Deutsche Kälte- und Klimatagung

DKV Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein

Deutsche Kälte- und Klimatagung 2026

Ingolstadt

18. – 20. November 2026

Kurzfassungen

Veranstalter:

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.
Theodorstraße 10
30159 Hannover
T. +49 (0) 511 897 0814
E. info@dkv.org
H. www.dkv.org

Maritim Hotel Ingolstadt
Schloßlände 24
85049 Ingolstadt
T.: +49 (0)841 88178405
E.: meeting.ing@maritim.de
H.: www.maritim.de
H.: www.maritim.com

Inhaltsverzeichnis

Studierendenvorträge 3

Arbeitsabteilung 1. 10
Kryotechnik

Arbeitsabteilung 2 23
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik

Arbeitsabteilung 3 38
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik

Arbeitsabteilung 4 51
Kälteanwendung

Arbeitsabteilung 5 64
Klimatechnik

Arbeitsabteilung 6 79
Wärmepumpenanwendung

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

S.01

Thermodynamisches Verhalten von Arbeitsfluidgemischen

Einfluss des thermodynamischen Gemischverhaltens auf die zentralen Kreisprozessgrößen einer Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf

Ivo Schüle[1, 2]

[1] Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Forschungsgruppe Wärmepumpen
Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Deutschland
schuele@isfh.de

[2] Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover,
Welfengarten 1, 30167 Hannover, Deutschland
ivo.schuele@stud.uni-hannover.de

Die Bereitstellung von Wärme für industrielle Prozesse ist für einen erheblichen Anteil des globalen Energieverbrauchs und der energiebedingten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Durch Rückgewinnung ungenutzter Abwärme mittels Wärmepumpen kann die Energieeffizienz eines Systems gesteigert und der Verbrauch fossiler Energieträger reduziert werden. Als Alternative zum konventionellen Kompressionskreisprozess mit Reinstoffkältemitteln oder engsiedenden, zeotropen Gemischen kann für industrielle Hochtemperaturanwendungen ebenfalls eine Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf eingesetzt werden. Diese verwendet weitsiedende, binäre Gemische als Kältemittel, folglich wird der Lösungsraum des Kreisprozesses um die Dimension der Gemischzusammensetzung erweitert. Der dadurch entstehende Freiheitsgrad kann genutzt werden, um die Temperaturprofile in den Wärmeübertragern für den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Zusätzlich kann eine breite Spanne an Quellen- und Senkentemperaturen mit nur einem Gemisch bedient werden. Bislang wird ausschließlich das Arbeitsfluidgemisch bestehend aus Ammoniak und Wasser kommerziell für Wärmepumpen dieses Typs eingesetzt.

In diesem Vortrag werden Einflussfaktoren und Wirkmechanismen des Gemischverhaltens auf zentrale Kreisprozessgrößen und Effizienzparameter der Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf nach Osenbrück diskutiert. Grundlegend dafür sind die thermischen und kalorischen Zustandsräume von sechs erstmals untersuchten, natürlichen Arbeitsfluidgemischen. Anschließend werden diese im Kontext einer Kreisprozesssimulation untersucht. Die Simulation basiert auf dem Anwendungsfall der Nutzbarmachung von Flusswasserwärme für Nah- und Fernwärmenetze. Es werden neben Leistungszahlen und volumetrische Heizleistungen weitere Kennzahlen berechnet, welche die Güte der Verdichtungs- und Wärmeübertragungsprozesse quantifizieren. Diese Parameter werden abschließend hinsichtlich ihres Einflusses auf die Gesamteffizienz des Systems untersucht und mit dem zugrundeliegenden Gemischverhalten korreliert. Auf diese Weise werden hervorzuhebende Gemischeigenschaften und zentrale Auslegungsgrößen des Kreisprozesses identifiziert. Zuletzt werden diese mittels einer Parameterstudie untersucht, um das konkurrierende Verhalten verschiedener Einflussfaktoren auf Prozess-, Komponenten- und Gemischebene zu analysieren.

Stichwörter:
Thermodynamisches Gemischverhalten, Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf, Kreisprozesssimulation

S.02

Einfluss des inneren Wärmeübertragers auf die Prozesseffizienz von Gemischkältekreisläufen

Fabienne Hassis

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland
fabienne.hassis@student.kit.edu

Die Erzeugung tiefer Temperaturen mit konventionellen einstufigen Kompressionskältekreisläufen unter Einsatz reiner Kältemittel ist aufgrund thermodynamischer und wirtschaftlicher Grenzen nur eingeschränkt möglich. Zur Realisierung niedriger Verdampfungstemperaturen werden in der Praxis häufig Kaskadenkältekreisläufe eingesetzt.

Einstufige Linde-Hampson-Prozesse mit Gemischkältemitteln bieten hingegen das Potenzial, die Kälteerzeugung hinsichtlich ihrer Effizienz und Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Durch den einfacheren Aufbau und die geringere Anzahl an Bauteilen lassen sich die Anlagenkomplexität und die damit verbundenen Kosten reduzieren. Zudem lassen sich durch die gezielte Wahl der Gemischkomponenten die thermodynamischen Eigenschaften des Gemisches anpassen und damit die Prozesseffizienz deutlich beeinflussen.

Ein zentrales Bauteil des Linde-Hampson-Prozesses ist der innere Wärmeübertrager, der das Kältemittel vor der Expansion rekuperativ vorkühlt und somit die Erzeugung tiefer Temperaturen ermöglicht. Da die dabei auftretende Entropieproduktion einen wesentlichen Einfluss auf die Energieeffizienz des Gesamtprozesses hat, ist das Zusammenspiel von Wärmeübertragerdesign und Gemischeigenschaften von großer Bedeutung. Dazu werden an einem Versuchsstand Wärmeübertrager unterschiedlicher Größe und Ausführung mit Gemischen betrieben und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Prozesseffizienz untersucht.

Stichwörter:
Gemischkälte, Energieeffizienz, Linde-Hampson, Kohlenwasserstoffe

S.03

Experimentelle Untersuchung und Modellvalidierung einer R-717

Großwärmepumpe mit Hubkolbenverdichter

Hedy Dinse

Technische Universität Dresden,
Schaufler Professur für Kälte- Kryo- und Kompressorentechnik
01062 Dresden, Dresden
hedy.dinse@mailbox.tu-dresden.de

Industrielle Großwärmepumpen auf Basis natürlicher Kältemittel leisten einen wichtigen Beitrag zur Defossilisierung der Wärmeversorgung. Die vorliegende Arbeit präsentiert die experimentelle Untersuchung einer kommerziellen R-717-Großwärmepumpe mit Heizleistungen bis 3 MW. Hierzu wurde eine Messkampagne aufgestellt, welche das gesamte Betriebsfeld der Anlage abdeckt. Die experimentellen Daten dienen der Bewertung des Verdichters, der Wärmeübertrager und der Gesamtanlage sowie der Validierung eines industriellen Berechnungstools. Die Ergebnisse zeigen einen hohen und nahezu konstanten isentropen Gütegrad des Hubkolbenverdichters, während der Liefergrad mit steigendem Druckverhältnis abnimmt und auf volumetrische Verluste als maßgeblichen Einflussfaktor hinweist. Zudem zeigt der Enthitzer Hinweise auf eine Überdimensionierung. Das Berechnungstool sagt die thermodynamischen Prozessgrößen zuverlässig voraus und stellt damit eine geeignete Grundlage für die Bewertung der untersuchten Produktserie dar.

Stichwörter:
Ammoniak (R-717), natürliches Kältemittel, Großwärmepumpe, experimentelle Untersuchung; Komponentenbewertung, Berechnungstool, Validierung

S.04

Techno-Ökonomische Eignung von Hochtemperatur-Wärmepumpen:

Genetische Optimierung und Bewertung von Kältemittelgemischen und Kreislauftopologien

Jan Esch[1,2*], Philip Hofmann[2], Henrik Waßmuth[1], Wilhelm Tegethoff[1], Thomas M. Koller[1]

[1] TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland

[2]Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG,
Am Hochschulcampus 1, 44801 Bochum, Deutschland
* Korrespondenzautor j.esch@tu-braunschweig.de

Im Zuge der Dekarbonisierung der Industrie rückt die nachhaltige Bereitstellung von Prozesswärme zunehmend in den Fokus. Hierbei gelten Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) als vielversprechende technologische Lösung. Die Anforderungen an einen wirtschaftlichen Markthochlauf von HTWP erfordern eine dezidierte Betriebsauslegung zur Minimierung der Wärmegestehungskosten (LCOH) für verschiedene Applikationen.

In dieser Studie werden verschiedene HTWP-Systeme hinsichtlich ihrer techno-ökonomischen Eignung für vier industrielle Anwendungsfälle untersucht und bewertet. Betrachtet werden drei Kreislauftopologien: eine einstufige Anlage, eine kaskadierende Anlage sowie ein zweistufiges System mit Flash-Tank. Die Untersuchungen umfassen den Vergleich von Alkanen als natürliche Kältemittel in Form von Reinstoffen und entsprechenden binären zeotropen Gemischen. Die kostenoptimalen Betriebsparameter und die ideale Kältemittelzusammensetzung werden durch einen genetischen Algorithmus bestimmt. Dafür wird ein statisches Modell der thermodynamischen Kreislaufprozesse eingesetzt und mit Routinen zur Wärmeübertragerdimensionierung gekoppelt. Durch die Kombination mit korrelationsbasierten Kostenmodellen lassen sich die effektiven LCOH für jede mögliche Betriebsweise der HTWP-Systeme ermitteln.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Zielkonflikt zwischen der Systemeffizienz (COP) und LCOH besteht, weshalb eine anwendungsfallspezifische Auslegung des HTWP-Systems notwendig ist. Bei Prozessen mit ausgeprägter anwendungsseitiger Temperaturänderung ermöglicht der Temperaturgleit von Propan-Pentan-Gemischen in einer einstufigen Anlage die niedrigsten Kosten von bis zu 100 €/MWh. Für Szenarien mit geringen Temperaturänderungen innerhalb der Wärmeübertrager auf der Anwendungsseite dominiert hingegen die Zweistufige Anlage mit Flash-Tank mit Reinstoffen bei circa 104 €/MWh. Die Kaskadenschaltung erweist sich unter den gewählten Annahmen in keinem untersuchten Szenario als konkurrenzfähig.

Form von Reinstoffen und entsprechenden binären zeotropen Gemischen. Die kostenoptimalen Betriebsparameter und die ideale Kältemittelzusammensetzung werden durch einen genetischen Algorithmus bestimmt. Dafür wird ein statisches Modell der thermodynamischen Kreislaufprozesse eingesetzt und mit Routinen zur Wärmeübertragerdimensionierung gekoppelt. Durch die Kombination mit korrelationsbasierten Kostenmodellen lassen sich die effektiven LCOH für jede mögliche Betriebsweise der HTWP-Systeme ermitteln.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Zielkonflikt zwischen der Systemeffizienz (COP) und LCOH besteht, weshalb eine anwendungsfallspezifische Auslegung des HTWP-Systems notwendig ist. Bei Prozessen mit ausgeprägter anwendungsseitiger Temperaturänderung ermöglicht der Temperaturgleit von Propan-Pentan-Gemischen in einer einstufigen Anlage die niedrigsten Kosten von bis zu 100 €/MWh. Für Szenarien mit geringen Temperaturänderungen innerhalb der Wärmeübertrager auf der Anwendungsseite dominiert hingegen die Zweistufige Anlage mit Flash-Tank mit Reinstoffen bei circa 104 €/MWh. Die Kaskadenschaltung erweist sich unter den gewählten Annahmen in keinem untersuchten Szenario als konkurrenzfähig.

Stichwörter:
Hochtemperatur-Wärmepumpe, Genetischer Algorithmus, Natürliche Kältemittel, Kältemittelgemische, Wärmegestehungskosten

S.05

Modellprädiktive Regelung für einen R290-Kältemittelkreis mit internem Wärmeübertrager

Mohammad Danial Wahidi

E.ON Energy Research Center, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen University
mohammad.wahidi@rwth-aachen.de

Die Überhitzungsregelung im Kältemittelkreis beeinflusst sowohl die Effizienz als auch den Schutz des Verdichters. In dieser Arbeit wird eine datengetriebene modellprädiktive Regelung (MPC) für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Propan (R290) und internem Wärmeübertrager entwickelt und simulativ bewertet.

Die MPC nutzt Vorhersagemodelle, um die zukünftige Entwicklung der Regelgrößen abzuschätzen und die Stellgrößen vorausschauend zu bestimmen. Dadurch können die Kopplungen und technischen Grenzen des Kältemittelkreises berücksichtigt werden.

Ein dynamisches Dymola-Modell wird als FMU in eine Python-basierte Regelungsumgebung eingebunden. Aus Simulationsdaten werden Vorhersagemodelle für die Überhitzung und die Vorlauftemperatur identifiziert. Zur Vorhersage der Überhitzung innerhalb des MPC-Optimierungsproblems werden lineare Regression und künstliche neuronale Netze verglichen.

Die Regelung wird bei variabler Außentemperatur und mit Gebäudekopplung untersucht. Beim Einsatz des internen Wärmeübertragers wird die Überhitzung vor dem Verdichter geregelt.

Das ANN-basierte Vorhersagemodell reduziert auftretende Schwingungen und verbessert die Überhitzungsregelung. Gegenüber der PI-Regelung sinken die Standardabweichung des Regelfehlers der Überhitzung um 90 % und der IAE um 65 %. Die Ergebnisse zeigen, dass die datengetriebene MPC im betrachteten Betriebsbereich eine präzisere Überhitzungsführung und zugleich eine erfolgreiche Nachführung der Vorlauftemperatur erreicht.

Ergänzend wird eine Dreigrößenregelung mit regelbarem IHX-Bypass untersucht.

Stichwörter:
Wärmepumpe, IHX, Propan (R290), modellprädiktive Regelung, Machine Learning (ML)

S.06

Untersuchung einer Adsorptionskälteanlage für Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung

Philipp Grießhaber

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Bereich Wärme- und Kältetechnik,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
philipp.griesshaber@ise.fraunhofer.de

Für die Integration einer Adsorptionskälteanlage in ein experimentelles Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungssystem wurde eine im Jahr 2016 gefertigte Adsorptionskälteanlage wieder in Betrieb genommen und experimentell untersucht, um ein dynamisches Simulationsmodell des Systems zu kalibrieren. Dabei wurden die Kälteleistung und der COP mit den Spezifikationen des Herstellers verglichen und die aufgetretenen Abweichungen analysiert.

Es konnte eine durchschnittliche Abweichung von 48 % in der Kälteleistung sowie 20 % (0,075 absolut) im COP festgestellt werden.

Auf Basis der experimentell erhobenen Messdaten wurde ein numerisches Modell der Adsorptionskälteanlage kalibriert und validiert, wobei Abweichungen < 10 % zwischen Messung und Simulation erreicht werden konnten. Mit Hilfe des Modells wird das Zusammenspiel einer Mikrogasturbine und der Adsorptionskälteanlage simulativ untersucht.

Durch die Auswertung der effektiven Wärme- und Stofftransportwiderstände konnte die eingesetzte Rundrohr-Lamellen-Wärmeübertrager-Bauform mit direkt aufkristallisiertem Adsorbens SAPO-34 mit anderen Bauformen verglichen werden, wodurch der Vorteil der direkten Aufkristallisation des Adsorbens gegenüber Schüttungen, binderbasierten Beschichtungen und aufgeklebtem Adsorbens nachgewiesen werden konnte.

