersucht. Dampf-Flüssig-Phasengrenzen innerhalb der offenen Poren bewirke eine Kapillarkraft, die durch zusätzliche Konvektion direkt an der Heizfläche den Wärmeübergang begünstigt. Im Bereich des Blasensiedens ist eine Änderung der Charakteristik hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen zugeführter Wärmestromdichte und Wärmeübergangskoeffizient sowie eine Reduzierung des notwendigen Temperaturgefälles um den Faktor 12 zu beobachten.

Zunächst werden die eingesetzten Kapillarstrukturen und die Versuchsanordnung erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse einer Oberflächenanalyse und der Wärmeübergangsmessungen vorgestellt. Abschließend werden die Ergebnisse unter Verwendung von physikalischen Modellen aus der Literatur interpretiert.

II.1.02

## Strukturen in additiv gefertigten Wärmeübertragern

### Parameterbasierte Generierung und messtechnische Charakterisierung innerer Gitterstrukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs

**Robin Kahlfeld<sup>1\*</sup>, Jasper Lachmayer<sup>1</sup>, Niklas Thies<sup>1</sup>, Stephan Kabelac<sup>1</sup>,  
Ina Meyer<sup>2</sup>, Cameron Meßmann<sup>2</sup>, Tobias Ehlers<sup>2</sup>, Roland Lachmayer<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau,  
An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland  
[meyer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:meyer@ipeg.uni-hannover.de), [c.messmann@stud.uni-hannover.de](mailto:c.messmann@stud.uni-hannover.de)  
[ehlers@ipeg.uni-hannover.de](mailto:ehlers@ipeg.uni-hannover.de), [lachmayer@ipeg.uni-hannover.de](mailto:lachmayer@ipeg.uni-hannover.de)

Das pulverbettbasierte Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M) ermöglicht als additives Fertigungsverfahren neuartige, hocheffiziente Wärmeübertrager mit komplexen inneren Strukturen. Ein Ansatz zur Steigerung der volumetrischen thermischen Leistungsdichte sind dabei Lattice Structures, Gitterstrukturen aus periodischen Einheitszellen. Zur thermofluidodynamischen Optimierung kann eine Vielzahl von Parametern angepasst werden. Dies erfordert eine grundlegende Untersuchung der Auswirkung der Parametervariationen. Die Generierung solcher Strukturen erfolgt über eine skriptbasierte Konstruktionsumgebung. Im folgenden Beitrag werden drei unterschiedlich ausgerichtete Diamond-Lattice-Structures generiert und messtechnisch charakterisiert. Der Algorithmus zur Generierung wird beschrieben. Die Strukturen unterscheiden sich bezüglich Anordnung und Ausrichtung. Sie sind auf der Gas-Seite eines kompakten, mittels PBF-LB/M gefertigten

Gaskühlers verortet. Wärmeübergang und Druckverlust werden für Leerrohr-Eintritts-Reynolds-Zahlen von 700 bis 9000 vermessen und untereinander sowie mit einem konventionellen, geometrisch ähnlichen Referenz-Rohrbündel verglichen. Die effizienteste Struktur hat gegenüber den beiden anderen um 50 % bzw. 57 % niedrigere mittlere Druckverluste, wobei die Wärmeströme jedoch im Mittel nur um 23 % bzw. 18 % abnehmen. Dies zeigt, dass über Parametervariationen eine deutliche Effizienzsteigerung möglich ist. Der Rohrbündelwärmeübertrager weist eine durchgehend niedrigere volumetrische Leistungsdichte auf, wobei die auftretenden Druckverluste jedoch ebenfalls geringer ausfallen.

**Stichwörter:**

Wärmeübertrager, Gitterstrukturen, Additive Fertigung, Pulverbettbasiertes Schmelzen von Metallen mittels Laserstrahl (PBF-LB/M)

**II.1.03**

## Characteristic Maps of Heat Exchanger-Behavior

Christoph Zainer<sup>1\*</sup>, Kevin Wimmer<sup>1</sup>, Jan Kummer<sup>1</sup>, Michael Lang<sup>1</sup>, Raimund Almbauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graz University of Technology, Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems, Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria  
[zainer@ivt.tugraz.at](mailto:zainer@ivt.tugraz.at), [kevin.wimmer@ivt.tugraz.at](mailto:kevin.wimmer@ivt.tugraz.at), [jan.kummer@ivt.tugraz.at](mailto:jan.kummer@ivt.tugraz.at)  
[lang@ivt.tugraz.at](mailto:lang@ivt.tugraz.at), [almbauer@ivt.tugraz.at](mailto:almbauer@ivt.tugraz.at)

According to the IIR [1], the refrigeration sector accounts for about 20 % of the global electricity consumption and thus represents one of the biggest potentials for reducing energy consumption and achieving sustainability.

However, the optimal operation of a domestic refrigerator depends on many factors and is even more difficult to depict by using variable-speed compressors. The associated distribution of the refrigerant in transient operation can lead to the refrigeration cycle being operated very inefficiently, as illustrated in Zainer *et al.* [2] (e.g. draining or flooding of the heat exchangers, drop in suction gas density and associated COP losses).

This publication shows how the optimum operation of a R600a-driven refrigeration cycle can be identified with the use of characteristic heat exchanger maps at variable operating points. With these maps for the condenser and the evaporator, deviations between real and optimal operation and their influence on the overall performance of the system (energy efficiency, ...) are analyzed and subsequently control strategies to improve the energy efficiency are derived. We also present the validated 1D steady state simulation used to generate the characteristic heat exchanger maps.

We found that by using the characteristic heat exchanger maps as a basis for operation, significant increases in efficiency are possible. The optimal operation is thereby known at each variable operating point (compressor speed, fan speed, ...) and necessary steps can be taken in case of a deviation in real operation. Furthermore, we show that the use of adjustable expansion valves could be indispensable for energy efficiency improvement.

These results may be useful to design future control strategies for energy efficient domestic refrigeration devices and provide a basis for control-strategies of adjustable expansion valves. Furthermore, the use of these maps is computationally much faster than a 1D simulation and can therefore achieve real-time capability (e.g. digital twin) in operation more easily.

**Keywords:**

Heat exchanger simulation, domestic refrigeration

**Literature:**

- [1] IIR, The role of refrigeration in the global economy, 38th Note on Refrigeration Technologies, 2019, <https://iifir.org/en/fridoc/142028>, doi: 10.18462/iif.Nltec38.06.20198
- [2] Zainer, C., Wimmer, K., Lang, M., Almbauer, R., Effect of the Contained Refrigerant Mass on the Efficiency and Effectiveness of two-phase Heat Exchangers, Paper at 19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 2022.

## 1D-3D-Coupling of a Two-Phase Heat Exchanger

Christoph Zainer<sup>1\*</sup>, Kevin Wimmer<sup>1</sup>, Jan Kummer<sup>1</sup>, Michael Lang<sup>1</sup>, Raimund Almbauer<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graz University of Technology,  
Institute of Thermodynamics and Sustainable Propulsion Systems,  
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria  
[zainer@ivt.tugraz.at](mailto:zainer@ivt.tugraz.at)  
[kevin.wimmer@ivt.tugraz.at](mailto:kevin.wimmer@ivt.tugraz.at)  
[jan.kummer@ivt.tugraz.at](mailto:jan.kummer@ivt.tugraz.at)  
[lang@ivt.tugraz.at](mailto:lang@ivt.tugraz.at)  
[almbauer@ivt.tugraz.at](mailto:almbauer@ivt.tugraz.at)

According to Zainer [1], the two-phase heat exchangers (condenser, evaporator) of domestic refrigerators have a significant uncertainty in the modeling and therefore probably a large potential for increasing efficiency.

However, the measurement of the two-phase refrigerant flow (geometric position of the phase transitions, heat transfer coefficient (HTC), ...) as well as the air-side effects (pressure drop, system characteristic, HTC, ...) of the heat exchangers is, if at all, only possible with considerable effort. A simulation-based representation of the heat exchangers with the aid of a full 3D-CFD simulation is associated with accurate mapping of the flow regimes, and therefore with a large computational effort (especially if the two-phase flow needs to be represented). Contrary, a 1D simulation using correlations is fast in terms of computation time, but an exact representation of the real air distribution is only achievable with difficulty.

This paper presents an approach for an accurate representation of the behavior of two-phase heat exchangers at a reasonable computational time using a 1D-3D-coupling. Therefore, the refrigerant-side effects are represented using an in-house 1D-model (MS Excel + VBA + Refprop), whereas the air-side flow phenomena across the heat exchanger are represented using a 3D-CFD-simulation (Ansys Fluent 2020R2). The focus of this paper is the presentation of the coupling algorithm and its application on a R600a operated wing-and-tube condenser of a freezer (applies analogously to the evaporator). Furthermore, the design of the 1D- and the 3D-model (correlations, simplifications, ...) is shown.

We found that very volatile solutions can appear at the coupling interface, but using under-relaxation, convergent solutions are obtained after only a few iterations (3 to 8). By comparing the results of the 1D-3D coupling with measurements, adjustments to improve the accuracy (temperature-dependent material values, ...) are presented. Furthermore, the simulation time and usability of this approach is discussed.

The presented 1D-3D coupling algorithm may be useful to address the future high demands on the accuracy of a control basis for efficient domestic cooling devices. Furthermore, it enables accurate predictions about the heat exchanger, and, thus, also the overall cycle behavior, already in the development stage without the need of a prototype.

### Key words:

Heat exchanger simulation, 1D-3D coupling

### Literature:

[1] Zainer, C., Wimmer, K., Lang, M., Almbauer, R., Effect of the Contained Refrigerant Mass on the Efficiency and Effectiveness of two-phase Heat Exchangers, Paper at 19th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 2022.

## Vorstellung des Rekuperativen Zweiphasen-Prozesses

### Ein Potential für Hochtemperatur-Wärmepumpen?

**Benedikt G. Bederna<sup>1\*</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>**

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

Hochtemperatur-Wärmepumpen gelten als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung vieler Industrieprozesse. Thermodynamisch sind damit aber zwei Herausforderungen verbunden, die multipliziert zu niedrigen COPs führen und eine Implementierung wirtschaftlich herausfordernd machen. Einerseits nimmt mit steigendem Temperaturhub der maximal erreichbare Carnot-COP ab, zum anderen wird auch die Umsetzung einer hohen Prozessgüte, dem Carnot-Wirkungsgrad, schwieriger. Die Ursache hierfür liegt in der wachsenden Abweichung der isenthalpen Expansion des Kaltdampf-Kompressionsprozesses von der isentropen Expansion des Carnot-Prozesses. Effizienzsteigernde Maßnahmen, wie Economizer- und Flashtank-Schaltungen, innere Wärmeübertrager und Expander bzw. Ejektoren, die alle isenthalpe Drosselverluste zu reduzieren versuchen, werden deswegen vermehrt eingesetzt. In dieser Veröffentlichung soll der neue rekuperative Zweiphasen-Kreisprozess (Recuperative Two-Phase Cycle – RTPC) vorgestellt werden, welcher den isenthalpen Drosselverlusten mittels einer vollständig im Zweiphasengebiet liegenden Rekuperation begegnet. Dies wird durch den Einsatz zeotroper Gemische mit stark nichtlinearem Temperaturverlauf im Zweiphasengebiet ermöglicht. Das Konzept, die Einsatzmöglichkeiten und die technischen Herausforderungen werden an Beispielen von Wärmepumpen-Anwendungen mit Temperaturhüben von 80 bis 120 K erläutert.

#### **Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpen, Ericsson Prozess mit Phasenwechsel, Interne Rekuperation, Recuperative Two-Phase Cycle

## Impact of an Internal Heat Exchanger and Ejector on the Performance of a Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle

**Fatih Meral<sup>\*,a</sup>, Gabriele Toffoletti<sup>b</sup>, Steven Montoya Grajales<sup>c</sup>,  
Andrea Luke<sup>a</sup>, Davide Ziviani<sup>c</sup>, Eckhard A. Groll<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> University of Kassel, School of Mechanical Engineering, Department of Technical Thermodynamics,  
Kurt-Wolters-Str. 3, Kassel 34125, Germany

<sup>b</sup> University of Udine, Polytechnic Dept. of Engineering and Architecture,  
Dia delle Scienze 206, 33100 Udine, Italy

<sup>c</sup> Purdue University, School of Mechanical Engineering, Ray W. Herrick Laboratories  
177 South Russell Street, West Lafayette, IN 47906, United States  
[fmeral1994@gmail.com](mailto:fmeral1994@gmail.com)

The refrigeration industry is facing challenges from both an energy efficiency standpoint as well as the equivalent carbon emissions. The regulations governing refrigerants in the residential and commercial sectors are subject to ongoing discussions, particularly with respect to meeting thermophysical property requirements and climate change goals. The European Union has introduced a gradual restriction on the amounts of hydrofluorocarbons (HFCs) available on the market through the F-Gas-Regulation, aiming to reduce emissions from the industrial sector by 70% compared to 1990 levels by the year 2030. The production of new mixtures, which often just meet the defined threshold of the Global Warming Potential (GWP), serves as a temporary measure to reduce HFC consumption. A long-term strategy requires a more in-depth examination of natural

refrigerants with low GWP and advanced cycle architectures. Refrigerants used in supermarket systems operating in the cooling temperature range of -30 °C to 5 °C have GWP values ranging from 500 to 700. In this paper, an existing multi-stage transcritical carbon dioxide (R-744) supermarket system has been investigated. The cycle features two evaporators, three stages of compression consisting of a fixed-speed, single-stage compressor in the low-pressure stage, and a two-stage compressor with intercooling and variable speed in the high-pressure stage. To reduce the energy consumption and optimize the seasonal energy efficiency, an internal heat exchanger and an ejector have been installed and tested. Extensive experimental testing has been performed inside a psychrometric chamber to control environment conditions in the outdoor temperature range of 19 °C to 30 °C. The results demonstrate that the use of the ejector and the internal heat exchanger can improve the coefficient of performance by up to 20%.

**Keywords:**

Carbon Dioxide (R-744), Supermarket Refrigeration System, Ejector, Internal Heat Exchanger

II.1.07

## Thermo-Economic Analysis of Refrigeration Systems

### Application of Novel Oil-Refrigerant Thermophysical Property Model

Caner Cikmaz<sup>1</sup>, Xiaoxian Yang<sup>1</sup>, Markus Richter<sup>1\*</sup>

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

Ideal design and precise analysis of refrigeration processes require accurate knowledge of the thermophysical properties of the involved fluids. Design calculations and process analysis are typically carried out considering only the working fluid, i.e., the pure refrigerant or refrigerant blend, while it is usually ‘contaminated’ with the lubricant oil of the compressor. The oil affects the properties of the working fluid by shifting the evaporation temperature, density and especially viscosity. Due to the difficulty in modelling all required thermophysical properties (mainly: density, heat capacity, entropy, enthalpy, viscosity, and thermal conductivity) of oils and oil-refrigerant mixtures, analysis of refrigeration processes considering the refrigerant being mixed with oil remains a challenge today. Recently, we have developed a novel modelling approach [1] that requires less than 20 experimental data points to develop a model set for all required properties of an oil, and one additional mixture data point to predict the properties of an oil-refrigerant mixture. Here, we present the application of this modelling approach to thermo-economic analysis of refrigeration machines and compare it to only considering the pure refrigerant. A software package is being developed for such an analysis, the main components of which, a fluid properties package and a simple process analysis, have already been completed. The subsequent step is to implement the software package to process simulation software, such as DWSIM [2] or EBSILON Professional [3].

**Keywords:**

Design, Lubricant, Mixture, Refrigerant, Viscosity, Software

**References**

- [1] Yang, X., Hanzelmann, C., Feja, S., Trusler, JPM., Richter, M. Thermophysical property modelling of lubricant oils and their mixtures with refrigerants using least amount of experiments. *Industrial & Engineering Chemistry* 2023:(to be submitted).
- [2] Medeiros, D.: DWSIM – Open Source Process Simulator. 2023. Available at: <http://dwsim.inforside.com.br>.
- [3] Iqony Solutions GmbH, 2023. EBSILON Professional 16.0.

## Speicherkonzepte für die industrielle Dampfversorgung

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

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

Die Europäische Union strebt einen Rückgang der jährlichen Treibhausgasemissionen um 55 % bis zum Jahr 2030 an. Es ist vorgesehen, dass im Jahr 2050 Europa klimaneutral sein soll. Um diese Ziele zu erreichen, muss u. a. die Prozesswärmeversorgung der Industrie stärker in den Fokus rücken. Beispielsweise machte im Jahr 2019 die Prozesswärme ca. 66,7 % des Endenergieverbrauchs der deutschen Industrie aus [1].

In industriellen Anlagen ist Dampf ein verbreitetes Wärmeträgermedium, welche bei der Erzeugung viel Energie benötigt [2]. Im Rahmen des aktuellen Projektes KETEC (Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik) werden u. a. Konzepte zur Realisierung einer hochverfügbaren, emissionsarmen und energieeffizienten Bereitstellung von Dampf für industrielle Prozesse grundlegend untersucht. Der Lösungsansatz sieht die Verwendung eines Wärmepumpen-Speicher-Systems vor. Die Dampferzeugung übernimmt eine Hochtemperatur-Wärmepumpe mit dem Low-GWP-Kältemittel R1336mzz(Z). Der erzeugte Dampf wird in einem Speichersystem zur Flexibilisierung der Dampferzeugung gespeichert. Die Dampftemperatur soll dabei mindestens 140 °C betragen. Die Hochtemperatur-Wärmepumpen können momentan nur mit relativ niedrigen Dampftemperaturen und hohen Wärmequellentemperaturen gute Leistungszahlen erreichen. Dann ist die nutzbare Temperaturdifferenz eingeschränkt, was durch die Funktionsweise von Gefälledruck-Dampfspeichern (z. B. Ruths-Speichern) verursacht wird. Zur Erhöhung der Speicherkapazität kann man folglich Phasenwechselmaterial (PCM) einsetzen.

Die vorliegende Arbeit behandelt Konzepte und mögliche Umsetzungsvarianten von hybriden Speichersystemen auf der Basis von Ruths- und PCM-Speichern. Diese werden mit relativ niedrigen Vorlauftemperaturen (z. B. Hochtemperatur-Wärmepumpe) beladen. Die Simulation des Systems erfolgt mit der Software EBSILON®Professional [3].

Die Ergebnisse bestätigen, dass verschiedene Kombination von Ruths-Speichern mit PCM-Speichern zielführend sein können. Der Einsatz von PCMs erhöht die Speicherwärmekapazität und sorgt für eine zusätzliche Nachverdampfung. Folglich kann das Ruths-Speicher-Volumen kleiner dimensioniert werden. Die Nutzung von Hochtemperatur-Wärmepumpen erlaubt u. a. die Nutzung der Abwärme aus anderen Prozessen. Besonders großes Anwendungspotenzial für dieses System sehen die Autoren in der Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie.

### Stichwörter:

Wärmepumpe, Ruths-Speicher, PCM, Simulation, EBSILON®Professional

### Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6) [abgerufen am: 12.04.2023]
- [2] Bazzanella, M.; Ausfelder, F.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Technologische Studie, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Frankfurt am Main, 2017.
- [3] STEAG Energy Services GmbH, 2022. EBSILON Professional 16.

## Drallbehaftete Beladung von schlanken Heißwasserspeicher –

### Detaillierte Simulation der Strömung im Diffusor und Speicher

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

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

Thermische Energiespeicher (Wärmesenke) ermöglichen u. a. einen kontinuierlichen und wirtschaftlichen Betrieb von Hochtemperaturwärmepumpen in der Fernwärmeversorgung (Betriebstemperatur über 100 °C, Betriebsdruck bis 20 bar). Dafür eignen sich Druckbehälter, sog. schlanke Heißwasserspeicher (Speichertyp b1, [1]). Die oben genannten Vorteile setzen einen effizienten Speicherbetrieb (niedrige interne und externe Speicherverluste) voraus. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Minimierung der internen Verluste durch die Verbesserung des thermischen Schichtungsverhaltens. Eine thermische Schichtung mit einem möglichst schmalen Übergangsbereich zwischen heißer und kalter Zone ist ein Indikator für geringe Mischvorgänge während der Beladung. Die Minimierung dieser Mischungsvorgänge bei der Beladung nimmt eine Schlüsselrolle bei der Minimierung der internen Speicherverluste ein. [2] und [3] untersuchten die Beladung mit herkömmlichen radialen Diffusoren in schlanken Heißwasserspeicher mithilfe von numerischer Strömungssimulation. Die Arbeiten identifizieren aufgrund der schlanken Speicherform nachteilige Strömungseffekte wie z. B. einen ausgeprägten Wandstrahl. Dieser Wandstrahl regt Mischvorgänge an und damit steigen die internen Speicherverluste. Zur Überwindung dieser Strömungsproblematik schlägt Platzer et al. [4] die Beladung mit Drall vor. Die Untersuchungen in [5] zeigten das Strömungsverhalten im Diffusor und im Speicher, die Auswirkungen auf die thermische Schichtung sowie die Vorteilhaftigkeit. Dieser Beitrag soll eine detailliertere Beschreibung der Strömungsvorgänge liefern. Dieses Wissen ist unbedingt notwendig, um die Ursachen und Wirkungen bei der Beladung mit Drall und beim Aufbau der thermischen Schichtung besser zu verstehen. Die Modellierung und Simulation des Diffusors bzw. des Speichers erfolgen mit ANSYS CFX [6]. Zur Auflösung turbulenter Strukturen findet die Large Eddy Simulation Anwendung. Dieser Artikel präsentiert erstmalig die Wirbelstrukturen im Diffusor mit Leitelementen zur Drallerzeugung. Die Speicherströmung weist ein ähnliches Verhalten zu bekannten Dichteströmungen (z. B. Lappen-Kluft-Struktur, Instabilitäten in den freien Scherschichten) auf, was bisher nicht bekannt war. Hohe Peclet-Zahlen (hohe Advektionsströme) im Speichermodell führen zu numerischer Instabilität der Simulation und erfordern deshalb erhöhten Diskretisierungsaufwand.

#### Stichwörter:

thermischer Energiespeicher, radialer Diffusor mit Leitelementen, Drall, LES, Wirbel, Wärmepumpen

#### Literaturverweise

- [1] Urbaneck, T.: Water Tank Stores for Medium/Large Application. In: Elsevier (2020).
- [2] Brähmer, C.; Urbaneck, T.; Lohse, R.: Influence of Geometry and Operation Parameters on Thermal Stratification. Euro Heat and Power 4 (2012), S. 30–36. ISSN: 1630-0200.
- [3] Lohse, R.; Urbaneck, T., Brähmer, C., Platzer, B.: Effects during loading of hot water storages with a high aspect ratio. Euro Heat and Power 3.9 (2012).
- [4] Platzer, B.; Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Winkler, T.: Verfahren und Vorrichtung zum Be- und/oder Entladen eines thermischen Energiespeichers. Patentanmeldung, 2017120716373300DE. Anmeldung eingegangen am: 07.12.2017.
- [5] Oestreich, F.; Urbaneck, T.: Loading Slim Hot ater Tanks With and Without Swirl Generation – First Results. 14th International Conference on Solar Energy and Buldings. Kassel (Deutschland), Tagungsbeitrag eingereicht.
- [6] ANSYS, Inc.: ANSYS CFX 2019 R2. Canonsburg (USA), 2019.

II.1.10

## Experimentelle Untersuchung eines Kohlendioxidgemischs zur Erzeugung von Temperaturen unter – 50 °C

Melanie Cop<sup>1\*</sup>, Diandra Kücükaya<sup>1</sup>, Riley Barta<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Raimund Kögler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Münchner Platz 3, 01069 Dresden, Deutschland  
[melanie.cop@tu-dresden.de](mailto:melanie.cop@tu-dresden.de)

<sup>2</sup>Feutron Klimasimulation GmbH, Am Weberbrunnen 1, 07957 Langenwetzendorf, Deutschland  
[raimund.koegler@feutron.de](mailto:raimund.koegler@feutron.de)

Zur Überprüfung von Qualität und Beständigkeit technischer Bauteile werden selbige künstlich erzeugten Umgebungsbedingungen in Temperatur- bzw. Klimaprüfkammern ausgesetzt. Die Anwendung zeichnet sich durch besondere Anforderungen an Temperaturstabilität und Abkühlgeschwindigkeit der Luft im Prüfraum aus. Zur Bereitstellung besonders tiefer Temperaturen bis -75 °C stellen Kaskadenkälteanlagen mit dem Hoch-GWP-Kältemittel R-23 in der unteren Kaskadenstufe den etablierten Standard dar. Vor dem Hintergrund der gesetzlich vorgesehenen Treibhausgasreduktion resultieren aus dem GWP<sub>100</sub> von 12 690 wirtschaftliche wie politische Unwägbarkeiten. Aktuelle Marktentwicklungen bieten u.a. nicht brennbare zeotrope Ersatzkältemittel auf Basis von Kohlenstoffdioxid und nur etwa 10 % des Treibhauspotentials von R-23. Entsprechende Langzeituntersuchungen des Anlagen- und Komponentenverhaltens stehen bisher in einigen Fällen noch aus.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens erfolgte ein Retrofit des Kältemittels R-23 mit dem Ersatzstoff R-473A für eine Klimaprüfkammer mit einem Prüfraumvolumen von 0,28 m<sup>3</sup>. Der Beitrag stellt die Untersuchungsergebnisse der Versuchsanlage vor, welche sich auf die Abkühlgeschwindigkeit der Luft (gem. DIN EN 60068 3-5) und der minimal möglichen Lufttemperatur fokussieren. Außerdem werden erste Untersuchungsergebnisse einer zweiten Kammer höherer Kälteleistung und einem Nutzraumvolumen von 2 m<sup>3</sup> vorgestellt.

### Stichwörter:

Tieftemperaturkältemittel, Umweltsimulationskammer, Kältemittelgemisch

II.1.11

## High-glide ternary mixtures in high-temperature heat pumps

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

OST - Ostschweizer Fachhochschule – Buchs SG, Schweiz  
[leon.brendel@ost.ch](mailto:leon.brendel@ost.ch)

Industrial heat pumps often must provide large temperature variations in the heat source and heat sink of over 20 K. For those applications, temperature glide matching using non-azeotropic refrigerant blends has been shown to improve the COP in some operating conditions. When designing binary mixtures, large differences in the normal boiling point and small mass fractions lead to non-linear trends of the phase change process in a temperature–enthalpy chart, thereby hindering glide matching. A method to linearize the glide is adding a third component with an intermediate normal boiling point. This has been proven for low temperatures with (H)CFC mixtures in the past. This study applied the method to a high-temperature heat pump with H(C)FO and HC refrigerants, aiming for COP improvements. Binary and ternary mixtures were experimentally tested at equal operating conditions in the same heat pump. The COP improvements were smaller than expected, mainly due to an increased approach temperature in the heat exchanger. However, it was possible to determine the composition of the ternary mixture using different sets of two inline property measurements without taking a sample. Future work will leverage different heat exchanger sizes to decrease the impact of the varying approach temperature.

**Keywords:**

heat pump, ternary mixture, heat transfer, composition determination, COP

II.1.12

## Novel Modeling Approach for Oil-Refrigerant Mixtures

Xiaoxian Yang<sup>1</sup>, Christian Hanzelmann<sup>2</sup>, Steffen Feja<sup>2</sup>, J.P. Martin Trusler<sup>3</sup>, Markus Richter<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup> ILK Dresden: Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, 01309 Dresden, Germany  
[christian.hanzelmann@ilkdresden.de](mailto:christian.hanzelmann@ilkdresden.de), [steffen.feja@ilkdresden.de](mailto:steffen.feja@ilkdresden.de)

<sup>3</sup> Department of Chemical Engineering, Imperial College London, South Kensington Campus,  
London SW7 2AZ, United Kingdom  
[m.trusler@imperial.ac.uk](mailto:m.trusler@imperial.ac.uk)

Modelling all required thermophysical properties – mainly density, phase behavior, heat capacity, entropy, enthalpy, viscosity and thermal conductivity – of a lubricating oil and the oil-refrigerant mixtures in refrigeration machines and heat pumps remains a challenge today. Here, we propose a novel modelling approach that requires less than 20 experimental data points to develop a model set for all required properties of an oil, and one additional mixture data point to predict the properties of an oil-refrigerant mixture. For oils and less asymmetric oil-refrigerant systems, this approach yielded uncertainties of approximately 7 % for viscosity and 3 % for other properties in the liquid phase and not in the vicinity of the critical point. For asymmetric binary systems, the approach still yields good predictions, typically within 10 % for all properties except for viscosity. With the developed model set, the thermodynamic performance of a simple refrigeration cycle considering the refrigerant being mixed with oil was investigated. More comprehensive analysis will be presented by Cizmaz et al (abstract title: Thermo-Economic Analysis of Refrigeration Processes Using a Novel Oil-Refrigerant Mixture Model)

**Stichwörter:**

lubricant; refrigerant; thermophysical property model; heat pump

II.1.13

## Neuartiger Modellierungsansatz für die thermodynamischen Daten von Kältemittel-Öl-Gemischen

Steffen Feja, Christian Hanzelmann, Eric Schmieder

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

Die Modellierung aller erforderlichen thermophysikalischen Eigenschaften – vor allem Dichte, Phasenverhalten, spezifische Wärmekapazität, Entropie, Enthalpie, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit – eines Schmieröles und – zzgl. des Dampfdruckes – des Kältemittel-Öl-Gemisches (KMÖG) in Kältemaschinen und Wärmepumpen ist auch heute noch eine Herausforderung. Hier schlagen wir einen neuartigen Modellierungsansatz vor, der von den Stoffdaten des reinen Öles ausgeht, welche in den Datenblättern der Ölhersteller beschrieben sind. Aus diesen Daten kann ein Datensatz zur Temperaturabhängigkeit für die meisten erforderlichen Eigenschaften zur Beschreibung eines Öls im kältetechnisch interessanten Bereich vom Pour Point des Öles bis 140 °C entwickelt werden. Für die nicht im Datenblatt bereitgestellten thermischen Größen, hier spezifische Wärmekapazität und

Wärmeleitfähigkeit wird mittels eines einzigen Messwertes die Temperaturabhängigkeit der Größen abgeschätzt. Das Modell erreicht dabei für die zunächst betrachteten Eigenschaften (Dichte, Viskosität, thermische Größen) des reinen Öles eine im Bereich der Messunsicherheit liegende Genauigkeit.