Stichwörter:
Adsorptionskälteanlage, Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, numerischer bottom-up Ansatz, Mikrogasturbine

S.07

Aufbau eines Prototypen zur Laser-basierten Vermessung von Flüssigkeitsschichtungen für Absorptionswärmespeicher

Jan Salmen

Betreut von Dorian Höffner, Stefan Elbel

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Fachgebiet für Wärmeübertragung und -wandlung, Sekretariat KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland
Email: salmen@campus.tu-berlin.de

Absorptionswärmespeicher auf Basis wässriger NaOH-Lösungen ermöglichen eine verlustarme Langzeitspeicherung thermischer Energie. Als Schichtungstank ausgeführt (mit hoch- und niedrigkonzentrierter Lösung übereinander) lässt sich das Tankvolumen gegenüber getrennten Tanks etwa halbieren. Entscheidend ist dabei die zeitliche Stabilität der Schichtung, da der diffusive Stofftransport zwischen den Schichten die Selbstentladerate des Speichers bestimmt.

In dieser Arbeit wurde ein Konzept entwickelt, mit dem sich Flüssigkeitsschichtungen störungsfrei vermessen lassen. Als Messgröße dient der Brechungsindex: Ein transparenter Tank wird horizontal mit einem Laser durchleuchtet, und aus der x-Verschiebung des Laseraustrittspunkts wird über das Snellius'sche Brechungsgesetz auf den lokalen Brechungsindex und damit auf die Konzentration geschlossen. Ergänzend werden vertikale – und mittels IR-Kamera potenziell horizontale – Temperaturprofile erfasst. Das Verfahren ist nicht auf Natronlauge beschränkt, sondern lässt sich grundsätzlich auf beliebige transparente Flüssigkeitsschichtungen übertragen, sodass weitere Anwendungsfelder denkbar sind.

Der Beitrag erläutert das Messprinzip, beschreibt den Prototypenaufbau — mit fein auflösender, vertikal verschiebbarer Messeinrichtung, hochauflösendem Zeilensensor und einem Tank aus gefloatetem Borosilikatglas — und leitet die erreichbaren Genauigkeiten her. Erste Testmessungen zeigen anhand vertikaler Konzentrationsprofile, wie schnell sich hydraulisch stabile Schichtungen diffusiv vermischen.

S.08

Frühzeitige, vibroakustische Leckagedetektion in sammlerbasierten Kältekreisen

Felix Lauscher

RWTH Aachen, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Team Kältekreisprozesse,
Mathieustraße 10, 52074 Aachen, Deutschland
felix.lauscher@eonerc.rwth-aachen.de

Kältemittelleckagen in Kältemittelkreisläufen von Wärmepumpen führen zu Effizienzverlusten, Sicherheitsrisiken und Umweltbelastungen. Bei Verwendung eines Kältemittelsammlers sind die Auswirkungen einer Leckage aufgrund dessen Pufferwirkung mithilfe konventioneller Sensorik erst spät erkennbar. Diese Arbeit untersucht daher einen nichtinvasiven Ansatz zur Füllstandsbestimmung mittels vibroakustischer Signalanalyse mit Beschleunigungssensoren, um Leckagen frühzeitig zu detektieren.

Zur Entwicklung einer Detektionsmethode wird am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik eine R290-Luft-Wasser-Wärmepumpe auf einem Hardware-in-the-Loop-Prüfstand betrieben. Unter der Emulation von Leckage durch Reduktion der Füllmenge wurden sowohl thermodynamische Daten als auch an der Sammlerhülle erfasste vibroakustische Daten aufgenommen und ausgewertet. Dabei zeigt sich eine starke Korrelation zwischen dem Schwingungsverhalten des Sammlers und dessen Füllmenge.

Die im Spektrum dominante Ovalisierungsmode des Sammlers eignet sich ideal zur Leckagedetektion, da ihre Eigenfrequenz stark von der Kältemittelmasse und der Kondensationstemperatur abhängt, während der Einfluss der Verdichterdrehzahl und der Verdampfungstemperatur vernachlässigbar ist. Auf dieser Basis wurde eine kennfeldbasierte Echtzeit-Massenbestimmung entwickelt, die im stationären Betrieb präzise ist (mittlerer absoluter Fehler, MAE: 15,34 g) und auch unter dynamischen Bedingungen wie einer Wärmespeicherbeladung zuverlässig funktioniert (MAE: 29,33 g).

Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag zur frühzeitigen Leckagedetektion und steigert dadurch die Betriebssicherheit, Effizienz und Lebensdauer von Wärmepumpen.

Stichwörter:
Wärmepumpe, Kältemittelsammler, R290, Leckagedetektion, Vibroaktusik

S.09

Ejektorzellenmodell in Dymola

Diego Alejandro Villalba-Rondon

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
01062 Dresden, Deutschland

Die steigende Nachfrage nach nachhaltigen Kälte- und Wärmepumpensystemen hat den Einsatz natürlicher Kältemittel wie R-744 (CO_2) oder R-290 (Propan) vorangetrieben. Ejektoren können die Energieeffizienz steigern, indem sie einen Teil der Expansionsarbeit zurückgewinnen.

Diese Arbeit präsentiert ein nulldimensionales Modell eines Zweiphasen-Ejektors, welches in Dymola mit der TIL-Bibliothek implementiert wurde. Das Modell umfasst vier Untermodelle (Treibdüse, Saugdüse, Mischkammer, Diffusor) und basiert auf realen thermophysikalischen Stoffeigenschaften. Die Validierung für R-744 zeigt eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten über einen breiten Betriebsbereich. Der entwickelte 0D-Ansatz ermöglicht die gleichungsbasierte Modellierung in Dymola und eine flexible Auswahl von Korrelationen. Beispielsweise kann die Berechnung der Schallgeschwindigkeit innerhalb des HEM-Ansatzes mit verschiedenen Formulierungen (z. B. nach Brennen oder Henry-Fauske) erfolgen. Die geringen Rechenzeiten (im Bereich weniger Millisekunden) ermöglichen die Integration des Ejektormodells in transiente Gesamtanlagensimulationen von Kälte- und Wärmepumpensystemen. Neben der Ejektorgeometrieoptimierung können dadurch

auch das dynamische Betriebsverhalten unter realen Lastprofilen analysiert und Regelungsstrategien für ejektorgestützte Systeme entwickelt und getestet werden.

Stichwörter:
Zweiphasen-Ejektor; CO_2 (R-744); natürliches Kältemittel; 0D-Modell; Dymola; TIL-Bibliothek; Rückgewinnung der Expansionsarbeit; Energieeffizienz; experimentelle Validierung; geometrische Optimierung.

S.10

Analyse der Förderung von gesättigten Kohlenwasserstoffen in einer Mehrphasenpumpe für unterschiedliche Sättigungsdrücke

Andrej Shpigel*, Oliver Obst, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

In verfahrenstechnischen Anlagen, wie z. B. Erdgasverflüssigungsanlagen, nimmt der Bedarf an der Förderung von gesättigten Fluiden zu. Bisher müssen die Phasen aufwendig getrennt werden, gefördert und anschließend wieder gemischt werden. Mehrphasenpumpen (MPP) ermöglichen die Förderung von Gas-Flüssigkeits-Gemischen mit hohen Gasanteilen. Diese spezielle Bauart einer Verdrängerpumpe ist nicht nur für ungesättigte Gas-Flüssigkeitsgemische geeignet, sondern auch für Fluide im Sättigungszustand. In diesem Fall kondensiert der Dampf in den Förderkammern der Pumpe und in den Verlustströmungen in den Spalten zwischen den drehenden Schrauben verdampft die Flüssigkeit im Sättigungszustand. Der Phasenwechsel in der Pumpe während der Förderung erfolgt in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsparameter und der Stoffwerte des Fluides. Im folgenden Beitrag wird eine speziell für niederviskose, gesättigte Flüssigkeiten wie Kohlenwasserstoffe konstruierte Mehrphasenpumpe, die in einer Technikumsanlage zur Strömungskondensation betrieben wird, analysiert. Das Förderverhalten und die Effizienz der Pumpe wird in Abhängigkeit des Gasgehaltes, der Drehzahl und des Differenzdruckes anhand experimenteller Daten mit Propylen vorgestellt und mit Daten für höher viskose gesättigte Flüssigkeiten (Weißöl / Luft bzw. CO_2) aus der Literatur verglichen.

Stichwörter:
Mehrphasenpumpe, hohe Gasgehalte, degressive Spindelsteigung, , Pumpenwirkungsgrad, Propylen

1.01

Autonome Anlagenlastregelung von Heliumkälteanlagen mittels variierender Systemdrücke

Julian Friedel*, Markus Diehl

Linde Kryotechnik AG; Daettlikonerstrasse 5, 8422 Pfungen, Schweiz
julian.friedel@linde-kryotechnik.ch, markus.diehl@linde-kryotechnik.ch

Als Hersteller von Heliumverflüssigungs- und Kälteanlagen finden bei Linde Kryotechnik AG (LKT) verschiedene Konzepte zur Regelung der Prozessdrücke ihre Anwendung. Eine etablierte Variante, um den Kompressorsaugdruck zu regeln, ist der Einsatz von Kompressoren mit Frequenzumrichter. Hierbei wird der Kompressorvolumenstrom durch Veränderung der Frequenz an das Lastszenario angepasst. Diese Lösung ist jedoch mit erhöhten Investitions- und Betriebskosten verbunden, weshalb viele Kunden darauf verzichten, zumal Frequenzumrichter zudem einen negativen Einfluss auf das Stromnetz haben und empfindliche Messexperimente stören können.

Alternativ bietet LKT ein Regelungskonzept mit frei einstellbaren Systemdrücken (Floating Pressure) an. Anstatt die Systemdrücke auf feste Sollwerte zu regeln, stellt sich das System bei Lastwechseln selbstständig auf einen thermodynamischen Gleichgewichtszustand ein. Dies ermöglicht eine hohe Anlageneffizienz über einen breiten Lastbereich und reduziert gleichzeitig die erforderliche Kompressorkapazität.

Einerseits findet dieses Konzept Anwendung bei Heliumkälteanlagen, bei denen kein Flüssigheliumbad aufrechterhalten werden muss, sodass der Niederdruck über dem kritischen Druck von Helium liegen darf. Bei annähernd konstantem Druckverhältnis stellen sich die Systemdrücke in Abhängigkeit vom Lastverhalten ein, sodass bei geringer Last niedrige absolute Drücke und bei hoher Last entsprechend höhere absolute Drücke vorliegen. Der Hauptkompressor benötigt hierbei keinen Frequenzumrichter, da die Anpassung der Druckniveaus zwischen niedrigen und hohen Lastzuständen diese Funktion übernimmt.

Andererseits kann auch bei Heliumkälteprozessen mit Flüssigheliumbad die mit dem Bad gekoppelte Druckstufe variiert werden. Bei steigender Last erhöht sich die Verdampfungsrate, während sie bei sinkender Last entsprechend abnimmt. Eine erhöhte Verdampfung führt dann zu einem Anstieg des Niederdrucks (LP), was bei konstantem Ansaugvolumenstrom und konstantem Druckverhältnis auch einen Anstieg des Hochdrucks (HP) zur Folge hat. Dadurch steht wiederum mehr Kälteleistung zur Verfügung. Auf diese Weise ergibt sich eine intrinsisch stabile und flexible Betriebsweise ohne den Einsatz des Frequenzumrichters.

Das zugrunde liegende Regelkonzept wird hier anhand von zwei realisierten Beispielanlagen erläutert und diskutiert.

Stichwörter:
Frequenzumrichter, Systemdruckregelung, Heliumkälteanlagen, Floating Pressure, Kompressor, Ganni-Cycle

1.02

Leistungsanpassung und Energieoptimierung der ELBE-Heliumanlage

Ch. Schneider*, A. Wagner

Radiation Source ELBE, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e.V.
christof.schneider@hzdr.de

Der Vortrag stellt die durchgeführten Maßnahmen zur Erweiterung und Modernisierung der kryogenen Infrastruktur der ELBE-Heliumanlage vor. Im Mittelpunkt standen die notwendige Leistungserweiterung zur Versorgung eines zusätzlichen Kryostat-Testlabors sowie die Erhöhung der verfügbaren Kälteleistung bei 1,8 K. Diese

wurde unter anderem durch ein Turbinenupgrade und eine damit verbundene Erhöhung des Helium-Massenstroms erreicht.

Gleichzeitig wurde die Anlage modernisiert, um den Betrieb flexibler und effizienter an die jeweils aktuellen Prozessanforderungen anzupassen.

1.03

Engineering und Betrieb von Helium-Kälteanlagen – aktuelle Projekte im Fokus

Maximilian Gierlinger

Vorbuchner cryogenics, 84558 Kirchweidach
maximilian.gierlinger@vorbuchner.com

Tieftemperaturkälteanlagen sind essenziell für eine Vielzahl moderner Anwendungen in Forschung, Industrie und Medizintechnik. Insbesondere für den Betrieb supraleitender Systeme sind hocheffiziente Heliumkälteanlagen von entscheidender Bedeutung. Neben standardisierten Lösungen entwickelt die Firma Vorbuchner maßgeschneiderte Anlagen, die gezielt auf die spezifischen Anforderungen unterschiedlicher Anwendungen ausgelegt sind.

Der Vortrag gibt einen Überblick über aktuelle Projekte, deren Fortschritte sowie ausgewählte technische Besonderheiten und gewonnene Erkenntnisse.

Im Fokus stehen dabei zwei konkrete Anlagen: die 2K-Heliumkälteanlage für den Polish Free Electron Laser (PolFEL) in Warschau sowie eine 20K-Kälteanlage mit Verflüssiger für die *Test Facility for Large Magnets and Superconducting Lines (TFML)* am INFN in Salerno.

1.04

Cryogenic Design and Commissioning of the Helium Thermosiphon System for the MADMAX Cryostat

E. Shabagin*, A. Hobl

Bilfinger Nuclear & Energy Transition GmbH, Würzburg
Eugen.Shabagin@bilfinger.com

For the MADMAX experiment, which aims to search for dark matter axions, a novel cryogenic system was designed, manufactured, and successfully commissioned in 2026. The cryostat is used to cool a cylindrical 4 K vacuum vessel approximately 4 m in length and 800 mm in diameter. Its purpose is to provide a stable cryogenic environment for the future operation of the experiment.

In contrast to conventional helium thermosiphon systems, the 4 K vessel is not cooled by welded cooling pipes and copper thermal straps. Instead, a double-wall cooling jacket was directly integrated onto the vessel, allowing liquid helium to circulate under thermosiphon conditions. After the initial filling, the helium inventory is maintained within a closed-loop system. Five pulse-tube cryocoolers continuously recondense the evaporated helium, enabling continuous closed-loop operation of the system.

In addition, a closed-loop cooling system was developed for the thermal radiation shield. Gaseous helium is circulated through the first stage of the cryocoolers by means of a cryogenic fan. This concept enables cooling of the thermal shield within a closed helium circuit while maintaining a low temperature gradient along the shield.

The presentation provides an overview of the cryogenic design of the MADMAX cryostat and the system parameters achieved during operation. The helium thermosiphon system for the 4 K region, the thermal shield cooling circuit with cryogenic fan, and selected design features of the cryostat will be presented. Furthermore,

experiences gained during cooldown, commissioning, and the site acceptance test of the system will be discussed.

1.05

Kryogene Kühlsysteme für photonische Quantencomputer bei PsiQuantum

Dirk Pflueckhahn*, Eric Fauve, Hong Hu

PsiQuantum Inc., 700 Hansen Way, Palo Alto, California 94304 USA
dpflueckhahn@psiquantum.com

Das Ziel von PsiQuantum ist es, den ersten praktisch nutzbaren Quantencomputer zu entwickeln und zu bauen. Das Unternehmen setzt dabei auf photonenbasierte Quantencomputer, bei denen Lichtteilchen als Träger der Quanteninformation dienen. Diese Technologie unterscheidet sich grundlegend von materiebasierten Ansätzen und stellt daher andere Anforderungen an die kryotechnische Infrastruktur. So bewegt sich PsiQuantum nicht im Millikelvinbereich, sondern nutzt bewährte Helium-Kryotechnik im Temperaturbereich von etwa 2 K bis 4,5 K. Dieser Ansatz ermöglicht die Skalierung größerer photonischer Quantensysteme. Aktuell entstehen für Projekte in den USA und Australien mehrere Helium-Kryoanlagen, die in Kürze an den jeweiligen Standorten installiert werden. Im Folgenden werden die Anforderungen der photonischen Quantencomputertechnik an die Kryo-infrastruktur erläutert und die entsprechenden Systeme vorgestellt.

1.06

Effiziente Radonentfernung in CO_2-dominierten Strömen

Ein neuer industrieller Lösungsansatz – Anwendungsfall Geothermie

Petar Dalakov*, Corinne Ziege

Nikkiso Cryotec GmbH, Dresdener Straße 76, 04808 Wurzen
petar.dalakov@NikkisoCEIG.com

Geothermal energy offers a unique opportunity for carbon capture, but geothermal gas streams often contain complex mixtures of carbon dioxide, water vapor, and trace contaminants such as naturally occurring radon. These impurities can significantly impact the quality and commercial usability of recovered CO_2. This presentation discusses the challenges of CO_2 purification in geothermal applications and highlights recent developments in advanced adsorption technologies designed for selective trace contaminant removal. Experimental results demonstrate how optimized sorbent materials can improve CO_2 purity and enable valuable industrial reuse. The work illustrates how innovative gas treatment solutions can unlock new carbon utilization opportunities in decentralized renewable energy systems and other demanding industrial environments.

1.07

White paper “Management of BOG for Zero-Loss LH2 Supply Chain”

Alexander Alekseev[1*], Christian Wolf[1] Thomas Acher[1], Simon Schaeffer[1], Minish Shah[1], Harald Klein[2], Sebastian Rehfeldt[2]

[1] Linde GmbH, Clean Energy Technology R&D, Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14, 82049 Pullach
[2] Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Department of Energy and Process Engineering, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching
alexander.alekseev@tum.de

Liquid hydrogen (LH_2) is increasingly recognized as a critical component of future hydrogen infrastructure. While cost considerations remain central, boil-off gas is frequently cited as a major challenge. In recent discourse, BOG has emerged as a high-priority concern, often perceived as a significant barrier to the deployment of LH_2 systems. A white paper on the management of boil-off gas (BOG) for a zero-loss liquid hydrogen (LH_2) supply chain has been prepared. This presentation will outline the study’s motivation, structure, methodology, and key findings.

The short description of the white paper is as follows:

> This paper aims to provide a structured and evidence-based perspective on BOG, addressing three main objectives: (a) to offer a systematic overview of the key issues associated with BOG; (b) to outline the principles of effective BOG management; and (c) to present practical recommendations and real-world examples of successful mitigation strategies.
>
> The paper begins by outlining the key benefits and challenges of liquid hydrogen. This is followed by a definition of boil-off gas (BOG) and a systematic classification of its sources, providing the necessary context for a more detailed examination of BOG-related issues. The paper then introduces a strategic framework for robust BOG management, emphasizing the importance of system-level design and techno-economic considerations.
>
> Subsequent sections examine BOG generation resulting from the thermal [and mechanical] design of the system, beginning with an overview of the current state of the art, followed by a discussion of available mitigation measures. Emphasis is placed on thermal shielding as an effective countermeasure, with its impact illustrated through a real-world application example.
>
> The analysis then shifts to process design, examining different types of boil-off gas, such as flash gas and push gas, which arise as a consequence of process design and operating parameters. In this context, the importance of accurate process modeling is emphasized. Pressurization using pumps is identified as the most effective strategy for minimizing flash gas and push gas during loading and unloading operations. Furthermore, the use of subcooled liquid hydrogen (SLH_2) is recommended for managing displaced gas at hydrogen refueling stations, supported by a successful implementation case.
>
> Finally, a simplified economic model for a hydrogen refueling station is introduced to assess the financial impact of BOG. The analysis reveals that while BOG does influence the economics, they are not the dominant cost driver. Capital expenditure remains the primary challenge, typically exceeding all other cost components by a factor of three to five. This model, if applied to other “liquid hydrogen hub” kind of businesses, delivers a similar outcome.

The key conclusion of this study is that boil-off gas must always be considered across the LH_2 supply chain. If technical solutions are inadequately designed, BOG can indeed influence the overall economics of the system. However, when the technology is properly planned from the outset, with BOG sources clearly identified and appropriate mitigation measures implemented, BOG does not constitute a significant barrier to the expansion of LH_2 infrastructure. With integrated process design and suitable technological measures, BOG generation can be reduced to levels that are unlikely to materially affect the overall business case.

1.08

Thermodynamische Modellierung und Analyse von Flüssigwasserstoff-Transfersystemen

Fabian Primke[1*], Alexander Alekseev[2], Sebastian Rehfeldt[1], Harald Klein[1]

[1]Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, Department of Energy and Process Engineering, Lehrstuhl für Anlagen- und Prozesstechnik, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland
fabian.primke@tum.de

[2]Linde GmbH, Clean Energy Technology R&D, Dr.-Carl-von-Linde-Straße 6-14, 82049 Pullach, Deutschland
Alexander.Alekseev@linde.com

Der sichere und effiziente Transfer von Flüssigwasserstoff (LH_2) stellt aufgrund der tiefen Temperaturen, der geringen Dichte sowie der Neigung zur Verdampfung besondere Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb kryogener Transfersysteme. In dieser Arbeit wird ein thermodynamisches Modell verwendet, um den Transfer von LH_2 mittels Kreiselpumpen anhand des Beispiels der Betankung von LH_2-Tankwagen zu untersuchen. Das Modell beschreibt die gekoppelten Massen- und Energiebilanzen der beteiligten Komponenten und berücksichtigt insbesondere Druckaufbau, Wärmeeintrag sowie den Einfluss der Pumpenförderung auf den thermodynamischen Zustand des Fluids. Ziel ist es, maßgebliche Betriebsparameter zu identifizieren, die Transferdauer und Verluste beeinflussen. Durch die modellbasierte Analyse können unterschiedliche Betriebsstrategien bewertet und Ansatzpunkte für eine optimierte Auslegung zukünftiger LH2-Transfersysteme abgeleitet werden. Der Fokus liegt dabei auf dem physikalischen Verständnis der dominierenden Effekte und der Übertragbarkeit des Modellierungsansatzes auf technisch relevante Anwendungen.

1.09

Kryogene Energiespeicher – Modulare und skalierbare Isolationskonzepte

Finn Harwege*, Robert Eberwein

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
finn-reinhard.harwege@bam.de

Die Speicherung und der Transport von verflüssigtem Wasserstoff (LH_2) bei Temperaturen von −253 °C stellen hohe Anforderungen an thermische Isolationssysteme. Im EU-Projekt NICOLHy werden neuartige Isolationskonzepte auf Basis von Vakuumisolationspaneelen (VIP) entwickelt, die eine energie- und kosteneffiziente Speicherung großer Wasserstoffmengen ermöglichen sollen.

Im Vergleich zu konventionellen doppelwandigen Tanks bieten VIP-basierte Systeme Vorteile hinsichtlich Modularität, Ausfallsicherheit und Herstellungsaufwand. Gleichzeitig ermöglichen sie flexible Tankgeometrien und eine verbesserte Skalierbarkeit für Anwendungen von stationären Speichern bis hin zum Transport in großvolumigen Tanks.

Zur Bewertung der Isolationskonzepte werden experimentelle und numerische Ansätze kombiniert. Hierzu zählen speziell entwickelte Prüfstände zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sowie die Validierung von Modellen unter realistischen Randbedingungen.

Die Ergebnisse leisten einen wichtigen Beitrag zur Integration von Wasserstoff in zukünftige Energiesysteme und zur Entwicklung effizienter kryogener Speicherkonzepte.

Keywords:
Insulation materials, Thermal Insulation, Tank design

Related Published Papers:
Harwege, F. R. et al., Testing of vacuum insulation panels for liquid hydrogen storage tanks, Proceedings 18th Cryogenics, Praha, 2025
Campari, A. et al., Thermo-Mechanical Assessment of a Novel Insulation Concept for Liquid Hydrogen Tanks, Proceedings 18th Cryogenics, Praha, 2025
Giannakopoulos, A.E., et al., Effective elastic moduli and failure mechanisms of a random assembly of thin walled glass microbubbles, International Journal of Solids and Structures 320, 2025

1.10

Aufbau eines Flüssigwasserstoff-Pumpenprüfstands, ein Beitrag aus der Praxis

Friedhelm Herzog*[1], Frank Gockel[2], Marc Sauermann[3], Christian Fleing[3]

[1] Herzog-Consulting im Auftrag von Messer SE & Co. KGaA
Friedhelm.Herzog-external@messergroup.com
[2] Messer SE & Co. KGaA
[3] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR-Köln) wurde ein Prüfstand zum Testen von Flüssigwasserstoff-Pumpen für die Luftfahrt und für marine Anwendungen aufgebaut. Die Flüssigwasserstoff-Versorgung erfolgt dabei mittels vakuumisolierter Container, die mit einem Flüssigstickstoff-Kühlschild ausgestattet sind, um bei Transport und Lagerung des -253°C (20 K) kalten Flüssigwasserstoffs die Abdampfverluste möglichst zu vermeiden. Um den Wasserstoffbedarf klein zu halten, wird der flüssige Wasserstoff während der Versuche von der Druckseite der zu testenden Pumpe wieder zum Pumpeneintritt zurückgeführt. Durch den Wärmeeintrag der Pumpe, die Isolationsverluste und die für die Rückführung erforderliche Druckabsenkung entsteht ein Flashgas, welches über einen speziell konstruierten Phasenseparator von der Flüssigkeit abgetrennt und zum Abgaskamin geführt wird. Dem Kamin wird dabei eine große Menge heißer Stickstoff zugeführt, um Luftkondensation am Kaminrohr und Nebelbildung am Gasaustritt zu vermeiden.

1.11

Schließung der experimentellen VLE-Datenlücken von Neon-Kohlenwasserstoff-Gemischen

Julian Schunk[1*], Jakob Reichert[2], Steffen Grohmann[1,2]

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

[2]Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
jakob.reichert@kit.edu

Die Verwendung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) in energietechnischen Anwendungen erfordert mehrere Kilowatt Kälteleistung bei kryogenen Temperaturen. Diese Anforderung kann durch kryogene Gemischkälteprozesse (Cryogenic Mixed-Refrigerant Cycles, CMRCs) mit hoher Effizienz und Leistungsdichte erfüllt werden. Vielversprechende Betriebsstoffe für CMRC-Anwendungen sind Gemische aus Neon, Stickstoff und kurzkettigen Kohlenwasserstoffen. Derzeit schränkt der Mangel an thermodynamischen Daten für binäre Neon-Kohlenwasserstoff-Systeme die Möglichkeit einer zuverlässigen simulationsgestützten Optimierung von Kältemittel

zusammensetzungen erheblich ein. Um diese Datenlücke zu schließen, sind experimentelle Untersuchungen der Dampf-Flüssigkeits-Gleichgewichte (Vapor-Liquid Equilibria, VLE) binärer Neon-Kohlenwasserstoff-Gemische am kryogenen Phasengleichgewichtsprüfstand CryoPHAEQTS geplant. Der Prüfstand ermöglicht VLE-Messungen in einem Temperaturbereich zwischen den jeweiligen Gefrierpunkten der untersuchten Gemische und Raumtemperatur sowie bei Drücken von bis zu 100 bar. Der Beitrag liefert eine Übersicht über existierende Daten, den Einfluss fehlender Wechselwirkungsparameter und die geplanten Messungen.

Stichwörter:
Phasengleichgewichte, Gemischkältekreislauf, Hochtemperatur-Supraleiter

1.12

Ein monolithisches Modell für die Auslegung hoch effizienter Wärmeübertrager in der Kryotechnik

Timo Weckerle[1]*, Steffen Grohmann[1,2]

[1] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
timo.weckerle@kit.edu
[2] Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK), Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland
steffen.grohmann@kit.edu

Interne Wärmeübertrager sind Schlüsselkomponenten kryogener Prozesse. Für einen wirtschaftlichen Betrieb werden in der Praxis Wirkungsgrade von deutlich über 90 % gefordert, da die nutzbare Kälteleistung häufig nur ein kleiner Bruchteil des insgesamt übertragenen Wärmestroms ist. Das bedeutet, dass bereits geringe Abweichungen von der idealen Wärmeübertragung die Leistungsfähigkeit des Prozesses überproportional beeinträchtigen. Axiale Wärmeleitung, innere oder parasitäre Wärmelasten sowie temperaturbedingte Änderungen der Stoffwerte beeinflussen das Betriebsverhalten innerer Wärmeübertrager signifikant und müssen in der Auslegung explizit abgebildet werden.

Ein häufig genutzter Ansatz entkoppelt die Stoffströme von der Wand und löst diese sequenziell als unabhängige Teilprobleme. So lässt sich jeder Strom mit vollständiger Impuls- und Energiebilanz integrieren, wobei die starke Druckkopplung im Zweiphasengebiet unmittelbar abgebildet wird. Die Entkopplung konvergiert jedoch schlecht, was auf eine prinzipbedingte numerische Schranke zurückzuführen ist.

Wir präsentieren ein Modell, das diese Schranke umgeht, indem Ströme und Wand monolithisch mit einem Jacobi-freien Newton–Krylov-Verfahren gelöst werden. Die Vorteile des entkoppelten Vorgehens gehen dabei nicht verloren: Modularität durch frei wählbare Korrelationen und Zustandsgleichungen sowie schnelle Lösbarkeit ohne vollaufgelöste CFD. Unser Modell konvergiert robust für ein breites Spektrum an Gemischen und Geometrien, liefert ohne fallspezifische Abstimmung physikalisch konsistente Ergebnisse und wurde anhand eigener Messungen sowie Literaturdaten validiert.