Das Modell wird nun mit Hilfe der Kenntnis des Kältemittels, seiner tabellierten Eigenschaften und teilweise bekannter mathematischen Beziehungen (z. B. Feja et al. IIR Conference Ohrid 2023) erweitert. Für ein Beispielsystem (R290-PAG 68-System) werden die Koeffizienten der Gleichungen für die Erstellung des Dampfdruck-Viskositäts-Temperaturverhalten (kurz: PnT-Diagramm oder Danielplot) abgeleitet. Diese Abschätzung erfolgt zunächst ohne Hinzunahme von zusätzlichen Messdaten des KMÖG. Aus diesen Daten wird ein Vorschlag zur Lage der Mischungslücke im System erarbeitet und mit der gemessenen Mischungslücke verglichen. Für die spezifische Wärmekapazität des Gemisches wird ein ähnlicher Ansatz vorgestellt. Die so gewonnenen Abschätzungen werden durch nur wenige Messdaten konkretisiert und dann mit der vollständigen Messung verglichen. Auch hier wird eine sehr hohe Genauigkeit der abgeschätzten Daten mit den tatsächlichen Messwerten erreicht.

In der Präsentation wird ein Vergleich der Abschätzung auf dieser alternativen Route mit der Veröffentlichung von Yang et al. (DKV 2023: Novel Modeling Approach for Oil-Refrigerant Mixtures) durchgeführt, da dieser dieselben gemessenen thermodynamischen Daten zugrunde liegen.

Ausblick: Mit dem so entwickelten Modellansatz kann die thermodynamische Leistung bzw. die Energieeffizienz eines einfachen Kältekreislaufs untersucht und berechnet werden, in dem das Kältemittel mit Öl „rechnerisch“ gemischt wird. Die dafür benötigten Formeln und Berechnungen werden im Verbundvorhaben OELEK – Schmierstoffwahl für Kälteanlagen unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz (FKZ: 03EN4027; BMWK) durch die Projektpartner COOLPLAN und Hochschule Ruhr West (HRW) entwickelt und angewandt und auf mind. drei weitere Propan-Öl-Gemische (Ölentwicklung: KLÜBER) übertragen. Eine Überprüfung der so berechneten Effizienz der Verdichter (Tests: BOCK und ILK Dresden) und einer Kälteanlage (Aufbau und Messung: HRW) erfolgt dann experimentell.

**Stichwörter:**

Öl, Kältemittel, Propan, Modellierung thermophysikalische Eigenschaften, spezifische Wärmekapazität, Viskosität, Dampfdruck

**II.1.14**

## **Kälte-Erzeugung u. Speicherung mittels Lösungsenthalpie**

**Peter Röllig\*, Joachim Germanus**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[peter.roellig@ilkdresden.de](mailto:peter.roellig@ilkdresden.de)

In einem Vorlaufforschungsvorhaben wird ein Verfahren entwickelt, bei dem durch Nutzung der positiven Lösungsenthalpie von Stoffpaaren (wie z. B. Salz und Wasser) nutzbare Kälte zyklisch erzeugt werden kann.

In einer Versuchsanlage im kleinen Maßstab wurden mit verschiedenen Arbeitsstoffpaaren experimentelle Untersuchungen durchgeführt und deren Lösungseigenschaften analysiert.

Mit der Versuchsanlage wird die prinzipielle Möglichkeit für eine punktuelle, zeitlich bedarfsgerechte Erzeugung von Kälte gezeigt, ebenso die Eignung zur Kältespeicherung.

Für die Regeneration des Systems jeweils nach einem Kälteerzeugungszyklus wird der Lösung bei entsprechendem Unterdruck niedertemperierte Wärme mit ca. 50°C zugeführt, um die Lösung für einen erneuten Kälteerzeugungszyklus wieder in seine Ausgangskomponenten zu trennen. Mit dieser Technologie ergibt sich die Möglichkeit einer nützlichen Anwendung von niedrig temperierter Wärme.

Für eine großtechnische praktische Nutzung dieses Verfahrens zur Erzeugung und Speicherung von Kälte muss noch weitere Entwicklungsarbeit geleistet werden.

Im Vortrag werden die Ergebnisse vorgestellt, die im Vorlaufforschungsvorhaben bislang als erste Schritte für diese Technologie erreicht wurden.

**Stichwörter:**

Kälte-Erzeugung/-Speicherung, Lösungsenthalpie, Niedertemperaturwärmenutzung

II.1.15

## **Analyse des Temperaturprofils und der Zusammensetzung eines CO<sub>2</sub>-PAG68 Gemisches in einem Koaleszenzabscheider**

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

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

In CO<sub>2</sub>-Kompressionskälteanlagen werden oftmals Ölmanagementsysteme verwendet, bei denen nach dem Verdichter die ölreiche Phase von der überkritischen oder gasförmigen Kältemittelphase in einem Koaleszenzabscheider separiert und zum Kältemittelverdichter zurückgeführt wird. Aufgrund der Löslichkeit des CO<sub>2</sub> im Öl wird ein Teil des Kältemittels über die Ölleitung mitgeführt. Die Zusammensetzung der ölreichen Phase wirkt sich dabei auf die Viskosität aus und stellt einen Einflussfaktor für ein mögliches Aufschäumen der in den Verdichtersumpf zurückgeführten Ölphase dar. Für die Berechnung von Ölmanagementsystemen ist somit die Zusammensetzung der am Abscheider entnommenen Ölphase von besonderem Interesse.

In diesem Beitrag werden die Zusammensetzung der abgeschiedenen ölreichen Phase eines CO<sub>2</sub>-PAG68 Gemisches und das eindimensionale Temperaturprofil in einem Koaleszenzabscheider präsentiert und mit den im thermodynamischen Gleichgewicht bestimmten Stoffdaten des Gemisches verglichen. Es wird gezeigt, dass die im Abscheider gemessene Zusammensetzung und die für den Zustand an der Phasengrenzfläche ermittelte Gleichgewichtszusammensetzung nahezu übereinstimmen. Aufgrund der Wärmeübertragung von der ölreichen Flüssigphase an die Umgebung ergibt sich für die austretende ölreiche Phase ein Zustand der ungesättigten Flüssigkeit. Für die Bestimmung der Zusammensetzung der Ölphase im Abscheider sollte somit die Temperatur an der Phasengrenzfläche und nicht am Entnahmestutzen herangezogen werden.

II.1.16

## **Mit dem Kältemittel Wasser unter den Gefrierpunkt –**

### **Einschränkungen und Lösungsansätze**

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

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

Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser und wässriger Lithiumbromidlösung werden im Allgemeinen nicht zur Kältebereitstellung unter 0 °C eingesetzt, da das Kältemittel Wasser im Verdampfer gefrieren würde.

Da Lithiumbromid gefrierpunktniedrigend wirkt, liegt es nahe, das Kältemittel Wasser in solchen Anlagen mit diesem Salz anzureichern, um einen entsprechenden Betrieb zu ermöglichen. Damit einher geht notwendigerweise ein geeignetes Salzmanagement im Kältemittelkreis. Zudem ist die Salzkonzentration in Absorber und Desorber abzustimmen. Beschränkend wirkt besonders die Kristallisationsgrenze der Salzlösung. Weitere Limitierungen ergeben sich einerseits aus einem verminderten Wärmeübergang auf der Prozessseite sowie andererseits beim Wärmeträgermedium, welches bei Temperaturen um -10 °C sehr viskos wird. Abhilfe können hierbei beispielsweise eine optimierte Geometrie der Wärmeübertragerrohre und entsprechende Rohrein-

bauten schaffen. Im vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben „GALuWap“ (FKZ 03EN2005) wurden weitere Lösungsansätze untersucht und werden hier vorgestellt und erörtert. Damit wird in diesem Beitrag ein umfassender Einblick in die Chancen und Risiken des Betriebs von Absorptionskältemaschinen und insbesondere des Rohrbündelverdampfers mit Kältemittel Wasser unter dem Gefrierpunkt gegeben.

## II.1.17

# Der SunBeltChiller – ein solarthermisch betriebenes Kühlsystem für den Sunbelt

Richard Gurtner<sup>1\*</sup>, Tobias Schmetzer<sup>1</sup>, Manuel Riepl<sup>1</sup>

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

Der Sunbelt liegt zwischen dem 40. nördlichen und südlichen Breitengrad und hat naturgemäß einen hohen Kühlbedarf bei gleichzeitig hoher solarer Einstrahlung und ist damit prädestiniert für den Einsatz von solar betriebenen Kühlsystemen. Die tagsüber meist hohen Außentemperaturen (>30 °C) erfordern dort für den Betrieb von solar**thermischen** Kühlsystemen (Absorptionskältemaschinen) den Einsatz von Nasskühltürmen. Dieser ist jedoch aufgrund von Wasserknappheit oder hoher Luftfeuchtigkeit häufig nicht möglich. Hierdurch wird der Einsatz von solarthermischen Kühlsystemen im Sunbelt bisher erheblich gehemmt. Aus diesem Grund wurde speziell für den Einsatz im Sunbelt der SunBeltChiller (SBC) entwickelt. Er benötigt keinen Nasskühlturm und ist aus marktverfügbaren Komponenten aufgebaut.

Der SunBeltChiller ist ein Energiesystem bestehend aus einer Double-Lift-LiBr-Absorptionskälteanlage (DL) und einer Single-Effect-LiBr-Absorptionskälteanlage (SE), sowie einem Kaltwasserspeicher (ca. 6 °C) und einem Warmwasserspeicher (ca. 90 °C). Die Double-Lift-Anlage wird durch konzentrierende Solarkollektoren (z. B. Fresnel-Kollektoren) bei ca. 190 °C angetrieben und liefert Kälte mit einem EER von ca. 0,3 und kann dabei bei Temperaturen von bis zu 90 °C rückgekühlt werden. Diese hochtemperierte Abwärme der DL dient der einstufigen SE-Anlage als Antriebswärme (EER ca. 0,7). Im Warmwasser-Wärmespeicher kann die Abwärme der DL zwischengespeichert werden und dann der SE als Antriebswärme zur Verfügung gestellt werden, wenn insbesondere nachts niedrige Außentemperaturen (< 30 °C) herrschen und somit über trockene Rückkühlwerke gegen die Umgebung rückgekühlt werden kann. Durch den Einsatz eines Kältespeichers kann die (nachts) erzeugte Kälte bedarfsgerecht dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden. Der SBC ist mit einem EER von 1,3 energetisch gleichwertig zu einer Double-Effect-Anlage und kann zudem Nutzwärme bei ca. 90 °C dem Verbraucher zur Verfügung stellen, und ist damit deutlich flexibler und erzielt höhere solare Deckungsgrade.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Verbundvorhaben *SunBeltChiller-Solarthermisches Energiesystem für Kälte und Prozesswärme im Sunbelt* (FKZ: 03ETW026) wird das SBC-System derzeit durch das ZAE Bayern und Industrial Solar GmbH entwickelt und im Labormaßstab (ca. 50 kW Kälteleistung) voraussichtlich in diesem Jahr getestet und demonstriert. Darüber hinaus wurden im Projekt eine Geodaten-Analyse entwickelt und ein Auslegungstool zur Anlagendimensionierung aufgebaut, mit deren Hilfe eine Potential-Landkarte, sowie eine Anwendungsstudie für mehrere Einzelstandorte nach ökonomischen und ökologischen Kriterien erstellt wird.

In diesem Beitrag werden das Konzept, der Aufbau und die Vorteile des innovativen SBC-Kühlsystems präsentiert. Es wird das Potenzial des Systems mittels der Geodaten-Analyse und dem Dimensionierungstools anhand verschiedener Standorte und Anwendungen aufgezeigt. Zudem werden die Labor-Testergebnisse des zweistufigen Kühlsystems präsentiert, die der Validierung des Systemkonzepts und der Berechnungsmodelle dienen.

### Stichwörter:

Solare Kühlung, solarthermische Kühlung, mehrstufige Absorptionskältemaschine, Sunbelt, trockene Rückkühlung, Solare Prozesswärme

## Analyse eines Resorptions-Double-Lift-Adsorptionskälteprozesses:

### Materialauswahl für die Impfstoffkühlung in heißen Regionen

Charlotte Fischer<sup>1\*</sup>, Roland Kühn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Coolar UG (haftungsbeschränkt), Wolfener Str. 32-34, Haus C, 12681 Berlin, Germany  
[charlotte@coolar.co](mailto:charlotte@coolar.co)

Weltweit haben ca. 1 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität, was insbesondere für die medizinische Versorgung, bspw. mit Impfstoffen, ein Problem darstellt. Zur Lösung des Problems setzen NGOs wie UNICEF heutzutage größtenteils auf direkt photovoltaisch betriebene Impfstoffkühlschränke ohne Batterien (SDD – solar direct drive), welche unabhängig vom Stromnetz betrieben werden können. Die WHO zertifiziert entsprechende Geräte, um eine ausreichende Sicherheit der Kühltechnik zu gewährleisten. Ein Großteil der Impfstoffkühlschränke wird für heiße Klimazonen zertifiziert, wobei der Kühlraum bei konstanter Umgebungstemperatur von 43°C bei 2-8 gehalten werden muss und das mindestens für 3 Tage, auch wenn das Solar-system keine Antriebsenergie liefert. Aufgrund des hohen Anlaufstroms der Kompressoren in SDDs, kommt der Auslegung des Photovoltaiksystems eine große Bedeutung zu, um eine ausreichende Laufzeit des Kompressionskältesystems sicherzustellen. Eine Alternative bieten solarthermisch angetriebene Adsorptionskältesysteme: die Adsorptionskälte nutzt die Sonnenenergie stufenlos aus und das Solarthermiesystem ist weniger anfällig bei diffusem Lichteinfall als Photovoltaik.

Um mit einem einfachen Solarthermiesystem auch bei 43°C Umgebungstemperatur ausreichende Kühlraumtemperaturen zur Verfügung zu stellen, nutzt Coolar einen erweiterten Adsorptionskälteprozess. Der von Coolar verwendete Resorptions-Double-Lift-Prozess arbeitet mit zwei Adsorbent, die so verschaltet sind, dass der Prozess je nach Auslegung und Umgebungsbedingungen selbstregulierend entweder stärker als Single-Lift- oder Double-Lift-Prozess arbeitet, sodass immer eine möglichst große Beladungsbreite und damit effektive Ausnutzung des Sorptionsmaterials erreicht wird.

In dieser Veröffentlichung wird der Coolar Resorptions-Double-Lift-Prozess mithilfe eines Gleichgewichtsmodells für unterschiedliche Arbeitsmedien und Massenverhältnisse der beiden Adsorbent untersucht und mit dem bekannten Single-Lift- und Double-Lift-Prozess verglichen. Je nach Arbeitspaar und Temperaturtripel existiert ein optimales Massenverhältnis, welches für den von Coolar genutzten und den bekannten Double-Lift-Prozess unterschiedlich ist. Es zeigt sich außerdem, dass der Coolar Double-Lift-Prozess bei gleicher eingesetzter Gesamtmasse an Adsorbent immer eine größere Wassergleichgewichtsaufnahme aufweist als der Single-Lift-Prozess, während der bekannte Double-Lift-Prozess bei ungünstigen Bedingungen oder Auslegung eine geringere Ausnutzung des Adsorptionsmaterials erreicht als der einfachere Single-Lift-Prozess. Von den untersuchten Materialien erreicht Siogel bei dem Temperaturtripel 2°C/43°C/100°C die beste Adsorptionsmaterialausnutzung im Coolar Prozess, wenn der zweite Adsorbent 40% der Größe des ersten Adsorbent besitzt.

#### Stichwörter:

Adsorptionskälte, solares Kühlen, Impfstoffkühlung, theoretische Analyse, Gleichgewichtsmodell

II.1.19

## **Bestimmung des Massenanteils wässriger Lithiumbromidlösung bei Temperaturen unter 0 °C**

**Michael Radspieler<sup>1\*</sup>, Felix Schulze-Hoeing<sup>1</sup>, Manuel Kausche<sup>1</sup>, Manuel Riepl<sup>1</sup>**

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

Absorptionskälteanlagen mit dem Arbeitsstoffpaar Wasser und wässriger Lithiumbromidlösung werden im Allgemeinen nicht zur Kältebereitstellung unter 0 °C eingesetzt, da das Kältemittel Wasser im Verdampfer gefrieren würde.

Da Lithiumbromid gefrierpunktniedrigend wirkt, liegt es nahe, das Kältemittel Wasser in solchen Anlagen mit diesem Salz anzureichern, um einen entsprechenden Betrieb zu ermöglichen. Im vom BMWK geförderten Forschungsvorhaben „GALuWap“ (FKZ 03EN2005) wird eine solche Anlage entwickelt.

Um diese Anlage und ihre Komponenten wissenschaftlich zu untersuchen und für das Salzmanagement der Anlage ist es notwendig den Salzgehalt im Kältemittel bestimmen zu können.

Daher wurden Messungen von Dichte und elektrischer Leitfähigkeit von wässriger Lithiumbromidlösung, vor allem im Bereich niedriger Massenanteile und bei Temperaturen unter 0 °C durchgeführt. Die dabei ermittelten Messwerte sowie die daraus bestimmten Gleichungen zur Berechnung des Massenanteils von Lithiumbromid werden hier vorgestellt.

II.1.20

## **Luftkonditionierung mit ionischer Flüssigkeit**

### **Experimentelle Ergebnisse eines kompakten Apparates zur unabhängigen Regulierung von Luftfeuchte und -temperatur mittels offener Sorption**

**David Dehler<sup>1\*</sup>, Stefan Elbel<sup>1</sup>, Thomas Meyer<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wärmeübertragung und -wandlung,  
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland  
[david.dehler@tu-berlin.de](mailto:david.dehler@tu-berlin.de)

Thermisch angetriebene sorptionsgestützte Klimatisierungsverfahren können im Vergleich zur Luftkonditionierung mittels Kompressionskälteverfahren wegen des potenziell deutlich geringeren Strombedarfs einen Beitrag zur Weiterentwicklung alternativer Kühlsysteme liefern, wie sie beispielsweise von der internationalen Energieagentur (IEA) in deren Bericht zur Zukunft der Kühlung (2018) gefordert wird [1]. Laut [1] liegt der über alle weltweit verbauten Klimageräte gemittelte SEER bei knapp 4 im Jahr 2020. Der angestrebte SEER des hier vorgestellten Prozesses liegt zwischen 10 und 15.

Um eine behagliche Feuchte und Temperatur in einem Gebäude einzustellen, ist bei Lüftungsanlagen, die mit Kompressionskälte arbeiten, meistens eine Taupunktunterschreitung durch Kühlung der Luft auf 6 °C bis 10 °C (entspricht bei 20 °C einer relativen Feuchte von 40 % - 52,5 %) und eine anschließende Nachheizung auf ein behagliches Temperaturniveau notwendig. Diese Entfeuchtung durch Taupunktunterschreitung kann bis zu 80 % [2] des Strombedarfs dieses Prozesses ausmachen.

Die Hauptantriebsleistung des thermischen Sorptionsprozesses ist hingegen nicht elektrischer Strom, sondern ein Niedertemperaturwärmestrom im Temperaturbereich von 55 °C bis 100 °C, je nach klimatischen Verhältnissen. Wärmequellen sind beispielsweise Solarthermie oder Prozessabwärme. Als Arbeitsmedium werden ionische Flüssigkeiten verwendet. Die Stoffeigenschaften von ionischen Flüssigkeiten können für vielfältige Anwendungszwecke entwickelt werden, wodurch sie mittlerweile in unterschiedlichsten Industrien Anwendung

finden [3]. Die in dieser Studie verwendeten ionischen Flüssigkeiten haben kein Global Warming Potential, einen vernachlässigbaren Dampfdruck, sind nicht giftig, nicht brennbar und nicht korrosiv gegenüber einfachen Lüftungsbaumaterialien wie Aluminium. Die hygroskopischen und rheologischen Eigenschaften lassen sich in weiten Bereichen gestalten.

Die für die isotherme Luftentfeuchtung entwickelten Wärme- und Stoffübertrager werden bei atmosphärischem Druck betrieben. Die Apparate sind aus Aluminium gefertigt und sind für den direkten Einbau in marktüblichen Lüftungskanälen ausgelegt. Es wird der Prüfstand vorgestellt, der für Leistungstests von Prototypen aufgebaut wurde. Es werden Ergebnisse der Entfeuchtungsleistungen für eine Variation der Antriebs-temperatur und eine Variation der Eintrittsfeuchte gezeigt. Des Weiteren werden die thermische und die elektrische Effizienz des hier vorgestellten Prozesses gezeigt und Entwicklungspotentiale diskutiert.

Für Feldtests in Nichtwohngebäuden werden Partner gesucht.

#### Literatur:

- [1] International Energy Agency, 2018, *The Future of Cooling – Opportunities for energy-efficient air conditioning*, <http://www.iea.org>
- [2] Meyer, T., Ricart C., 2023, *Reduction of the electricity consumption of a compression refrigeration system for air conditioning by a preceding thermally driven absorptive air dehumidification system*, DOI: 10.18462/iir.10.18462/iir.icr.2023.0859, 26<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration (under review), August 21<sup>st</sup> – 25<sup>th</sup> 2023, Paris
- [3] Gagandeep Kaur, Harsh Kumar, Meenu Singla, *Diverse applications of ionic liquids: A comprehensive review*, Journal of Molecular Liquids, Volume 351, 2022, 118556, ISSN 0167-7322, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118556>.

#### II.1.21

## „TAFEis – Thermische Flüssigeis-Erzeugung für Heiz- und Kühlanwendungen“

Christine Tillmann<sup>1\*</sup>, Lutz Richter<sup>1</sup>, Mathias Safarik<sup>1</sup>, Christian Kemmerzell<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> WEGRA Anlagenbau GmbH Westenfeld, Oberes Tor 106, 98630 Römhild, Deutschland  
[ckemmerzell@wegra-anlagenbau.de](mailto:ckemmerzell@wegra-anlagenbau.de)

Das Projekt TAFEis ist Teil des Projektverbundes SubSie („Sorptions-Verdampfer für Siedetemperaturen unter 0°C“). Der Forschungsverbund hat das Ziel, den Anwendungsbereich von thermische Kälteanlagen und Wärmepumpen, die Wasser als Kältemittel nutzen und die durch Wärme angetrieben werden, für industrielle und gewerbliche Zwecke zu erweitern und damit Energieeinsparpotenziale bei der Bereitstellung von Kälte und Wärme durch Abwärmenutzung zu realisieren.

Das ILK entwickelt im Projekt TAFEis eine thermisch angetriebene Flüssigeis-Erzeugungsanlage für Nutzkälte-temperaturen von unter 0°C. Bisher wurden im ILK die Technologiefelder Absorptionskältetechnik und Vakuumeiserzeugung mit Kompressionswasserdampfkälteanlagen getrennt bearbeitet. Nun werden beide Entwicklungsgebiete zur Thermischen Flüssigeiserzeugung vereint.

Verschiedene Additive als Zugabe für das Kältemittel Wasser wurden hinsichtlich ihrer Qualifizierung für die Flüssigeiserzeugung untersucht. Unterschiedliche Kriterien der Additivbewertung wurden berücksichtigt bspw. die Auswirkung auf die Effizienz der Wasserdampfdesorption (Verdampfung), die Eisbildung und das Eisverblockungsrisiko, die Eiskristallbeschaffenheit sowie die Auswirkung kleinerer Rohrdimensionen für die Kälteverteilung. Eine optimale Gestaltung des Direktverdampfers wurde entwickelt, um eine hohe Kälteleistungsdichte kW je m<sup>2</sup> Direktverdampfungsfläche stabil zu gewährleisten. Der Absorptionsprozess (thermische Verdichtung) wurde an die Betriebsbedingungen mit niedrigen Kältetemperaturen und kleinen Drücken der Niederdruckseite angepasst.

Der Vortrag stellt die Anlagenentwicklung, -aufbau und erste Ergebnisse der Entwicklung einer Versuchsanlage (Eiserzeugerleistung 15 kW) mit Kopplung einer Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlage und eines Anlagenteils Flüssigeis-Erzeugung dar.

Zudem wurden im Rahmen des Projektes Dampfdruckmessungen für ausgewählte Additive durchgeführt, welche die Auswahl des bevorzugten Additivs stützen. Hierfür wurde eine Messapparatur und Messprozedere entwickelt. Die gewonnenen Ergebnisse der Untersuchungen werden ebenfalls dargestellt.

**Stichworte:**

Absorptionskälteanlage, Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlage, Phasenwechselstoffe, Flüssigeis, Ice Slurry, Eisbrei

**II.1.22**

## **Dispersionsbasierte Eisbreierzeugung**

### **Entwicklung eines neuartigen Verfahrens**

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

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

Die Energiewende und die klimapolitischen Ziele erfordern die Optimierung bestehender Techniken und die Entwicklung neuer Verfahren. Das trifft auch auf die Kälteerzeugung und -speicherung zu. Eisbrei (Ice Slurry, Flüssigeis) ist ein umweltfreundlicher und pumpfähiger Kälteeträger mit einer hohen Energiedichte. Es existieren viele Herstellungsverfahren [1], [2], wobei in den letzten Jahren relativ wenig neue Lösungen präsentiert wurden. Etablierte Eisbreierzeugungsverfahren besitzen nach wie vor diverse Nachteile: z. B. Verschleiß mechanisch bewegter Bauteile, Erfordernis einer separaten Kältemaschine, Einsatz nachteiliger Kältemittel, ineffizienter Kältemaschinenbetrieb oder begrenzte Eisproduktionsraten. Eigene Analysen zeigten weiterhin, dass sich nur wenige Verfahren auf große Eisproduktionsraten skalieren lassen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojektes „KETEC – Forschungsplattform Kälte und Energietechnik“ [3] wurde ein neuartiger Ansatz zur Eisbreierzeugung basierend auf einem dispergierbaren Zweistoffsystem erarbeitet. Erste experimentelle Untersuchungen zeigten die Funktion des Verfahrens. Im nächsten Schritt soll die Herstellung von Eisbrei mit einer Versuchsanlage demonstriert werden. Die kontinuierliche Eisbreiherstellung und die Steuerung des gesamten Prozesses sind die nächsten Ziele. Der Beitrag beschreibt den Ansatz des Verfahrens und den aktuellen Stand der Arbeiten.

**Literatur:**

- [1] Kauffeld, M.: Handbook on ice slurries: fundamentals and engineering. Paris: International Institute of Refrigeration, 2005. — ISBN 2-913149-44-8
- [2] Rausendorf, J.; Urbaneck, T.: Herstellungsverfahren von Eisbrei - Stand der Technik und Forschung. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik VDI Fachmedien 74. Jg. (2023) Heft 03 S. 56-60. – ISSN 1436-5103  
Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: [www.ketec.online](http://www.ketec.online). Internetseite zum Verbundvorhaben 03.11.2022.

## EuPhaSUS – Eutektische Phasenwechsel-Suspensionen

Jannik Schug\*, Mathias Safarik

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Angewandte Energietechnik,  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland  
[jannik.schug@ilkdresden.de](mailto:jannik.schug@ilkdresden.de)

Im Zuge der Energiewende und der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien spielen Energiespeicher auch in der Kältetechnik eine immer größere Rolle. Eine effiziente Form der direkten Kältespeicherung bietet das Medium Flüssigeis (Ice Slurry), das sowohl als Kälte­träger als auch als Speichermedium fungiert. Um die Vorteile dieser Technologie gegenüber Festeis­speichern auch bei tieferen Temperaturen nutzen zu können, wurden im Rahmen des Projekts EuPhaSUS verschiedene eutektische Phasenwechsel-Suspensionen untersucht.

Potenzielle Einsatzgebiete wären vor allem Anwendungen, in denen heute Ammoniak­kälteanlagen mit Sole als Kälte­träger eingesetzt werden (z. B. Industriekälte, Kühlhäuser oder Großraumklimatisierung). Aufgrund der Vielzahl theoretisch verfügbarer eutektischer Solen eröffnet sich ein weites Feld neuartiger Kältespeicher­materialien bzw. Kälte­träger für Temperaturen weit unter 0 °C. Allerdings sind nur in wenigen Fällen alle relevanten Stoffwerte bekannt, sodass im Rahmen von Laborversuchen beispielsweise die Phasenwechsel­enthalpie der einzelnen Suspensionen bestimmt werden musste.

Der zur Erprobung und Vermessung der Suspension aufgebaute Versuchsstand besteht aus einem Kratzeis­erzeuger und einem agitierten Speicher. Im Vortrag werden die Messergebnisse verschiedener Suspensionen mit unterschiedlichen Phasenwechsel­temperaturen vorgestellt. Anhand der Ergebnisse werden die Eignung der untersuchten Suspensionen und die Grenzen des eingesetzten Eiserzeugungsverfahrens diskutiert.

**Stichwörter:**

Eutektikum, Phasenwechselstoffe, PCMs, Flüssigeis, Kratzeis, Ice Slurry, Eisbrei

II.2.01

## **Effizienzbewertung der Trinkwassererwärmung**

### **Sind Systeme aus Wärmepumpe, Kombispeicher und Durchlauftrinkwassererwärmer mit bestehenden Prüfverfahren bewertbar?**

**Fabian Hüsing<sup>1\*</sup>, Constantin Dick<sup>2</sup>, Maximilian Loth<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), AG Wärmepumpen, Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

<sup>2</sup>Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), CalTeC Thermische Anwendungen

[huesing@isfh.de](mailto:huesing@isfh.de)

Die Erwärmung und warme Speicherung von Trinkwasser verlangen wegen hygienischer Anforderungen hohe Temperaturen, welche die Effizienz der Wärmepumpe (WP) mindern. Durchlauftrinkwassererwärmer (DTE) erlauben signifikante Absenkungen der bereitzustellenden Temperatur und somit eine effizientere Wärmebereitung mittels WP.

In Kombispeichern kann Wärme sowohl für die Raumheizung, als auch für die Erwärmung von Trinkwasser mittels DTE gespeichert werden. Im Beitrag werden experimentelle Untersuchungen vorgestellt, welche die Anwendbarkeit des Prüfverfahrens der DIN EN 16147:2017-08 (Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Prüfungen [...] von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser) für die Effizienzbewertung eines Systems mit Kombispeicher und DTE betrachten.

Die Experimente wurden am modularen Wärmepumpenprüfstand des ISFH CalTeC Thermische Anwendungen durchgeführt, der für die Prüfung von Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser-WP mit Heizleistungen bis 30 kW ausgelegt ist. Der Prüfstand verfügt weiterhin über Module zur Abbildung von Warmwasserentnahmen, welche die Realisierung des Prüfverfahrens innerhalb der zulässigen Abweichungen ermöglichen.