Stichwörter:
Air-Cycle-Machine, Turbokompressor, Expander, Gaslagerung, Mikro-Vibrationen

1.13

Entwicklungsaspekte einer Air-Cycle-Machine zur Kälteerzeugung

Fabian Dietmann, Patrik Fröhlich*

Celeroton AG, Industriestrasse 22, 8604 Volketswil, Schweiz
info@celeroton.com

Aktuelle regulatorische Rahmenbedingungen wie die konsequente Reduktion des GWP im Rahmen der F-Gase Verordnung sowie das drohende Verbot von derzeit eingesetzter Kältemittel aufgrund von PFAS treiben verstärkt die Suche nach alternativen, klimafreundlichen Kältemitteln voran. Infolgedessen befinden sich zahlreiche Industriezweige – von der industriellen Tieftemperaturkälte bis hin zur Gebäudeklimatisierung – in einem tiefgreifenden Transformationsprozess. Eine universelle, pauschale Kältemittelwahl zeichnet sich dabei nicht ab. Für gewisse Anwendungen haben sich natürliche und brennbare Kältemittel wie R-600 oder R-290 etabliert, für andere Anwendungsbereiche wie sicherheitskritische Industrieanlagen braucht es andere Lösungen. Zusammengefasst erfordert die Erreichung ambitionierter Klimaziele neue systemische Kompromisse, die sich für die definierte Kälteanforderung in veränderten Effizienzen, Betriebs- und Sicherheitskonzepten äussert.

Vor diesem Hintergrund stellt das Kältemittel R-729 (Luft) in Kombination mit gasgelagerten Turbomaschinen eine vielversprechende Alternative dar. Die Kombination bietet spezifische Vorteile, insbesondere im Hinblick auf Umweltverträglichkeit (GWP, ODP, Toxizität), Verfügbarkeit und Sicherheit, Lebensdauer und Ölfreiheit, sowie hohe Einzelkomponenten-Wirkungsgrade. Hierdurch können die Anforderungen in spezialisierten Nischen wie z. B. bei Kaltluftprozessen in der Halbleiterindustrie abgedeckt werden. Nachteilig sind die ungünstigen thermophysikalischen Eigenschaften zu nennen, welche sich in einem vergleichsweise tiefen Gesamtwirkungsgrad äussern.

Das vorliegende Paper widmet sich den Entwicklungsaspekten einer Prototyp-Air-Cycle-Machine (ACM) zur Bereitstellung einer Kälteleistung von einigen Kilowatt im Temperaturbereich von -60 bis -100 °C. Der Fokus liegt dabei auf der detaillierten Analyse zentraler Systemkomponenten (Verdichter, Expander, Rekuperator) sowie deren Zusammenspiel in der ACM. Es werden sowohl die Leistungsdaten der Einzelkomponenten wie auch die des Kreislaufes umfassend präsentiert und ein Ausblick über die nächsten Schritte gegeben.

Stichwörter:
Cryo-Cooler, Turbo-Kompressor, Reverse Brayton, Gaslagerung, Micro-Pulsationen

1.14

Kalibriereinrichtung für industrielle Thermometer bei Temperaturen unterhalb von 77 K

Tristan Vonken

Technische Universität Ilmenau, FG Prozessmesstechnik, Ehrenbergstraße 29, 98693 Ilmenau
tristan.vonken@tu-ilmenau.de

Während in der Kryotechnik häufig Thermometer in kleinen Bauformen genutzt werden, sind im industriellen Umfeld der Prozessindustrie Thermometer mit Metall-Messeinsätzen mit 3 mm bis 8 mm Durchmesser und beliebiger Länge üblich. Mit Blick auf großtechnische Anlagen im Bereich der Wasserstoff- und Erdgasverflüssigung sind solche Bauformen auch in der Kryotechnik bereits in Verwendung und es ist von einer zunehmenden Verbreitung auszugehen.

Um die Kalibrierung solcher industrieller Thermometer bei Temperaturen unter 77 K zu ermöglichen, wird an der Technischen Universität Ilmenau ein passender Kryostat entwickelt.

Ausgehend von einem Überblick über die Anforderungen an das Kalibriersystem beschreibt diese Veröffentlichung den detaillierten Aufbau des geplanten Kryostaten und seiner zentralen Komponenten. Zur Validierung

des Designs wurden FEM-Simulationen zum thermischen und mechanischen Verhalten des Systems durchgeführt, die kurz vorgestellt werden. Die so validierte Konstruktion bildet die Grundlage für die Fertigung und anschließende Inbetriebnahme des Kryostaten.

1.15

Kryokonservierung von Erythrozytenkonserven mithilfe von Float-Freezing-Verfahren

Tarek Deeb*, Malte Freiknecht, Christina Winkler, Marc Müller, Markus Richter, Stephan Kabelac und Birgit Glasmacher

Leibniz Universität Hannover, Institut für Mehrphasenprozesse und Institut für Thermodynamik
deeb@imp.uni-hannover.de

Das Ziel der Arbeit ist die Validierung eines Float-Freezing-Verfahrens zur Kryokonservierung von Erythrozytenkonzentraten (EK, Rotblutkörperchen-Konserven). Im Fokus steht die Untersuchung von vier Trägerflüssigkeiten (HFE-7100 Mixture, HFE-7200 Mixture und FD-40, Puretecs GmbH, sowie InfinX Calibration Fluid 0.8S, Halocarbon/Sojitz SOLVADIS) hinsichtlich ihrer Grenzflächenspannung gegenüber EK sowie ihres hämo- und zytotoxikologischen Profils.

Zusätzlich wurde die Dichte von EK bei klinisch relevanten Hämatokritwerten (50 %, 60 %, 70 %) bestimmt und die EK mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) kalorimetrisch charakterisiert. Ziel ist unter anderem, das Austragungsprofil auf der Trägerflüssigkeit zu erfassen und Stoffdaten zu sammeln, um ein in-silico-Modell für Auftragung und Wärmetransport zu validieren (Modell und erste Simulationen liegen bereits vor).

Geplant sind in den kommenden Monaten weitere DSC-Messungen zur Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von EK (mit und ohne Kryoprotektivum) sowie die numerische Bestimmung der aufgetragenen Schichtdicke. Perspektivisch möchten wir zudem fluorierte Tenside testen, um das Spreiten der EK-Phase zu verbessern, ohne eine Durchmischung oder Emulsionsbildung zu erzeugen.

1.16

LN_2-basierte Lagerbehälter zur Temperaturhaltung biologischer Proben zw. +8 °C und -196 °C

Jos Wulfestieg*, Bernd Gottschlich

Cryotherm GmbH&Co.KG, Euteneuen 4, 57548 Kirchen
Jos.Wulfestieg@Cryotherm.de

Bei der Lagerung von biologischen Proben ist die Lagertemperatur von entscheidender Bedeutung. Abhängig von der Art der einzulagernden Probe sowie der Lagerdauer ergeben sich unterschiedliche Zieltemperaturen: +2°C bis +8°C - Kühlschrank: kurzfristige Zwischenlagerung von flüssigen Blutproben, Urin, Abstrichen und flüssigen Nährmedien

- -20°C bis -30°C - Gefrierschrank: Tiefkühllagerung für einfache Seren, Urin, Plasma, Antikörper oder DNA
- -70°C bis -80°C - Ultratiefkühlschrank: Langzeitlagerung Gewebe, Zellen, RNA, Proteine und mikrobiologische Kulturen
- -150°C bis -196°C - Kryolagerung: Dauerhafte Konservierung von Stammzellen, Embryonen, Zelllinien oder sehr empfindlichen Gewebe

Die kryogene Lagerung mit flüssigem Stickstoff deckt bisher den Temperaturbereich -150°C - -196°C ab. Eine Weiterentwicklung verspricht die Erschließung neuer Anwendungsgebiete für die Kühlung mit LIN. Im Vortrag

beschrieben wird eine Lagerbehälter-Entwicklung, mit der alle genannten Temperaturbereiche gezielt angefahren und gehalten werden können.

1.17

Transportwege von zu importierendem Wasserstoff

K. Skorzus

DVGW - Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn
Karsten.Skorzus@dvgw.de

Wasserstoff tiefkalt-flüssig (LH2) wird zunehmend als aussichtsreicher alternativer Energieträger gesehen. Der DVGW hat sich zur Aufgabe gemacht, dies gezielt durch den Ausbau von Regelwerkssetzung und Normierung zu unterstützen. Dabei werden insbesondere im Rahmen der Normungsroadmap H2plus in den Arbeitsgruppen LH2-Verflüssigung und LH2-Terminals diese Regelwerksbedarfe ermittelt und zur Umsetzung gebracht.

In dem vorliegenden Beitrag werden Wasserstoffbedarfe und der Ausbau der Elektrolyse für 2030 – 2045 dargelegt, verschiedene Importvektoren (pipelinegebunden; Schiffstransport) vorgestellt, weitere Speicher- und Transportoptionen (NH3, MeOH, LOHC) kurz besprochen und miteinander verglichen. Schwerpunktmäßig wird der Transportvektor LH_2 betrachtet. Es erfolgt eine Effizienzvergleich der genannten Transportvektoren, überdies eine Betrachtung der Terminalproblematik.

1.18

Regasifizierung von LH2 und LNG mit thermischer Druckerhöhung

Erkundung alternativer Prozessarchitekturen für die Gasnetzeinspeisung von LH2 und LNG in maritimen Import-Terminals

Jaron Buhlmann

Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Universitätsplatz 2, 38106 Braunschweig
jaron.buhlmann@tu-braunschweig.de

Flüssigerdgas („liquid natural gas“, LNG) wird weltweit in großen Mengen entlang maritimer Handelsrouten transportiert. Nach dem Transport wird das LNG in Import-Terminals regasifiziert und in das Gasnetz eingespeist. Ein analoges Versorgungsszenario wird aktuell auch für Flüssigwasserstoff („liquid hydrogen“, LH2) diskutiert. Konventionelle Prozessarchitekturen zur Regasifizierung und Gasnetzeinspeisung am Import-Terminal sehen im Falle beider Fluide eine Druckerhöhung der Flüssigkeit vom Speicherzustand auf Pipelinedruck vor. Anschließend wird zur Temperaturerhöhung des Fluids Wärme nahezu isobar zugeführt. Statt die thermische Exergie des Speicherzustandes zu verwenden, wird die Druckerhöhung unter Einsatz von Arbeit durch Hochdruckpumpen erreicht. Die isobare Wärmezufuhr führt dabei zur Vernichtung der thermischen Exergie des Fluids im Hochdruckzustand nach der Pumpe, ohne diese Exergie auszunutzen.

Eine hier behandelte alternative Prozessarchitektur zur Regasifizierung und Gasnetzeinspeisung basiert auf der teilweisen Umwandlung der thermischen Exergie des Speicherzustandes in mechanische Exergie. Durch isochore Wärmezufuhr an das Fluid in einem geschlossenen Behälter kommt es hierbei zu einer thermischen Druckerhöhung. Nach Erreichen des Zieldrucks ermöglicht die Öffnung eines Ventils die Entladung des Fluids in Richtung Pipeline, während der Druck im Behälter durch weitere Wärmezufuhr konstant gehalten wird. Der Einsatz von Pumpen kann aufgrund dieser Ausnutzung der Exergie des Speicherzustandes entfallen. Ein Anteil des Fluids verbleibt nach Ende der Wärmezufuhr auf Pipelinedruck im Behälter und kann unter Einsatz von Arbeit durch unterstützende Verdichter in die Pipeline eingespeist werden.

Im vorliegenden Beitrag wird das Potenzial dieses Ansatzes simulativ am Beispiel von LH2 und LNG anhand eines einzelnen Druckbehälters aufgezeigt. Die Simulationsergebnisse für den spezifischen Arbeitsbedarf und eine

Exergieanalyse werden genutzt, um Vor- und Nachteile der alternativen Prozessarchitektur zur Gasnetzeinspeisung gegenüber der konventionellen Prozessarchitektur mit Verwendung einer Pumpe zu diskutieren.

Stichwörter:
LNG, LH2, Regasifizierung, Exergie, thermische Druckerhöhung

1.19

Auslegung und Qualifizierung einer schwimmenden flexiblen kryogenen LNG-Transferleitung für küstennahe LNG-Importterminals

Jürgen Essler

BRUGG Rohrsysteme GmbH • Adolf-Oesterheld-Straße 31 • D-31515 Wunstorf
Juergen.Essler@brugg.com

Der Ausbau kleiner und mittelgroßer LNG-Importterminals eröffnet neue Möglichkeiten zur Energieversorgung von Küstenregionen und Inselstandorten. Flexible, vakuumisolierte Kryoleitungen bieten hierbei Vorteile hinsichtlich Vorfertigung, Installationsaufwand und Projektlaufzeit gegenüber konventionellen starren Rohrleitungssystemen.

Der Beitrag präsentiert die ingenieurtechnische Qualifizierung einer 200 m langen, flexiblen LNG-Transferleitung aus gewelltem Edelstahl für den dauerhaften Einsatz zwischen einer schwimmenden LNG-Empfangseinheit und einer landseitigen Importanlage in tropischer Umgebung. Im Fokus stehen die Wechselwirkungen zwischen Umwelteinflüssen, thermischem Verhalten und struktureller Integrität.

Vorgestellt werden die Methoden zur thermischen und mechanischen Auslegung, einschließlich Ermüdungsanalysen unter welleninduzierten Bewegungen, Untersuchungen des transienten Temperaturverhaltens sowie die Bewertung der Vakuumisolierung unter hohen Umgebungstemperaturen und intensiver Sonneneinstrahlung. Ergänzend werden Ergebnisse aus Qualifikationstests und Projektumsetzungen vorgestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass flexible kryogene Transferleitungen die Anforderungen eines dauerhaften LNG-Betriebs auch unter anspruchsvollen tropisch-maritimen Randbedingungen erfüllen können und eine technisch robuste sowie wirtschaftlich attraktive Lösung für moderne LNG-Importterminals darstellen.

Stichwörter:
Schlagwörter: LNG, Kryotechnik, Flexible Kryoleitung, LNG-Transfer, Ermüdungsanalyse, Thermische Auslegung, Vakuumisolierung, Offshore-Technik.

1.20

SuprAL – Kühlung eines 600 m langen Supraleiters in der Aluminiumproduktion auf 20 K

Claus Hanebeck*, Stefan Huwer, René Steidel, Wolfgang Reiser

Vision Electric Super Conductors GmbH, Morlauterer Str.21, 67657 Kaiserslautern
hanebeck@vesc-superbar.de

Im Reallabor der Energiewende SuprAL wird in einer Aluminiumproduktion eine rund 600 m lange konventionelle Stromschiene durch ein supraleitendes 200 kA-System ersetzt. Mit dem Einsatz von Hochtemperatursupraleitern soll der Spannungsfall über den Rückleiter von derzeit etwa 12 V auf unter 0,5 V reduziert und die Energieeffizienz der Anlage deutlich gesteigert werden.

Das Kühlsystem umfasst eine offene Flüssigstickstoffkühlung zur Kühlung der Stromzuführungen und des Strahlungsschilds entlang des Rohrkryostaten sowie einen geschlossenen Helium-Gaskreislauf bei 20 K zur Kühlung der Supraleiter.

Der Vortrag gibt einen Überblick über den aktuellen Projektstand und stellt die Auslegung sowie den Aufbau der Kryotechnik vor.

Förderkennzeichen: 03EWR025

1.21

Kryostat für mechanische Werkstoffprüfung

Quirin Schneider

Universität Augsburg, Universitätsstraße 2, 86159 Augsburg
quirin.schneider@uni-a.de

Diese Arbeit präsentiert ein flüssigkeitsfreies Kryostat-Konzept zur mechanischen Charakterisierung von Materialien bei bis zu 50 kN und einem variablen Temperaturbereich bis zu 20 K. Eine zentrale Motivation der Systemauslegung ist die Integration optischer und akustischer In-situ-Messverfahren, insbesondere der digitalen Bildkorrelation und Schallemissionsanalyse, um eine experimentelle Echtzeitüberwachung des Materialverhaltens während der Prüfung zu ermöglichen.

Kern der auf einem bereits bestehenden Proof-of-Concept basierenden Überarbeitung ist eine optimierte thermische Architektur basierend auf zwei GM-Kryokühlern. Ziel der Neuauslegung ist die Reduktion der Abkühlzeit, Minimierung thermischer Gradienten im Probenbereich sowie ein verbessertes Wärmelastmanagement. Hierzu wurde der Wärmeleitpfad verkürzt, wodurch der thermische Widerstand reduziert, und die Temperaturhomogenität erhöht wurde. Ein Kryokühler übernimmt gezielt die Probenkühlung, während der andere parasitäre Wärmelasten auf höherem Temperaturniveau abführt.

Ergänzend wurde das mechanische Konzept hinsichtlich Steifigkeit, Lastaufnahme und thermischer Anbindung grundlegend überarbeitet. Das resultierende System ermöglicht zudem verbesserte Zugänglichkeit zu Probe und Probenraum und eignet sich damit für anspruchsvolle kryogene Prüfaufgaben.

1.22

Zugversuche an Klebstoffen und Klebverbindungen unter kryogenen Bedingungen

Thomas Just*, Christoph Haberstroh, Jörn Jaschinski, Christoph Ebert, Karsten Dobrindt-Tittmann, Maik Gude, Christiane Thomas

Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
Technische Universität Dresden, 01062 Dresden
thomas_christopher.just@tu-dresden.de

Die Disziplin Leichtbau nimmt eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt ein. Der Einsatz von Flüssigwasserstoff (LH_2) als Treibstoff in der nachhaltigen Luftfahrt erfordert kryogene Tank- und Leitungssysteme. Diese herkömmlicherweise aus Edelstahl gefertigten Systeme sind durch ihr hohes Gewicht für den Einsatz in Flugzeugen schlecht geeignet. Aus diesem Grund rücken faserverstärkte Polymere als alternative Konstruktionswerkstoffe vermehrt in den Fokus der aktuellen technischen Entwicklung. In diesem Kontext spielen ebenso alternative Fügemethoden wie das Kleben eine große Rolle. Die Auslegung kryogener Systeme mit solchen Werkstoffen bedarf umfassender Materialkennwerte, insbesondere unter kryogenen Bedingungen. Die vorhandene Datenlage ist jedoch unzureichend. Die vorliegende Arbeit stellt einen an der Technischen Universität Dresden entwickelten Prüfstand für Zugversuche an Klebstoffen und Klebverbindungen unter

kryogenen Bedingungen vor. Der Prüfstand erlaubt Versuche unter Flüssigstickstoff bei 77 K, unter Flüssigwasserstoff bei 20 K, unter Helium-Kaltgas bei 20 K und unter Flüssighelium bei 4 K. Messergebnisse von Klebverbindungen unter kryogenen Bedingungen werden präsentiert und mit Messungen bei Umgebungsbedingungen (296 K) und unterhalb Umgebungsbedingungen (233 K) verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanischen Festigkeitskennwerte maßgeblich von den kryogenen Temperaturbedingungen bestimmt werden und nicht vom Medium abhängig sind.

2.01

Exergieanalyse eines NH_3/H_2O-Absorptionswärmetransformators

Luisa Haak*, Simon Klink

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

Absorptionswärmetransformatoren (AWT) ermöglichen die Aufwertung von Abwärme von einem mittleren Temperaturniveau (ca. 70…90 °C) auf ein höheres Temperaturniveau (>100 °C) bei gleichzeitig geringem Strombedarf. Damit stellen sie eine vielversprechende Technologie zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse dar.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde ein Ammoniak/Wasser-AWT mit einer Nutzwärmeleistung von ca. 10 kW aufgebaut und in Betrieb genommen. In diesem Beitrag wird eine Exergieanalyse des Ammoniak/Wasser-AWTs auf Basis experimenteller Daten vorgestellt. Es werden sowohl die Exergieverlustrate als auch der exergetische Wirkungsgrad einer jeden Komponente sowie des gesamten Kreisprozesses berechnet. Auf dieser Grundlage werden die wesentlichen Quellen irreversibler Exergieverluste identifiziert. Ergänzend wird die energetische Effizienz anhand eines Vergleichs des COP mit dem Carnot-COP beurteilt. Potenziale zur Steigerung der energetischen und exergetischen Effizienz aber auch deren Grenzen werden diskutiert.

Schlüsselwörter:
Absorption, Wärmetransformator, Ammoniak/Wasser, Exergetische Analyse

2.02

Alternative Sorptionsmittel für Absorptionswärmepumpen

Betriebsverhalten zweier alternativer Sorptionsmittel in einem gläsernen Demonstrator

**Elena Steinwender[1-1*], Michael Wernhart[1-1], René Rieberer[1-1],
Christoph Weinzettl[1-2], Marlene Kienberger[1-2,]
Markus Damm[2],
Mike Otto[3], Christian Kemmerzehl[3]**

[1-1] TU Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
elena.steinwender@tugraz.at

[1-2] TU Graz, Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik,
Inffeldgasse 25/C, 8010 Graz, Österreich

[2] proionic GmbH, Parkring 18/H, 8074 Raaba-Grambach, Österreich

[3] EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld, Oberes Tor 106, 98630 Römhild, Deutschland

H_2O/Lithiumbromid wird überwiegend als Arbeitsstoffpaar in Absorptionswärmepumpen eingesetzt, da es betriebssicher ist und hohe thermische Leistungen bei üblicherweise hoher Effizienz ermöglicht. Betriebseinschränkungen ergeben sich durch die Kristallisationsneigung und korrosionsfördernde Wirkung wässriger Lithiumbromidlösung, besonders bei hohen Konzentrationen, welche sich insbesondere bei hohen Antriebstemperaturen einstellen können.

Zur Verbesserung der Betriebsflexibilität werden im Zuge des Projekts „AbSorbEnt“ alternative Sorptionsmittel, ionische Flüssigkeiten (ILs) und stark eutektische Lösungsmittel (DES), erforscht, wobei diese u. a. in einem mit Schaugläsern ausgestatteten Absorptionswärmepumpen-Demonstrator untersucht werden.

In diesem Beitrag werden die Messdaten aus dem Betrieb mit zwei vielversprechenden alternativen Sorptionsmitteln (IL: [EMIM][$MeSO_3$], DES: Betaine:Glycerol) bei Lösungstemperaturen zwischen 30 °C und 140 °C sowie bei Drücken zwischen 20 und 400 mbar analysiert und bewertet. Hierbei werden u.a. die Leistungen und Effizienzkennzahlen aus dem Heizbetrieb einander gegenübergestellt. Maßgebliche Einflussgrößen werden u.a. anhand von Diagrammen und qualitativer, optischer Analyse diskutiert. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit H_2O/[EMIM][$MeSO_3$] bei hohen Antriebstemperaturen ($t_{Gen,in}$ ≈ 150 °C) und einem spezifischen Lösungsumlauf von f ≈ 43,11 kg_{RSo}/kg_{Ref} Verdampferleistungen bis $\dot{Q}_{Eva}$ ≈ 2,04 kW erreicht werden können. Im Vergleich dazu resultiert aus den ersten Messungen bei gleichen Bedingungen mit H_2O/Betaine:Glycerol eine Verdampferleistung von $\dot{Q}_{Eva}$ ≈ 1,05 kW bei einem spezifischen Lösungsumlauf von f ≈ 62,85 kg_{RSo}/kg_{Ref}.

Stichwörter:
Stark eutektische Lösungsmittel, Ionische Flüssigkeiten, Lithiumbromid, AWP

2.03

Modellgestützte Analyse eines LiBr/Wasser-Absorptionswärmetransformators

Konrad Ostermann[1*], Julian Wagner[1], Ludwig Irrgang[1], Hartmut Spliethoff[1], Christopher Schifflechner[1]

[1] Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme, Boltzmannstraße 15,
85748 Garching bei München, Deutschland
konrad.ostermann@tum.de

Absorptionsmaschinen bieten insbesondere in Kombination mit Geothermieanlagen ein hohes Potenzial für eine saisonal flexible Nutzung thermischer Energie. Zur Steigerung des Ausnutzungsgrades und der betrieblichen Flexibilität wird ein bestehender Prüfstand einer Absorptionskältemaschine so weiterentwickelt, dass die Anlage zusätzlich umkehrbar im rechtsläufigen Betrieb als Absorptionswärmetransformator eingesetzt werden kann. Dadurch wird ein saisonal adaptiver Betrieb ermöglicht, bei dem die Anlage in den Sommermonaten zur Kältebereitstellung und in den Wintermonaten zur Wärmetransformation genutzt werden kann.

Zur experimentellen Validierung des erweiterten Anlagenkonzepts soll ein bestehender Teststand entsprechend umgerüstet werden. Im ersten Schritt wird das neue Systemkonzept vorgestellt und hinsichtlich seiner funktionalen Anforderungen eingeordnet. Für die Auslegung und Optimierung wird der Teststand anschließend als Wärmetransformator in Dymola mithilfe eines stationären Modells modelliert. Auf dieser Grundlage werden geeignete Regelungsstrategien simulativ entwickelt und die Betriebsgrenzen des Wärmetransformators charakterisiert.

Ein Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der optimierten Verschaltung von Generator und Verdampfer sowie auf der Auslegung einer geeigneten Regelungsstrategie für die Lösungspumpe. Die daraus abgeleitete Betriebsführung soll einen stabilen und effizienten Anlagenbetrieb über unterschiedliche Temperaturniveaus hinweg ermöglichen. Abschließend werden die tolerierbaren Temperaturbereiche sowie die daraus resultierenden Einsatzgrenzen des Systems aufgezeigt. Damit wird eine Grundlage für die experimentelle Realisierung und die spätere Bewertung des saisonal reversiblen Anlagenbetriebs geschaffen.

Stichwörter:
Absorptionswärmetransformator, Regelungsstrategie, Betriebsgrenzen, Dymola, Geothermie

2.04

Partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher

Zentrale Ergebnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens PAKS

Dieter Preßl[1*], Tobias Schubert[1], Michael Radspieler[1], Eberhard Lävemann[1]

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

Im kürzlich abgeschlossenen Forschungsvorhaben PAKS (BMWE, FKZ 03EN6017) wurde ein neuartiger partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher zur Nutzung industrieller Abwärme für die flexible Kältebereitstellung entwickelt und erstmals in einer Technikumsanlage experimentell umgesetzt. Ziel ist die Substitution konventioneller, strombasierter Kälteerzeugung durch die Nutzung bislang ungenutzter Abwärmeströme. Auf Basis von Materialuntersuchungen und Ergebnissen der experimentellen Untersuchung der Teilprozesse wurde eine Technikumsanlage konzipiert, aufgebaut und experimentell untersucht. Im Rahmen des Vortrags sollen die zentralen Ergebnisse des Projekts vorgestellt werden. Neben den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung des Lade- und Entladebetriebs des Speichers werden auch die Erkenntnisse der durchgeführten technoökonomischen Bewertung vorgestellt. Zudem erfolgt ein Ausblick auf die geplante weitere Entwicklung der Technologie im Rahmen eines Demonstrationsprojekts.

Stichwörter:
Absorption, Kältespeicher, Abwärme, Energieeffizienz, Energiespeicher

2.05

[EMIM][$MeSO_3$] als alternatives Sorptionsmittel für AWP

Von Stoffdaten zur experimentellen Analyse des Stoff- und Wärmetransports wässriger Lösungen

**Michael Wernhart[1-1*], Elena Steinwender[1-1], René Rieberer[1-1],
Christoph Weinzettl[1-2], Marlene Kienberger[1-2,]
Markus Damm[2],
Mike Otto[3], Christian Kemmerzehl[3]**

[1-1] TU Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
michael.wernhart@tugraz.at

[1-2] TU Graz, Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik,
Inffeldgasse 25/C, 8010 Graz, Österreich

[2] proionic GmbH, Parkring 18/H, 8074 Raaba-Grambach, Österreich

[3] EAW Energieanlagenbau GmbH Westenfeld, Oberes Tor 106, 98630 Römhild, Deutschland

In Absorptionswärmepumpen wird meist das Arbeitsstoffpaar H_2O/Lithiumbromid eingesetzt, da Wasser aufgrund seiner hohen latenten Wärme und Umweltfreundlichkeit ein gut geeignetes Kältemittel darstellt und das Sorptionsmittel Lithiumbromid aufgrund seiner hohen Wasseraffinität geringe Lösungsumläufe ermöglicht. Insbesondere bei hohen Antriebstemperaturen kann Lithiumbromid jedoch zu Problemen wie Korrosion und Kristallisation führen, wodurch die Betriebsflexibilität eingeschränkt wird.

Aus diesem Grund werden im Rahmen des Projekts "AbSorbEnt" alternative Sorptionsmittel wie ionische Flüssigkeiten und stark eutektische Lösungsmittel entwickelt und deren Einsatz in Absorptionswärmepumpprozessen

bei Temperaturen des Wasser-Sorptionsmittel-Gemischs zwischen 30 und 200 °C bzw. bei Drücken zwischen 10 mbar und 1,5 bar analysiert und bewertet.

In diesem Konferenzbeitrag werden experimentell ermittelte Stoffeigenschaften und daraus abgeleitete Zustands- und Transportgrößen wässriger Lösungen mit der ionischen Flüssigkeit [EMIM][$MeSO_3$], die als vielversprechendes Sorptionsmittel identifiziert wurde, vorgestellt. Darauf aufbauend erfolgt eine modellbasierte Einordnung der aus Stoffdaten abgeleiteten thermodynamischen und transportrelevanten Eigenschaften im Vergleich zu dem in einem Lösungskreis beobachteten Verhalten. Dabei wird untersucht, inwieweit sich die stoffdatenbasierten Erwartungen unter Betriebsbedingungen auf Wasseraufnahme, Wärme- und Stoffübergang übertragen lassen. Ergänzend werden apparatebedingte Einflussgrößen wie Benetzung, Filmbildung und Druckverlust analysiert und bewertet.

Für H_2O/[EMIM][$MeSO_3$] wurden im Absorber einer Versuchsanlage beispielsweise effektive Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten von $\alpha \approx 850\ W/(m^2 \cdot K)$ und $\beta \approx 3 \cdot 10^{-5}\ m/s$ aus Messdaten bestimmt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden Ansätze zur Beschreibung des Transportverhaltens abgeleitet und deren Bedeutung für die technische Umsetzung von Absorptionswärmepumpen diskutiert.