An einem System aus einer Luft/Wasser-WP in Monoblock-Bauweise und einem Hydraulikmodul, bestehend aus einem Kombispeicher und einem DTE, führen wir einen vollständigen Prüfablauf [A] gemäß DIN EN 16147:2017-08 (Aufheizphase, Elektrische Leistungsaufnahme im Bereitschaftszustand, Warmwasserentnahmen und Mischwasservolumen) durch und anschließend einen weiteren, verkürzten Prüfablauf [B] ohne Bereitschaftszustand. Die Ergebnisse beider Prüfabläufe weisen signifikante Unterschiede auf, die bei näherer Betrachtung eine Eignung des Prüfverfahrens für Systeme mit großen Pufferspeichern in Frage stellen. Die Untersuchungen detailliert vorzustellen und die resultierenden Implikationen zu diskutieren sind Ziele unseres Beitrags.

II.2.02

## **Absorptionswärmepumpe für Ein- und Zweifamilienhäuser, angetrieben durch hydraulische Kopplung**

**mit einem kommerziellen Wärmeerzeuger**

**Johannes Brunder\*, Simon Woog, Florian Meyer, Konstantinos Stergiaropoulos**

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

Tel.: 0049-711-685-63225, Fax: 0049-711-685-53225

[Johannes.Brunder@igte.uni-stuttgart.de](mailto:Johannes.Brunder@igte.uni-stuttgart.de)

Absorptionswärmepumpen werden hauptsächlich durch Wärme auf höherem Temperaturniveau angetrieben. Die Absorptionswärmepumpe nutzt das höhere Exergetische Niveau der Antriebswärme zur Aufnahme von Umweltwärme, sodass mehr Wärme auf mittlerem Temperaturniveau bereitgestellt werden kann. Für den Einsatz als Wärmepumpe für die Gebäudebeheizung ist das Arbeitsstoffpaar Ammoniak/Wasser etabliert, da

dieses auch Wärmequellen mit Temperaturen unter 0°C ermöglicht. Absorptionswärmepumpen für die Gebäudebeheizung werden bisher hauptsächlich durch die Verbrennung von Gas angetrieben und werden daher als Gasabsorptionswärmepumpen bezeichnet. Gasabsorptionswärmepumpen haben einige nur unzureichend gelöste technische Herausforderungen: Der Desorber mit integriertem Gasbrenner ist ein teures Sonderbauteil, das die Wirtschaftlichkeit der Anlage erschwert. Die aus der hohen Verbrennungstemperatur resultierenden hohen lokalen Oberflächentemperaturen verursachen Korrosion, die durch den Einsatz giftiger Inhibitoren verhindert werden muss. Die Verbrennung von fossilem Gas, auch in Gasabsorptionswärmepumpen, ist nicht zukunftsträchtig.

Dennoch sind Absorptionswärmepumpen eine interessante Technologie um klimaneutrale Brennstoffe wie synthetische Gase oder Biomasse effizienter zu nutzen. Voraussetzung dafür ist, dass die Absorptionswärmepumpe einfach von beliebigen Wärmeerzeugern angetrieben, Standardbauteile verwendet und Korrosion verhindert werden kann. Dies soll in einem Prototypenprojekt am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) an der Universität Stuttgart demonstriert werden. Dafür wurden zuvor die nötigen Antriebstemperaturen der Absorptionswärmepumpe durch den Einsatz eines zwangsdurchströmten mehrgängigen Plattenwärmeübertragers als Desorber deutlich gesenkt. Zur Demonstration wird die Absorptionswärmepumpe, exemplarisch aufgrund der einfachen Handhabbarkeit, durch eine Gastherme mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 90°C angetrieben. Es werden unterschiedliche Heizungssysteme bei verschiedenen Umgebungstemperaturen im Labor emuliert. Im Vortrag werden die Ergebnisse der Demonstration, mögliche Verbesserungspotentiale und die technischen Grenzen diskutiert.

**Stichwörter:**

Absorptionswärmepumpe, Gasabsorptionswärmepumpe, Ammoniak/Wasser, Plattenaustreiber

II.2.03

## Vereinfachtes Simulationsmodell einer NH<sub>3</sub>-HTWP in einem Molkereibetrieb

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

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

Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) ermöglichen die Nutzung von Abwärme durch deren Anhebung auf ein für Prozesswärme nutzbares Temperaturniveau. Dadurch wird der Energieverbrauch und somit die Effizienz der versorgten Prozesse wesentlich verbessert und – im Falle, dass fossile Energieträger eingespart werden – ein Beitrag zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse geleistet.

Viele Prozesse in der Lebensmittelindustrie weisen sowohl einen Heiz- als auch einen Kühlbedarf auf, wobei durch den Einsatz einer HTWP prinzipiell beide Lasten abgedeckt werden können. Die optimale Integration einer HTWP hängt jedoch wesentlich von den auftretenden Lastprofilen ab und gegebenenfalls können Speicher genutzt werden, um Lastspitzen zu glätten. Mithilfe von Simulationsmodellen kann die Betriebscharakteristik (z. B.: Laufzeit der HTWP und Wärmemengen) bei verschiedenen Betriebsstrategien (z. B.: geänderte Schaltschwellen der Speichertemperaturen für den Betrieb der HTWP) untersucht werden. Vereinfachte Modelle zeichnen sich dabei durch eine kurze Rechenzeit und eine geringe Anzahl an zu bestimmenden Modellparametern aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein System bestehend aus Kälteanlage, HTWP, Speicher und Lastprofilen eines Cleaning-in-Place (CIP) Systems abgebildet, mögliche Vereinfachungen des Simulationsmodells aufgezeigt und die Ergebnisse mit Messdaten verglichen. Abschließend wird die Übertragbarkeit des vereinfachten Simulationsmodells auf andere Anwendungsfälle betrachtet.

**Stichwörter:**

R717, Abwärmenutzung, Speicher, modellbasierte Analyse

## II.2.04

# Rotation Heat Pump – Vorstellung des integralen Rotordesigns

Andreas Längauer<sup>1\*</sup>, Bernhard Adler<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> ecop Technologies GmbH, Forschung & Entwicklung, Perfektastraße 73, A-1230 Wien, Österreich  
[andreas.laengauer@ecop.at](mailto:andreas.laengauer@ecop.at)

Das umweltfreundliche Arbeitsmittel auf Basis von Edelgasen wie Helium, Argon und Krypton wird in einer Rotationswärmepumpe (RHP) im linksläufigen Joule-Prozess eingesetzt. In Kombination mit der Zentrifugalkompression führt dies zu einer sehr hohen Leistungszahl (COP-Coefficient of Performance) bei gleichzeitig hohen Senken-Austrittstemperaturen im Vergleich zu herkömmlichen Kompressionswärmepumpen. Da der realisierte Joule-Kreislauf auf einem stets gasförmigen Arbeitsmittel basiert, ist der Wärmeübergang in den Wärmetauschern sensibel. Daher begrenzen weder die Frage der Schmierung des Kompressors noch der kritische Punkt des Arbeitsmittels die maximale Senken-Temperatur.

Bisher wurde das Prinzip der RHP bereits in mehreren Anlagen getestet und validiert. Das zugrundeliegende Design und die Konstruktion des Rotors wurden in mehreren Publikationen vorgestellt und der Aufbau erläutert. Durch die Weiterentwicklung, vor allem im Bereich Wärmeübertragung und dazugehöriger Komponenten, wurde für den Aufbau und das System der Rotationswärmepumpe ein vollständig neuer Rotoraufbau konzipiert und ausgearbeitet. Dieser basiert auf dem System eines Diffusionsgeschweißten Integralrotors, der durch das Verschweißen mehrerer dünnen Einzelschichten zu einem soliden Block gefertigt wird und extremen Randbedingungen standhält. Dieses Verfahren und System ermöglicht es, den gesamten Rotor inkl. aller Verdichtungs- und Expansionsrohre sowie die Wärmeübertrager aus einem Stück zu fertigen. Die daraus resultierenden Vorteile sind ein sehr einfacher Aufbau mit wenigen Bauteile und Dichtstellen, die sehr hohen Drücken und Temperaturniveaus standhalten. Damit wird nicht nur der mögliche Temperaturhub, sondern auch das maximal mögliche Temperaturniveau nochmals weiter angehoben. Zudem kann durch dementsprechende Kanalführung bereits während der Verdichtung Wärme abgeführt und damit der Prozess mit einem Minimum an Exergieverlusten umgesetzt werden. Der aktuelle Entwicklungsstand sowie das Konzept dieses Integralrotors werden vorgestellt.

### Stichwörter:

Rotationswärmepumpe, Joule-Prozess, Integralrotor

## II.2.05

# Bereifungsverhalten von unterschiedlichen Trockenexpansions-Verdampfern

Alexandra Hofmann

Güntner GmbH & Co. KG | Hans-Güntner-Straße 2-6 | 82256 Fürstenfeldbruck | Germany  
[alexandra.hofmann@guentner.com](mailto:alexandra.hofmann@guentner.com)

Bei lamellierten luftbeaufschlagten Verdampfern bereifen oder vereisen die Lamellen während des Betriebs zwangsläufig sofern die Lamellentemperatur unter 0°C liegt. Diese Bereifung ist in mehrfacher Hinsicht nachteilig: die thermische Kühlleistung reduziert sich, es muss Energie aufgewendet werden, um die Bereifung abzutauen, der dadurch entstehende Energieeintrag erfordert zusätzliche Kühlleistung, es kommt zur Eisbildung im Kühlraum (Vergletscherung) und vieles mehr.

Um diese Vorgänge zu untersuchen und zu optimieren, wurde das Betriebsverhalten von bereifenden Verdampfern im Labor bei verschiedenen Umgebungsbedingungen vermessen. Dabei konnte die Abnahme der thermischen Leistung, die Zunahme des luftseitigen Druckverlustes sowie die Gewichtszunahme der Prüflinge (in Korrelation mit der Kondensatmenge) während der Bereifung ermittelt werden. Dieses Verhalten wurde bei

kontrolliertem Feuchtigkeitseintrag in den Kühlraum auch über mehrere Kühl- und Abtauzyklen hin beobachtet, um realistischen Kühlhausbedingungen näher zu kommen. Auch Unterschiede in Bauart, Rohrführung und Lamellenform der untersuchten Verdampfer haben Einfluss auf das Bereifungsverhalten und wurden ebenfalls betrachtet und interpretiert.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesen Versuchen werden in dieser Präsentation dargestellt.

## II.2.06

# Luftbeaufschlagte Verdampfer mit Anti-Eis-Oberflächen

## Experimentelle Charakterisierung in einer Klimakammer

Alexander Warlo<sup>1\*</sup>, Christina Hildebrandt<sup>1</sup>, Philipp Bauer<sup>1</sup>, Hannes Fugmann<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>,  
Andreas Stake<sup>2</sup>, Georg Umlauf<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Abteilung Lacktechnik,  
Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Deutschland  
[andreas.stake@ifam.fraunhofer.de](mailto:andreas.stake@ifam.fraunhofer.de)

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB,  
Innovationsfeld Funktionale Oberflächen und Materialien, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[georg.umlaut@igb.fraunhofer.de](mailto:georg.umlaut@igb.fraunhofer.de)

Durch die steigende Verbreitung von Wärmepumpen mit luftbeaufschlagten Verdampfern im Gebäudebereich, gewinnt die Problematik der Vereisung während kalten und feuchten Zeiträumen zunehmend an Bedeutung. Die Vereisung des Lamellenpakets führt zu einem schlechteren Wärmedurchgang, einem erhöhten luftseitigen Druckverlust und hat einen erheblichen Effizienzverlust zur Folge. Um den effizienten Betrieb der Wärmepumpe wiederherzustellen, muss der Verdampfer in regelmäßigen Zyklen abgetaut werden, wodurch zusätzliche Energie benötigt wird. Dieser Energieverbrauch wird in den nächsten Jahren steigen, wenn noch kompaktere Wärmeübertrager auf den Markt kommen, die mit weniger Kältemittel und weniger Raumbedarf auskommen. Ein Ansatz die Eisbildung zu verhindern bzw. zu verzögern, ist die gezielte Oberflächenfunktionalisierung des Verdampfers. In diesem Beitrag werden verschiedene Anti-Eis-Beschichtungen auf einem Rundrohr-Lamellenwärmeübertrager untersucht. Neben kommerziell erhältlichen Beschichtungen werden auch neuartige Beschichtungen untersucht. Die experimentelle Charakterisierung erfolgt an einem Teststand in einer Klimakammer unter vereisungstypischen Außenluftbedingungen. Der Vereisungsvorgang wird während der Messungen über eine Kamera auf verschiedenen Detailebenen kontinuierlich erfasst. Über eine integrale Energiebilanz auf der Kältemittelseite erfolgt eine Bewertung der Wärmeübertrager und der Vergleich zu einer unbeschichteten Referenzprobe.

### Stichwörter:

Wärmepumpe, Vereisung, Anti-Eis-Beschichtungen, Oberflächenfunktionalisierung, luftbeaufschlagte Verdampfer

II.2.07

## Verschmutzungsdetektion an Trockenrückkühlern

### Laboruntersuchungen und Anwendung auf Bestandsanlagen

Sebastian Rohrer\*, Tzu-Heng Kao, Alexander Morgenstern, Björn Nienborg

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

Energieeinsparungen durch Effizienzsteigerung stellen einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele dar. Auch Rückkühler, wie sie in Kälteanlagen zum Abführen der Kondensatorwärme an die Umgebung meist eingesetzt werden, bieten ein Einsparpotenzial an elektrischer Energie, wenn Verschmutzungen rechtzeitig erkannt und beseitigt werden.

Das Fraunhofer ISE untersucht daher Möglichkeiten, eine Leistungsabnahme von Rückkühlern automatisiert zu detektieren. Mit diesem Ziel wurde ein Rückkühler unter Laborbedingungen ausgiebig im unverschmutzten Zustand charakterisiert. Zudem wurden verschiedene Verschmutzungsintensitäten emuliert. Die so gewonnenen Daten wurden zur modellbasierten Verschmutzungsdetektion genutzt. Parallel wird ein minimal-invasives Messsystem entwickelt, mit dem das im Labor entwickelte Verfahren auf Bestandsanlagen angewandt werden kann. Im vorliegenden Beitrag wird das im Labor entwickelte Verfahren vorgestellt und ein Einblick in die Umsetzung an Bestandsanlagen gewährt.

**Stichwörter:**

Rückkühler, Verschmutzung, Fouling, Betriebsüberwachung

**Danksagung:**

Das Projekt KETEC wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SF0623C gefördert. Das Verbundvorhaben wird gemeinsam mit der Professur Technische Thermodynamik der TU Chemnitz und dem ILK Dresden bearbeitet.

II.2.08

## NH<sub>3</sub>-Verdampfer für tiefe Temperaturen

Markus Müller\*, Paul Zimmermann

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH  
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden  
[markus.mueller@ilkdresden.de](mailto:markus.mueller@ilkdresden.de)

Im Rahmen des großen KETEC-Verbundprojekts (Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik; ketec.online) zwischen der TU Chemnitz, dem Fraunhofer ISE Freiburg und dem ILK Dresden werden im Teilprojekt 7 Ammoniak-Verdampfer für sehr tiefe Temperaturen untersucht. Ziel des Projekts ist es, den Trockenexpansionsbetrieb für solche Verdampfer zu ermöglichen bzw. zu verbessern. Die Entwicklung des dafür notwendigen Prüfstands und erste Ergebnisse der Recherchen und Berechnungen zur Modifikation der Verdampfer werden vorgestellt. Die Herausforderungen sind insbesondere das große Verhältnis von Flüssigkeits- zu Dampfdichte von Ammoniak bei tiefen Temperaturen und die damit einhergehenden Schwierigkeiten bezüglich der Änderung der Kältemittelgeschwindigkeit und der Berücksichtigung der Druckverluste.

**Stichwörter:**

Ammoniak, Verdampfer, Trockenexpansion, Tiefkühlung

II.2.09

## Betriebsoptimierung überfluteter Ammoniak-Verdampfer

Christian Guggenberger

Güntner GmbH & Co. KG | Hans-Güntner-Straße 2-6 | 82256 Fürstenfeldbruck | Germany  
[christian.guggenberger@guentner.com](mailto:christian.guggenberger@guentner.com)

Bei Verdampfern mit Ammoniak wird, speziell in Europa, der überflutete Betrieb realisiert. Das heißt, dass am Austrittsstutzen des Verdampfers zweiphasiges Ammoniak in Form von Flüssigkeit und Dampf den Wärmeübertrager verlässt. Bei der Untersuchung überfluteter Verdampfer konnte bei Leistungsmessungen das Vorhandensein eines optimalen Betriebspunktes festgestellt werden. Durch die Variation der Rezirkulationsrate (kurz:  $rr$ , engl.: recirculation rate), welche den Kehrwert des Dampfgehaltes am Austritt des Gerätes darstellt, trat in Abhängigkeit der luftseitigen Wärmelast ein Leistungsmaximum im Bereich  $rr = [1.4; 3]$  auf. Es stellt sich heraus, dass ein steiler Anstieg der Kälteleistung von  $rr \approx 1$  hin zum Optimum durch die Vergrößerung des Kältemittelmassenstroms vorliegt, wodurch die Rohrrinnenflächen vollständig mit zweiphasigem Kältemittel benetzt sind und keine überhitzten Rohrbögen thermografisch mehr erkenntlich sind. Ein weiteres Erhöhen des Kältemittelmassenstroms führt anschließend wieder zu einem Leistungseinbruch, was auf den kältemittelseitigen Druckverlust zurückzuführen ist. Demnach ist der optimale Betriebspunkt überfluteter Verdampfer abhängig vom Zusammenspiel zwischen Kältemittelmassenstrom, Benetzung der Rohrrinnenfläche, dem kältemittelseitigen Druckverlust und der Bauart des Verdampfers.

II.2.10

## New capacity control algorithm for large systems with fixed capacity ejectors

Ebrahim AEINI\*, Ekaterini KRIEZI<sup>(a)</sup>, Mark SEVER<sup>(a)</sup>, Mikael WERNER<sup>(a)</sup>, Jan PRINS<sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Danfoss A/S, Nordborg, 6430, Denmark, [ekk@danfoss.com](mailto:ekk@danfoss.com)  
[ebrahim.aeini@danfoss.com](mailto:ebrahim.aeini@danfoss.com)

Fixed capacity ejectors for CO<sub>2</sub> system have been used in several applications. A single fixed capacity ejector cannot control the system capacity in off design conditions, so a common solution is to utilise an array of different sizes of ejectors and control the system capacity by steps. This method is used in the Danfoss Multi Ejector Solution™. The step control concept fits in common food retail application with a design capacity less than 300 kW. However, in large industrial system or heat pump applications larger than 1 MW, the step control will result in a large number of ejectors, which is not optimal for implementation. Hence, a combination of a high-pressure valve or a variable capacity ejector unit in parallel with an array of large capacity ejectors can be used instead. In this paper a new algorithm to control and distribute the flow between ejectors and high-pressure valve is presented and validated with experimental data.

**Keywords:**

Carbon Dioxide, Fix Geometry Ejectors, Capacity Control, Control Algorithm, Large Systems, Heat pump.

II.2.11

## Ejektoroptimierung durch numerische & dynamische Simulation

Dominik Herden<sup>1\*</sup>, Christian Doerffel<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>, Riley B. Barta<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Purdue University, School of Mechanical Engineering  
585 Purdue Mall, West Lafayette, 47907-2088, USA  
[bartar@purdue.edu](mailto:bartar@purdue.edu)

Transkritisch betriebene CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen weisen in der Regel niedrigere Leistungszahlen als Anlagen mit herkömmlichen Kältemitteln unter den gleichen geforderten Randbedingungen auf. Um die Effizienz dieser Kälteanlagen zu steigern, werden unter anderem Ejektoren eingesetzt, um einen Teil der Expansionsarbeit zurückzugewinnen. Derzeit eingesetzte CO<sub>2</sub>-Ejektoren sind für einen niedrigen bis mittleren Druckhub ausgelegt, was außerhalb der Auslegungsparameter zu einem geringen Wirkungsgrad sowie zu Strömungsablösungen und Rückströmungen im Ejektor führt. Aufgrund dieses Risikos und der Komplexität der Regelungsstrategie in bisherigen Ejektorsystemen haben diese nur einen geringen Verbreitungsgrad erreicht.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Ejektorkreislauf mit zusätzlichem Unterkühlungswärmeübertrager in der Flüssigkeitsleitung vor den Verdampfern entwickelt, der die genannten Probleme minimieren soll. Die Herausforderung für einen effizienten Ejektorkreislauf besteht im Wesentlichen in der Entwicklung eines Ejektors mit hohem Druckhub, der hohe Wirkungsgrade und sichere Betriebsbedingungen aufweist.

Zu diesem Zweck wurde ein numerisches Modell erstellt, um Ejektorgeometrien bei hohem Druckhub zu untersuchen. Es wurde ein Ejektor gefertigt, der unter den genannten Randbedingungen hohe Wirkungsgrade erreicht. Dieser wurde in eine CO<sub>2</sub>-Versuchsanlage mit Unterkühlungswärmeübertrager implementiert und entsprechende Messreihen wurden durchgeführt. Anhand der Messdaten wurden das numerische Berechnungstool, sowie das dynamische Simulationsmodell validiert. Mit Hilfe der dynamischen Simulation konnten verschiedene Randbedingungen des Kreislaufs untersucht und Effizienzsteigerungen quantifiziert werden.

**Stichwörter:**

Transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, Ultrahigh-lift-Ejektor, Ejektorauslegung, Zweiphasen-Ejektor, Dynamische Simulation

II.2.12

## Improvement of refrigerant system performance through oil-free compressors

Tatvakumar Bhanderi<sup>1\*</sup>, Ahmet Çokşen<sup>1</sup>, Sönke Teichel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KG, Vor- u. Funktionsentwicklung Strömungst.,  
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland  
[Tatvakumar.Bhanderi.Extern@de.ebmpapst.com](mailto:Tatvakumar.Bhanderi.Extern@de.ebmpapst.com); [Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com](mailto:Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com);  
[soenke.teichel@de.ebmpapst.com](mailto:soenke.teichel@de.ebmpapst.com)

Commonly used refrigeration compressors in the Vapor-Compression refrigeration system require oil as a lubricant to reduce the friction and seal the leakage gaps. In absence of oil extraction device, oil mixes with the refrigerant and can add up 2-6% of the refrigerant mass flow, and consequently recirculate in the refrigeration system. Therefore, it is necessary to assess the effect of oil content on the overall system performance. This paper examines the impact of lubricant PAG (Polyalkylene Glycol) oil on the performance of chiller system operating with refrigerant R1234yf. The study focuses on simulation-based system analysis using Simcenter Amesim as well as experimental evaluation of oil's presence in the condenser and evaporator. The

quantification of pressure loss, heat transfer rate, cooling capacity, and system performance for different oil circulation rates is presented. It is observed that oil in the system adversely impacts the performance and leading to additional power consumption for given operating conditions. Therefore oil-free compressors, like the turbo compressor platform currently developed by ebm-papst, have the potential to significantly improve the performance of refrigeration systems.

**Keywords:**

Refrigeration system; Chiller system; Turbo Compressor; Lubricant; Oil-free; Heat exchanger

**II.2.13**

## **Optimale Dampfeinspritzung von Scrollverdichtern**

**Tim Klebig<sup>\*</sup>, Marius Frikel, Christian Vering, Dirk Müller**

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

Um die Klimaziele zu verfolgen, ist die Substitution fossiler Energiequellen durch erneuerbare Energiequellen notwendig. Wärmepumpen können erneuerbare Energiequellen in nahezu allen Sektoren erschließen. In deutschen Wohngebäuden ist die Wärmeversorgung mit Temperaturniveaus bis zu 80 °C häufig eine komplexere Anforderung, um notwendige Temperaturniveaus zur Einhaltung des thermischen Komforts sicherzustellen. Hohe Vorlauftemperaturen treten im Allgemeinen mit hohen Heizleistungen auf und erfordern für effiziente Wärmepumpenprozesse insbesondere effiziente Verdichtungsprozesse. Hohe Vorlauftemperaturen führen in Abhängigkeit von Betriebspunkt und Kältemittel zu hohen Verdichteraustrittstemperaturen, die den Betriebsbereich des Verdichters beschränken können. Zur Aufweitung des Betriebsbereichs kann Dampfeinspritzung eingesetzt werden. Dampfeinspritzung von gasförmigem Kältemittel in den Verdichtungsraum kühlt den Verdichtungsprozess und kann gleichzeitig die Effizienz des Prozesses erhöhen.

Im Rahmen dieses Beitrages wird mithilfe eines Verdichterprüfstands der Betriebsbereich eines Scrollverdichters hinsichtlich der temperatur- und druckabhängigen Zustände des Einspritzprozesses und deren Auswirkung auf die Effizienz der Verdichtung untersucht. Die Kältemittel R410A und R290 werden unter Anwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans vermessen und analysiert. Auf Basis dieser Messungen werden fluidabhängige Kennfelder für die Optimierung der Einspritzzustände entwickelt. Durch die Anwendung von Zwischendampfeinspritzung mit Propan und die Einstellung optimierter Injektionsparameter kann die Leistungszahl um bis zu 26,6 % gesteigert und die Verdichteraustrittstemperatur um bis zu 11,3 K reduziert werden. Durch Erhöhung der Injektionsdrücke wird der Injektionsmassenstrom erhöht, was in einem Anstieg der maximal möglichen Wärmeleistung des Prozesses sowie in einer Reduktion des isentropen Wirkungsgrades resultiert. Eine detaillierte exergetische Analyse zeigt das Potential optimierter Einspritzzustände auf und hebt den Trade-Off aus Wärmeleistung und isentropem Wirkungsgrad heraus. Zukünftig können die Erkenntnisse in modell-basierte Entwicklungsverfahren integriert werden, was langfristig sowohl die Auslegung als auch den Betrieb von Kältekreisen mit vergrößerten Betriebsbereichen sicherstellt.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Flüssigkeitsschlag, Dampfmassegehalt, Zustandsüberwachung

II.2.14

## Erste Betriebserfahrungen bei der experimentellen Untersuchung von Flüssigkeitsschlägen bei Hubkolbenverdichtern

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

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

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

Verdichter sind im Allgemeinen darauf ausgelegt, rein gasförmiges Kältemittel zu verdichten. In der gängigen Praxis wird seitens der Anlagenbauer sorgsam darauf geachtet, dass flüssige Kältemittelanteile nicht bis in den Verdichter bzw. den Arbeitsraum vordringen. Kommen unerwünscht Anteile von flüssigem Kältemittel in den Arbeitsraum, kann dies zu mechanischen Schäden am Verdichter führen. In diesem Kontext ist das Phänomen des Flüssigkeitsschlages zu nennen, welches in aller Regel die Verdichtung eines zweiphasigen Kältemittelgemisches beschreibt und durch hohe Zylinderdrücke und akustisch wahrnehmbaren Geräuschen charakterisiert werden kann. Die Folge sind mechanische Schäden am Kolben oder den Ventilen. Die Praxis hat dabei gezeigt, dass Hubkolbenverdichter in einem besonderen Maße anfällig für Flüssigkeitsschläge sind. Überdies können – vor allem bei sauggasgekühlten Maschinen – Auswaschung des Öls an den Lagern auftreten, was in graduell zunehmenden Verschleißerscheinungen endet.

Für die Untersuchung zum gezielten Flüssigkeitseintrag in Kältemittelverdichter wurde ein Prüfstand aufgebaut, dessen Ziel es ist, definierte Dampfmassengehalte auf Saugseite des Verdichters respektive über eine separate Leitung in die Saugkammer einstellen zu können. Zu beobachtende Größen sind dabei die geänderten Phasenströme sowie die Leistungsaufnahme des Verdichters und perspektivisch der Druck im Arbeitsraum sowie der Kurbelwellenwinkel. Thermodynamische Zustandsgrößen sowie Möglichkeiten der Messung des Dampfmassengehaltes wurden ebenfalls mit einbezogen. Im Rahmen dieser Veröffentlichung soll das Anlagenkonzept sowie erste Ergebnisse und Herausforderungen bei der Betrachtung von Flüssigkeitsschlägen in Hubkolbenverdichtern vorgestellt werden.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Flüssigkeitsschlag, Dampfmassengehalt, Zustandsüberwachung

II.2.15

## Flüssigkeitseinspritzung bei Hubkolbenverdichtern

### Neuartiges Verfahren zur Effizienzsteigerung und Erweiterung der Einsatzgrenzen

Jonas Schmitt\*, Tobias Pfliehinger, Jiyan Akyol, Robin Heinzemann, Robin Langebach

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

Für den Kaltdampfkompressionsprozess ist die isentrope Verdichtung als Vergleichsprozess etabliert. Bei Kältemitteln mit anterogradem Verlauf der Taulinie, z. B. R717 und R744, ist die Verdichtungsendtemperatur bei isentroper Verdichtung allerdings erheblich höher als die Verflüssigungstemperatur. Der Vergleich mit dem theoretischen, idealen Carnot-Prozess zeigt, dass für diese Kältemittel eine Effizienzsteigerung zu erwarten ist, wenn die Verdichtung nur bis zum Erreichen der Verflüssigungstemperatur isentrop und anschließend isotherm erfolgen würde. Als zusätzlicher Vorteil ergeben sich mit dieser Prozessführung erweiterte Einsatzgrenzen, da

die maximale Kältemitteltemperatur im Vergleich zum isentropen Prozess reduziert ist. Dadurch werden größere Temperaturhübe pro Verdichtungsstufe ermöglicht.

Eine isotherme Verdichtung erfordert eine erhebliche Wärmeabfuhr aus dem Kältemittel, die bei herkömmlichen Verdichtern nicht mit konventionellen Kühlverfahren realisiert werden kann. Wärme wird dabei aus dem Kältemittel nicht ausreichend schnell an die Zylinderwand abgeführt. Stattdessen wird vorgeschlagen, einen Teilmassenstrom des Kältemittels nach dem Verflüssigen zu entnehmen, auf einen höheren Druck zu bringen und gesteuert in den Arbeitsraum einzuspritzen. Das Kältemittel wird beim Einspritzen zerstäubt, nimmt Wärme aus dem Arbeitsraum auf und verdampft dabei.

Um die Kältemittelspritzung theoretisch zu bewerten wird der Verdichtungsprozess im Hubkolbenverdichter numerisch modelliert. Davon ausgehend wird die Effizienz berechnet und mit bekannten Verfahren, die zur Reduktion der Verdichtungsendtemperatur eingesetzt werden, verglichen. Weiterhin wird die geplante technische Umsetzung der Spritzung, insbesondere hinsichtlich der Pumpe und des Einspritzventils, diskutiert.

**Stichwörter:**

Kältemittelspritzung, isotherme Verdichtung, Hubkolbenverdichter

**II.2.16**

## **Messergebnisse optischer Detektionsmethoden von Flüssigkeitseinträgen in Kältemittelverdichter**

**Ulrich Schindler<sup>1\*</sup>, Franz Joseph Pal<sup>1</sup>, Tobias Pflieginger<sup>1</sup>, Robin Langebach<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie,  
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik

[Ulrich.Schindler@h-ka.de](mailto:Ulrich.Schindler@h-ka.de)

Zur Überwachung von Kälteanlagen werden üblicherweise die thermodynamischen Größen, Druck und Temperatur, der Ölstand im Gehäuse des Verdichters und die elektrischen Größen, Strom und Spannung, erfasst.

Neben diesen genannten Messgrößen können noch weitere wie beispielsweise Schwingungen oder Flüssigkeitsanteile in der Saugleitung gemessen und ausgewertet werden. Eine häufige Ursache für den Ausfall von Kältemittelverdichtern ist auf den Eintrag von flüssigem Kältemittel in das Gehäuse bzw. den Arbeitsraum zurückzuführen.

Um den Flüssigkeitseintrag in den Verdichter zu provozieren, wurde eine Versuchsanlage aufgebaut. Über einen Bypass nach dem Expansionsventil kann der Verdampfer umgangen und flüssiges Kältemittel über die Saugleitung in den Verdichter befördert werden.

Im Rahmen der Veröffentlichung soll dabei die nicht invasive, optische Infrarot-Methode zur Detektion von flüssigem Kältemittel in der Saugleitung des Verdichters näher untersucht werden. Über ein handelsübliches Schauglas kann damit mit der vorgeschlagenen Sensoranordnung flüssiges Kältemittel detektiert werden. Um dabei den Einfluss des Kältemaschinenöls bzw. der Öltröpfchen auf die Messmethode zu untersuchen, wurde die Versuchsanlage erweitert und modifiziert. Des Weiteren wurde zu Vergleichszwecken ein handelsüblicher Dampfmassegehaltssensor in den Kreislauf integriert. Es werden konkrete Messergebnisse vorgestellt, die insbesondere den Einfluss des Kältemaschinenöls auf die Messmethode und die generelle Aussagekraft hin analysiert.

**Stichwörter:**

Hubkolbenverdichter, Flüssigkeitsschlag, Flüssigkeitseintrag, Kältemaschinenöl, Prüfstand, Zustandsüberwachung, Dampfmassegehalt, optische Detektionsmethoden

## **R744-Kälteanlage mit R290-Modulen zur mechanischen Unterkühlung – Simulation & Experiment**

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

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

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

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

Aus diesem Grund wurde am Institut für Wärmetechnik eine Versuchsanlage aufgebaut, die in ihrer Dimensionierung und Ausführung einer Feldanlage entspricht. Dabei können an der Wärmequelle (Sole) als auch an der Wärmesenke (Wasser bzw. Luft) verschiedene Temperaturniveaus vorgegeben werden.

Der Fokus der Arbeiten liegt auf einer realitätsnahen Untersuchung des „Zusammenspiels“ der R290-Unterkühlmodule mit der R744-Kälteanlage. Dazu werden die luftgekühlten R290-Unterkühler in einer Klimakammer positioniert, um den Betrieb bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen zu ermöglichen.

Mithilfe von Modelica/Dymola und der TIL-Bibliothek wurde für die installierte R744/R290-Kälteanlage ein dynamisches Simulationsmodell erstellt und anhand der am Prüfstand gewonnenen Messdaten validiert. In weiterer Folge werden mithilfe des Simulationsmodells verschiedene Betriebsstrategien für die Unterkühlmodule erarbeitet und die Einflüsse auf Kälteleistung und Effizienz diskutiert.

### **Stichwörter:**

CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, Propan-Unterkühler, Versuchsstand, Dymola, Modelica

## **CO<sub>2</sub> Kältemittelpumpensysteme**

**Monika Witt**

TH. WITT Kältemaschinenfabrik GmbH, Lukasstr. 32, 52070 Aachen  
[monika.witt@th-witt.com](mailto:monika.witt@th-witt.com)

### **Erfahrungen aus der Praxis**

Kältemittel Pumpensysteme haben sich in der Industriekälte seit Jahrzehnten bewährt, wenn eine große Anzahl von Verdampfern in einem Rohrleitungsnetz direkt mit flüssigem Kältemittel versorgt werden sollen (= überfluteter Betrieb). Die ersten Kohlendioxid Pumpenanlagen wurden analog zu den bis dahin bekannten Ammoniak Pumpenanlagen gebaut. Mit der Zeit wurden Unterschiede deutlich und daraus geänderte Anforderungen abgeleitet.

Die Vorteile von Kältemittelpumpensystemen im Vergleich zu nicht verdampfenden Kälte-trägern liegen im Wegfall des sonst benötigten zusätzlichen Wärmetauschers für die Kühlung des Kälte-trägers und der niedrigeren benötigten Pumpenergie, wodurch die Energieeffizienz verbessert wird.

Unterschiede zwischen Ammoniak und Kohlendioxid Pumpensystemen werden betrachtet im Bezug auf notwendige Zulaufhöhe, Konstruktionsunterschiede und verwendete Materialien. Die Erfahrungen aus den ersten Pumpenanlagen mit Kohlendioxid werden vorgestellt mit den daraus gezogenen Konsequenzen für konstruktive Änderungen an den Pumpen selbst und den Anforderungen, die an die Anlagen gestellt werden.

**Stichwörter:**

Kältemittelpumpen, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, überflutete Verdampfung

**II.2.19**

## **Wärmepumpenverdampfer für CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen**

### **Ein umfassender Vergleich zwischen zwei Wärmepumpenverdampfer für transkritische CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen zum Heizen und Kühlen**

**Osama Aljolani, Ceslovas Kizlauskas, David Gomse, Norbert Schneider**

Kelvion Germany GmbH, Forschung und Entwicklung (F&E), 82065 Baierbrunn, Deutschland  
[osama.aljolani@kelvion.com](mailto:osama.aljolani@kelvion.com)

Wärmepumpen mit natürlichen Arbeitsfluiden stellen einen integralen Bestandteil der Dekarbonisierung des Heizungs- und Klimasektors dar. Die aktuelle Entwicklung der F-Gase Verordnung unterstreicht die Wichtigkeit natürlicher Kältemittel in der gewerblichen Kältetechnik. Im Kontext des Montrealer Protokolls ist R744 (CO<sub>2</sub>) eines der wenigen ungiftigen und nicht brennbaren Kältemittel, die nicht zum Ozonabbau oder zur globalen Erwärmung beitragen, wenn sie in die Atmosphäre gelangen. Die Verwendung eines Wärmepumpenverdampfers als Wärmequelle für Wärmepumpen ist eine technische Lösung, die von Kelvion angewendet wird, damit das transkritische CO<sub>2</sub>-Boostersystem den Wärmebedarf in Kühlanwendungen, insbesondere in Supermärkten, decken kann.

Diese Studie präsentiert einen umfassenden Vergleich zwischen zwei kompakten Rippenrohrwärmetauschern, die von der Firma Kelvion für Kälteanlagen mit Wärmerückgewinnung auf Basis von CO<sub>2</sub> als Arbeitsmedium entwickelt und hergestellt werden. Konkret werden ein eigenständiger Wärmepumpenverdampfer und ein integrierter Wärmepumpenverdampfer in einem Gaskühler einer Lebenszyklus-Analyse unterzogen. Anhand einer Fallstudie für einen Supermarkt werden beide Wärmepumpenverdampfer unter energetischen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten betrachtet.

**Stichwörter:**

Natürliches Kältemittel, Transkritisches System, Wärmepumpenverdampfer, Abwärmenutzung, Kompakt-Rippenrohrwärmetauscher, Außenverdampfer, Lebenszyklusanalyse

## **Selbstoptimierende Abtauregelung durch Anwendung von maschinellen Lernverfahren**

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

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52064 Aachen, Deutschland  
[jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:jonas.klingebiel@eonerc.rwth-aachen.de)

Die Entstehung von Reif an den Lamellen des Luftverdampfers einer Wärmepumpe oder Kältemaschine ist unvermeidlich, wenn die Lufttemperatur unter die Taupunkttemperatur abgesenkt wird und die Lamellentemperatur unterhalb des Gefrierpunktes liegt. Der Reif hemmt die Wärmeübertragung und reduziert die Systemeffizienz. Um den Kältekreis robust und effizient zu betreiben, muss der Reif abgetaut werden. Vergangene Forschungsbeiträge zeigen, dass der Zeitpunkt der Abtauintiierung einen signifikanten Einfluss auf die Anlageneffizienz nimmt. Die Entwicklung von bedarfsgesteuerten Abtauregelungen ist deshalb Gegenstand aktueller Forschung. Zu den Herausforderungen gehören die robuste Reifdetektion unter Verwendung herkömmlicher Sensorik, sowie die Definition von geeigneten Sensorschwellwerten zur Abtauintiierung. Da das Reifwachstum von einer Vielzahl an Prozessparametern abhängig ist (z. B. Umgebungsbedingung: relative Luftfeuchtigkeit, Betriebsweise: Verdichterdrehzahl), ist die Bestimmung effizienter Schwellwerte komplex und zeitintensiv.

In diesem Beitrag wird ein selbstoptimierender Abtauregler vorgestellt, der auf Basis einer Methode des maschinellen Lernens (Reinforcement Learning) operiert. Der vorgestellte Regler lernt durch Versuch- und Irrtum und optimiert kontinuierlich den Abtauzeitpunkt in Abhängigkeit des Betriebspunktes. Die Effizienz des selbstoptimierenden Abtaureglers wird experimentell mit einem zeitgesteuerten Regler und einem druckdifferenzbasierten Regler in dynamischen 24h-Versuchsreihen mit unterschiedlichen Reifwachstumsgeschwindigkeiten verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass der selbstoptimierende Abtauregler im Vergleich zu den anderen Reglern bei schnellem Reifwachstum um 7,1 % höhere durchschnittliche Leistungszahlen erzielt. Bei geringem Reifwachstum können bis zu 9,1 % Effizienzverbesserungen realisiert werden. Damit konnte experimentell gezeigt werden, dass Reinforcement Learning eine geeignete Methodik darstellt, um die Energieeffizienz von Wärmepumpen oder Kältemaschinen zu erhöhen.

### **Stichwörter:**

Reinforcement Learning, Experiment, Reifbildung, Abtauung, neuronale Netze

## **Energetischer und sicherheitstechnischer Vergleich von Kälteanlagen mit den Kältemitteln R-290 und R-744**

**Valentin Falk\*, Tobias Guth, Sylvia Schädlich**

Hochschule Ruhr West, Institut für Energiesysteme und Energiewirtschaft,  
Lützowstraße 5, 46236 Bottrop, Deutschland  
[valentin.falk@hs-ruhrwest.de](mailto:valentin.falk@hs-ruhrwest.de)

Im Fokus des Umweltschutzes steht derzeit die Reduzierung der Erderwärmung und damit die Reduzierung klimagefährdender Stoffe (Treibhausgase). In der Kältebranche werden derzeit herkömmliche Kältemittel durch umweltschonende ersetzt. Oftmals konzentrieren sich Hersteller und Betreiber jedoch auf ein einziges Ersatzkältemittel und berücksichtigen somit keine alternativen Lösungen. Bereits der Vergleich von Stoffdaten zeigt allerdings, dass die Kältemittel aus energetischer Sicht für verschiedene Anwendungsfälle unterschiedlich gut geeignet sind. Die natürlichen Kältemittel R-290 und R-744 decken bereits ein breites Anwendungsspektrum ab. Um Herstellern und Betreibern Anhaltspunkte für die anwendungsspezifische Auswahl des besser ge-

eigneten Kältemittels zu geben, werden im Rahmen dieser Arbeit die Kältemittel R-290 in indirekten Kälteanlagen und R-744 in direkten Kälteanlagen sowohl energetisch als auch sicherheitstechnisch einander gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung erfolgt mittels eines Modells, das sowohl auf Stoff- als auch auf Hersteller- und Anlagendaten basiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Kältemittels stark durch den Anwendungsfall bestimmt ist. Daher liefert das Modell einen guten Überblick in welchen Bereichen die genannten Kältemittel effizient und sicher eingesetzt werden können. Zukünftig soll die Aussagekraft des Modells durch die Berücksichtigung weiterer Anlagendaten stetig erhöht werden.

## II.2.22

# Modellbasierte Regelung der Kälteerzeugung mit wassergekühlten Kompressionskälteanlagen

Carsten Hausherr<sup>1,2\*</sup>, Jan Albers<sup>1,2</sup>, Walther Hüls<sup>1,2</sup>, Stefan Petersen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Berlin, FG Wärmeübertragung und -wandlung,  
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin, Deutschland  
[carsten.hausherr@tu-berlin.de](mailto:carsten.hausherr@tu-berlin.de)

<sup>2</sup> Factor 4 Solutions GmbH, Ernst-Reuter-Platz 1, 10587 Berlin, Deutschland  
[info@factor4solutions.com](mailto:info@factor4solutions.com)

Ein erheblicher Anteil der Kälteerzeugung in Deutschland erfolgt über zentrale Kältesysteme mit wassergekühlten Kompressionskälteanlagen. Die Effizienz solcher Kälteerzeugungsanlagen ist stark abhängig vom Lastfall, d. h. von Kaltwassersollwert und Kältelast sowie den Umgebungsbedingungen einerseits und von den Soll- bzw. Stellwertvorgaben für die einzelnen Komponenten (Kompressionskälteanlage, Rückkühlwerk, Kalt- und Kühlwasserpumpe) andererseits. Die Anlagenregelung erfolgt trotz des Vorhandenseins drehzahl geregelter Pumpen in Kalt- und Kühlwasserkreis und RKW-Ventilatoren häufig auf Basis fest vorgegebener Volumenströme und Temperatursollwerte oder auf Basis von Sequenzen, deren Fokus auf einfacher Implementierbarkeit liegt. Dabei bleibt Potential zur Einsparung von Energie und damit von Emissionen und Kosten ungenutzt. Zur Bestimmung der Kombination von Soll- und Stellwertvorgaben, die zur effizientesten Betriebsweise führt, werden Modelle benötigt, die die Charakteristiken der Komponenten beinhalten und ein Lösungsalgorithmus, der für jeden Lastfall den Betriebspunkt mit optimaler Effizienz berechnet.

Um die Nutzung einer modellbasierten Regelstrategie zu ermöglichen, muss der Rechenaufwand so gering bleiben, dass die Berechnung in Echtzeit auf einem Industriecontroller erfolgen kann. Das schränkt die Komplexität der Komponentenmodelle ein, die außerdem mithilfe von Angaben aus Datenblättern parametrierbar sein sollen. Nach der Vorstellung geeigneter Modelle mit dem Fokus auf dem der Kompressionskälteanlage wird durch Simulationen verschiedener Betriebsstrategien in einem existierenden Kältesystem mit gemessenen Lastfällen beispielhaft gezeigt, wie groß die Einsparpotentiale durch die Nutzung einer modellbasierten Regelstrategie sind.

### Stichwörter:

Regelung, Kälteversorgungssystem, wassergekühlte Kältemaschine, Modelle, Effizienz

## Kälteverdichter – Schlüssel zu Energieeffizienz und Betriebsicherheit

Christian Stahel<sup>a</sup>, Lukas Wick<sup>a</sup>, Frank Tillenkamp<sup>a</sup>, Silvan Steiger<sup>a</sup>, Manuel Diem<sup>a</sup>

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

In diesem Projekt wurde das energetische Verhalten von Verdichterbauarten untersucht. Dabei wurde ein Verdichter-Tool [1] entwickelt, das verschiedene Verdichterbauarten unter variablen Lastprofilen und Standorten energetisch bewertet.

Der Kern des Tools bildet eine Datenbank mit Verdichterpolynomen von mehr als 1400 Verdichtern verschiedener Hersteller. Dabei wurden für unterschiedliche Auslegungspunkte, Kälteleistungen und Kältemittel Daten von mehreren Herstellern gesammelt und zusammengefasst. Daraus wurden 70 Verdichterkennfelder [2] abgeleitet, welche den durchschnittlichen Verlauf von Effizienz, Kälteleistung, Regel- und Einsatzbereich der Verdichterbauarten als Funktion der Verflüssigungstemperatur aufzeigen.

Basierend auf den Verdichterkennfelder sowie einer selbst definierten Bewertungsmethode (aCOP) werden die Verdichterbauarten im Verdichtertool saisonal bewertet. Die Bewertungsmethode basiert auf fünf Betriebspunkten, die in Abhängigkeit von Standort und Lastprofil energetisch gewichtet werden. Mittels Verdichterkennfeld werden Einsatz- und Regelbereich des Verdichters geprüft und die Effizienz am Betriebspunkt bestimmt.

### Links zu weiteren Informationen:

[1] [Verdichter-Tool](#)

[2] [Projekt Abschlussbericht](#)

III.01

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

### Erfahrungsbericht aus der Praxis

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

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

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

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

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

Im Herbst 2022 ging in einem Cash and Carry Markt im Raum Zürich eine energiesparende Weltneuheit in Betrieb. In die, im Rahmen einer Erneuerung installierte CO<sub>2</sub>-Kälteanlage, wurde ein Energie-Transfer-System integriert. Das letztere wandelt Hochtemperatur-Abwärme der CO<sub>2</sub>-Kälteanlage mittels eines Rankine-Kreisprozesses in nützliche Kälte um und entlastet dabei wiederum die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage. Das ETS wurde entwickelt, gebaut und vor Ort in die neu installierte CO<sub>2</sub>-Kälteanlage integriert. Im Anschluss an die Installation wurde die CO<sub>2</sub>-Kälteanlage zusammen mit dem ETS in Betrieb genommen. Seither läuft das ETS im Automatik-Betrieb, Betriebsdaten werden erfasst und der Betrieb wird laufend optimiert. Die Auswertung der ersten Betriebsdaten deuten darauf hin, dass die prognostizierte Effizienzsteigerung von ca. 8% realistisch ist und erreicht werden kann. Im laufenden Kalenderjahr erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie eine detaillierte Auswertung des Gesamt-Systems. Das Konzept vom ETS ist nicht zuletzt deshalb vielversprechend, da es auch losgelöst von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen, Hochtemperatur-Abwärme aus beliebigen Prozessen in nützliche Kälte umwandeln vermag. Praktische Erfahrungen aus dem Betrieb sowie Erkenntnisse aus einer detaillierten Untersuchung werden in einem Erfahrungsbericht präsentiert.

#### Stichwörter:

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

III.02

## Integriertes CO<sub>2</sub>- Kälteanlagen-system einer Molkerei:

### Energieflussanalyse und Potenzial für einen kalten thermischen Energiespeicher

Jan Bengsch<sup>1\*</sup>, Eirik Starheim Svendsen<sup>1</sup>, Håkon Selvnes<sup>2</sup>

Armin Hafner<sup>3</sup>, Kristina Norne Widell<sup>1</sup>, Sigmund Jenssen<sup>4</sup>, Alexis Sevault<sup>2</sup>, Shuai Ren<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SINTEF Ocean, 7465 Trondheim, Norwegen

[jan.bensch@sintef.no](mailto:jan.bensch@sintef.no)

<sup>2</sup> SINTEF Energy Research, 7034 Trondheim, Norwegen

<sup>3</sup> Norwegian University of Science and Technology (NTNU), 7491 Trondheim, Norwegen

<sup>4</sup> CadioAS, Terminalen 6, 7080 Heimdal, Norwegen

Molkereien und andere Lebensmittelindustrien gelten aufgrund des hohen Bedarfs an thermischer Energie auf unterschiedlichen Temperaturniveaus sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen als sehr energieintensiv. In konventionellen Molkereien wird dieser Bedarf häufig durch zwei getrennte Systeme gedeckt. Für den Kühlbedarf wird die thermische Energie über eine Kälteanlage und für den Wärmebedarf über einen Heizkessel mit fossilen Energieträgern bereitgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vollständig integriertes CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen-Kälteanlagen-system vorgestellt, das in einer Bio-Molkerei in Mittelnorwegen installiert wurde. Wie in vorhergegangenen Veröffentlichungen beschrieben, wurde das System mit Energieflussmessern ausgestattet, welche die Energieflüsse sowohl auf der kalten als auch auf der warmen Seite erfassen. Diese

Daten dienen dazu, den Energiebedarf und die Lastverteilung innerhalb der Molkerei über verschiedene Zeiträume besser zu verstehen. Auf Basis der Analyse der thermischen Energieströme soll die Energieeffizienz der Molkerei weiter gesteigert werden. Darüber hinaus dienen die Daten als Grundlage für die Untersuchung der Integration eines kalten latenten thermischen Energiespeichers (CTES) in das System, der die Spitzenlasten, die bei der Prozesskühlung auftreten, reduzieren soll.

**Stichwörter:**

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

III.03

## **Klimatische Einflüsse auf R744 Supermarktkälteanlagen in Deutschland und Europa**

### **Eine Betrachtung des Energiebedarfes Heute und in Zukunft**

**Andreas Schulte<sup>1\*</sup>, Jana Friese<sup>1</sup>, Florian Hanslik<sup>2</sup>, Kristian Kastner<sup>1</sup>, Kilian Meinke<sup>1</sup>  
Sascha Hellmann<sup>3</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Nicholas Lemke<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup> Efficient Energy GmbH, Hans-Riedel-Str. 5, 85622 Feldkirchen, Deutschland  
[florian.hanslik@efficient-energy.de](mailto:florian.hanslik@efficient-energy.de)

<sup>3</sup> Carrier Commercial Refrigeration, Am Mainzer Weg 7, 55246 Mainz-Kostheim, Deutschland  
[sascha.hellmann@carrier.com](mailto:sascha.hellmann@carrier.com)

Kälteanlagen mit R744 sind in Europa der Standard für die Kälteerzeugung im Supermarkt. Aufgrund des transkritischen Betriebes nimmt jedoch die Effizienz für R744 mit steigenden Umgebungstemperaturen stärker ab als für vergleichbare synthetische Kältemittel. Daher existiert eine Vielzahl von verschiedenen Technologien zur Steigerung der Effizienz z. B.: Ejektor, Parallelverdichter oder mechanische Unterkühlung. Dabei stellen die klimatischen Randbedingungen einen wesentlichen Einflussfaktor auf den Energiebedarf der Supermarktkälteanlage dar. Sowohl die Kältelast im Supermarkt als auch der Energieaufwand für die Wärmeabgabe an die Umgebung hängen von den Umgebungsbedingungen ab.

Um den standortspezifischen Einfluss des Klimas auf den Energiebedarf zu evaluieren sind Simulationsmodelle für die Ganzjahressimulation von Supermärkten ein geeignetes Werkzeug. Simulationen erlauben sowohl die Bewertung des Energiebedarfes zum aktuellen Zeitpunkt, als auch in der Zukunft unter Beachtung des Klimawandels und können für eine Vielzahl von Standorten durchgeführt werden. Darüber hinaus können auch verschiedene Technologien für den jetzigen und zukünftigen Einsatz bewertet werden. Die simulative Untersuchung kann als Grundlage für eine sinnvolle Auswahl von Technologien im Neubau und Retrofit in Abhängigkeit des Standortes dienen.

In dieser Studie soll der Energiebedarf von R744 Supermarktkälteanlagen an variierenden Standorten und in verschiedenen Klimawandelszenarien evaluiert werden. Dabei sollen Standorte in Deutschland, aber auch in weiteren Ländern Europas untersucht, Szenarien zum Klimawandel analysiert und verschiedene Technologien zur Effizienzsteigerung verglichen werden.

**Stichwörter:**

Supermarkt, R744, Klimawandel, Energiebedarf, Effizienz

## Die Verwendung eines R718-Unterkühlers in einem R744-Supermarktkältesystem

### Energetischer Vergleich eines Systems vor und nach der Optimierung

Florian Hanslik<sup>1\*</sup>, Jana Friese<sup>2</sup>, Andreas Schulte<sup>2</sup>, Sascha Hellmann<sup>3</sup>  
Wilhelm Tegethoff<sup>2</sup>, Jürgen Köhler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Efficient Energy GmbH, Hans-Riedel-Str. 5, 85622 Feldkirchen, Deutschland  
[florian.hanslik@efficient-energy.de](mailto:florian.hanslik@efficient-energy.de)

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

<sup>3</sup> Carrier Commercial Refrigeration, Am Mainzer Weg 7, 55246 Mainz-Kostheim, Deutschland  
[sascha.hellmann@carrier.com](mailto:sascha.hellmann@carrier.com)

Kältesysteme mit R744 sind zum Standard für die Supermarktkühlung geworden. Dies gilt auch für Anlagen in warmen Klimazonen. Aufgrund des transkritischen Betriebs nimmt der Wirkungsgrad von R744 mit steigenden Umgebungstemperaturen jedoch stärker ab als bei vergleichbaren synthetischen Kältemitteln. Es gibt eine Reihe verschiedener Technologien zur Steigerung der Effizienz, z. B. Ejektoren, Parallelverdichtung oder mechanische Unterkühlung. Bei der Wahl des Kältemittels für einen Unterkühler gibt es eine breite Palette von Möglichkeiten. Eine Wahl kann das natürliche Kältemittel Wasser (R718) sein.

In diesem Beitrag wird der Einsatz eines R718-Unterkühlers in einem R744-Supermarktkältesystem vor und nach einer Optimierung der Betriebsweise bewertet. Die Optimierung wurde anhand eines validierten Simulationsmodells durchgeführt. Die durchgeführten Optimierungsmaßnahmen werden beschrieben und eine energetische Auswertung der beiden Systeme vorgenommen. Darüber hinaus werden die durch die Optimierung veränderten Anforderungen an den R718-Unterkühler diskutiert.

#### Stichwörter:

Supermarkt, R744, R718, mechanische Unterkühlung, Energieeffizienz

## Energieeffizienz-Messungen an Kälte- und Klimaanlage (Teil 1)

### Methodik und Ergebnisse

Maik Strauch

CoolTool Technology GmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg, Germany  
[info@cooltool-technology.com](mailto:info@cooltool-technology.com)

Das Klimaschutzgesetz der Bundesregierung hat das Ziel der nationalen „Treibhausgase-Neutralität bis 2045“. Kälte- und Klimatechnik können zu diesem Ziel beitragen durch:

- Minderung direkter Emissionen (deren Anteil gegenwärtig bereits gering ist und durch die F-Gase-Verordnung zukünftig weiter reduziert wird) sowie
- Minderung indirekter Emissionen (deren Anteil deutlich größer ist).

Die Ziele können in begrenztem Umfang mittels Steigerung der Energiesuffizienz (Verringerung des Kältebedarfs durch bessere Dämmung, Verschattung) erreicht werden oder in größerem Umfang mittels Steigerung der Energieeffizienz. Bekannt ist, dass letztere durch eine Vielzahl technischer Maßnahmen realisiert werden

kann. Bisher wenig bekannt ist, in welchem Umfang ausgeführte Anlagen tatsächlich energieeffizient betrieben werden.

Das „Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz“ unterstützte eine Feldstudie, in deren Rahmen Energieeffizienz-Messungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse werden verglichen mit branchenspezifischen Durchschnittswerten und mit Simulationen optimaler ausgeführter Anlagen.

### III.06

## Energieeffizienz-Messungen an Kälte- und Klimaanlage (Teil 2)

### Konsequenzen und Empfehlungen

Michael Arnemann<sup>1</sup>, Vilim Mergl<sup>2</sup>, Jörn Schwarz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe, Postfach 24 40, 76012 Karlsruhe

<sup>2</sup> CoolTool Technology GmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg, Germany

<sup>3</sup> Ice-TeX, Rühlower Damm 36, 17039 Sponholz, Germany

[ArGe.Kaelte@t-online.de](mailto:ArGe.Kaelte@t-online.de)

Energieeffizienz stellt sich nicht automatisch durch Verwendung der „richtigen“ Komponenten, Systeme und Kältemittel ein. Sie ist vielmehr das Ergebnis einer anwendungsspezifischen Planung und guten handwerklichen Ausführung sowie optimaler Parameter von Steuerung und Regelung.

Abgeleitet aus energetischen Messungen (siehe Teil 1) an ausgeführten Kälte- und Klimaanlage für verschiedene Anwendungen werden Konsequenzen und Empfehlungen für einen betriebssicheren und dauerhaft energieeffizienten Betrieb formuliert.

### III.07

## Solare Kühlung mit Flüssigeispeichersystem am Standort der Lienig Wildfruchtverarbeitung

Carsten Heinrich<sup>1\*</sup>, Mathias Safarik<sup>1</sup>, Jannik Schug<sup>1</sup>, Alexander Raabe<sup>1</sup>  
Tilo Neumann<sup>2</sup>, Rene Neumann<sup>2</sup>, Rudi Naumann<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Sachsenkälte GmbH, Marie-Curie-Str. 2, 01139 Dresden

Die PV-gestützte Kälte- und Wärmeversorgung in Verbindung mit Flüssigeispeichersystemen ist eine energetisch und wirtschaftlich attraktive Möglichkeit zur Steigerung des Autarkiegrads und Senkung des Netzbezugs für eine Vielzahl von Anwendungen. Dies bietet für verarbeitende Unternehmen große Chancen zur Senkung der Energiekosten und Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit. Eine derartige „Power-to-Cold“ Anwendung wurde mit der Kälte- und Wärmeversorgung des Kühllagers der Fa. *Lienig-Wildfruchtverarbeitung* erstmalig umgesetzt. Die Anlage ist seit 2022 in Betrieb.

Die Lagerhalle verfügt über drei unterschiedlich temperierte Lagerbereiche von -18 bis 12 °C auf in Summe ca. 650 m<sup>2</sup> Fläche. Die Einlagerungen sind nur teilweise vortemperiert, so dass ein Großteil der täglichen Einlagerungen auf das Zielniveau abzukühlen ist. Im Rahmen des Projekts wurde ein Kühlkonzept mit Propan-Solekühlern, CO<sub>2</sub>-Tiefkühlstufe, vier Flüssigeiszeugern inkl. eines 10 m<sup>3</sup> Flüssigeispeichers, einer 100 kW PV-Anlage sowie einem Rückkühler mit adiabater Vorkühlung und optionaler Arbeitsweise zur Wärmerückgewinnung durch das ILK Dresden entwickelt und im Firmenverbund mit Kältetechnik Richter und Scholz sowie Sachsenkälte umgesetzt.