Stichwörter:
Absorptionswärmepumpen, Ionische Flüssigkeit, Lithiumbromid, Transportverhalten

2.06

Berechnung des Druckverlusts von Offset-Strip-Fins in Einphasenströmung

Marco Bem[1*], Dr.-Ing Marco Mancini[1], Prof. Dr.-Ing Michael Olbricht[1]

[1] Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik,
Agricolastraße 4, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland
marco.bem@tu-clausthal.de

Ein Schlüssel bei der Auslegung energieeffizienter Thermomanagementsysteme für mobile Anwendungen, inklusive Wärmepumpen- und Kältekreisläufe ist die möglichst exakte Auslegung kompakter Wärmeübertrager. Diese werden häufig als Plattenapparate mit Offset-Strip-Fins ausgeführt. Bestehende empirische Korrelationen zur Berechnung des Druckverlusts solcher Lamellen zeigen für komplexe Finnenstrukturen signifikante Abweichungen untereinander und im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen und führen daher häufig zu konservativen Überdimensionierungen in der Auslegung der gesamten Systeme. Daher wird eine CFD-basierte Methodik zur verbesserten Berechnung des einphasigen Druckverlusts in Offset-Strip-Fins vorgestellt.

Die Methodik umfasst eine detaillierte Modellierung der Finnenstruktur mit separater Betrachtung von Einlass- und Auslassbereichen. Im Gegensatz zu vielen bisherigen Ansätzen werden auch trapezförmige Finnengeometrien explizit berücksichtigt sodass der Einfluss verschiedener Geometrieparameter auf den Druckverlust detailliert analysiert werden kann.

Die numerischen Ergebnisse werden anhand experimenteller Daten validiert. Die Auswirkung unterschiedlicher Arten der Diskretisierung und der numerischen Randbedingungen auf das Ergebnis werden diskutiert. Es wird dargestellt, wie durch das Modell der Entwicklungsprozess neuer kompakter Wärmeübertrager beschleunigt wird und sich für neue Offset-Strip-Fin-Geometrien Auslegungsgleichungen ohne zusätzliche Messungen ableiten lassen.

Stichwörter:
Offset strip fin, Druckverlust, Plattenwärmeübertrager, CFD

2.07

Experimentelle Untersuchung der Feststoff-Gas-Strömung von CO_2 in gebogenen Rohren mittels optischer Visualisierung

Tom-Alexander Müller et al.

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
tom-alexander.mueller@tu-dresden.de

Die Sublimation von festem CO_2 (Trockeneis) gewinnt im Kontext der F-Gase-Verordnung für Ultratieftemperatur-Anwendungen (ULT) unterhalb von -50 °C zunehmend an Bedeutung. In geschlossenen Kältemittelkreisläufen wird CO_2 unterhalb des Tripelpunkts (5,18 bar) geführt, wobei die Sublimation des festen CO_2 im Verdampfer zur Bereitstellung der Kälteleistung genutzt wird. Für eine zuverlässige Auslegung derartiger Systeme ist ein grundlegendes Verständnis der Wärmeübertragungs- und Verblockungsmechanismen in Rohrleitungen und Wärmeübertragern erforderlich. Während die Feststoff-Gas-Strömung in geraden Rohren bereits Gegenstand erster Untersuchungen war, liegen für gebogene Rohre, trotz ihrer praktischen Relevanz und der dort auftretenden komplexen Strömungs- und Wärmeübertragungsphänomene, bislang keine experimentellen Daten vor. Die Feststoff-Gas-Strömung von sublimierendem CO_2 in gebogenen Rohren wurde experimentell untersucht. Hierzu wurde ein Versuchsstand konzipiert, der eine visuelle Beobachtung und Analyse der Zweiphasenströmung ermöglicht. Die Experimente wurden bei verschiedenen Drücken unterhalb des Tripelpunkts durchgeführt, um den Einfluss des Druckniveaus auf die Feststoffverteilung im Rohr zu analysieren. Darüber hinaus wurde die Rohrgeometrie gezielt variiert, um den Einfluss geometrischer Parameter auf das Strömungsverhalten zu bewerten. Die gewonnenen Ergebnisse liefern einen Beitrag zum besseren Verständnis der Sublimationsströmung.

2.08

Two-phase flow in brazed plate heat exchangers

Visualization and characterization of flow maldistribution issues

Carsten Hausherr*, Prof. Dr. Stefan Elbel

Technische Universität Berlin, FG Wärmeübertragung und -wandlung, KT2, Marchstraße 18, 10587 Berlin
carsten.hausherr@tu-berlin.de

The transition to low global warming potential refrigerants, driven by regulatory frameworks such as the F-gas Regulation, has introduced significant challenges in brazed plate heat exchanger (BPHX) design. Maldistribution of two-phase flow in BPHX evaporators severely degrades thermal performance, often necessitating oversized systems to compensate for efficiency losses. This study presents experimental insights into flow maldistribution phenomena using a visualization approach. BPHX prototypes were fabricated by integrating transmissive observation windows, enabling optical and infrared (IR) thermographic access to quantify plate-to-plate maldistribution. High-speed optical and IR thermography were employed to map flow regimes under varying operating conditions, including mass flux, inlet vapor quality, and saturation temperatures. Results reveal distinct maldistribution patterns correlated with high efficiency losses in severe cases, particularly at low mass fluxes and high vapor qualities. The visualization data provides the basis for the development of guidelines for the optimization of BPHX designs for applications with low-GWP refrigerants, which can lead to significant efficiency improvements and thus reduce manufacturing costs and CO2 emissions during operation.

2.09

Versuchsanlage eines ejektorbasierten R744 Sublimators mit Trägerfluid

Entwicklung, Aufbau und erste Ergebnisse

Jakob Illmer[1*], René Rieberer[1]

[1] Institut für Wärmetechnik – Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz, Österreich
jakob.illmer@tugraz.at

R744 (Kohlendioxid) wird in vielen Bereichen der Kältetechnik mit großem Erfolg eingesetzt. Bei Temperaturen zwischen -60 und -80°C tritt reines R744 jedoch nur im festen oder gasförmigen Aggregatszustand auf, wodurch der Einsatz in klassischen Kaltdampf-Kompressionskälteanlagen erschwert wird. Diverse Arbeiten zum Einsatz von sublimierendem R744 (d. h. unter Ausnutzung des Phasenwechsels fest-gasförmig unterhalb des Tripelpunkts (5,2 bar/-57°C) identifizierten speziell die Verstopfung von Strömungsquerschnitten durch R744-Partikel und den vergleichsweise schlechten Wärmeübergang als Probleme.

Ein vielversprechender Lösungsansatz für diese Probleme ist die Verwendung eines flüssigen Trägerfluids. Um ein neuartiges Funktionsprinzip für einen ejektorbasierten Sublimator mit Trägerfluid untersuchen zu können, wurde ein Versuchsstand entwickelt. Dieser Versuchsstand kann R744 in unterkühltem sowie gesättigt flüssigem Zustand bei verschiedenen Druckniveaus vor der Drosselung mittels Kapillare bereitstellen und bietet optische Zugänglichkeit zur Ejektorzone, welche unterhalb des Flüssigkeitsspiegels des Trägerfluides liegt. Das Gefäß mit dem Trägerfluid steht unter Umgebungsdruck (ca. 1 bar), was einer Sublimationstemperatur von ca. -78,5°C entspricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein stabiler, verstopfungsfreier Betrieb des Sublimators möglich ist. Es wird eine zentrale Größe für den verstopfungsfreien Betrieb identifiziert und anhand eines bewusst herbeigeführten Verstopfungsvorganges das Verhalten des Systems veranschaulicht.

Stichwörter:
R744, Sublimation, Tieftemperaturkühlung, Trägerfluid

2.10

Massebestimmung in Wärmeübertragern: Vergleich experimenteller Methoden

Vasco Wild[*], Prof. Dr.-Ing. Arne Speerforck

Technische Universität Hamburg, Institut für technische Thermodynamik, Denickestraße 17, 21073 Hamburg
vasco.wild@tuhh.de

Im Rahmen der Forschung am Institut für Technische Thermodynamik ist ein experimenteller Prüfstand zur Untersuchung von Wärmeübertragern unter Einsatz von Propan als Arbeitsmedium aufgebaut worden. Das grundlegende Konzept sowie die Auslegung des Prüfstands wurden bereits im Rahmen eines Vortrags auf der DKV Tagung 2025 vorgestellt (Wild und Speerforck 2025). Der Prüfstand ermöglicht die Untersuchung von Kondensatoren und Verdampfern unter variablen Betriebsbedingungen und dient insbesondere der Analyse von Füllmengen und Wärmeübertragungscharakteristika.

Ein zentraler Aspekt bei der experimentellen Bewertung von Wärmeübertragern ist die zuverlässige Bestimmung der im Wärmeübertrager enthaltenen Kältemittelmasse. Im vorliegenden Beitrag werden hierzu zwei etablierte Methoden gegenübergestellt, die Quick Closing Valve Technique (QCVT) und die Online Measurement Technique (OMT) (vgl. Ding u. a. 2009; Poggi u. a. 2008). Die QCVT basiert auf dem schnellen Absperren des Wärmeüber-

tragers mit anschließender gravimetrischer Bestimmung der eingeschlossenen Kältemittelmasse. Die OMT hingegen ermöglicht eine kontinuierliche Bestimmung der Kältemittelmasse im laufenden Betrieb auf Basis geeigneter Messgrößen. In der hier betrachteten Umsetzung erfolgt dies durch eine direkte Wägung des Wärmeübertragers, wobei insbesondere die mechanische Entkopplung sowie die Kalibrierung der Messtechnik entscheidend sind.

Ziel des Beitrags ist ein experimenteller Vergleich beider Methoden hinsichtlich ihrer Genauigkeit sowie des erforderlichen zeitlichen Aufwands. Hierzu werden Messdaten aus dem neu aufgebauten Prüfstand herangezogen. Neben der Gegenüberstellung der Messergebnisse werden auch praktische Aspekte der Anwendbarkeit, wie der Eingriff in den Betriebszustand und der experimentelle Aufwand, diskutiert.

Literatur:
Ding, Guoliang, Xiaokui Ma, Ping Zhang, Weizhe Han, Shinichi Kasahara, und Takahiro Yamaguchi. 2009. „Practical Methods for Measuring Refrigerant Mass Distribution inside Refrigeration System". International Journal of Refrigeration 32 (2): 327–34. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.05.002.
Poggi, F., H. Macchi-Tejeda, D. Leducq, und A. Bontemps. 2008. „Refrigerant charge in refrigerating systems and strategies of charge reduction". International Journal of Refrigeration 31 (3): 353–70. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.05.014.
Wild, Vasco, und Arne Speerforck. 2025. „Teststand zur Untersuchung von Wärmeübertragern mit Propan". 52 (November). https://hdl.handle.net/11420/60584.

Stichwörter:
Wärmeübertrager, Propan, R290, Teststand, Verdampfung, Kondensation

2.11

Dispersionsbasierte Eisbreierzeugung

Vorstellung des Funktionsnachweises und erster Ergebnisse

Manuel Matthes[1], Levi Walter[1], Jonathan Laun[1], Jonathan Rausendorf[1], Thorsten Urbaneck[1*]

[1] Technische Universität Chemnitz, Professur für Technische Thermodynamik
Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

In der Kältetechnik und -versorgung richtet sich seit Jahren der Fokus immer mehr auf natürliche Kältemittel, wie z. B. CO_2, Propan und Ammoniak, sowie umweltfreundliche thermische Speicher mit bspw. Kaltwasser oder Eisbrei. Obwohl Eisbrei ein vorteilhaftes Speicher- und Transportmedium für Kälte ist, konnten sich entsprechende Systeme in der Praxis bisher nicht durchsetzen. Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in den Nachteilen und Limitierungen bestehender Erzeugungsverfahren. Die Autoren präsentierten in früheren Arbeiten einen neuartigen Ansatz zur Herstellung von Eisbrei. Der Prozess umfasst zunächst die Erzeugung einer Gas-Wasser-Dispersion unter hohem Druck, welche anschließend entspannt wird, wobei ein Teil des Wassers zu feinen Eispartikeln gefriert. Das Verfahren erlaubt die kontinuierliche, skalierbare Eisbreierzeugung unter Nutzung natürlicher Kältemittel. Ein Demonstrator erbrachte nun den Funktionsnachweis des Verfahrens. Der Beitrag beschreibt die Anlage und präsentiert erste Ergebnisse.

Stichwörter:
Eisbrei, Ice Slurry, Dispersion, Gas, Demonstrator

2.12

Arbeitsfluidgemische für Hochtemperaturanwendungen

Alternative Arbeitsfluid-Lösemittel Paare für die Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreis

Sven-Yannik Schuba[1*], Ivo Schüle[1], Arne Dittrich[1], Maximilian Loth[1]

[1] Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Forschungsgruppe Wärmepumpen
Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Deutschland
schuba@isfh.de

Seit den 1980er Jahren wird die Anzahl von synthetischen Arbeitsfluiden kontinuierlich wegen ihrer Ozonschädigung und hohen Treibhauspotentiale legislatorisch beschränkt. Hinzu kommt das im Raum stehende Verbot für Arbeitsfluide mit toxischen und persistenten Abbauprodukten. Die Anzahl möglicher Arbeitsfluide für Hochtemperaturwärmepumpen wird so absehbar auf die Gruppe der natürlichen Arbeitsfluide reduziert werden. Eine Lösung bietet die Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreis. Das in ihr eingesetzte, weitsiedende Gemisch ermöglicht zum einen das Einstellen einer auf die Anwendung passenden Dampfdruckkurve und damit eine optimale Lage von Verdampfungs- und Kondensationsdruck. Zum anderen ist sie nicht auf einen vollständigen Phasenwechsel angewiesen. Dadurch kann sie das Mischungsverhältnis und damit den Temperaturgleit des Arbeitsfluidgemisches in den Wärmeübertragern zur jeweiligen Versorgungsaufgabe anpassen. Zusätzlich bieten sich durch zwei flüssige und einen gasförmigen Strang mehr Möglichkeiten, den Standard-Prozess mit weiteren Komponenten zu modifizieren. Auf dem Markt sind Wärmepumpen dieses Typs mit dem Gemisch Ammoniak-Wasser bereits erhältlich. In diesem Vortrag wird eine Methodik zur Identifizierung von natürlichen Arbeitsfluid-Lösemittel-Paaren, neben Ammoniak-Wasser, für die Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreis vorgestellt. Dafür wurde eine Datenbank mit 280 reinen Fluiden erstellt. Diese Datenbank beinhaltet thermodynamische Daten sowie Angaben zur Mischbarkeit und Gefährdungsbeurteilung der Fluide. Unter Berücksichtigung der Anwendungsfälle „Kühlen“, „Wärmenetze“, „Dampferzeugung“ und „Hochtemperatur“ wurde eine Filterlogik erarbeitet, um pro Anwendungsfall geeignete Arbeitsfluid-Lösemittel-Paare bis 200 °C Senkentemperatur zu identifizieren. Nach anschließender Auswahl der Paare werden diese mit Hilfe von Literaturdaten auf Mischbarkeit, thermische Zersetzung und gefährliche Reaktionen kontrolliert. Nach Bestehen der Kontrolle werden geeignete Stoffdatenmodelle aus der Literatur zur Berechnung von realen thermischen, kalorischen und entropischen Stoffdaten für diese Paare entnommen. Abschließend werden diese miteinander verglichen, mit Hilfe von Messdaten aus der Literatur validiert und die Ergebnisse in einer Entscheidungsmatrix für die Arbeitsfluid- und Lösemittelwahl zusammengefasst.