Im Rahmen des Vortrags wird die Entwicklung und Umsetzung des Anlagenkonzepts vorgestellt, sowie die bisherigen Messergebnisse dargestellt und diskutiert. Anhand der Messergebnisse werden die Chancen und Grenzen der Technologie sowie weitere Betriebserfahrungen kritisch beleuchtet.

**Stichwörter:**

Solar Kühlung, Kältespeicher, Demonstrationsanlage, Flüssigeis

III.08

## **Kälteerzeugung aus Tiefengeothermie – Absorptionstechnologien im Überblick**

### **Entwicklung und Test von Kältespeichermaterialien**

Ludwig Irrgang

Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme

[ludwig.irrgang@tum.de](mailto:ludwig.irrgang@tum.de)

Aufgrund steigender durchschnittlicher Temperaturen und häufigerer Phasen extrem hoher Temperaturen wird der Kältebedarf in Deutschland weiterhin ansteigen. Diesen Bedarf mithilfe von Kompressionskältemaschinen zu decken, verursacht einen entsprechend hohen elektrischen Energieverbrauch. Durch die Nutzung von Absorptionskältemaschinen können elektrische Bedarfe reduziert und erneuerbare Wärmequellen auch in Zeiten geringer Wärmenachfrage ausgelastet werden. Besonders im Bereich der hydrothermalen Geothermie ist eine ganzjährige hohe Auslastung und damit weite Auskühlung des geförderten Thermalwassers wünschenswert, aber auch andere erneuerbare Wärmequellen profitieren durch eine ganzjährige hohe Ausnutzung hinsichtlich spezifischer Investitions- und Betriebskosten. In dieser Arbeit werden verschiedene Absorptionskältemaschinenkonzepte hinsichtlich der Nutzung in Verbindung mit Geothermiewärme untersucht und bewertet. Für diese Untersuchungen werden neben dem einstufigen Absorptionsprozess auch die gängigen zweistufigen Prozesse „*double lift*“ und „*double effect*“, sowie innovative hybride Konzepte betrachtet. Der Vergleich der Konzepte findet mithilfe numerischer Modelle und anhand typischer Randbedingungen eines Geothermieprojekts im süddeutschen Molassebecken statt. Da die Kälteerzeugung bei Geothermiewärme nur eine untergeordnete Rolle neben der Wärmebereitstellung und Stromerzeugung darstellt, werden die dadurch entstehenden Einschränkungen bezüglich verfügbarem Temperaturniveau und Wärmemenge in die Untersuchung mit einbezogen. Die Ergebnisse sind auch auf andere Geothermiestandorte bzw. Wärmequellen übertragbar und sollen dabei helfen den Einsatz der Technologie als Alternative zu klassischen Kompressionsmaschinen anhand spezifischer Standortbedingungen zu bewerten.

III.09

## **Kühlcontainer-Lösung für Krankenhäuser in Afrika –**

### **Messergebnisse eines Naturumlauferdampfers zum beladen eines thermischen Speichers**

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

<sup>1</sup> Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,

Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland

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

Im Forschungsprojekt „SophiA – Sustainable Off-grid solutions for Pharmacies and Hospitals in Africa“ werden nachhaltige Systeme für die Kühlung von Lebensmitteln und Medikamente in abgelegenen Krankenhäusern entwickelt. Der solarbetriebene 40 Fuß Container ist in drei Temperaturzonen unterteilt: einem großen Normalkühlraum mit Temperaturen zwischen 5°C und 10°C, ein kleinerer Tiefkühlraum bis -30°C und einer

Tiefkühltruhe bis  $-70^{\circ}\text{C}$ , welche im Tiefkühlraum aufgestellt ist. Die verschiedenen Temperaturniveaus werden durch eine entkoppelte dreistufige Kältemittelkaskade ermöglicht. Als Kältemittel kommt in der obersten Stufe Propan, in der mittleren  $\text{CO}_2$  und in der untersten Stufe Ethan zum Einsatz. Im Normalkühlraum des Containers befindet sich ein thermischer Latentwärmespeicher. Als Speichermedium wird Wasser-Eis verwendet. Dieses Speichermedium bietet den Vorteil, dass es überall vorkommt, keine Umweltschäden verursacht und durch die Phasenwechseltemperatur bei  $0^{\circ}\text{C}$  geringe Speicherverluste aufweist.

Beladen wird der Speicher, wenn ausreichend Energie von der PV Anlage vorhanden ist, um den Propanverdichter der ersten Stufe zu betreiben. Um die Kältemittelfüllmenge des brennbaren A2L Stoffes gering zu halten, wird die oberste Stufe kompakt gehalten. Deshalb findet auch keine Direktverdampfung von Propan im Eisspeicher statt. Stattdessen wird ein zweiphasiger Thermosiphon, auch Naturumlaufverdampfer genannt, eingesetzt. Die Verwendung ermöglicht den Wärmestrom aus dem Eisspeicher zum Propanverdampfer. Als Kältemittel wird im zwei-Phasen Thermosiphon ebenfalls  $\text{CO}_2$  eingesetzt. Der Eisspeicher dient gleichzeitig als Wärmesenke für alle drei Temperaturzonen. Im Falle des Normalkühlraumes wird die flüssige Phase durch einen Wärmeübertrager gepumpt und ermöglicht so die Temperierung des Raumes. Im Eisspeicher sind neben den Rohrwendeln des zweiphasigen Thermosiphons auch Rohre verbaut, die als Verflüssiger der zweiten Stufe dienen. Die dritte Stufe gibt die Kondensationswärme an den  $-30^{\circ}\text{C}$  Raum ab, weshalb dieser Wärmestrom ebenfalls vom Eisspeicher aufgenommen wird.

Das Verhalten des Thermosiphons soll im Laborversuch untersucht werden. Hierfür wurde ein Prüfstand aufgebaut, der der Anlage im Container nachempfunden ist. Wärmeströme in den Container werden im Labor durch Widerstandsheizungen emuliert. Es wird die Beladezeit bei unterschiedlichen Betriebspunkten gemessen. Zudem wird das Abtauverhalten des Eises beobachtet. Die aufbereiteten Messergebnisse werden mit den Simulationsergebnissen des Druckverlusts im Thermosiphons bei wachsender Eisdicke verglichen. Eine weitere Simulation soll beweisen, dass der Einsatz eines Systems mit thermischem Speicher Vorteile gegenüber einem System mit reinen Lithium-Ionen-Akkus bietet.

**Stichwörter:**

$\text{CO}_2$ -Propan-Kaskade, Thermosiphon-Technologie, natürliche Kältemittel, Ethan-Tiefkühlung, Latentwärmespeicher

III.10

## Zonale Klimatisierung und Frischluftkontrolle in batterie-elektrischen Stadtbussen

Dr.-Ing. Kemal-Edip Yildirim<sup>1\*</sup>, Prof.-Dr.-Ing. Mathias Ahlhaus<sup>2</sup>, M. Eng. Pradeep Boggarapu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Pepper Motion GmbH, Experte Thermalsystems / Innovationen,  
Alemannenstraße 14, 85095 Denkendorf, Deutschland  
[kemal-edip.yildirim@peppermotion.com](mailto:kemal-edip.yildirim@peppermotion.com)

<sup>2</sup>Hochschule Stralsund, Fakultät Maschinenbau, Energieanlagen / regenerative Energien,  
Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund, Deutschland  
[matthias.ahlhaus@hochschule-stralsund.de](mailto:matthias.ahlhaus@hochschule-stralsund.de)

<sup>3</sup>PikeTec GmbH, Embedded Test Automation: TPT, Waldenserstraße 2 - 4, 10551 Berlin, Deutschland  
[pradeep.boggarapu@piketec.com](mailto:pradeep.boggarapu@piketec.com)

Bei batterie-elektrischen Bussen reduziert sich die Reichweite durch die Temperierung der Kabine und der Frischluft. Dabei kann sich die Reichweite durch das Heizen aufgrund der größeren Temperaturdifferenzen zwischen der Kabine und der Fahrzeugumgebung im Falle des Einsatzes von elektrischen Zuheizern halbieren. Daher gewinnen die Klimatisierung und das Thermomanagement in den batterie-elektrischen Bussen deutlich größere Bedeutung und erfordern weitere effiziente Maßnahmen neben dem bekannten Wärmepumpensystem zur Steigerung der Reichweite.

Der Energiebedarf in den Bussen entsteht durch den Ausgleich der Energieverluste durch die Transmission (Konvektion, Strahlung, u. a.) zwischen der Kabine und der Fahrzeugumgebung, internen Wärmequellen (elektrische Komponenten, etc.), Luftaustausch mit der Fahrzeugumgebung in den Türaufphasen und auch durch die Temperierung der Frischluft. Frischluft wird in den Bussen benötigt, um den CO<sub>2</sub>- und Feuchteausstoß von Passagieren auszugleichen. Hierdurch wird der Komfort und die Sicherheit der Passagiere gewährleistet und die Beschlagbildung der Fahrzeugfenster verhindert.

Stadtbusse können bis zu 20 Stunden am Tag im Linienverkehr im Einsatz sein, wobei ihre Belegung mit Passagieren über den Tag stark schwanken kann. Die Stadtbusse sind während der Hauptverkehrszeiten meist voll belegt. In der restlichen Zeit ist die Belegung deutlich geringer. Durchschnittlich werden die Stadtbusse in der Regel über den Tag zu ca. 30 % belegt. Der Verband deutscher Verkehrsbetriebe (VDV) empfiehlt eine Frischluftmenge von 15 m<sup>3</sup>/h/Passagier. Die Stadtbusse werden aktuell mit der maximalen Frischluftmenge versorgt und die gesamte Kabine so temperiert, als ob die Busse voll belegt wären.

Durch die Aufteilung der Buskabine in Zonen und durch den Einsatz von CO<sub>2</sub>- und Feuchtesensoren können die aktiven Zonen und die Frischluftmenge bedarfsgerecht bei gleichbleibendem Komfort und Sicherheit kontrolliert werden, wodurch der Energiebedarf reduziert und damit die Reichweite erhöht wird.

Hierzu wurde eine simulative Masterarbeit in Zusammenarbeit zwischen der Pepper Motion GmbH und der Hochschule Stralsund durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Kontrolle der aktiven Zonen und der Frischluftmenge ein hohes Energieeinsparungspotenzial hat.

**Stichwörter:**

Zonale Klimatisierung, Kontrolle der Frischluftmenge, Thermomanagement, Energieeffizienz, Stadtbusse

III.11

## CO<sub>2</sub>-Kältemaschinen für die mobile Tiefkühlung

### Variantenvergleich und Optimierung

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

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

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

Im Bereich der kombinierten Kälteerzeugung für die Normal- und Tiefkühlung von Lebensmittel werden heute erfolgreich mehrstufige CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen projektiert. Dagegen kommen bei mobilen Tiefkühlanwendung vornehmlich fluorierte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel zum Einsatz. Als Ersatzstoff für diese Anwendung werden daher ebenfalls der Einsatz von CO<sub>2</sub> oder eines Kältemittelgemisches mit CO<sub>2</sub> als Hauptkomponente vorgeschlagen. Mögliche zweistufige Prozessführungen werden dazu untersucht.

Zur Vereinfachung der Auslegung wird eine Berechnung zur Abschätzung des Hubraumverhältnisses der Verdichterstufen vorgestellt. Daraus folgt eine Optimierung des Mitteldruckes zwischen Nieder- und Hochdruckstufe und des Hochdruckes bei gegebener Gaskühleraustrittstemperatur. Vor- und Nachteile verschiedener Schaltungen bezüglich des Einsatzes zur mobilen Tiefkühlung werden evaluiert. Schließlich wird eine Anlagenschaltung favorisiert und die dazugehörige Regelstrategie vorgestellt. Als Referenz dient eine gleichartige Konzeption mit Propan als Kältemittel.

**Stichwörter:**

Zweistufige Verdichtung, CO<sub>2</sub>, mobile Kälte, natürliche Kältemittel

III.12

## Kältemittel für BEV-technische Entwicklungen im regulatorischen Kontext

Christian Macri, Felix Flohr\*

Daikin Chemical Europe GmbH, Düsseldorf

[felix.flohr@daikinchem.de](mailto:felix.flohr@daikinchem.de)

Mit dem Verbot von nicht CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Verbrennern (ICE) im Jahr 2035 hat die EU ein klares Signal in Richtung Klimaneutralität von PKW-Antrieben gesetzt. Ein Großteil der Fahrzeuge wird in Zukunft batterieelektrisch (BEV) angetrieben.

BEVs haben spezielle Anforderungen an das Thermomanagement. Komponenten wie Batterie, Leistungselektronik, Fahrmotoren sowie die Konditionierung der Fahrerkabine müssen miteinander verbunden und temperiert werden, um effizient zu arbeiten. Lösungen basierend auf reinem R-1234yf stoßen im unteren Temperaturbereich wegen des hohen Siedepunkts von -29°C an ihre Grenzen. Gleiches gilt für R-744 im hohen Temperaturbereich durch die niedrige kritische Temperatur von 31°C. Das Kältemittelgemisch R-474A, basierend auf R-1132(E), überwindet die genannten Limits von R-1234yf und R-744, und ist somit für einen weiten Temperaturbereich als Kältemittel geeignet.

Der Vortrag wird die neuesten Ergebnisse der Entwicklung in BEV-Anwendungen zeigen. Anschließend wird die aktuelle Diskussion bzgl. F-Gas Verordnung und einer etwaigen PFAS Restriktion aufgegriffen. Die Auswirkungen auf die Kältemittelauswahl, mögliche Optionen und deren Grenzen werden gezeigt, die sich aus den diskutierten Gesetzesvorhaben ergeben.

III.13

## Klimatisierung von elektrischen Personenkraftwagen mit R744

Florian Wieschollek<sup>1</sup>, Dr. Roman Heckt<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hanon Systems Deutschland, Thermal Management, 50170 Kerpen, Deutschland

[fwiesch1@hanonsystems.com](mailto:fwiesch1@hanonsystems.com)

<sup>2</sup> Hanon Systems Deutschland, System Development, 50170 Kerpen, Deutschland

[rheckt@hanonsystems.com](mailto:rheckt@hanonsystems.com)

In den letzten Jahren ist der Marktanteil der elektrischen und teilelektrischen Fahrzeuge (EV) kontinuierlich gestiegen. In diesen Fahrzeugen spielt das Thermal Management eine besondere Rolle, um den elektrischen Antriebsstrang optimal nutzen zu können. Das Thermal Management in EVs ist deutlich umfangreicher und komplexer als in Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor. Ein wichtiges Subsystem im Thermal Management ist der Kältemittelkreislauf. Dieser wird in EVs nicht nur zum Kühlen eingesetzt, sondern darüber hinaus auch zum Heizen. Dafür wird der klassische Kältemittelkreislauf um eine Wärmepumpenschaltung erweitert. Damit kann die begrenzt zur Verfügung stehenden Energie aus dem Hochvoltspeicher effizient genutzt werden.

Derzeit wird großflächig das Kältemittel R1234yf als Arbeitsfluid eingesetzt. Für den Einsatz bei tieferen Umgebungstemperaturen gibt es für den Wärmepumpenfall weitere Kältemittel mit thermodynamisch vorteilhafteren Eigenschaften. Zum Beispiel bietet sich R744 als potenzieller Kandidat an.

Die Firma Hanon hat Komponenten und Kreislaufschaltungen für das Kältemittel R744 entwickelt. Diese sind bereits im Serieneinsatz auf der Straße. Systeme und Komponenten werden ständig weiterentwickelt.

In diesem Vortrag werden technische Lösungen und deren technische Umsetzung gezeigt und diskutiert.

**Stichwörter:**

Automobil, Klimatisierung, R744

## Umschaltbare Wärmepumpe im elektrischen Fahrzeug

### Direkte Temperierung der Batterie mit dem Kältemittel R744

Nina Piesch<sup>1,2\*</sup>, Jan Friedrich Hellmuth<sup>1</sup>, Sunny Rai<sup>1,3</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Nicholas Lemke<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Energy and Process Engineering,  
Postboks 8900, NO-7491 Trondheim, Torgarden, Norway  
[nina.piesch@ntnu.no](mailto:nina.piesch@ntnu.no)

<sup>3</sup>Center of Excellence Battery, Pre-Series development, Concepts and Simulation,  
Letterbox 013/37630, 38112 Braunschweig, Deutschland  
[sunny.rai1@volkswagen.de](mailto:sunny.rai1@volkswagen.de)

Aktuell nutzen die meisten batterieelektrischen Fahrzeuge eine kühlmittelbasierte Temperierung der Batterie und synthetische Kältemittel. Es entstehen zusätzliche Kosten und Gewicht für den Kühlmittelkreislauf und der zusätzliche Wärmeübergang zwischen Kühl- und Kältekreislauf senkt die Effizienz und limitiert die mögliche Kühlleistung.

Die direkte Temperierung der Batterie mit dem natürlichen Kältemittel R744 stellt eine effiziente Möglichkeit dar, die Batterie unter Nutzung der latenten Wärme zu kühlen und zu heizen sowie auf einen weiteren Wärmeübergang zu einem Sekundärkreislauf zu verzichten. Es wird eine Topologie einer umschaltbaren Wärmepumpe vorgestellt. Entsprechend der Topologie und den thermischen Anforderungen der Batterie und des Fahrgastraumes werden Betriebs- und Regelstrategien erarbeitet.

Anhand einer modellbasierten Untersuchung wurden fünf Betriebsmodi für Kombinationen aus Heiz- und Kühlfällen für Batterie und Fahrgastraum bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperierung effektiv durch die vorgestellte Topologie erfolgen kann. Der COP ist vergleichbar mit denen einer kühlmittelbasierten Temperierung der Batterie. Weiterhin wurde das Regelungskonzept hinsichtlich einer möglichst homogenen Erwärmung der Batterie optimiert. Durch die Reduktion der Überhitzung am Eintritt in die Kühlplatte konnten die Temperaturunterschiede in der Batterie auf maximal 5 K gesenkt werden.

#### **Stichwörter:**

BEV, Thermomanagement, R744, Wärmepumpe, Fahrzeugklimatisierung, Batteriekühlung, Batterieheizung

III.15

## Entwicklung einer Wärmepumpe für elektrifizierte Bau- und Landmaschinen

Katerina Hatesuer<sup>\*1</sup>, Felix Zimmermann<sup>2</sup>, Bastian Pühl<sup>2</sup>, Andreas Köster<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AKG Verwaltungsgesellschaft mbH, FuE, Am Hohlen Weg 31, 34369 Hofgeismar, Deutschland  
[katerina.hatesuer@akg-gruppe.de](mailto:katerina.hatesuer@akg-gruppe.de), [andreas.koester@akg-gruppe.de](mailto:andreas.koester@akg-gruppe.de)

<sup>2</sup> AKG Verwaltungsgesellschaft mbH, NPI, Am Hohlen Weg 31, 34369 Hofgeismar, Deutschland  
[felix.zimmermann@akg-gruppe.de](mailto:felix.zimmermann@akg-gruppe.de), [bastian.puehl@akg-gruppe.de](mailto:bastian.puehl@akg-gruppe.de)

CO<sub>2</sub>-Emissionen und deren Auswirkung auf den Klimawandel sind ein drängendes Thema in der aktuellen Wirtschaft und Politik. Besonders in der Mobilität wird ein großer Wert auf die Elektrifizierung der Fahrzeuge gelegt und durch starke Förderungsmaßnahmen unterstützt. Demzufolge werden zunehmend auch Bau- und Landmaschinen elektrifiziert, um CO<sub>2</sub>-Emissionen in diesem Bereich zu reduzieren. Im Vergleich zum Automotive-Bereich stellt der Elektroantrieb zusätzliche Herausforderungen an Thermomanagementlösungen dar. Die verbauten Komponenten müssen zusätzlich zu deren Charakteristik auch robust sowie vibrationsbeständig und teilweise unter extremen Witterungsbedingungen funktionsfähig sein.

Im Rahmen eines durch die Hessenagentur geförderten Projekts wird eine hocheffiziente Wärmepumpe (WP) für elektrische Bau- und Landmaschinen entwickelt, welche dann in ein beliebiges Thermomanagementsystem (TMS) integriert werden kann. Durch seine sehr guten thermodynamischen Eigenschaften und extrem geringen GWP-Wert wird als Kältemittel Propan eingesetzt. Aufgrund der hohen Brennbarkeit wird die Menge des Kältemittels im WP-Kreislauf auf einen minimalen Wert reduziert. Als Verdampfer und Verflüssiger werden neu entwickelte Plattenwärmeübertrager, mit Hinblick auf geringes Kältemittelvolumen, eingebaut. Die ersten Labor-, sowie Simulationsergebnisse werden dargestellt und diskutiert.

### Stichwörter:

Wärmepumpe, Plattenwärmeübertrager, Propan

III.16

## Wärmepumpe für Nutzfahrzeuge mit Feststoffbatterien

Jan Friedrich Hellmuth<sup>1\*</sup>, Markus Pollak<sup>1</sup>, Timo Heinke<sup>1</sup>, Wilhelm Tegethoff<sup>1</sup>, Jürgen Köhler<sup>1</sup>

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

Der Einsatz von Feststoffbatterien in batterieelektrischen Nutzfahrzeugen ermöglicht potentiell – im Vergleich mit herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien – höhere Reichweiten, größere Sicherheit und kürzere Ladezeiten. Allerdings werden höhere Betriebstemperaturen als bei aktuellen Batterien benötigt, die eine thermische Vorkonditionierung vor Fahrtbeginn erforderlich machen. Aufgrund der guten Planbarkeit des Einsatzes von Nutzfahrzeugen eignen sich Feststoffbatterien somit besonders für dieses Fahrzeugsegment.

Eine Wärmepumpe stellt eine effiziente Möglichkeit zur Vorkonditionierung der Batterien dar. In dieser Arbeit werden Konzepte für Wärmepumpen für die Vorkonditionierung von Feststoffbatterien und Fahrerkabine entworfen und präsentiert. Ergänzend wird ein einfacher Modellierungsansatz für Feststoffbatteriezellen präsentiert. Dabei werden die Unterschiede von thermischen Eigenschaften der Feststoffbatterien im Vergleich zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien herausgearbeitet. Mit diesen Batteriezellen wird ein Batteriesystem für einen Langstrecken-LKW vorgeschlagen. Für die Wärmepumpe werden spezifische Betriebsstrategien zur Vorkonditionierung von Batterien und Kabine präsentiert.

Die erarbeiteten Betriebsstrategien für die Wärmepumpe werden im Gesamtfahrzeugkontext bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen simulativ untersucht. Dabei wird insbesondere auf die Effizienz der Heizung und die benötigte Zeit zur Vorkonditionierung eingegangen. Schließlich werden die Potentiale von Feststoffbatterien für den Einsatz im Nutzfahrzeugsegment erörtert und bewertet, inwiefern sich eine Wärmepumpe für Vorkonditionierung und Betrieb eignet. Ein Ausblick zur Nutzung der Wärmepumpe im Betrieb des Fahrzeugs wird gegeben.

**Stichwörter:**

BEV, Thermomanagement, Wärmepumpe, Fahrzeugklimatisierung, Batterie, Batterieheizung, Feststoffbatterien, Nutzfahrzeug, LKW, Vorkonditionierung

III.17

## **Auswirkungen des Thermosiphons auf den Kälteprozess am Beispiel der Transportkälte**

**Jürgen Süß<sup>1</sup>, Matthias Bacht<sup>1</sup>, Melanie Cop<sup>2</sup>, Christiane Thomas<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup> Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik | Technische Universität Dresden

Die Entwicklungen in der Kälte- und Wärmepumpentechnik zeichnen seit längerem ein klares Bild: Reduzierung der F-Gase als Kältemittel, um globale Klimaziele zu erreichen.

Dies gilt auch für die Kühlkette der Lebensmittel, allerdings mit dem wesentlichen Glied des heute überwiegend HFKW-basierten Kühltransports von Waren, der wie alle mobilen Anwendungen besonders anfällig für Kältemittelleckagen ist.

Im Vortrag werden Möglichkeiten vorgestellt, von den hervorragenden energetischen Stoffeigenschaften der Kohlenwasserstoffe als Kältemittel zu profitieren und gleichzeitig einen risikoarmen und zuverlässigen Betrieb der Anlagen durch den Einsatz von Sekundärkreisläufen zu gewährleisten. Dazu werden ausgehend von typischen FKW-Kälteanlagen mit Direktexpansion verschiedene Maßnahmen vorgestellt und bewertet, die in Summe zu einer energetischen Verbesserung der neuen Kälteanlage führen.

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

**Stichwörter:**

Transportkälte, natürliche Kältemittel, Thermosiphon, Kohlenwasserstoffe, Kohlendioxid

## Ammoniak-Kälteanlagen sicher betreiben

### Eine praxisorientierte Untersuchung zur sicherheitstechnischen Ausrüstung von Maschinenräumen mit Ammoniak-Kälteanlagen und Luftwäschern

MMst. Dipl.-Ing. Harald Erös<sup>1\*</sup>, Mst. Alfred Binder<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingenieurbüro DI Erös, Althanstraße 1-3/1/30, 1090 Wien, Österreich  
[harald.eroes@oegkt.at](mailto:harald.eroes@oegkt.at)

<sup>2</sup> BINDER Kälteplanung GmbH, Hermann Hlinka Gasse 17, 2482 Münchendorf, Österreich  
[a.binder@kaelteplanung.at](mailto:a.binder@kaelteplanung.at)

Ausgehend von der Überarbeitung der europäischen Verordnung über fluoriierte Treibhausgase sowie der REACH-Verordnung zeichnet sich eine vermehrte Verwendung alternativer Kältemittel ab. In der industriellen Kälte- und Wärmepumpentechnik wird bei hohen Leistungen zumeist auf R-717 (Ammoniak) gesetzt. Dieses Kältemittel ist toxisch und schwer entflammbar, weshalb es umfangreiche Anforderungen an Sicherheitseinrichtungen in Maschinenräumen gibt.

Regelwerke beschreiben teilweise sehr detailliert die Vorgaben an den Schutz von Anrainern und Personen. Die Erstellung eines gesamtheitlichen Sicherheitskonzepts ist ein wesentlicher Bestandteil der Planung. So darf bei einer Leckage nur eine bestimmte Ammoniakkonzentration den Maschinenraum tatsächlich verlassen. Eine Möglichkeit dies zu realisieren, bieten Luftwäscher. Normative Vorgaben sind jedoch für deren Auslegung interpretierbar oder fehlen gänzlich.

Diese Studie zeigt anhand von Berechnungen und Messungen das Verhalten von Ammoniak in einem Maschinenraum, gibt damit wertvolle Hinweise auf das Sicherheitskonzept und widmet sich im Besonderen der Thematik der Auswaschung mit Luftwäschern.

Von hohem Interesse ist dabei der Vergleich von historischen Richtwerten mit modernen Rechenmodellen und tatsächlichen Messmethoden. Es zeigt sich, dass abhängig von der Dimensionierung des Luftwäschers (Bauform, Luftvolumenstrom, Wassermanagement und geplanter Auswaschzeit) es problemlos möglich ist, die komplette Ammoniak-Konzentration aus der Luft in einem geschlossenen Maschinenraum auszuwaschen.

#### Stichwörter:

Ammoniak, R-717, Sicherheitstechnik, Sicherheitskonzept, Luftwäscher, Maschinenraumausrüstung

## Vermessung neuartiger natürlicher Kältemittelgemische für Haushaltsanwendungen

Katharina Stöckel<sup>\*1</sup>, Erik Mickoleit<sup>2</sup>, Theresa Kramer<sup>1</sup>, Riley B. Barta<sup>1</sup>, Christiane Thomas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, Professur für Technische Thermodynamik

[katharina.stoeckel@tu-dresden.de](mailto:katharina.stoeckel@tu-dresden.de), [erik.mickoleit@tu-dresden.de](mailto:erik.mickoleit@tu-dresden.de), [theresa.kramer@tu-dresden.de](mailto:theresa.kramer@tu-dresden.de)  
[riley.barta@tu-dresden.de](mailto:riley.barta@tu-dresden.de), [christiane.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane.thomas@tu-dresden.de)

Die Minimierung des Energieverbrauchs von elektrischen Haushaltsgeräten wird von der Gesetzgebung und den Herstellern immer stärker fokussiert, wodurch die Möglichkeit des Einsatzes von Wärmepumpen in Haushaltsgeräten zu betrachten ist. Ein Beispiel dafür stellt die Erhitzung von Spülwasser in Geschirrspülmaschinen dar. Gleichzeitig unterliegen die in Wärmepumpen verwendeten Arbeitsfluide immer strengeren Regularien und müssen bereits im Vorfeld optimal für die jeweilige Anwendung ausgewählt werden. Eine optimierte Arbeitsfluidauswahl kann mittels Screeningmethoden unter Verwendung von prädiktiven Zustandsgleichungen erfol-

gen. Am Beispiel einer Wärmepumpen-Spülmaschine erfolgt die Auswahl geeigneter Kältemittelgemische über die Software TREND und für die Modellierung der Gemische wird eine Kombination des Multifluid-Gemischmodells mit dem auf quantenchemischen Rechnungen basierenden Modells COSMO-SAC verwendet. Die Bestimmung der Güte der verwendeten Zustandsgleichungen erfolgt mittels eines Vergleichs des experimentell bestimmten Dampfdrucks, der Dichte und der Viskosität der im prädiktiven Screening bestimmten Arbeitsfluidgemische im Temperaturbereich von 0 °C bis 70 °C. Neben der angepassten Zustandsgleichung erfolgt ein Vergleich mit linearen Mischungsregeln und COSMO-SAC-dsp Berechnungen.

**Stichwörter:**

Prädiktive Screening Methoden, Dampfdruck, Viskosität, Kältemittelgemische, Wärmepumpen, Haushaltsgeräte

III.20

## Energieeffiziente Heiz- und Entfeuchtungskonzepte in Eissporthallen

F. Micus<sup>1\*</sup>, D. Fleig<sup>1</sup>, U. Jordan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Germany  
[felix.micus@uni-kassel.de](mailto:felix.micus@uni-kassel.de)

Eissporthallen gehören zu den besonders energieintensiven Gebäuden. Dabei spielt neben der Eisbereitung auch die Raumklimatisierung und insbesondere die Luftentfeuchtung eine große Rolle. Bei vergleichswisen undichten Gebäuden stellt die Infiltration mit ca. 80-90 % den größten Anteil der Feuchtelast in Eissporthallen dar. Nur bei einer hohen Zuschaueranzahl ist der Feuchteintrag durch Personen entscheidend.

Effektive Heiz-, Lüftungs- und insbesondere Entfeuchtungskonzepte sind essenziell für den energetischen Betrieb von Eissporthallen. Zur näheren Betrachtung wird dazu ein Gebäudemodell für Eissporthallen in der Simulationsumgebung TRNSYS entwickelt. Daran ist ein auf Isopotentiallinien (F1, F2) basierendes Modell eines Adsorptionentfeuchters gekoppelt. Dieses wird mit Messdaten aus unterschiedlichen Eissporthallen verglichen und für die Untersuchung von Entfeuchtungskonzepten genutzt.

Ohne Luftentfeuchtung kann die rel. Feuchte in der Halle nur durch Beheizung gesenkt werden. Die Taupunkttemperatur bleibt dabei konstant, sodass die Gefahr von Kondensatbildung an kalten Oberflächen weiterhin besteht, was auch im Modell abbildbar ist. Der abgebildete Sorptionsentfeuchter kann dieses Problem wirksam beheben und ermöglicht dadurch eine Absenkung der minimalen Hallentemperatur, die bei einer Absenkung von 12 °C auf 4 °C zu einer Energieeinsparung von 60 % des Heizwärmebedarfs führt.

**Stichwörter:**

Eissporthallen, Gebäudesimulation, Luftentfeuchtung, Kondensatbildung, TRNSYS, Sorption

III.21

## Process air conditioning

### The transition to air cycles in the automotive and mobility test infrastructure

Lorenz Hammerschmidt<sup>\*1</sup>, Michael Tielsch<sup>2</sup>, Christoph Spijker<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben, Austria  
[lorenz.hammerschmidt@unileoben.ac.at](mailto:lorenz.hammerschmidt@unileoben.ac.at)

<sup>2</sup>Christof Systems GmbH, Plabutscherstraße 115, 8051 Graz, Austria  
[s.lachmann@christof.com](mailto:s.lachmann@christof.com)

Most air cycle systems find application in air conditioning for aircraft and railways, but they can also be applied in systems such as environmental test chambers for industrial applications. This paper highlights the

advantages of an air cycle system applied in test benches especially for the automotive industry. In such applications air is required at massive quantities and at different conditions (e.g. temperature, humidity, salinity and dust levels). Furthermore, an insight into the design process is given.

The automotive industry heavily depends on different test cycles for materials and components under various conditions according to norms like the ISO 19453-4, EN IEC 60068-2-38 and ISO 16750-4. Especially in high dynamic systems, where large temperature ramps are required, brine is often pre-cooled or heated before being applied into the process. This circumstance results in pauses until the system can recover between test cycles, limiting the throughput of each test rig. ACS can overcome those drawbacks by having lower thermal mass, operating at different pressure ratios, and providing the coolant directly.

A general ACS consists of a compressor unit, a heat exchanger, and a turbine. Pre- and post-units are required to provide clean or conditioned air. The turbine is an in-house development to match the required design point. A design software for radial turbines is developed to reduce prototyping time and costs. An optimisation algorithm is implemented based on a newly developed CAD core for NURBS, specially tailored for turbomachinery applications. In the ongoing funded project, a test bench for the radial turbine will be developed to verify the results of the optimisation process.

**Keywords:**

automotive, air conditioning, turbomachinery, testing, optimisation

III.22

## Niedrig GWP Anlagenkonzepte – Ökonomischer und Ökologischer Vergleich

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

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

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

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

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

Seit Inkrafttreten der EU F-Gase-Verordnung 517/2014 wird die verfügbare Quote in Tonnen CO<sub>2</sub> äquivalent für das Inverkehrbringen von Kältemitteln schrittweise reduziert und der Einsatz von Kältemitteln mit einem höheren GWP nach und nach verboten. Steigende Anforderungen für Umweltschutz und Energieverbrauch erhöhen zusätzlich die Herausforderung für die gesamte Kälte-, Klima- und Wärmepumpenbranche. Alternative Anlagenkonzepte werden stetig weiterentwickelt um allen neuen Anforderungen gerecht zu werden. Besonders im Fokus stehen HFO Kältemittel R-744 und R-290 die auf Grund des geringen GWP's im Falle einer Leckage den direkten Einfluss auf die Umwelt reduzieren. Der Energieverbrauch, der die indirekten Emissionen darstellt, muss von nun an das Hauptanliegen sein, da er jetzt den Großteil der Emissionen während der Lebensdauer der Anlage ausmacht.

Diese Präsentation gibt einen Überblick verschiedener Technologien und dessen Einfluss auf Emissionen und Kosten. Besonders im Fokus stehen hier niedrig GWP Kältemittellösungen die auf Grund spezifischer Eigenschaften verschiedene Anlagenkonzepte erfordern.

**Stichwörter:**

Energieeffizienz, Lebenszykluskosten, CO<sub>2</sub> Emissionen, A2L, HFO, Kältemittel, Systemanalyse, Low GWP, Sicherheit, wirtschaftlich, Umwelt

## Experimentelle Untersuchung eines Frost-Präventionssystems für Kühlhäuser

Felix Hochwallner<sup>1,2\*</sup>, Ben Stephani<sup>1,2</sup>, Johann Emhofer<sup>1</sup>, Christoph Reichl<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> AIT – Austrian Institute of Technology, Center for Energy – Sustainable Thermal Energy Systems,  
Giefinggasse 2, 1210 Wien, Österreich  
[felix.hochwallner@ait.ac.at](mailto:felix.hochwallner@ait.ac.at)

<sup>2</sup> TU Wien, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Abtauzyklen tragen erheblich zur Kühllast in Kühlhäusern bei, da ein Teil der für die Abtauung aufgewendeten Wärme über die Luftkühler in den gekühlten Raum gelangt und die erwärmten Luftkühler anschließend wieder gekühlt werden müssen. Daher entfallen mehr als 10 % des gesamten Energieverbrauchs für die Kühlung auf die Abtauung. Das hier untersuchte System verwendet Fallfilmabsorber, um die Luft zu entfeuchten und so die Kondensation von Wasserdampf und damit die Frostbildung an den Luftkühlern in Kühlhäusern zu verhindern. Das vom Absorptionsmittel absorbierte Wasser wird anschließend mit der Abwärme der Kälteanlage ausgetrieben, wodurch keine zusätzliche Wärmequelle benötigt wird. Das System wurde im Labor des AIT aufgebaut und besteht aus dem Absorber zur Entfeuchtung der Luft, dem Luftkühler, an dem sich kein Frost bilden darf, und dem Desorber zur Regeneration des Absorptionsmittels. Sowohl die Temperatur als auch die Feuchte vor dem Absorber und dem Regenerator können von der Anlage beliebig vorgegeben werden. Die Messergebnisse bestätigen die Machbarkeit des Konzeptes und zeigen das Energieeinsparpotential auf.

### Stichwörter:

Frostbildung, Absorption, Fallfilmabsorber, Entfeuchtung, Kühlhäuser

IV 1.01

## Zonale Klimatisierung von Räumen –

### eine Analyse zu thermischer Behaglichkeit und energetischem Aufwand am Beispiel eines Büroraumes

Lars Schinke<sup>1</sup>, Maximilian Beyer<sup>1</sup>, Joachim Seifert<sup>1</sup>, Ralf Gritzki<sup>1</sup>, Eugen Gleim<sup>2</sup>, Manfred Dzubiella<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik

<sup>2</sup> Viessmann Climate Solution SE, Allendorf

[lars.schinke@tu-dresden.de](mailto:lars.schinke@tu-dresden.de)

Auf Grund von erheblich gestiegenen Energiekosten und veränderten Nutzungskonzepten von Büros durch z. B. Homeoffice und politische Entscheidungen (z. B. EnSikuMaV) muss die Frage gestellt werden, inwiefern eine Beheizung der gesamten Büroflächen sinnvoll ist oder ob diese durch eine zonale Beheizung (z. B. durch schnell reagierende und direkt im Bereich der Nutzer wirksame Systeme) mit dem Ziel einer energetischen Bedarfsreduktion für das Gebäude ersetzt oder unterstützt werden kann.

Im Rahmen einer Studie wurden messtechnische und probandengestützte Untersuchungen bei deutlich reduzierter Raumtemperatur in Kombination mit verschiedenen lokalen, schnell reagierenden, elektrischen Heizsystemen im Combined Energy Lab der TU Dresden durchgeführt. Den Versuchspersonen wurden fünf verschiedene Varianten der Heizsysteme hinsichtlich der Anordnung (Decke / Wand / auf und unter dem Tisch / Sitz) zur Verfügung gestellt sowie deren Leistungsregelung freigestellt. Neben den energetischen Aufwendungen wurden auch die Antworten der Versuchspersonen detailliert analysiert.

Abschließend wurden, basierend auf den messtechnischen Untersuchungen für ausgewählte Varianten energetische Hochrechnungen für ein Mehrpersonenbüro mit variierenden Wärmedämmstandards und Nutzungsszenarien durchgeführt. Hierzu wurden gekoppelte Gebäude-, Anlagen- und Strömungssimulationen auf Basis eines Typ-Tagverfahrens eingesetzt, da nur auf diese Weise detaillierte Aussagen zum Einfluss lokaler Einflüsse der zusätzlichen Heizsysteme auf die Behaglichkeit der Nutzer möglich ist.

Die Analysen zeigten deutlich, dass zonale/lokale Konzepte zur Beheizung energetisch sinnvoll genutzt werden können und von den Nutzern als behaglich akzeptiert werden. Die Analysen zeigen aber auch deutliche Nachteile bei einer nicht optimalen Positionierung der strahlungsdominierten Heizsysteme auf.

IV 1.02

## Kühlen mit Freien Heizflächen

André Kremonke

Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik,  
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

[andre.kremonke@tu-dresden.de](mailto:andre.kremonke@tu-dresden.de)

Bereits seit geraumer Zeit untersucht die TU Dresden im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte die Möglichkeit, auch Freie Heizflächen (z. B. Plattenheizkörper) zur sommerlichen Raumkühlung einzusetzen. Inzwischen werden in Zusammenarbeit mit verschiedenen Praxispartnern auch größere Demonstrationsvorhaben realisiert. Motivation ist die Bereitstellung vergleichsweise kostengünstiger Lösungen für den Einsatz von Wärmepumpentechnologien in Bestandswohngebäuden mit dem Ziel der Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und der damit verbundenen Möglichkeit, einer zunehmenden Überhitzung von Gebäuden in urbanen Gebieten entgegenzuwirken.

Im Rahmen des Tagungsbeitrages wird der bereits erprobte grundsätzliche Ansatz vorgestellt, welcher auch mit geringen Kühlleistungen, vor allem in Räumen mit hohen thermischen Belastungen, einen deutlich spürbaren

Kühleffekt bewirkt. Diesbezüglich werden Ergebnisse aus bisherigen Untersuchungen vorgestellt. Weiterhin wird über aktuelle Umsetzungen berichtet und ein Ausblick auf weitere Demonstrationsvorhaben gegeben.

#### IV 1.03

## Entwicklung regelbarer Vakuumdämmelemente zur bedarfsgerechten Anpassung des Wärmedurchgangs

Maurizio Calandri<sup>1\*</sup>, Michael Müller<sup>1</sup>, Tobias Henzler<sup>1</sup>, Konstantinos Stergiaropoulos<sup>1</sup>

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

Die Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes zielen hauptsächlich darauf ab, den Heizenergiebedarf von Gebäuden zu reduzieren. Jedoch treten im Sommerfall und auch schon in der Übergangszeit aufgrund der Luftdichtheit und des geringen Wärmedurchgangs der Gebäudehülle erhöhte Raumtemperaturen auf. Diese können zu unbehaglichen Zuständen oder steigendem Kühlenergiebedarf bei Einhaltung der maximalen Raumtemperaturen führen. Neben der Verringerung des Energiebedarfs besteht aufgrund zunehmender elektrischer Wärme- und Kältebereitstellung in Gebäuden ein steigender Bedarf an Maßnahmen zur Entkopplung von Stromerzeugung und Stromverbrauch z. B. durch eine Flexibilisierung von Lasten auf der Verbraucherseite (Demand Side Management). Um Lasten auf Seiten heiz- und raumlufttechnischer Anlagen als größte Verbraucher in Gebäuden ab- oder zuzuschalten und gleichzeitig die geforderten Raumkonditionen zu jedem Zeitpunkt einzuhalten, ist eine Speichermöglichkeit für thermische Energie im Gebäude erforderlich.

Eine Möglichkeit den Gesamtenergiebedarf sowohl für Heizen als auch Kühlen zu senken, bieten so genannte adaptive Gebäudehüllen. Diese haben den Vorteil, dass sie den Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle variabel an die thermische Last im Gebäude anpassen können. Außerdem können durch regelbare Dämmelemente massive Bauteile als thermisch aktivierbare Speichermassen erschlossen werden. Die zu entwickelnden und untersuchenden regelbaren Vakuumdämmelemente sind zentraler Baustein des vom BMWK (FKZ: 22617 N) im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) geförderten Projekts ReVaD. Im Rahmen des Vorhabens werden am IGTE geeignete Einsatzbereiche und deren Potenziale zur Umsetzung von adaptiven Gebäudehüllen mit regelbarer Vakuumdämmung betrachtet. Dies erfolgt mit thermisch-energetischen Gebäudesimulationen sowie anhand von experimentellen Untersuchungen im Raumluftrömungslabor.

#### **Stichwörter:**

Adaptive Gebäudehülle, Regelstrategien, Aktivierung von Speichermassen, Flexibilisierung, Reduktion Kühlenergiebedarf

## Regelstrategien für Wohnungslüftung und Heizung

### Systemübergreifende Regelung von zentralen Wohnungslüftungsgeräten in Kombination mit separaten Heizungssystemen

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

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

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

Ein fortgeschrittener Ansatz für die effiziente Raumkonditionierung in Wohngebäuden sind übergreifende Regelstrategien der Systeme Wohnungslüftung und Heizung. Diese sind zentraler Gegenstand des im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung geförderten Projekts HeatVentCon (IGF-Vorhaben-Nr. 22051 N) über „Systemübergreifende Regelstrategien für einen energetisch optimierten Betrieb von Wohnungslüftungs- und Heizungssystemen“. Daneben wird das Konzept dezentral angeordneter Ventilatoren bei zentralem Wohnungslüftungsgerät untersucht, als Variante eines Variablen-Volumenstrom-Systems. Ziel des Projekts ist es, bedarfsgeführte zonenweise und systemübergreifende Regelstrategien für die Nutzenübergabe in Wohngebäuden zu entwickeln. Es werden deren Potentiale aufgezeigt und das resultierende Systemverhalten untersucht. Die Untersuchungen erfolgen anhand von thermisch-energetischen Gebäude- und Anlagenmodellen in einer Co-Simulationsumgebung mit TRNSYS und MATLAB. Ergänzend zu den Simulationen werden Experimente an Prüfständen zur zonenweisen Luftverteilung sowie der Anlagentechnik für die Nutzenübergabe in Wohngebäuden vorgenommen.

Es wird das Potential einer auf Präsenzmeldern gestützten bedarfsgeführten zonenweisen und übergreifenden Regelstrategie im Kontext einer Wohnung (Neubau) in einem Mehrfamilienhaus untersucht. Die Anlagentechnik besteht aus einem zentralen Wohnungslüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung und elektrischem Vorerwärmer in Kombination mit Raumheizflächen als Heizungssystem. Das Gesamtsystem wird nach typischen Nutzungsanforderungen bedarfsgeführt geregelt. Dabei wird außer der Nutzerpräsenz die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Raumluftfeuchte und die Raumtemperatur berücksichtigt. Ein geringer Aufwand der Nutzenübergabe bei gleichzeitig sichergestellter Behaglichkeit wird durch die raumweise Regelung der Wohnungslüftung und Heizung erzielt. Die vorgeschlagene übergreifende Regelstrategie verbessert dabei die Regelgüte. Es werden in der Systemkombination verfügbare Informationen und die einzelnen Funktionen zusammengeführt und komplementär eingesetzt. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich des Energieaufwands und den Auswirkungen auf die raumklimatischen Zustandsgrößen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die erzielten Einsparungen überwiegend auf die bedarfsgeführten und zonenweisen Regelstrategien zurückzuführen sind, wobei die übergreifende Regelstrategie die verfügbaren Informationen darüber hinaus für eine verbesserte Robustheit und Güte der Reglungen sowie den optimierten Betrieb des Gesamtsystems nutzen kann.

#### **Stichwörter:**

Wohnungslüftung, Heizungssystem, Modellbasierte Regelung, Übergreifende Regelstrategien, Regelgüte

## Nachhaltige Befeuchtung der Raumluft im Kontext der Gesundheit und des Wohlbefindens

Dr.-Ing. Claudia Kandzia

Fachverband Gebäude-Klima e. V., Hoferstraße 5, 71636 Ludwigsburg

[kandzia@fgk.de](mailto:kandzia@fgk.de)

Neben einer guten Luftqualität und behaglichen Temperaturen hat auch die Luftfeuchte im Raum einen entscheidenden Einfluss auf das Wohlbefinden und die Gesundheit des Nutzers. Dabei können die Änderungen der relativen Luftfeuchte nicht direkt wahrgenommen werden. Viel eher kann aufgrund von trockener Haut, Augen und Schleimhäuten auf eine zu niedrige Luftfeuchte geschlossen werden. Ist die Feuchte hingegen zu hoch, wird sie als Schüle empfunden.

Umfangreiche Untersuchungen zeigten, dass sich Menschen aus Mittel- und Nordeuropa bei Temperaturen zwischen 21 und 22 °C im Winter am wohlsten fühlen. Die relative Feuchte sollte bei Werten zwischen 40 und 50 % liegen. Vor allem im Winter lassen sich diese Werte nicht ohne aktive Befeuchtung sicherstellen. Eine Gegenüberstellung der Kosten, die einerseits für die Befeuchtung und andererseits für den Ausfall von Personal aufgrund von Krankheitstagen im Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen zu tragen sind, zeigt, wie zügig sich der Einsatz der Befeuchtung amortisiert. Die Luftbefeuchtung stellt damit eine notwendige Komponente zur Sicherung der Leistungsfähigkeit, der Gesundheit und des Wohlbefindens der Personen im Raum dar.

## Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Kühlenergieverbrauch in Wohngebäuden: Eine Fallstudie in Hanoi, Vietnam

Yuanchen Wang<sup>1\*</sup>, Tobias Henzler<sup>1</sup>, Dirk Schwede<sup>2</sup>  
Konstantinos Stergiaropoulos<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Technische Hochschule Lübeck, Energie- und Gebäudetechnik, Fachbereich Bauwesen  
Mönkhofer Weg 239, 23562 Lübeck, Deutschland

\* Korrespondenzautor

### Kurzfassung

Die stark wachsende Nachfrage nach Raumkühlung führt nicht nur zu einer zusätzlichen Belastung der Stromnetze vieler Länder, sondern mittelbar auch zu einer Zunahme der Treibhausgasemissionen. Es ist unerlässlich, diesem Trend durch gezielte Maßnahmen entgegenzuwirken, insbesondere für Gebäude in heißen und feuchten Klimazonen. Thermisch-energetische Gebäudesimulationen werden häufig eingesetzt, um das Energieeinsparpotenzial von Maßnahmen zu analysieren und geeignete energieeffiziente Sanierungskonzepte zu entwickeln. In den meisten Studien wird der Kühlenergiebedarf jedoch nur unter standardisierten Auslegungsbedingungen ermittelt und als Grundlage für die Untersuchung von Energieeffizienzmaßnahmen herangezogen. Dieser Ansatz berücksichtigt nicht den vielfältigen, dynamischen und stochastischen Charakter des Nutzerverhaltens, was zu signifikanten Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Energieeinsparungen führen kann.

Anhand von Langzeitmessdaten, die in 49 Wohnungen in Hanoi, Vietnam, erhoben wurden, analysiert diese Studie verschiedene Aspekte des Nutzerverhaltens (Kühlverhalten, Lüftungsverhalten, Belegung), die sich auf den Energieverbrauch für die Raumkühlung auswirken, und erstellt Nutzungsprofile für repräsentative Haushalte. Mithilfe eines stochastischen Modells werden diese Profile simuliert, um den Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Kühlenergieverbrauch in einer typischen Wohnung eines Wohnhochhauses zu quantifizieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nutzungshäufigkeit von Klimageräten zwischen Haushalten in heißen und feuchten Klimazonen variiert, was zu einer signifikanten Streuung des Stromverbrauchs während der Kühlperiode führt. Ebenso lässt sich feststellen, dass das Simulationsmodell mit standardisierten Auslegungsbedingungen den Strombedarf für die Klimatisierung deutlich überschätzt, da es die Toleranz der Nutzer gegenüber der thermischen Umgebung unterschätzt. In der Realität haben die Nutzer verschiedene Anpassungsmöglichkeiten wie Kleidung, Raumwechsel, Aktivitätsanpassungen, Fensterlüftung und Raumventilatoren, um ihren Komfort zu verbessern und den Energieverbrauch für die mechanische Kühlung zu reduzieren. Die Fallstudie in Hanoi, Vietnam verdeutlicht, dass das Verständnis des Nutzerverhaltens bei der Vorhersage des Strombedarfs für die Klimatisierung von großer Bedeutung ist und in energieeffiziente Planungs- und Sanierungsstrategien einbezogen werden sollte.

**Stichwörter:**

Nutzerverhalten, Raumkühlung, Kühlenergieverbrauch, Stochastisches Modell, Gebäudesimulation

IV 1.07

## **Dekarbonisierungspotential von DX-Wärmepumpen in Split-Ausführung**

**Dipl.-Ing. Anne Hartmann<sup>1\*</sup>, Prof. Dr.-Ing. Thomas Hartmann<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Institut für Technische Gebäudeausrüstung Forschung und Anwendung GmbH  
Tiergartenstraße 54, 01219 Dresden, Deutschland  
[anne.hartmann@itg-dresden.de](mailto:anne.hartmann@itg-dresden.de)

Bisher kommen DX-Systeme, wie z. B. VRF- und Split-Systeme, überwiegend für die Gebäudekühlung zum Einsatz. Im Rahmen eines vom FGK geförderten Projektes wurde das Potential von DX-Systemen bei einem zusätzlichen Heizbetrieb als Beitrag zur Dekarbonisierung untersucht.

Zunächst wurde der Einfluss einer Teilausstattung von einem Referenz-Bürogebäude mit einem VRF-System und von einem Referenz-Wohngebäude entweder mit Singlesplit- oder mit Multisplit-System untersucht.

Es zeigt sich, dass beim Einsatz des VRF-Systems im sanierten Bestand des Bürogebäudes bezogen auf die Endenergie Heizung (Gas bzw. Öl als Referenzsysteme) Einsparungen bis zu 140 kWh/m<sup>2</sup>a möglich sind. Im betrachteten Einfamilienhaus liegen die Einsparungen bei bis zu 125 kWh/m<sup>2</sup>a. Der dafür erforderliche zusätzliche Strombedarf liegt mit 24 bis 27 kWh/m<sup>2</sup>a um den Faktor 4 bis 6 niedriger.

Unter Verwendung verschiedener auf Rückmeldungen der beteiligten Hersteller basierenden Randbedingungen z. B. hinsichtlich der Anzahl der verkauften Geräte, Einsatz der Geräte (Neubau, Bestand, Sanierung) und der Betriebsweise (monovalent oder bivalent) wurde eine Prognose des Einsparpotentials bis 2045 durchgeführt.

Bei Ausschöpfung des vollen Potentials im Wohn- sowie Nichtwohnbereich sind im Jahr 2045 CO<sub>2</sub>-Einsparungen von bis zu 20 Mio. t/a möglich. Bezogen auf das nahe 0 Mio. t/a-Einsparziel für 2045 ist dies ein Anteil von bis zu 20 %.

**Stichwörter:**

Einsparpotential, DX-Wärmepumpe, CO<sub>2</sub>-Emissionen

IV 1.08

## Effizienzsteigerung bestehender Kühlsysteme

### Verbundbetrieb einer Wasser-Turbokälteanlage mit einem direktverdampfenden Klimasystem zur Nutzung der freien Kühlung

Philipp Nguyen, Christian Schweigler

CENERGIE – Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere  
Hochschule München, Dachauer Straße 100a, 80636 München, Deutschland  
[philipp.nguyen@hm.edu](mailto:philipp.nguyen@hm.edu)

Zur Kühlung von Gebäuden werden häufig Direktexpansionskühlgeräte in Split-Ausführung eingesetzt. Bei diesem konventionellen Anlagenkonzept kühlt der Verdampfer des Kältesystems direkt die Raumluft im Umluftbetrieb ohne zwischengeschalteten Wärmeträgerkreis. Die Abfuhr der Wärmelast erfolgt über den internen Kompressionskältekreislauf unter Einsatz mechanischer Energie für die Verdichtung des Kältemittels und Wärmeabgabe an die Umgebung über den Kondensator des Kältekreislaufs. Die Nutzung der freien Kühlung ist bei derartigen Systemen nicht möglich.

Zur Steigerung der Systemeffizienz ist ein hybrides Anlagenkonzept zur Kopplung einer Turbo-Kältemaschine mit dem natürlichen Kältemittel Wasser mit einer Multi-Split-Anlage entwickelt worden. Ziel ist es hierbei, durch den koordinierten Einsatz der beiden Kälteerzeuger den elektrischen Energiebedarf durch die Ausnutzung der Potentiale zur freien Kühlung zu senken.

In einer Pilotinstallation ist dieses Anlagenkonzept umgesetzt worden. Die Kälteleistung der Multi-Split-Anlage wird hierbei mithilfe eines Direktverdampfers in das Kaltwassersystem der Wasser-Turbo-Kältemaschine eingespeist. In Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass der System-EER durch den Verbundbetrieb gesteigert werden kann.

IV 1.09

## Wärmepumpen als Digitaler Zwilling – Systembetrachtung

J. Seifert, M. Knorr, L. Haupt\*, P. Seidel, L. Schinke, A. Perschk, F. Valentin (TU Dresden)  
Th. Hackensellner, A. König-Haagen (Glen Dimplex Deutschland GmbH)  
S. Borges, F. Wüllhorst, S. Göbel, H. Romberg, T. Klebig, C. Vering, D. Müller (RWTH Aachen)  
K. Spreitzer, A. Eggert, C. Grozescu (Viessmann Werke Allendorf GmbH)  
[lars.haupt@tu-dresden.de](mailto:lars.haupt@tu-dresden.de)

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

Im Rahmen der avisierten Veröffentlichung werden Verbesserungen und Erweiterungen der bereits bei der DKV-Tagung 2022 vorgestellten Systemplattform vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf einer erweiterten Funktionalität und verbesserter Modellgenauigkeit sowie neuen Test-, Fehlererkennungs- und Anwendungsszenarien, welche den Nutzen und das Potential eines Digitalen Zwillings für Wärmepumpensysteme verdeutlichen. Neben einer kompakten Vorstellung der grundsätzlichen Systemarchitektur und Kommunikationssoftware wird auf die Modellierung des Kältekreislaufes und die hier im Vergleich zum Vorjahr erzielten Verbesserungen in der Modellgüte

eingegangen. Darüber hinaus wird die dabei angewendete Kalibrierungs- und Validierungsprozedur erläutert und das Ergebnis mit real erfassten Messdaten belegt. Die Veröffentlichung endet mit einem Fazit und einem Ausblick auf weitere Arbeiten des Forschungsprojektes „Digitaler Zwilling von Wärmeerzeugersystemen als Wegbereiter für die Entwicklung emissionsarmer Gebäudeenergietechnik (DZWi) (FKZ: 03EN1022A-D)“, welches die Grundlage dieser Veröffentlichung darstellt.

## Analyse von Maßnahmen zur kurzfristigen Reduktion des Energieverbrauchs

Patrick Henkel<sup>1\*</sup>, Alexander Kümpe<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
Mathieustraße 10, 52074 Aachen  
[patrick.henkel@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:patrick.henkel@eonerc.rwth-aachen.de)

Infolge der Gasknappheit hat die Bundesregierung zur Sicherung der Energieversorgung in Deutschland kurzfristige Energiesparmaßnahmen (EnSikuMaV) verordnet. Seit September 2022 dürfen öffentliche Arbeitsstätten höchstens auf 19°C geheizt werden.

Die Energiesparmaßnahmen sind auch am Hauptgebäude des E.ON Energy Research Centers in Aachen umgesetzt. Das Energiesystem basiert auf einer Radialturbokompressor-Wärmepumpe mit 180 kW Heiz- und 258 kW Kühlleistung. Als Wärmequelle kann ein geothermisches Feld und die Abwärme des Gebäudes genutzt werden. Durch eine Betonkernaktivierung werden die Grundlasten für Heiz- und Kühlenergie bereitgestellt. Zur Deckung von Lastspitzen verfügen die einzelnen Büros über Fassadenlüftungsgeräte. Für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme steht ein Blockheizkraftwerk zur Verfügung.

Zur kurzfristigen Reduktion des Energieverbrauchs wurden unter anderem die Vorlauftemperatur der Betonkernaktivierung, die Zulufttemperatur der raumlufttechnischen Anlage und die Raumsolltemperaturen abgesenkt sowie das Blockheizkraftwerk vorübergehend deaktiviert.

Die Auswirkungen und Wirksamkeit der Energieeinsparmaßnahmen können durch ein umfassendes Energie-Monitoring überprüft und analysiert werden. Insgesamt werden über 12.000 Datenpunkte im Gebäude in einer Cloud-Plattform abgespeichert. Der Wärmeverbrauch wird aus aufgezeichneten Temperaturen und Volumenströmen berechnet und mit historischen Daten verglichen.

Die Analyse zeigt, dass der witterungsbereinigte Wärmeverbrauch durch die Energieeinsparmaßnahmen um 12,3 – 28,4 % gesunken ist. Demgegenüber steht jedoch eine Reduzierung des Nutzerkomforts durch die abgesenkten Solltemperaturen. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Bereitstellung der Heizleistung von der Betonkernaktivierung (Grundlast) hin zu den Fassadenlüftungsgeräten (Spitzenlast) verschoben wird.