Stichwörter:
Wärmepumpe mit Lösungskreis, Arbeitsfluid und Lösemittel, Hochtemperaturwärmepumpe

2.13

Ein kompakter 13-Parameter-Modellsatz für 1.500+ Fluide

Vorhersage thermophysikalischer Eigenschaften und Phasengleichgewichte

Xiaoxian Yang[1*], Thorsten Urbaneck[1]

[1] Technische Universität Chemnitz, Technische Thermodynamik,
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
xiaoxian.yang@mb.tu-chemnitz.de
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

Genaue thermophysikalische Stoffwerte sind für die Auslegung und Analyse energietechnischer Systeme, etwa von Wärmepumpen und Kälteanlagen, essenziell. Zu den wichtigsten Eigenschaften zählen Dichte, Phasengleichgewichte, Wärmekapazität, Enthalpie, Entropie sowie Transporteigenschaften wie Viskosität und Wärmeleitfähigkeit. Ein theoretisch kompaktes Modellkonzept, bestehend aus einer speziell entwickelten kubischen Zustandsgleichung, einem linearen Ansatz für die temperaturabhängige Wärmekapazität $c_p^0(T)$ im idealen Gaszustand und der residualen Entropieskalierung für Transporteigenschaften, ermöglicht die Vorhersage aller wesentlichen thermophysikalischen Eigenschaften von Reinstoffen über weite Temperatur- und Druckbereiche mit nur 13 effektiven Fluidkonstanten. Diese Konstanten umfassen kritische Eigenschaften, Wärmekapazitätsparameter und Transportkoeffizienten und stellen optimierte effektive Modellparameter dar, nicht notwendigerweise reale physikalische Stoffwerte. Da umfassende Datensätze in bestehenden großen Datenbanken nur für eine begrenzte Anzahl von Fluiden verfügbar sind, wurden im vorliegenden Ansatz effektive Konstanten für 1.541 Reinstoffe zusammengestellt, bewertet und im Modellkonzept angepasst. Grundlage hierfür bildeten berechnete Daten aus der NIST-Datenbank REFPROP 10.0 sowie experimentelle Daten aus NIST ThermoData Engine 10 und der Dortmund Data Bank 2023. Zusätzlich wurde die Zuverlässigkeit jedes Datensatzes bewertet, Datenlücken identifiziert und Prioritäten für zukünftige experimentelle und modellbasierte Forschungsarbeiten festgelegt.

Stichwörter
Thermodynamik, Physik, Stoffwert, Eigenschaft, Zustand, Datenbank

2.14

Kohlenwasserstoffe in PAG- und POE-Ölen für Haushaltswärmepumpen

Betrachtung der Löslichkeit, Dampfdruck und Viskosität

Katharina Stöckel*, Tim Rudzik, Yixia Xu, Christiane Thomas

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
katharina.stoeckel@tu-dresden.de

Angesichts der verschärften Anforderungen der EU-F-Gas-Verordnung (2024) sowie der Normen IEC 60335-2-40:2024 und EN 378 zur Begrenzung brennbarer Kältemittelfüllmengen in Haushaltswärmepumpen gewinnt die Auswahl geeigneter Kältemittel-Öl-Systeme zunehmend an Bedeutung. Die Kohlenwasserstoffe Propan (R-290) und Isobutan (R-600a) sind aufgrund ihrer hervorragenden thermodynamischen Eigenschaften vielversprechende Alternativen zu synthetischen Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial. Ihre ausgeprägte Löslichkeit in Kältemaschinenölen erhöht jedoch die im Ölsumpf gebundene Kältemittelmasse und damit die sicherheitsrelevante Gesamtfüllmenge.

Ziel dieser Arbeit ist die experimentelle Charakterisierung der thermodynamischen Eigenschaften von R-290- und R-600a-Ölgemischen mit drei technisch relevanten Schmierölen: Polyolester (POE) VG68, POE VG100 und Polyalkylenglykol (PAG) VG68. Im Temperaturbereich von −20°C bis 80°C werden Löslichkeit des Kältemittels im Öl und Mischungslücken bestimmt; Viskosität und Dichte werden bis 100°C gemessen. Der systematische Vergleich zweier Ölklassen (POE vs. PAG) und zweier Viskositätsklassen (VG68 vs. VG100) unter identischen Messbedingungen ermöglicht eine differenzierte Bewertung des Einflusses von Öltyp und Viskositätsgrad auf Löslichkeit, Mischungsverhalten, Viskosität und Dichte.

Die Ergebnisse liefern eine experimentelle Datenbasis für die gezielte Auswahl füllmengenoptimierter Kältemittel-Öl-Kombinationen und tragen dadurch zur normkonformen Auslegung von Haushaltswärmepumpen mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel bei.

Keywords:
Kohlenwasserstoffe, Viskosität, Löslichkeit, Dampfdruck, Dichte

2.15

Untersuchung der Viskosität als Funktion der Permittivität von Kältemaschinenöl

Simon Ender*, Daniel Gstöhl, Leon Brendel, Stefan Bertsch

OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme,
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs, Schweiz
simon.ender@ost.ch

In einer Wärmepumpe, genauer gesagt im Verdichter, befindet sich Kältemaschinenöl zur Schmierung der beweglichen Teile. Durch hohe thermische und mechanische Belastungen altert das Öl, wodurch sich seine Eigenschaften verändern, dies kann im Extremfall zum Ausfall des Verdichters führen. Um dies zu verhindern, muss die Ölqualität überprüft werden. Bisher erfolgt die Bewertung der Ölqualität über periodische Laboranalysen oder in manchen Fällen auch mittels einer Inline-Viskositätsmessungen.

In dieser Arbeit wird untersucht, ob die Ölqualität alternativ über die relative Permittivität bestimmt werden kann. Gegenüber der Viskositätsmessung bietet diese Methode potenzielle Vorteile, da keine beweglichen Teile erforderlich sind, der Sensor auf einfacher elektronischer Messtechnik basiert und eine Kalibrierung an der Luft möglich ist.

Hierzu wurden Messungen an einem Ölprüfstand durchgeführt, der die Ölrücklaufleitung einer Wärmepumpe simuliert. Untersucht wurden die Kältemaschinenölen Reniso Triton SE55 und SE170 sowie das Kältemittel R245fa. Die Untersuchungen zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen relativer Permittivität und kinematischer Viskosität sowohl für reines Öl als auch für Öl-Kältemittel-Gemische. Untersuchungen mit künstlich gealtertem Öl zeigen darüber hinaus, dass steigende Neutralisationszahlen mit einer Erhöhung von Permittivität und Viskosität korrelieren und damit Rückschlüsse auf die Ölqualität ermöglichen.

Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Permittivitätsmessung eine vielversprechende alternative Methode zur Zustandsüberwachung von Kältemaschinenölen darstellt.

Stichwörter:
Kältemaschinenöl, Ölalterung, Inline-Sensorik, elektrische Permittivität, dielektrische Leitfähigkeit, Viskosität, Verdichter, Kältemittel-Öl-Gemisch, Hochtemperaturwärmepumpe

2.16

Primär- und Sekundärpotentiale des RTPC Prozesses

am Beispiel der Wärmepumpe

Benedikt G. Bederna[1*], Max Friedemann[1], Christiane Thomas[1]

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
benedikt.bederna@tu-dresden.de

Der Rekuperative Zweiphasen-Prozesses [Rekuperative Two-Phase Cycle (RTPC)] ist eine thermodynamische Kreisprozesskonzeption, die sich in seiner linksläufigen Ausführung vom Kaltdampf-Kompressions-Prozess durch eine flüssig-zweiphasige Rekuperation unterscheidet. Der zentrale Temperaturhub des Prozesses wird dabei durch diese Rekuperation anstellen einer Verdichtung von überhitztem Dampf erbracht. Auf diese Weise lassen sich Drosselverluste und Verluste im innere Wärmeübertrager reduzieren. Diese Effizienzverbesserung wurden in bisherigen Arbeiten quantifiziert und werden für den Fall der Wärmepumpe erläutert. Neben diesen primären Potentialen auf der Kreisprozessebene ergeben sich weitere technische Verbesserungsmöglichkeiten aus der Kreisprozesskonzeption sowie Nebeneffekte durch den Einsatz eines asymmetrischen Gemisches. Zu nennen sind hier eine passive und aktive Zusammensetzungsverschiebung, eine Verdichtungskühlung, Verdichterschmierung und verbesserte Wärmeübergänge. Insbesondere die Möglichkeit den Verdichtungsraum durch die Nutzwärmesenke zu kühlen stellt ein relevantes zusätzliches Verbesserungspotential dar, das sich aber nur sehr aufwändig beziffern lässt. Erörtert wird in diesem Zusammenhang auch die Frage, inwiefern aus Sicht eines möglichen Einsatzes des RTPC als Wärmepumpenprozess diese Sekundärpotentiale die bedeutenderen Potentiale des Kreisprozesses darstellen könnten.

Stichwörter:
Rekuperativer Zweiphasen-Prozess, Asymmetrische Kältemittelgemische, Zusammensetzungsverschiebung, Verdichterkühlung

2.17

Experimentelle Untersuchungen des RTPC Prozesses

Max Friedemann[1 *], Benedikt G. Bederna[1], Christiane Thomas[1]

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
benedikt.bederna@tu-dresden.de

Der Rekuperative Zweiphasen-Prozesses [Rekuperative Two-Phase Cycle (RTPC)] ist eine thermodynamische Kreisprozesskonzeption, die in den vergangenen Jahren theoretisch erarbeitet wurde und bisher nur an ersten Experimenten überprüft worden ist. Gezeigt werden weiterführende Experimente, welche sowohl die grundsätzliche Funktionalität, als auch relevante Teilaspekte in den Blick nehmen. Der Versuchsstand zur Untersuchung der flüssig-zweiphasigen Rekuperation wurde um umfangreiche Messtechnik erweitert, sodass die Einflussfaktoren auf die Ausbildung der flüssig-zweiphasigen Rekuperation quantifiziert werden können. Im Fokus steht dabei die umlaufende und lokale Zusammensetzung des Arbeitsfluidgemisches. Vorgestellt wird auch das Messprinzip, das eine Bestimmung der umlaufenden wie lokalen Zusammensetzung des asymmetrisches Gemisch Propan/Dodekan erlaubt. Ein zweiter Versuchsstand dient der Untersuchung des Einflusses asymmetrischen Gemisches Isobutan/Nonan auf die zweiphasige Verdichtung. Motivation hinter dieser Untersuchung ist es, den Wärmeaustrag während des Verdichtungsprozesses zu erhöhen. Die Grenzen des bisher verwendeten Aufbaus eines langsam laufenden Hubkolbenverdichters werden hierbei anhand der Messergebnisse illustriert. Aus den Versuchen werden abschließend Empfehlungen für eine praktische Umsetzung der Verdichtung mittels eines Umlaufkolbens abgeleitet.

Stichwörter:
Rekuperativer Zweiphasen-Prozess, Wärmepumpe, Lokale Zusammensetzungsmessung, Zweiphasige Verdichtung

2.18

Wärmeübergang beim Sieden von Kohlendioxid (CO2) in einem weiten Druckbereich

Fatih Meral*, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Das Verständnis der Mechanismen beim Sieden ist für die Effizienz von Verdampfern und damit der gesamten Energiewandlungsprozesse essentiell. Verdampfer werden mit bekannten empirischen Korrelationen, wie die im VDI-Wärmeatlas, ausgelegt, die sich je nach Mechanismus erheblich unterscheiden. Für konvektives Sieden wird von bekannten Nusselt-Korrelationen ausgegangen, wobei für erzwungene Konvektion die Phasenverteilung, bzw. die Strömungsformen entscheidend sind. Der Druckeinfluß und der Fluideigenschaften ist relativ gering.

Im Bereich des Blasensiedens ist der Wärmeübergang von einer Vielzahl von Einflußparametern, wie z. B. der Siededruck, die Wärmestromdichte bzw. die Überhitzung, die Stoffeigenschaften des siedenden Fluid, Materialeigenschaften und die Geometrie der Heizwand, abhängig. Zumeist wird eine Einflußgröße variiert und die anderen konstant gehalten. Der Druckeinfluß ist erheblich und abhängig vom jeweiligen Stoff. Der Einfluss der Stoffeigenschaften wird für einen Referenzwert beschrieben (10 % des kritischen Druckes, eine Wärmestromdichte von 20 kW/m², eine Kupferheizfläche mit einem Mittenrauhwert von 0,4 µm). Diese sog. α0 -Werte liegen für einige Kältemittel in ausreichender Genauigkeit aus experimentellen Untersuchungen vor, z. B. für Propan, z. T. werden sie mit Korrelationen berechnet. Da für Kohlendioxid die Werte in der Literatur erheblich voneinander abweichen, wird der Wärmeübergang beim Sieden für CO2 in einem weiten Druckbereich von beginnendem Sieden bis zum intensiven Blasensieden sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht.

Die Hypothese ist, dass aufgrund der wesentlich steileren Dampfdruckkurve der Wärmeübergang beim Blasensieden für CO2 gegenüber Kohlenwasserstoffen wie Propan bei gleichem normiertem Druck erhöht ist. Ziel ist es, die im VDI-Wärmeatlas enthaltene Korrelation zu bewerten und zu optimieren. Die theoretischen Modelle zur Beschreibung der Stoffeigenschaften werden hinsichtlich der Eignung der Referenzwerte untersucht. Die neuen Ergebnisse werden mit denen in der Literatur verglichen, eingeordnet und diskutiert.

Stichwörter:
Kohlendioxid (CO2 / R744), Verdampfung, Druckeinfluss, VDIWärmeatlas

2.19

Einfluß geringer Zusätze von CO2 auf den Wärmeübergang in siedenden n-Pentan und Methanol

Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

In der Literatur wird diskutiert, dass geringe Zusätze von Kohlendoxid oder auch Stoffen wie Diethylether zu Kohlenwasserstoffen in Kaltdampfprozessen zu einer Verbesserung der Energieeffizienz führt. Bisher sind diese Untersuchungen begrenzt auf den gesamten Prozess und wenig validiert. Es ist unbekannt, in welcher Komponente und auf welchen Mechanismus der vermutete Verbesserungseffekt zurückzuführen ist.

Daher wird zunächst der Verdampfer als limitierende Komponente betrachtet, indem reines n-Pentan und Methanol als Referenzfluid eingesetzt wird und der Wärmeübergang in weiten Bereichen von Druck und Wärmestromdichte untersucht wird. Anschließend wird Kohlendioxid (CO2) in den Mengen wie in der Literatur beschrieben beigemischt, um die Steigerung des Wärmeübergangs durch den Zusatz geringer Mengen einer weiteren Komponente auf den Wärmeübergang beim Blasensieden zu untersuchen. Es ist bekannt, dass geringe Mengen einer Komponente mit Tensideffekt zu einem Reinstoff zu einer Verbesserung des Wärmeübergangs nur im Bereich des Blasensiedens führt, indem die Hysterese überwunden wird und das beginnende Blasensieden zu kleineren Überhitzungen verschoben wird. Dadurch wird der Nachteil des zusätzlichen Stoffübergangswiderstandes beim Sieden im Falle von Gemischen vermieden.