### Stichwörter:

Energiesparmaßnahmen, Monitoring, Betriebsauswertung, EnSikuMaV

## Nutzung von Abwärme im Mehrfamilienhaus / Geschosswohnungsbau

Dirk Gebhardt<sup>1\*</sup>, Mathias Kulle<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Nibe Systemtechnik Deutschland, Planung, Am Reiherpfahl 3, 29223 Celle  
[Gebhardt@nibe.de](mailto:Gebhardt@nibe.de)

<sup>2</sup> Nibe Systemtechnik Deutschland, Planung, Am Reiherpfahl 3, 29223 Celle  
[Kulle@nibe.de](mailto:Kulle@nibe.de)

In Mehrfamilienhäuser ist es aus Gründen des Feuchteschutzes häufig notwendig, Teile oder die gesamte Wohnung zu lüften. Dazu sind im Wohnungsbestand, aber auch im Neubau, häufig Abluftanlagen installiert. Die belastete Luft wird dabei entweder zentral, oder dezentral aus den Wohnungen ins Freie befördert. Dabei geht

der Wärmeinhalt der Luft verloren. Mit einer geeigneten Anlagentechnik kann diese Wärme zurückgewonnen werden.

Im Bestand findet man zumeist zentrale Abluftanlagen, bei denen die Luft aus allen Wohnungen in Sammelkanälen zusammengeführt und durch ein zentrales Gebläse, meist auf dem Dach, in die Umgebung angeblasen wird.

Bei einer Ablufttemperatur von 21°C (im Winter) und bis 23°C (im Sommer) ist der Wärmeinhalt dieser gesammelten Luft recht hoch und deckt den größten Teil den jährlichen Brauchwarmwasserwärmebedarf.

Der Vortrag stellt die Technik einer solchen zentralen Abwärmenutzung vor und rechnet an einem Beispiel das Einsparungspotenzial für die Wärmeerzeuger des Gebäudes durch. Grundlage sind ein Bestandsbau bzw. ein Neubau mit einer kontrollierten Wohnraumlüftung nach DIN 1946 T2. Hier können vom Gesamtwärmebedarf bis zu 40 % im Bestand und bis zu 60 % im Neubau aus der Abwärme zurückgewonnen werden.

Ausgehend von dem Gesamtwärmebedarf für Heizung und Warmwasser eines Bestandsgebäudes mit 10 Wohnungen und kann eine zentrale Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung im Bestandsgebäude um die 20 % Strom einsparen, im Neubau sogar um die 30 %. Im Neubau werden zumeist Lüftungsanlagen für die komplette Wohneinheit ausgelegt. Im Bestand findet man dagegen oft nur die Belüftung innenliegender Bäder nach DIN 18017 T3 vor. Hier ist die Stromeinsparung aufgrund geringerer Abluftmengen geringer. Vorteilhaft ist in jedem Fall die kleinere Wärmequelle. Weniger Sole- oder Luftwärmepumpen zusätzlich zur Abluftwärmepumpe.

Bei dezentralen Abluftwärmepumpen, welche wohnungsweise aufgestellt werden und neben der Lüftung auch Heizwärme und Warmwasser liefern, stehen die Vorteile des individuellen Wohnkomfort und der transparenten, von den Bewohnern individuell beeinflussbaren Betriebskosten im Fokus. Es werden keine Gemeinschaftseinrichtungen oder Außenflächen benötigt.

Der Vortrag stellt die Technik einer dezentralen Abluftwärmepumpe vor. Mit dem umweltfreundlichen Kältemittel Propan und den SG Ready-Funktionen (PV Ready-) des vielseitigen S-Serienreglers lassen sich die einzelnen Wohnungen im Neubau und auch im Bestand wegen des Kältemittels Propan besonders effizient und komfortabel beheizen. Hierbei sind Fortlufttemperaturen von bis zu -15°C üblich.

Der Vergleich von Wohnungen im Neubau und Bestand zwischen Abluftwärmepumpen und z. B. Gasetagenheizungen lassen sich Lösung für die „Wärmewende“ in dicht bebauten Ballungszentren für Mehrfamilienhäuser, Einzel-, Doppel- oder Reihenhäusern mit bis zu 40 % Kosteneinsparung gegenüber Gas realisieren.

**Stichwörter:**

Wärmewende, Abwärmenutzung, Abluftwärmepumpe, Einsparungspotenzial

**IV 2.03**

## **Bereitstellung von Prozesswärme mit Wärmepumpen und Fernwärme**

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

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

In den letzten Jahren hat die Nutzung von industrieller Abwärme als Wärmequelle für Hochtemperatur-Wärmepumpen an Bedeutung zugenommen [1], [2]. Dieser Beitrag behandelt einen neuen Ansatz im Bereich industrieller Wärmepumpen.

Im Fernwärme-Sektor werden die Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in bestehenden Netzen, z. B. zur Reduktion der Wärmeverluste, sukzessiv gesenkt. Fernwärmesysteme können dann keine Verbraucher mit höheren Temperaturen versorgen (z. B. über 120 °C). Eine mögliche Nutzung des Vorlaufs oder des Rücklaufs als Wärmequelle bietet ebenfalls ein Potenzial für Hochtemperatur-Wärmepumpen. Dann können Fernwärmebetreiber die Prozesswärmeversorgung von Betrieben übernehmen bzw. neue Kunden erschließen.

Zahlreiche Einflussgrößen (wie z. B. verschiedene Kältemittel, Schaltungsarten, Wärmequellen- und Wärmesenken-Temperaturen) beeinflussen die Heizleistung bzw. die Effizienz von Hochtemperatur-Wärmepumpen. Deswegen ist es wichtig, eine optimale Wärmepumpenlösung für die jeweiligen Randbedingungen zu finden.

Um dieses Problem zu lösen, wurden verschiedene Kältemittel untersucht, darunter natürliche Kältemittel (R600, R601a, R744) und HFO-Kältemittel (R1224yd(Z), R1233zd(E), R1234ze(E), R1336mzz(Z)). Weiterhin sind Verbesserungen der einfachen Prozessführung durch modifizierte Schaltungen (z. B. interner Wärmeübertrager, mehrstufige Verdichtung und Zwischenkühlung mittels Expansion) zu erreichen. Die quellenseitige Eintrittstemperatur der Wärmepumpe beträgt 90 °C (typische Vorlauftemperatur für moderne Fernwärmenetze). Die Zieltemperatur der Wärmeversorgung liegt bei 140 °C (z. B. Dampfbereitstellung). Die Temperaturspreizungen wurden ebenfalls systematisch variiert. Die Modellierung und Simulation aller Systeme erfolgte mit Programm EBSILON [3]. In den Untersuchungen wurde die Leistungszahl als wesentliche Kenngröße bestimmt. Dies ermöglicht wiederum eine optimale Vorauswahl der Wärmepumpen. Diese systematischen Untersuchungen zeigen die funktionalen Verläufe der Leistungszahlen, was ein besseres Verständnis der Problematik fördert. Die Ergebnisse liefern der Fernwärmebranche und der Industrie wertvolle Informationen, um den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen in Fernwärmegebieten zu fördern.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Hochtemperatur, Industrie, Fernwärme, Simulation, Leistungszahl, Parametervariation

Literaturverzeichnis:

- [1] Arpagus, C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale, VDE VERLAG GMBH, Berlin Offenbach, 2019.
- [2] Höges, C.; Roskosch, D.; Brach, J.; Vering, C.; Venzik, V.; Müller, D.: Investigation of the Interactions between Refrigerant. Energy Technol. 2023, 11, 2201295
- [3] STEAG Energy Services GmbH, 2022. EBSILON Professional 16.

IV 2.04

## Dauerfeldmessung der Lärmbelastung durch Luftwärmepumpen

### Finale Ergebnisse von 5 Anlagen

**Björn Nienborg\* , Siripak Sangsinsorn, Danny Günther**

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

Der zunehmende Einsatz von Luft-Wasser-Wärmepumpen zur Defossilisierung der Wärmeversorgung von Gebäuden führt zu einer potenziell erhöhten Lärmbelastung der Bevölkerung. Da Nachbarschaftslärm in Deutschland von über einem Viertel der Bevölkerung als problematisch wahrgenommen wird, muss auf diese Thematik ein besonderes Augenmerk gelegt werden [1]. Im Rahmen des Fördervorhabens "WP-QS im Bestand" werden daher an mehreren Wärmepumpenanlagen im Feld für die Dauer von mindestens einem Jahr Schallmessungen durchgeführt und die real auftretende Lärmbelastung im Jahresverlauf so erfasst.

Das grundlegende Vorgehen sowie erste Ergebnisse einzelner Anlagen wurden bereits auf den DKV-Tagungen 2020 und 2021 vorgestellt. Nun sollen gesammelte Erkenntnisse aus 5 Anlagen über je ein Jahr präsentiert werden.

Die Bewertung erfolgt dabei primär anhand der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm, [2]), welche Immissionsrichtwerte und eine Anleitung zu deren Ermittlung vorgibt. Zusätzlich werden psychoakustische Größen wie die Lautheit oder Schärfe der Betriebsgeräusche bewertet, da diese gemäß vorausgegangenen Studien maßgeblich zur empfundenen Lästigkeit beitragen.

**Stichwörter:**

Luft-Wärmepumpe, Schall, Akustik, Lärm, Immissionen, Lästigkeit

**Danksagung:**

Die vorgestellten Arbeiten werden im Rahmen des Projekts „WP-QS im Bestand“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert (FKZ 03EN2029A).

[1] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20210101-1>

[2] [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund\\_26081998\\_IG19980826.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwbund_26081998_IG19980826.htm)

IV 2.05

## Auslegung einer Propan Wärmepumpe

### Systemoptimierung mittels generischer Optimierung der Dampfeinspritzung

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

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

Getrieben durch die regulatorische Anforderungen müssen Alternativen für klassische Kältemittel gefunden werden. Propan ist eine vielversprechende Alternative für den Betrieb einer Wärmepumpe. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass sich Anfang dieses Jahres die europäische Wissenschaftsgemeinschaft in einem Positionspapier für Propan aussprach, als auch durch den letztjährigen Durchbruch des Fraunhofer Instituts eine Propanbasierende Wärmepumpe mit weniger als 150g Beladung bei 12.8kW Wärmeleistung zu entwickeln.

Im ersten Schritt wird in dieser Arbeit eine Wärmepumpe mit Propan mit Hilfe der kommerzielle Simulationssoftware GT-SUITE ausgelegt, basierend auf einem vorhandenen System mit R410A. Dabei wird versucht ein Großteil der vorhandenen Komponenten zu erhalten.

Dampfeinspritzverdichter werden in Wärmepumpensystem mit hohen Druckverhältnissen und erweiterten Umgebungsbedingungen verwendet, um den COP des Systems zu erhöhen und die Betriebskosten zu senken. Im zweiten Schritt dieser Arbeit eine ganzheitliche Systemoptimierungsmethodik verwendet, bei der die optimale geometrische Position der Dampfeinspritzung bestimmt wird. Somit werden mögliche dynamische System- und Verdichterinteraktionen mitberücksichtigt.

**Stichwörter:**

Kompressor, Wärmepumpe, Propan, 1D System Simulation, Optimierung

IV 2.06

## Sicherer Betrieb einer 12-kW-Propan-Wärmepumpe

### Sicherheitsanalyse von kältemittelreduzierten Sole-Wasser-Wärmepumpen mit R290

Lukas Joos<sup>1\*</sup>, Thore Oltersdorf<sup>1</sup>, Martin Kreutz<sup>1</sup>, Philipp Hügenell<sup>1</sup>,  
Clemens Dankwerth<sup>1</sup>, Timo Methler<sup>1</sup>, Hannes Fugmann<sup>1</sup>, Lena Schnabel<sup>1</sup>

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

Die europäische Umsetzung des Montrealer Protokolls, die F-Gas-Verordnung, schränkt die Verwendung von Kältemitteln mit hohem GWP ein. Daher werden Kältemittel mit niedrigem GWP, insbesondere R290, zum Standard auf dem wachsenden Wärmepumpenmarkt. Die Produktionskapazitäten und Sicherheitslösungen müssen weiterentwickelt werden, um das prognostizierte Wachstum zu unterstützen. In diesem Beitrag

werden die sicherheitsorientierten Ergebnisse zweier Forschungsprojekte zu kältemittelreduzierten Kältekreisläufen (LC150) und Wärmepumpen-Lösungen für den Austausch von Gasetagengeräten (LCR290) vorgestellt, insbesondere Maßnahmen zur Sicherstellung einer unkritischen Propanverteilung im Aufstellraum bei Propanleckagen.

Im Rahmen dieser Projekte wurden am Fraunhofer ISE verschiedene Komponenten kombiniert, um Wärmepumpenkreisläufe mit niedriger Kältemittelfüllmenge zu realisieren. Die derzeit besten Lösungen haben eine spezifische Heizleistung  $<10 \text{ g/kW}$  mit einem SCOP (ErP)  $>4,5$  und einer maximalen Heizleistung von 12 kW.

Die Ergebnisse wurden als Grundlage für die Gehäuseabmessungen und die freizugebende Kältemittelmenge verwendet. Zum Zweck einer sicheren und zuverlässigen R290-Ausströmung im Leckagefall wurde ein spezieller Teststand entwickelt, der in diesem Beitrag beschrieben wird. Der Teststand erlaubt es, Leckagen gemäß der Norm EN60335-2-40 darzustellen. Um individuelle Gehäuseansätze zu bewerten, wurden zwei modulare und anpassbare Gehäusemodelle erstellt. Die Gehäusemodelle sind in Weißwarenabmessungen und Gasetagengeräte-Abmessungen verfügbar. Eine Vielzahl von R290-Sensoren in und um die Gehäusemodelle ermöglichte es, Verteilungskarten der R290-Konzentration auf der Grundlage der freigesetzten Ladung, der Gehäuselösungen und der Umgebungsparameter wie Luftwechselrate und Temperatur zu erstellen.

**Stichwörter:**

Propan, Wärmepumpen, Kältemittel, Füllmengenreduzierung, Sicherheit

IV 2.07

## Kondensatordesign in einem thermischen Speicher für eine R290 Wärmepumpe

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

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

<sup>2</sup> TU Dresden, Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,  
Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland  
[christiane\\_sabine.thomas@tu-dresden.de](mailto:christiane_sabine.thomas@tu-dresden.de)

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

Fokus dieses Beitrags liegt dabei auf der Wärmepumpe bzw. dem Kondensator, der in einem thermischen Speicher für die Heizwärme- und Brauchwasserbereitstellung integriert ist. Hierfür wurde zunächst eine Literaturrecherche zum Kondensationsverhalten von R290 in Rohren durchgeführt und daraus ein mögliches Design des Kondensators abgeleitet. Dieses Design wurde in ein Wärmepumpenmodell übertragen, das in Modelica abgebildet ist. Im Beitrag werden die Simulationsergebnisse des füllmengenreduzierten Wärmeübertragers im Speicher dargestellt. Fokus liegt hierbei auf den Temperaturen im Speicher für die Heizwärme- und Brauchwasserbereitstellung und der potenziellen Füllmengenreduktion im Vergleich zum bisherigen System.

**Stichwörter:**

Propan, Wärmepumpen, Kältemittel, Füllmengenreduzierung, Kondensation

IV 2.08

## Entwicklung einer kompakten Hochtemperatur- Wärmepumpe

**Dr.-Ing. Karl Steinjan<sup>1\*</sup>, Dipl.-Ing. Dieter Rochhausen<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institut für Luft und Kältetechnik gGmbH, Hauptbereich Kälte- und Wärmepumpentechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland

[Karl.Steinjan@ilkdresden.de](mailto:Karl.Steinjan@ilkdresden.de)

<sup>2</sup> Rochhausen Kältesysteme GmbH, Hopfgartener Str. 38c, 09430 Drebach, Deutschland

[Dieter.Rochhausen@rochhausen.eu](mailto:Dieter.Rochhausen@rochhausen.eu)

Das Aufheizen von Prozesswasser für Wasch-, Reinigungs- und Desinfektionsvorgänge wird bei kleinen Anlagen heute meist rein elektrisch durch einen entsprechenden Heizstab oder durch Heizer mit fossilen Brennstoffen realisiert. Häufig wird das Prozesswasser anschließend einfach als Abwasser entsorgt. Des Weiteren entweichen oft mit dem Reinigungsgut weitere Wärmemengen an die Umgebungsluft.

Zur effizienteren Nutzung dieser Abwärme wurde im Rahmen eines geförderten Projektes eine kompakte Hochtemperatur-Wärmepumpe auf Basis natürlicher und brennbarer Kältemittel entwickelt. Das entwickelte Funktionsmuster erreicht dabei Temperaturen von ca.100°C und eine Leistung von ca. 5 kW. In der Veröffentlichung werden die Herausforderungen der Auslegung und der Entwicklung dargestellt. Insbesondere wird auf die Thematik Füllmenge und innere Wärmeübertrager eingegangen. Auch werden einige Erkenntnisse des Sicherheitskonzeptes, sowie des Thermomanagements erläutert. Abschließend werden auch einige Messergebnisse, sowie die Schwierigkeiten der Entwicklung präsentiert.

**Stichwörter:**

Wärmepumpe, Hochtemperatur, natürliche Kältemittel, Isobutan

IV 2.09

## Latest Update on PFAS – Current situation after the consulting deadline

**Eliza Consoli**

EFCTC Sector Group

IV 2.10

## Wärmepumpensysteme mit Latentwärmespeicher

### Effizienzvergleich von Wärmepumpen mit integriertem Latentwärmespeicher für den flexiblen Einsatz im Stromnetz

**Benjamin Lukas, Michael Barton, Christian Schweigler**

CENERGIE - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere  
Hochschule München University of Applied Sciences, Energie- und Gebäudetechnik,  
Lothstr. 34, 80335 München  
[Benjamin.lukas0@hm.edu](mailto:Benjamin.lukas0@hm.edu)

Wärmepumpen in Verbindung mit thermischen Speichern ermöglichen die zeitliche Entkopplung von Wärmeerzeugung und Wärmeverbrauch. Durch die Flexibilität der Wärmepumpen soll die Sektorkopplung der Sektoren Strom und Wärme unterstützt und das Stromnetz entlastet werden. Latentwärmespeicher als thermische Speicher bieten gegenüber herkömmlichen Wärmespeichern Vorteile, insbesondere beim Einsatz in Verbindung mit Wärmepumpen. Latentwärmespeicher eignen sich aufgrund der konstanten Temperaturverhältnisse bei der Be- und Entladung besonders gut für die Integration in den internen Kreislauf der Wärmepumpe, der durch die Temperaturniveaus von Verdampfung und Kondensation bestimmt wird.

Für die Integration von Latentwärmespeichern in Wärmepumpensysteme gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zunächst muss man unterscheiden, ob der Latentwärmespeicher in den internen Kältemittelkreislauf oder in den externen Heizwasserkreislauf integriert wird. Je nach Bauart des Latentwärmespeichers können auch interne und externe Anschlussoptionen miteinander verbunden werden.

Unterschiedliche Konzepte zur Integration der Latentwärmespeicher in die Wärmepumpenanlage sowie die kältetechnische Umsetzung werden vorgestellt. Die Konzepte werden im Hinblick auf unterschiedliche Aspekte, wie beispielsweise Anlageneffizienz, Bereitstellung von Flexibilität und Betriebscharakteristik, miteinander verglichen sowie der systemische Einfluss auf den COP beurteilt. Die Betriebsflexibilität der Systeme wird insbesondere im Hinblick auf die Nutzung von volatilem erneuerbarem Strom untersucht.

Die Untersuchung konzentriert sich sowohl auf die Energieeffizienz als auch auf die Betriebsflexibilität und die gegenseitige Abhängigkeit dieser beiden Kriterien. Der Betrieb und die Energieeffizienz der Wärmepumpensysteme werden auf der Grundlage von Simulationsrechnungen über den Zeitraum einer Heizperiode analysiert.

**Stichwörter:**

Wärmepumpensysteme, Latentwärmespeicher, Smart Grid

IV 2.11

## Wärmepumpenheizsysteme mit mehreren Wärmequellen

### Regelstrategie für ein System mit einem solar regenerierten Erdkollektorwärmespeicher und Außenluft als Wärmequellen

**Annemarie Lauffer, Christian Schweigler**

CENERGIE - Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere  
Hochschule München University of Applied Sciences, Energie- und Gebäudetechnik,  
Lothstr. 34, 80335 München  
[annemarie.lauffer@hm.edu](mailto:annemarie.lauffer@hm.edu)

Die Energieeffizienz von Wärmepumpenheizungen wird maßgeblich beeinflusst durch das Temperaturniveau der Umgebungswärmequelle. Durch den Einsatz von Erdsonden, flächige Erdkollektoren oder Grundwasser

werden deutliche höhere Jahresarbeitszahlen im Vergleich zu Luft-Wärmepumpen erreicht. Ist die Nutzung dieser geothermischen Wärmequellen durch die lokalen Gegebenheiten oder die Größe des Grundstücks beschränkt, kann stattdessen ein Wärmepumpenheizsystem mit gebäudeintegrierten Wärmequellen eingesetzt werden.

Ein fassadenintegrierter Solar-Massivabsorber regeneriert einen Untergrund-Wärmespeicher unter dem Gebäude, der als Wärmequelle für die Wärmepumpenheizung genutzt werden soll und mit Hilfe eines Erdkollektor-Wärmeübertragers thermisch aktiviert wird. Die Größe des Kollektors ist auf die Größe des darüberliegenden Gebäudes begrenzt, so dass die Speicherkapazität auch bei hohem Dämmstandard des Gebäudes in der Regel nicht ausreicht, um als saisonaler Speicher die gesamte Heizperiode abzudecken. Deshalb wird der Speicher, durch wiederholtes Regenerieren während der Heizperiode, als Mittelfrist-Speicher betrieben.

Um den erforderlichen Beitrag des Untergrundwärmespeichers zu begrenzen, wird zusätzlich ein Außenluft-Wärmeübertrager in das System eingebunden. Die Regelstrategie für den Einsatz der drei Wärmequellen wird unter folgenden Aspekten optimiert: Wärmequellen mit hoher Temperatur werden vorrangig eingesetzt; die im Erdreich gespeicherte Wärme wird für Betriebsphasen mit sehr niedriger Umgebungstemperatur vorgehalten; der Untergrundwärmespeicher muss mit Hilfe der Wärmeerträge der Thermowand regeneriert werden.

Die jährliche Systemeffizienz wird mit einem herkömmlichen Luft-Wärmepumpensystem verglichen.

**Stichwörter:**

Wärmepumpenheizsysteme, Erdkollektorspeicher, Solar-Massivabsorber, Regelstrategie,

**IV 2.12**

## **Flusswasser-Wärmepumpe mit latentem Wärmeentzug durch Vakuum-Flüssigeis-Technologie**

**Christoph Steffan<sup>1</sup>, Mathias Safarik<sup>\*1</sup>, Thomas Gubsch<sup>2</sup>, Dieter Leßmann<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup> Hochschule Zittau/Görlitz, Theodor-Körner-Allee 16, 02763 Zittau

<sup>3</sup> Dieter Leßmann, Brandenburgische Technische Universität, Konrad-Wachsmann-Allee 6, 03013 Cottbus

Viele Städte und Siedlungen liegen in der Nähe von Gewässern. Seen, Flüsse und das Meer sind in vielen Fällen eine leistungsfähige und kostengünstig zu erschließende Wärmequelle für Wärmepumpen auch großer Leistung. Bisherige Hydrothermie-Wärmepumpenanlagen können jedoch aufgrund der Einfriergefahr im Verdampfer bei niedrigen Wassertemperaturen nicht betrieben werden. Damit wird die Verfügbarkeit ausgerechnet in der Zeit des höchsten Heizbedarfs eingeschränkt.

In einer Vakuum-Flüssigeisanlage wird das Tripelpunktverfahren umgesetzt. Gefrierende Wassermoleküle stellen die Energie zur Verdampfung benachbarter Wassermoleküle bereit. Der Wasserdampf wird mittels Turboverdichter auf ein höheres, für die nachgeschaltete Stufe der Wärmepumpenkaskade nutzbares Temperaturniveau verdichtet. Durch den Wärmeentzug entsteht im Verdampfer ein pumpfähiges Wasser-Eis-Gemisch (Flüssigeis), das in das Gewässer zurückgeleitet wird. Das Gewässer bleibt somit selbst bei Wassertemperaturen um den Gefrierpunkt als leistungsfähige und effiziente Wärmequelle nutzbar. Gleichzeitig wird die zwischen Gewässer und Wärmepumpe zirkulierende Wassermenge signifikant reduziert.

Im Rahmen des Projektes AQVA HEAT 1 wurde auf dem Gelände der Stadtwerke Zittau eine Vakuumeisanlage aufgebaut und im Herbst 2022 der Betrieb zur Wärmeengewinnung aus dem Fluss Mandau erfolgreich erprobt. Neben den technologischen Fragestellungen wurden dabei auch die ökologischen Auswirkungen auf das Gewässer untersucht. Im Beitrag werden die Erfahrungen aus dieser Kurzzeit-Demonstration vorgestellt.

**Stichwörter:**

Hydrothermie, Wärmepumpe, Gewässer, Flüssigeis

#### IV 2.13

## Techno-ökonomische Analyse der Integration von Groß-Wärmepumpen in Mitteltiefe Geothermie Systeme

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

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

Durch die derzeitige energiepolitische Lage und klimapolitischen Ziele besteht besonders im Wärmesektor enormer Handlungs- und Innovationsbedarf, weshalb erneuerbare und kostengünstige Projekte wie die Nutzung Mitteltiefer Geothermie mehr in den Fokus rücken. Dabei können Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen ein entscheidender Faktor für die Dekarbonisierung des Wärmesektors sein. Denn wenn das geothermische Potential für eine Einspeisung in ein Fernwärmenetz zu gering ist, kann es durch Wärmepumpen klimafreundlich angehoben und somit nutzbar gemacht werden. Die unterschiedlichen geologischen Bedingungen machen es schwierig eine allgemeingültige Aussage über die Wirtschaftlichkeit oder technische Umsetzbarkeit in Deutschland zu treffen. Daher werden in dieser Studie zwei sich unterscheidende geographische Bereiche untersucht. Zum einen das Molassebecken nördlich von München wo mit Temperaturen zwischen 30 °C und 80 °C und sehr hohen Schüttungen von bis zu 170 L/s zu rechnen ist. Zum anderen der Buntsandstein in Nordbayern, bei welchem der Fokus, durch niedrige Schüttungen und Temperaturen eher auf kleinen Fernwärmenetzen liegt. Um das Potential der Kombination aus Wärmepumpe und Mitteltiefer Geothermie einordnen zu können, wurden im niedrigen Leistungsbereich techno-ökonomische Vergleiche zu Luft-Wasser-Wärmepumpen und im höheren Leistungsbereich zu BHKW angestellt. Ausgehend von einem Basisszenario werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss auf die Wärmegestehungskosten zu ermitteln. Zusätzlich wird auch das Teillastverhalten der Wärmepumpen berücksichtigt, das durch empirische Werte einer Versuchsanlage in die Modelle implementiert werden kann (siehe Jeßberger et al. [1, 2]).

Die Untersuchungen legen den Fokus auf die Wärmebereitstellung und nicht auf standortabhängigen Wärmebedarfe. So können auf Basis von den Ergebnissen allgemeingültige Aussagen getroffen werden unter welchen geologischen Bedingungen sich welche Wärmepumpentechnik rentiert.

#### Literatur:

1. J. Jeßberger, F. Heberle, and D. Brüggemann: *Integration of high temperature heat pumps into geothermal systems*, in EGC 2022 – European Geothermal Congress.
2. J. Jeßberger, F. Heberle, and D. Brüggemann: *Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen in erneuerbare Energiesysteme*, in DKV-Tagungsband 2022, AA IV 19

#### Stichwörter:

Mitteltiefe Geothermie, Großwärmepumpen, Techno-ökonomische Analyse, Fernwärme

#### IV 2.14

## Feldstudie zur Effizienzanalyse von Wärmepumpen im EFH-Bestand

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

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Solare Energiesystems ISE, Freiburg  
[danny.guenther@ise.fhg.de](mailto:danny.guenther@ise.fhg.de)

Gemäß der Strategie der Bundesregierung zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor und den damit verbundenen erfolgten und geplanten Maßnahmen erfahren Wärmepumpen derzeit einen rasanten Hochlauf. Während die jährlichen Absatzzahlen bis 2019 moderat auf 86000 Stück anstiegen, hat sich der Jahresabsatz bis 2022 auf 236000 Wärmepumpen fast verdreifacht. Hiervon waren drei Viertel der Wärmepumpen bereits für die Modernisierung vorgesehen. In diesem Anwendungsbereich sind die Akteure mit einer komplexeren Ausgangssituation (Gebäudeheizlast, Art und Dimensionierung der Wärmeübergabesysteme, bestehende Wärmeerzeuger usw.) die eine aufwendigere Planung nach sich zieht bis hin zu teils grundlegenden Vorbehalten gegenüber dieser Technologie konfrontiert.

Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „WPsmart im Bestand“ (FKZ: 03ET1272A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-smart-im-bestand.html>) wurde der unter ökologischen Gesichtspunkten zweckmäßige Einsatz von Wärmepumpen im EFH-Bestand im Rahmen einer breit angelegten Feldstudie demonstriert. Im BMWK-geförderten Nachfolgeprojekt „WP-QS im Bestand“ (FKZ: 03EN2029A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-qs-im-bestand.html>) wird die Messung unter Berücksichtigung weiterer Forschungsfragen (u.a. Schallbelastung durch Außenluft-Wärmepumpen und PV-Eigenstromnutzung) fortgeführt. Der Hauptfokus liegt weiterhin auf der Analyse von Effizienz und Betriebsverhalten unter Berücksichtigung der jeweils individuellen Voraussetzungen. Bis mindestens Mitte 2024 werden bis zu 75 Wärmepumpen (ca. 1/3 aus „WPsmart im Bestand“ mit teils neuen Wärmepumpen und ca. 2/3 neue Messobjekte) untersucht. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen werden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und sind in Gebäuden der Baujahre 1826 bis 2001 installiert. Der Zustand der Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert und als Wärmeübergabesysteme werden Heizkörper, Flächenheizungen oder Kombinationen aus beiden eingesetzt. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe oder Ventilator) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. In den Hydraulikkreisläufen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet.

Der Konferenzbeitrag umfasst die Effizienzanalyse einer Zwischenauswerteperiode, bspw. den Zeitraum Juli 2022 bis Juni 2023. Dabei stehen die Jahresarbeitszahlen und die direkt quantifizierbaren Effizienzeinflüsse, wie die Systemtemperaturen und die erforderlichen Hilfsenergien, im Vordergrund. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der Baualter der Gebäude sowie den installierten Wärmeübergabesystemen präsentiert. Die Analyse der energetischen Qualität der Gebäude sowie die vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen wird zum Zeitpunkt der Konferenz noch nicht abgeschlossen sein. Eine Abgrenzung zu den Ergebnissen aus „WPsmart im Bestand“ erfolgt u.a. durch die Untersuchung von Wärmepumpen gemäß Stand der Technik (vorher von 2006 bis 2017). Im aktuellen Projekt sind 65 % der Wärmepumpen zwischen 2020 und 2022 installiert worden.

IV 2.15

## Betrieb von Wärmepumpen in der Gebäudetechnik

Luca Vöckel<sup>1\*</sup>, Prof. Dr. Christian Fieberg<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Westfälische Hochschule, Master Systems Engineering in der Umwelt und Gebäudetechnik,  
Neidenburger Str. 43, 45897 Gelsenkirchen, Deutschland  
[lucavoeckel@web.de](mailto:lucavoeckel@web.de)

<sup>2</sup> Westfälisches Energieinstitut der Westfälischen Hochschule,  
Neidenburger Str. 43, 45897 Gelsenkirchen, Deutschland  
[christian.fieberg@w-hs.de](mailto:christian.fieberg@w-hs.de)

Aufgrund der Energiewende und den steigenden Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung gewinnt der Betrieb von Wärmepumpen in Gebäuden immer mehr an Bedeutung. Inzwischen existiert eine Vielzahl an Wärmepumpen-Systemen, die unterschiedliche Vor- und Nachteile sowie Einsatzmöglichkeiten aufweisen. Sofern die Installation einer Wärmepumpe für den Wohngebäudesektor in Betracht gezogen wird, muss eruiert werden, welches System sowohl ökologisch als auch ökonomisch für das Bauvorhaben am sinnvollsten ist. Hierfür wurde eine Bewertungstool entwickelt, das den Einsatz der unterschiedlichen Wärmepumpensysteme bewertet und auch Nutzern mit wenig Expertise eine Entscheidungshilfe ermöglicht. Für eine möglichst ganzheitliche Betrachtung können verschiedene Szenarien mit Hilfe des Bewertungstools überprüft werden. Hierzu können Indikatoren wie Standortdaten, Gebäudedaten, Parameter für die Trinkwassererwärmung, die Systemtemperaturen der Heizung und die Betriebsweise der Wärmepumpe im Tool variiert werden. Die Ergebnisse des Bewertungstools zeigen, wie die unterschiedlichen Nutzungsanforderungen sich auf die Jahresarbeitszahl und den Energiebedarf auswirken. Zusätzlich werden Investitions- und Verbrauchskosten für die unterschiedlichen Szenarien abgeschätzt und berechnet. Bei der ökologischen Bewertung wird der Fokus auf die Betrachtung des TEWI-Wertes gelegt, um den Einfluss von verschiedener Kältemittel im Lebenszyklus der Wärmepumpe zu berücksichtigen.

IV 2.16

## Efficient booster/basic heat pump concepts for retrofit buildings

Gerald Zotter<sup>\*1,2</sup>,

<sup>1</sup> AEE Intec, Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf, Austria  
[gerald.zotter.gz@gmail.com](mailto:gerald.zotter.gz@gmail.com)

<sup>2</sup> FH Joanneum, Energie-Mobilität und Umwelt, S Werk-VI-Straße 46, 8605 Kapfenberg, Austria

In order to force a phase-out of gas, for example, about 400,000 gas-floor boilers would have to be replaced in Austria's urban areas in a short time. In addition to district heating expansion, therefore, basic/booster heat pump concepts in combination with minimally invasive thermal refurbishment of the old multi-story building stock in urban areas will necessarily be spread over large areas. Air-source heat pumps are still easy and inexpensive to install, especially in urban areas. This is one reason why efficient concepts must be used to avoid high electricity consumption even on nice winter days. Basic/booster heat pumps with intermediate circuits are ideal for this minimally invasive renovation without the need to change the water-bearing heating system.

This paper shows, on the one hand, a comparison of one-stage, two-stage and basic/booster heat pumps by means of simulation in EES and gives a design guideline for the latter concepts. Particularly, the choice of the right temperature level of the intermediate heating circuit between basic and booster heat pumps is important to achieve high coefficients of performance. Likewise, the basic heat pump must be properly sized to allow high source extraction rates and thus high overall coefficients of performance. In this context, increasing the liquid fraction at the evaporator inlet of the booster HP is essential for its design. All this is explained within temperature vs. enthalpy diagrams showing the impact of the external circuits on the heat pumps cycles.

Basic/booster heat pump concepts can achieve over 25 % higher coefficients of performance compared to singlestage central heat pumps. In particular, with a buffer tank, the higher outdoor air temperatures can be shifted from day to night and used with the booster heat pumps without operating the base heat pumps, which is why of about 10 % higher coefficients of performance can be achieved than with a two-stage system. This is also helpful to avoid noise pollution at night from the air source fan.

Due to the energetic advantages of the basic/booster heat pump concept, it represents an energetically sensible substitution technology for the gas boiler in renovation projects, provided that it is designed correctly.

**Keywords:**

Simulation, medium pressure level, design, Lorenz process, two-stage, propane

IV 2.17

## 2 MW steam-generating heat pump concept for a nutrition firm

Frédéric Bless<sup>1\*</sup>, Cordin Arpagaus<sup>1</sup>, Ingolf Gummin<sup>2</sup>, Andreas Keller<sup>2</sup>, Stefan Bertsch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> OST, Ostschweizer Fachhochschule, Werdenbergstrasse 4, CH-9471 Buchs SG  
[frederic.bless@ost.ch](mailto:frederic.bless@ost.ch), [cordin.arpagaus@ost.ch](mailto:cordin.arpagaus@ost.ch), [stefan.bertsch@ost.ch](mailto:stefan.bertsch@ost.ch)

<sup>2</sup> DSM Nutritional Products AG, Hauptstrasse 4, 4334 Sisseln  
[Ingolf.Gummin@dsm.com](mailto:Ingolf.Gummin@dsm.com)

This paper describes the design and process integration of a 2.3 MW steam-generating heat pump in the distillation process of the company DSM Nutritional Products AG. An open-loop cycle concept is presented to generate steam at sub-atmospheric pressure lower which is then compressed to the desired pressure. The heat sink is steam at 1.74 bar (115 °C saturated temperature), and the heat source temperature is around 45 °C. The system can deliver a heating capacity of 2.3 MW with an estimated COP of around 3.3, making it an efficient and sustainable solution for industrial heating applications. The paper provides a detailed description of the whole concept as well as possible components and discusses their operational parameters and performance characteristics. The implementation of this system has the potential to significantly reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions while providing a reliable and sustainable source of heat for industrial applications.

**Keywords:**

Heat pump, steam-generating heat pump, industrial heat pump, distillation

IV 2.18

## Fernwärmeerzeugung mit mehrstufiger Turboverdichter-Großwärmepumpe

Dominik Morawetz

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

Mit diesem Projekt unterstützt Johnson Controls eines der größten, deutschen Energieunternehmen, die Nutzung von erneuerbaren Energien auszubauen und mittelfristig aus der Verwendung von Kohle und fossilen Brennstoffen als Energieträger auszusteigen. Dies hilft dabei, das gesetzte Ziel der Klimaneutralität zu beschleunigen. Die Großwärmepumpe wurde mit einem Vorlauf von etwa 1,5 Jahren geplant und wird im Jahr 2023 ausgeliefert und in Betrieb genommen. Durch die Nutzung der durch die Großwärmepumpe erzeugten

Fernwärme, werden jährlich etwa 15.000 Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart. Weiterhin wird der Anteil an klimaneutral erzeugter Fernwärme am Standort der Wärmepumpe erheblich gesteigert.

Die Großwärmepumpe nutzt einen 4-stufigen Turboverdichter zur klimaschonenden Fernwärmeerzeugung für Vorlauftemperaturen bis zu +90°C. Dabei wird ein am Standort, fließender Nebenfluss des Rheins als Wärmequelle genutzt. Diese Wärmequelle wird direkt mittels Flusswasser-Abzweigung von der Großwärmepumpenanlage genutzt. Die Heizleistung der Großwärmepumpe beträgt > 20 MW th.

Im Vortrag wird neben der Vorstellung der Großwärmepumpe sowohl auf die Sekundärsysteme Flusswasser-Rücklauf & Fernheizwasser eingegangen als auch die Herausforderungen in der Abwicklung dieses Projektes erläutert.

#### IV 2.19

## Industriewärmepumpe für Temperaturen >100°C

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

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

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

Der ThermBooster ist solch eine industrielle Hochtemperaturwärmepumpe die Prozesswärme als Dampf oder Heißwasser zur Verfügung stellen kann. Es werden verschiedene realisierte und in der Umsetzung befindliche Projekte präsentiert und mit Daten aus dem hauseigenen Hochtemperaturprüfstand untermauert.

#### Stichwörter:

Industriewärmepumpe, Hochtemperaturwärmepumpe, Dampf, Heißwasser

#### IV 2.20

## Dekarbonisierungspotenzial durch dampfbereitstellende Wärmepumpen

Hannah Teles de Oliveira<sup>1\*</sup>, Sebastian Benkert<sup>1</sup>, Ursula Wittstadt<sup>1</sup>, Lydia Dorka<sup>1</sup>, Dr. Stefan Henninger<sup>1</sup>  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac<sup>2</sup>

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

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

Aus den Daten der AG Energiebilanzen kann für das Jahr 2020 der Prozesswärmebedarf der Industrie mit ca. 440 TWh beziffert werden. Hierbei werden für die Wärmebereitstellung in der Industrie in Deutschland jährlich ca. 107 Mt CO<sub>2</sub> freigesetzt [1-3]. Während bei Temperaturen oberhalb 500°C verschiedene Versorgungskonzepte verfolgt werden, wird bis zu einer Temperatur von 500°C in vielen Anwendungsbereichen Prozessdampf als Wärmeträgermedium eingesetzt. Eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung von Prozesswärme bis 200°C stellen dampfbereitstellende Wärmepumpen dar. Hierbei sind die Anwendungsbedingungen sehr breit gestreut hinsichtlich Dampfdruck, Temperatur, Leistung und benötigter Temperaturhub, entsprechend finden

sich auch keine Standard-Dampf-Wärmepumpen-Lösungen in den Produktportfolios der Anbieter wieder. Um den Entwicklungsfokus und damit den Ausbau zu beschleunigen sowie insbesondere für kleinere Anlagen von Skaleneffekten zu profitieren, wären typische Anwendungsfelder und damit Randbedingungen sehr hilfreich. Ein häufiger Treiber zum Austausch der Wärmebereitstellung ist für Industrieunternehmen die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen. Daher wird in diesem Beitrag der Fokus auf das Dekarbonisierungspotential durch den Einsatz von dampfbereitstellenden Wärmepumpen gelegt.

Im Folgenden wird der Dampfbedarf für industrielle Prozesse in Deutschland mit Hilfe der Bottom-Up Methodik ermittelt. Um zu zeigen, in welchen Branchen bzw. Prozessen sich die Umstellung auf eine Wärmepumpe aus ökologischer Sicht lohnt, werden hier neben dem Energiebedarf auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Tonne Endprodukt dargestellt. Für besonders CO<sub>2</sub>-intensive Prozesse wird das Dekarbonisierungspotenzial für verschiedene Szenarien der Stromerzeugung sowie für unterschiedliche Integrationspunkte berechnet.

**Stichwörter:**

Industriewärmepumpen, Dampfbedarf, Dekarbonisierung, CO<sub>2</sub>-Emissionen

**Literaturverzeichnis:**

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (Hrsg), Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken, Detaillierte Anwendungsbilanzen der Endenergiesektoren für 2019 und 2020 sowie zusammenfassende Zeitreihen zum Endenergieverbrauch für die Jahre 2010 bis 2020, unter Mitarbeit von Hans Georg Buttermann und Uwe Maaßen, 2021
- [2] Umweltbundesamt (Hrsg), CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe, Aktualisierung 2022, unter Mitarbeit von Kristina Jührich. Dessau-Roßlau, 2022
- [3] Umweltbundesamt (Hrsg), Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021, unter Mitarbeit von Petra Icha, Thomas Lauf und Gunter Kuhs. Dessau-Roßlau, 2022

IV 2.21

## Optimierung eines Wärmepumpensystems für Kälte und Dampf

Johannes Riedl<sup>1</sup>, Verena Sulzgruber<sup>1</sup>, Reinhard Jentsch<sup>1</sup>, Felix Hubmann<sup>1</sup>, Bernd Windholz<sup>1</sup>, Veronika Wilk<sup>1\*</sup>

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

Kompressionswärmepumpen spielen bei der Dekarbonisierung von industriellen Prozessen eine wesentliche Rolle, da sie Prozesswärme mit hoher Temperatur (100-200°C) liefern können und dabei die CO<sub>2</sub>-Emissionen signifikant verringern. Als Wärmequelle können Abwärmeströme aus dem Produktionsprozess, wie zum Beispiel erwärmtes Kühlwasser oder Abgase oder Prozesse, die aktiv gekühlt werden müssen, genutzt werden. Die Abwärme von Kältemaschinen ist eine gut geeignete Wärmequelle für Wärmepumpen. Wärmepumpen, die Dampf liefern, sind für industrielle Anwendungen von besonderer Bedeutung, da Dampfsysteme in der Industrie weit verbreitet sind und Dampf als Medium zu Wärmeübertragung, Sterilisation und Luftkonditionierung, aber auch als Reaktionsmittel eingesetzt wird.

Im Forschungsprojekt AHEAD wird ein innovatives Wärmepumpensystem an einem Produktionsstandort von Takeda, einem pharmazeutischen Unternehmen in Wien, demonstriert. Es besteht aus einer dampferzeugenden Wärmepumpe von SPH Sustainable Process Heat, die mit Butan (R600) betrieben wird und mit Dampfverdichtern kombiniert wird, um Dampf mit 11 bar(a)/184 °C zu erzeugen. Als Wärmequelle dient eine zentrale Kälteanlage, die Kaltwasser mit 6°C liefert und deren Abwärme bereits in einer Wärmepumpe genutzt wird, die 70°C für die Heizung bereitstellt. In beiden Anlagen wird NH<sub>3</sub> (R717) als Kältemittel eingesetzt. Mit der dampferzeugenden Wärmepumpe und dem Dampfverdichter (R718) wird nun ein Wärmepumpensystem realisiert, das nur auf natürlichen Kältemitteln beruht und gleichzeitig Kälte und Dampf liefert.

Dieser Beitrag beschreibt die Ergebnisse der simulationsbasierten Designoptimierung dieses Wärmepumpensystems. Das Ziel der Optimierung ist ein möglichst effizientes System, das hohe CO<sub>2</sub> Einsparungen erzielt, in dem die verschiedenen Anlagen bestmöglich kombiniert werden.

**Stichwörter:**

Dampferzeugung, MVR, Brüdenverdichtung, Industrierärmepumpen, Optimierung

IV 2.22

## Energieflexibilitatspotenzial industrieller Wärmepumpen in der Produktion

**Bijan Seyed Sadjjadi<sup>12\*</sup>, Kerim Torolsan<sup>12</sup>, Alexander Sauer<sup>12</sup>**

<sup>1</sup> Fraunhofer Institut für Produktion und Automatisierung (IPA), Industrielle Energiesysteme,  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland  
[bijan.seyed.sadjjadi@ipa.fraunhofer.de](mailto:bijan.seyed.sadjjadi@ipa.fraunhofer.de)

<sup>2</sup> Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Straße,  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland

Im Rahmen der Energiewende und der vermehrten Einspeisung erneuerbarer Energien ins deutsche Stromnetz nehmen flexible Energieverbraucher und -wandler einen immer größeren Stellenwert ein. Zudem stellt der zunehmende Anteil fluktuierender Stromerzeugung und der daraus resultierenden Volatilität der Energiepreise Unternehmen des produzierenden Gewerbes zudem zukünftig vor weitere Herausforderungen. Industrielle Energieflexibilitatsbereitstellung ermöglicht es dem produzierenden Gewerbe auf diese Schwankungen zu reagieren und diese mit Hilfe neuer Geschäftsmodelle wirtschaftlich zu nutzen.

Aufgrund ihres Funktionsprinzips und der sektorenkoppelnden Betriebsweise können industrielle Wärmepumpen eine Schlüsseltechnologie zur gleichzeitigen Dekarbonisierung des produzierenden Gewerbes und zur Energieflexibilitatsbereitstellung sein. Neben der Reaktion auf volatile Strompreise könnten industrielle Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Energiespeichern etwaigen Schwankungen im Netz durch externes Anbieten von Regelenergie oder durch Peak-Shaving begegnen. Diese Arbeit hat zum Ziel, industrielle Wärmepumpen hinsichtlich ihres Potenzials zur Energieflexibilitatsbereitstellung innerhalb der energieflexiblen Fabrik zu bewerten und die zentralen Anwendungsfälle zu identifizieren. Insbesondere die Identifikation geeigneter Energiemarkte und die Interaktion mit diesen im Spannungsfeld zwischen Produktionszielen, Auslastung der thermischen Wandler und der Energieflexibilitatsbereitstellung soll bewertet werden. Dazu werden neben historischen Energiepreisen, für den Produktionsprozess charakteristische Bedarfs- und Produktionsmodelle eingebunden.

**Stichwörter:**

Industrielle Wärmepumpen, Energieflexibilitat, Produktion

IV 2.23

## Versuchsanlage für Hochtemperatur-Wärmepumpen mit R718

**Steffen Klöppel<sup>1\*</sup>, Göksel Özüylasi<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),  
Äußere Oybiner Str. 14/6, 02763 Zittau  
[steffen.kloeppe@dlr.de](mailto:steffen.kloeppe@dlr.de)

Ein betrachtlicher Anteil des Primarenergiebedarfs wird für die Prozesswarmeerzeugung benötigt. Da dabei größtenteils fossile Energieträger zum Einsatz kommen, sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen entsprechend hoch. Mittels Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) kann ein gewisser Anteil der Prozesswarme durch die Aufwertung von Ab- oder Umweltwarme genutzt werden.

Trotz der seit längerem vorhandenen Technologie der Dampfverdichtung haben sich HTWP bisher nicht durchgesetzt. Offene Fragestellungen sind dabei unter anderem wie die Anlagen durch die Verwendung von Verdichtern mit einem hohen Druckverhältnis möglichst einfach gestaltet werden können und wie die Wärmepumpen effizient integriert werden können.

Um diesem Forschungsbedarf zu begegnen wird derzeit am DLR Institut für CO<sub>2</sub>-arme Industrieprozesse eine Pilotanlage einer geschlossenen HTWP mit dem Arbeitsmittel (Wasser-)Dampf aufgebaut.

Durch die Gestaltung der Anlage ergibt sich eine hohe Flexibilität, die allerdings wiederum eine komplexe Anlagensteuerung erforderlich macht. In diesem Beitrag wird neben der Entwicklung des Fließschemas auf das Steuerungs- und Regelungskonzept der Anlage eingegangen, das es erlaubt, trotz der begrenzten Kennfeldbreite der verwendeten Turboverdichter, diese jeweils in einem stabilen Betriebspunkt zu betreiben.

**Stichwörter:**

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Dampfverdichtung, Versuchsanlage

RZ 01

## **Grundlagen für die Klimatisierung von Rechenzentrum unter Berücksichtigung des neuen Energie-Effizienzgesetzes**

**Ulrich Terrahe**

dc-ce RZ-Beratung GmbH & Co. KG, Berner Straße 38, 60437 Frankfurt am Main  
[u.terrahe@dc-ce.de](mailto:u.terrahe@dc-ce.de)

Das neue Energie Effizienzgesetz verlangt von den Betreibern von neuen Rechenzentren ab 2026 einen PUE von 1,2.

Hierbei handelt es sich um einen effektiven PUE, also ein PUE, der sich aus dem Betrieb heraus ergibt (also nicht der planerische Absatz. Das bedeutet eine absolute enge Abstimmung zwischen der IT-Last und der Klimatisierung-Anforderungen. Der Vortrag zeigt auf, was zukünftig zu berücksichtigen ist und wie man diese Ziele erreicht.

RZ 02

## **Abwärmepotenziale aus Rechenzentren erkennen und erschließen**

**Vivien Klein**

Umwelttechnik BW GmbH, Friedrichstraße 45, 70174 Stuttgart  
[vivien.klein@umwelttechnik-bw.de](mailto:vivien.klein@umwelttechnik-bw.de)

Eine möglichst klimaneutrale Wertschöpfung kann nur gelingen, wenn bestehende Abwärmepotenziale konsequent erkannt und erschlossen werden. Aufgrund ihrer übers Jahr hinweg relativ konstanten Wärmeabgabe ist dieses Potenzial der Abwärmenutzung besonders auch bei Rechenzentren gegeben. Während die (Ab-)Wärme für Betreiber von Rechenzentren verlorene Energie ist, stellt sie für Betreiber von Wärmenetzen eine potenzielle Wärmequelle dar, deren Nutzbarmachung wirtschaftlich sinnvoll gestaltet werden kann. Herausforderungen sind hierbei jedoch die bedarfsgerechte Wärmebereitstellung, das Temperaturniveau, welches i.d.R. für die technische Nutzung in Fern- oder Nahwärmenetzen angehoben werden muss, und die erforderliche Infrastruktur. Damit entsteht ein Spannungsfeld zwischen Rechenzentrums-Betreiber, Wärmeabnehmer, Technologieanbieter, Energieversorger und letztlich der Politik. Dieses gilt es durch eine frühzeitige Planung unter Einbezug der unterschiedlichen Interessen zu entspannen. Als konkrete Anlaufstelle hierzu dient das Kompetenzzentrum Abwärme, welches bei Umwelttechnik BW, der Landesagentur für Umwelttechnik und Ressourceneffizienz Baden-Württemberg, angesiedelt ist. Das Kompetenzzentrum unterstützt die Akteure bei der Beratung, Projektanbahnung und Umsetzung von Abwärmeprojekten in Rechenzentren.

## Einbindung von Rechenzentrumsabwärme in ein Nahwärmenetz zur Versorgung eines Wohnquartiers

Maximilian Stahlhut<sup>1</sup>, Dimitri Nefodov<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>1\*</sup>

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

Rechenzentren bzw. deren elektrischen/elektronischen Komponenten benötigen eine permanente Kühlung. Den größten Kühlbedarf im Rechenzentrum haben die Server. Die Direktflüssigkeitskühlung ermöglicht eine effiziente Wärmeabfuhr der Serverabwärme. Bei dieser Kühltechnologie verlässt das Kühlmedium Wasser das Rack mit einer maximalen Austrittstemperatur zwischen  $T_{IT,Aus,max} = 50...55$  °C. Die relativ hohen Austrittstemperaturen ermöglichen eine ganzjährige freie Kühlung mit Trockenkühlern, was dem Stand der Technik entspricht. Gleichzeitig ist auch eine Wärmeanwendung der Rechenzentrumsabwärme für verschiedene Anwendungsszenarien denkbar und aus ökologischen Gründen notwendig. In diesem Beitrag wird deswegen eine beispielhafte Wärmenutzung von Rechenzentren mit Direktflüssigkeitskühlung zur Versorgung eines repräsentativen Wohnquartiers in Deutschland (Quartier Mariantal in Zwickau) mit einer Spitzenlast von 1850 kW untersucht. Eine Anhebung des Temperaturniveaus der Rechenzentrumsabwärme auf das Nutztemperaturniveau des Nahwärmenetzes  $T_{VL} = 70$  °C geschieht mit zwei Wärmepumpen mit jeweils zwei Verdichtern (Kältemittel R1234ze(E)). Diese Untersuchung analysiert verschiedene Rechenzentrumsgrößen bezüglich der Heizlastdeckung des Quartiers. Darüber hinaus erfolgt in der Simulation die Einbindung eines Kurzzeitspeichers mit einem Speichervolumen von 1685 m<sup>3</sup>. Dadurch kann der Anteil der freien Kühlung gesenkt und der Abwärme-Deckungsanteil gesteigert werden. Im Hinblick auf gesetzliche Verpflichtungen zur Abwärmenutzung von Rechenzentren (z. B. Energieeffizienzgesetz in Deutschland) zeigt dieser Beitrag das Potenzial zur Wärmenutzung der direkten Flüssigkeitskühlung. Kennzahlen stellen die Übertragung auf andere Wohnquartiere sicher.

### Stichwörter:

Abwärmenutzung, Rechenzentrum, Wärmepumpen, Nahwärmeversorgung, Speicher

## (Arbeitsthema): Rechenzentrumsklimatisierung mittels Flusswasserkühlung

K. Keller

Schwarz IT KG, Neckarsulm

## Energieeffiziente Rückkühlung in Rechenzentren

S. Medag

Jaeggi Hybridtechnologie AG, Wittichenau, Schweiz

## Adsorptive Wärmetransformation in Rechenzentren –

### Analyse der Möglichkeiten und Grenzen

Andreas Velte-Schäfer<sup>1\*</sup>, Maximilian Stahlhut<sup>2</sup>, Stefan K. Henninger<sup>1</sup>,  
Gerrit Földner<sup>1</sup>, Thorsten Urbaneck<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Thermal Systems and Building Technologies,  
Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Deutschland  
[andreas.velte-schaefer@ise.fraunhofer.de](mailto:andreas.velte-schaefer@ise.fraunhofer.de)

<sup>2</sup>Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik, Reichenhainer Straße 70, 09126  
Chemnitz, Deutschland

Rechenzentren benötigen eine permanente Kühlung, um eine Überhitzung der elektrischen/elektronischen Bauteile zu verhindern. Die Direktflüssigkeitskühlung der Server ist eine Möglichkeit die Abwärme effizient abzuführen. Bei dieser Kühltechnologie verlässt das Kühlmedium Wasser das Rack mit einer maximalen Austrittstemperatur zwischen  $T_{T,Aus,max} = 50...55\text{ °C}$ . Die Serverabwärme kann u. a. für den Betrieb thermisch angetriebener Kältemaschinen genutzt werden, um Kaltwasser auf einen Temperaturniveau von ca.  $T_{KW,VL} = 15...20\text{ °C}$  bereitzustellen. Dieser Anwendungsfall wurde im letzten Jahrzehnt gut untersucht. Eine Anlage basierend auf Adsorptionsmodulen mit dem Arbeitspaar Silicagel/Wasser wurde vom Leibniz Rechenzentrum in München 2017 in Betrieb genommen. Ein wesentlicher Nachteil dieses Anwendungsfalles sind die wenigen Betriebsstunden (ca. 10 % des Jahres) – an mitteleuropäischen Standorten reicht die freie Kühlung in den meisten Betriebsstunden über das Jahr hinweg aus. Dies erschwert den wirtschaftlichen Betrieb dieser Lösung. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Nutzung der Rechenzentrumswärme für die Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung. Beispielsweise werden für Nahwärmenetze und die Trinkwassererwärmung Temperaturen von ca. 70 °C benötigt. Hier ist das Temperaturniveau der Abwärme mit 50...55 °C zu gering. Mittels adsorptiver Wärmetransformation kann die Abwärme genutzt werden, um Wärme auf hohem Temperaturniveau (65...75 °C) für Gebäudeheizung und Trinkwassererwärmung bereitzustellen. Diese Möglichkeit soll in diesem Beitrag anhand von typischen Temperaturniveaus zunächst für das gängige Arbeitspaar Silicagel/Wasser näher untersucht werden. Weiterhin wird das Potential von neuartigen Adsorbentien (metallorganische Gerüstverbindungen) gegenüber dem Arbeitspaar Silicagel/Wasser für die beiden Anwendungsfälle evaluiert.

#### Stichwörter:

Adsorption, Wärmetransformation, thermisch angetriebene Kältemaschine, metallorganische Gerüstverbindungen, Rechenzentrumsabwärme

## Zweiphasen-Immersionenkühlung von elektronischen Bauteilen als Verdampferprozess für Wärmepumpenkreisläufe

Tim Kempa

Coincidence UG, Konstanzer Str.55, 78048 Villingen-Schwenningen, Deutschland  
[tim.kempa@stackforest.io](mailto:tim.kempa@stackforest.io)

Bei der zweiphasigen Immersionenkühlung werden elektronische Komponenten in ein Bad aus dielektrischer Wärmeübertragungsflüssigkeit (Bsp.:[https://www.3mdeutschland.de/3M/de\\_DE/p/d/b5005006004/](https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/p/d/b5005006004/)) getaucht. Der Siedepunkt der Flüssigkeit liegt im Bereich der Betriebstemperatur der elektronischen Komponenten (i.d.R. ca. 30-70°C). Die durch das Verdampfen am warmen Bauteil erzeugte Konvektion der aufsteigenden Blasen reicht aus um die Komponenten zu kühlen. Der entstehende Dampf wird in der Regel über

Kondensatoren in demselben Behälter wieder verflüssigt und herunter gekühlt. Dieses Verfahren ist Stand der Technik, wird jedoch aufgrund des technisch hohen Aufwands im Vergleich zur üblichen Luftkühlung bisher eher in großen Rechenzentren eingesetzt.

**Technisches Konzept:**

Statt den entstehenden Dampf direkt über einen Kondensator zu verflüssigen wird der erzeugte Dampf direkt für einen Wärmepumpenkreislauf genutzt. Der Dampf wird mittels Pumpe verdichtet und dessen Temperaturniveau somit weiter erhöht. Über einen Verflüssiger kann die Wärmeenergie für Warmwassererzeugung oder Prozesswärme abgegeben werden und kondensiert dabei. Das Kondensat wird über eine Drossel wieder entspannt und wieder dem Verdampferkreislauf zugeführt.

**Eigenschaften dieses Konzeptes:**

- Eingesetzte elektrische Energie wird in erster Linie für den Betrieb der elektronischen Komponenten verwendet statt sie nur in Wärmeenergie umzuwandeln.
- Hocheffiziente Kühlung von elektronischen Komponenten (z. B. Server, KI-Rendering Applikation oder Mining von Kryptowährungen)
- Deutlich höhere Temperaturniveaus erreichbar weshalb dieses Konzept als Hochtemperaturwärmepumpe Anwendung finden kann.
- Wartungsarm
- Geschlossener Kreislauf
- Niedriges GWP der eingesetzten Kältemittel
- Die Leistung der Komponenten kann geregelt werden und ist somit flexibel.
- Im Vergleich zu anderen Wärmepumpenkonzepten niedrige Betriebsdrücke
- Effizienz der Wärmequelle kann durch einfachen Austausch der Elektronik verringert, verbessert oder erweitert werden.
- Förderung von dezentralem Serverbetrieb

**Stichwörter:**

Zweiphasen-Immersion, Rechenleistung, Hochtemperaturwärmepumpe, flexible Wärmeerzeugung, Server, Mining