Stichwörter:
Hysterese, Gemischverdampfung, Blasensieden, Wärmeübergang, n-Pentan, Methanol, Kohlendioxid

2.20

Einfluß der Mikrostruktur auf den Wärmeübergang beim Sieden von Kohlenwasserstoffen

Ziad Elekiaby*, Andrea Luke

Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland
ttk@uni-kassel.de

Der Wärmeübergang beim Blasensieden wird seit Jahrzehnten experimentell und theoretisch untersucht, trotzdem besteht bisher keine geschlossene Theorie zu den eigentlichen physikalischen Vorgängen während der Verdampfung. Daher werden heutzutage in verschiedenen verfahrenstechnischen Prozessen die Verdampfer zu groß ausgelegt oder arbeiten ineffizient. Neuartige, effiziente Strukturen werden häufig nicht eingesetzt, da zuwenig Referenzdaten zur Verfügung stehen und die Berechnungsmethoden bislang aufgrund vieler Einflussgrößen keine eindeutigen Ergebnisse liefern. Dies gilt insbesondere für technisch sehr raue oder speziell strukturierte Rohre, für die die Datenbasis im Vergleich zu Glattrohren sehr gering ist. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Untersuchung des Einflusses der Rauheit bzw. der Mikrostruktur auf den Wärmeübergang beim Blasensieden. Bisher wird die Oberflächenstruktur durch den Mittenrauwert in den empirischen Gleichungen unabhängig von weiteren Einflußparametern wie Siededruck, Wärmestromdichte und Fluideigenschaften berücksichtigt.

In dem Beitrag werden die unterschiedlichen Gleichungen aus der Literatur vorgestellt und anhand einer großen Vielzahl von experimentellen Daten diskutiert. Für Mittenrauhwerte von ca. 0,4 µm liegen diese Daten vor, für höhere Rauheiten kaum. Daher werden die Oberflächen von Rohren durch Sandstrahlen mit einem arith

metischen Mittenrauheitwert von Pa≥ 10 µm bearbeitet. Die Analyse der Oberflächentopographie erfolgt mit zwei verschiedenen berührungslosen Tastschnittverfahren. Dabei werden Topographien in azimutaler sowie axialer Richtung aufgenommen und ausgewertet. Die Wärmeübergangsmessungen werden für Propan entlang der gesamten Dampfdruckkurve durchgeführt.

Stichwörter:
Sandstrahlen, potentielle Keimstellen, normierte Rauheitswerte, Wärmeübergang

2.21

Untersuchung der Wärmeübergänge in parallelen Mikrokanälen

Saija Schäfer*, Prof. Dr.-Ing. Arne Speerforck

Technische Universität Hamburg, Institut für technische Thermodynamik, Denickestraße 17, 21073 Hamburg
saija.schaefer@tuhh.de

Im Rahmen der Luftfahrtforschung wurde ein experimenteller Teststand zur Untersuchung des Wärmeübergangs von Methanol in parallelen Mikrokanälen entwickelt und für hochaufgelöste ein- und zweiphasige Analysen eingesetzt. Die Verdampferplatte basiert auf der Geometrie der Bipolarplatte einer Brennstoffzelle mit 40 parallelen Mikrokanälen (1 × 1 mm², Länge 250 mm) sowie Ein- und Auslassplena zur homogenen Durchströmung.

Der Teststand ermöglicht die präzise experimentelle Bestimmung lokaler Wärmeübergangskoeffizienten unter ein- und zweiphasigen Bedingungen bei sehr kleinen Reynoldszahlen. Hierfür werden hochaufgelöste, diskrete Wandtemperaturmessungen in Kombination mit lokal bestimmten Wandwärmestromdichten genutzt. Auf Basis dieser Messgrößen wird die Fluidtemperatur entlang der Kanäle berechnet und der lokale Wärmeübergang ortsaufgelöst bestimmt. Der Teststand ermöglicht eine gezielte Variation von Massenstromdichte, Wärmestromdichte, Druckniveau und Unterkühlung. Die Teststrecke befindet sich in einer thermisch konditionierten Einhausung und hat zusätzlich eine umfassende Dämmung, die eine Minimierung der Verlustwärmeströme sicherstellen. Die einphasigen Untersuchungsergebnisse zeigen eine Validierung des Teststandes mit etablierter Literatur und bestätigen die präzise Messung der lokalen Wärmeübergänge. Im Bereich der Verdampfung werden die Wärmeübergänge für verschiedene Rahmenbedingungen gezeigt. Die lokal aufgelösten Versuche ermöglichen die Identifikation charakteristischer Bereiche wie Verdampfungsbeginn und lokale Überhitzung.

Aufbauend auf den im Vorjahr vorgestellten einphasigen Untersuchungen zur Validierung des Versuchsaufbaus und der Messmethodik wird der Fokus der vorliegenden Arbeit auf die detaillierte Analyse des lokalen Wärmeübergangs unter zweiphasigen Bedingungen erweitert. Dabei ermöglicht die weiterentwickelte Auswertung auf Basis hochaufgelöster Wandtemperatur- und lokaler Wärmestromdichtemessungen erstmals eine ortsaufgelöste Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten entlang der Mikrokanäle im zweiphasigen Bereich.

2.22

Modularer Prüfstand für zweiphasige Loop-Thermosiphons zur CPU-Kühlung

Marius Benkler*, Michael Kauffeld, Constanze Bongs

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik,
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
marius.benkler@h-ka.de
michael.kauffeld@h-ka.de
Constanze.Bongs@h-ka.de

Die fortschreitende Erhöhung der Leistungsdichte moderner Prozessoren stellt zunehmend höhere Anforderungen an die eingesetzten Kühlsysteme. Besonders in Rechenzentren müssen große Wärmeströme auf engem Bauraum zuverlässig und energieeffizient abgeführt werden. Konventionelle Kühltechnologien wie Luftkühlung stoßen bei hohen Leistungsdichten an ihre Grenzen. Gleichzeitig gewinnen kompakte Bauweisen und der Einsatz umweltfreundlicher Arbeitsmedien an Bedeutung. Zweiphasige Kühlsysteme mit natürlichen Kältemitteln bieten hierfür ein großes Potenzial, da sie durch den Phasenwechsel hohe Wärmestromdichten bei geringer Temperaturspreizung abführen können.

Für die experimentelle Untersuchung wurde ein modularer thermischer Prüfstand entwickelt, der den Vergleich unterschiedlicher Kühltechnologien ermöglicht. Betrachtet werden luftgekühlte Heatpipes, Wasserkühlung sowie ein zweiphasiger Loop-Thermosiphon (TPLT). Der TPLT wird mit dem natürlichen Kältemittel R600a betrieben und hinsichtlich verschiedener Verdampfergeometrien, Füllmengen und Wärmesenkentemperaturen untersucht.

Zentrales Element des Prüfstands ist ein Thermal-Design-Power-Simulator zur realitätsnahen Abbildung CPU-typischer Wärmelastverteilungen. Die Anordnung der Heizelemente orientiert sich an der Mehrchip-Architektur eines in Rechenzentren eingesetzten AMD EPYC 9004 Prozessors. Durch die angepasste Platzierung der Heizelemente können sowohl homogene Wärmeeinträge als auch lokal konzentrierte Hot Spots simuliert werden. Die Wärmestromdichte wird in Anlehnung an ASTM D5470 über den Temperaturgradienten zwischen axial angeordneten Temperatursensoren bestimmt. Ergänzend erfasst eine flächige Sensoranordnung die Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heat Spreaders.

Im Beitrag werden der Prüfstandsaufbau, die Messtechnik sowie erste Messergebnisse vorgestellt. Ziel ist es, den Einfluss der untersuchten Parameter auf Blasenbildung, Temperaturhomogenität, Betriebsgrenzen und maximal erreichbare Wärmeabfuhr zu quantifizieren. Die Ergebnisse bilden eine experimentelle Grundlage für die Auslegung leistungsfähiger und nachhaltiger zweiphasiger Thermosiphonsysteme zur Kühlung von Hochleistungsprozessoren. Damit adressiert der Beitrag eine zentrale Herausforderung zukünftiger Hochleistungsprozessoren. Die effiziente und nachhaltige Abfuhr hoher Wärmelasten.

3.01

Konkreter Einsatz von KI in der Fehlersuche bei Rotating Equipment

Dr. Christian Ellwein

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, 74670 Forchtenberg
Christian.ellwein@kriwan.de

Verdichter, Pumpen und Ventilatoren gehören zweifellos zu den wichtigsten Vertretern des Rotating Equipment und spielen in vielen Anwendungen eine zentrale Rolle – so auch in der Kälte- und Klimatechnik und in Wärmepumpen. Aus diesem Grund sind Fehler und Störungen in diesen Maschinen auch von großer Bedeutung und eine schelle Identifikation und Behebung von Fehlern ist sehr wichtig.

Seit rund 2 Jahren erlebt die Künstliche Intelligenz (KI) einen erneuten Boom: Getrieben durch die Veröffentlichung der großen Sprachmodelle wie ChatGPT, Gemini oder Copilot haben vielen Menschen zum ersten Mal erlebt, wie mächtig KI sein kann.

In diesem Vortrag wird ein praxisnaher Weg aufgezeigt, wie sehr einfach große Sprachmodelle zur Identifikation von Fehlern und Störungen in Systemen mit Rotating Equipment (Pumpen, Verdichter, Ventilatoren…) genutzt werden können. Der Schwerpunkt des Vortrags liegt auf den Verdichtern. Dabei werden die Sprachmodelle nicht nur angewendet, um in dem Verdichter selber nach Fehlern zu suchen, sondern die Fehlersuche erstreckt sich auf das ganze System mit vor- und nachgelagerten Komponenten und die ganze Applikation.

In dem Vortrag werden folgende Punkte vorgestellt:

- Technische Datenübertragung von Messwerten aus dem Verdichter an das große Sprachmodell
- Erstellung eines geeigneten Prompts zur Beauftragung des Sprachmodells
- Grenzen und kritische Randbedingungen
- Praxisbeispiel zur Fehlersuche
- Rechtliche Aspekte zur Haftung der Hersteller beim Einsatz der großen Sprachmodelle

3.02

Neue Herausforderungen durch (generative) KI in der Cyber-Security

Dr. Christian Ellwein

KRIWAN Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, 74670 Forchtenberg
Christian.ellwein@kriwan.de

Cyber-Security ist seit vielen Jahren eine ständige Bedrohung für vernetzte Systeme und die Digitalisierung. Neue Technologie wie mobile Endgeräte (aka Smartphones) oder Cloud-Computing haben jeweils zu neuen Herausforderungen aber auch zu neuen Chancen der Cyber-Security geführt. Mit dem rasanten Wachstum der großen Sprachmodelle und anderer generativer KI hat sich seit ca. drei Jahren ein weiterer Entwicklungsschritt aufgetan. In diesem Vortrag werden sowohl neue Risiken aber auch neue Chancen durch (generative) KI in der Cyber-Security gelegt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf den Auswirkungen auf OT (Operations Technology, Digitalisierung auf der Ebene der Maschinen und Anlagen). Insbesondere Kälte-/Klimatechnik und Wärmepumpen mit ihren IT-technischen Spezifika werden in diesem Vortrag als Beispiel für die OT herangezogen. Folgende Schwerpunkte werden in diesem Vortrag beleuchtet:

- Kurzer technischer Überblick / Einführung in (generative) KI
- Neue Angriffsvektoren, neue Risikoszenarien
- Chancen in der Cyber-Abwehr
- Besonderheiten des RACHP-Markts

3.03

AI-assisted Anomaly Detection for Refrigeration Display Units

Melina Meyer[1*], Vincent Gehrmann[1], Martin Gergeleit[1], Dirk Krechel [1], Philipp Koehler[2], Matthias Wolf[2]

[1] Hochschule RheinMain – University of Applied Sciences and Arts,
Faculty of Design Computer Science Media, Unter den Eichen 5, 65195 Wiesbaden, Germany
Melina.Meyer@hs-rm.de

[2] Eckelmann AG, Automated Refrigeration & Building, Berliner Straße 161, 65205 Wiesbaden, Germany
M.Wolf@eckelmann.de

This study investigates machine learning approaches as part of an assistance system for anomaly detection in the specific behavior of refrigeration display units. In general, automated fault detection reduces monitoring effort and can improve the overall efficiency of system operation by leveraging artificial intelligence as a supportive tool. This also contributes to broader sustainability goals.

This work focuses specifically on refrigeration display units in the food retail sector. Current approaches to detecting fault conditions rely on threshold-based and rule-based systems. Due to the long operational lifetimes of refrigeration systems and natural wear over time, these approaches require continuous adjustment for individual systems and refrigeration units. A key advantage of applying machine learning methods to refrigeration systems is that, due to mandatory remote monitoring, the infrastructure for data acquisition and centralized storage is already widely available. This enables access to large existing datasets. Based on these data, models are trained for refrigeration display units. In this context, it is advantageous—both in terms of initial effort and model maintenance—if a generic model is trained for multiple units.

In this study, time series data from 167 freezer units across different supermarkets are used and evaluated using various anomaly detection models, including transformer-based models and state-space models. Previous work has shown that these models achieve strong performance for refrigeration systems despite variable conditions, such as differences in sensor configurations. Furthermore, the models are capable of generalizing, so that unit–specific models can be avoided. Building on these findings, this work places a particular emphasis on system-specific behavior like defrost cycles, which have been identified in prior results as a weakness in anomaly detection and a source of false-positive alerts. By adapting both the data preprocessing steps and the models themselves, an improvement in the false-positive rate can be achieved.

Stichwörter:
Anomaly Detection, Artificial Intelligence, Refrigeration Display Units

Acknowledgement:
The study was funded by the Federal Ministry of Research, Technology and Space (BMBFR) through Project 13FH017KX2.

3.04

Kontinuierliche Zustandsanalyse von Kälteanlagen

Manuel Saboy

SABOY Anlagentechnik, Geschäftsführung, Bodenseeallee 4, 78333 Stockach, Deutschland
manuel.saboy@saboy.de

Mit der zunehmenden Digitalisierung speichern moderne Regler und Server eine stetig wachsende Anzahl an Betriebsbedingungen von Kälteanlagen. Diese Datengrundlage eröffnet neue Möglichkeiten zur frühzeitigen Erkennung unerwarteter Betriebszustände mit dem Ziel, die Anlagenverfügbarkeit sowie die Energieeffizienz

nachhaltig zu steigern. Eine manuelle Auswertung erfordert jedoch umfangreiches Expertenwissen und ist zeitlich begrenzt verfügbar.

Der Einsatz moderner Softwaretechnologien ermöglicht die automatisierte Analyse großer Datenmengen in kurzer Zeit. Durch die Implementierung physikalisch basierter Auswertungsmodelle können Abweichungen von erwarteten Betriebszuständen kontinuierlich erkannt werden. Eine modulare Softwarearchitektur erlaubt dabei die flexible Modellierung von Anlagenkomponenten sowie die Berücksichtigung häufiger relevanter Betriebszustände in Bezug auf technische Ausfälle und erhöhten Energieverbrauch.

Neben der automatischen Erkennung von Kältemittelmangel und unerwarteten Verdampfer-Abtauzyklen unterstützt das System die strukturierte Klassifizierung von Betriebszuständen, welche als Grundlage für das Training von KI-Modellen dient und kundenspezifische Auswertungen ermöglicht.

3.05

KI-basierte Fehlererkennung in kältetechnischen Anlagen

Robin Heinzelmann

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU), Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
robin.heinzelmann@h-ka.de

Angetrieben durch Fortschritte in der Digitalisierung, ist der Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) in Form von maschinellem Lernen (ML) zu einem zentralen Forschungsschwerpunkt in der Kälte- und Wärmepumpentechnik geworden. Die ML-basierte Fehlererkennung und -diagnose (Fault Detection and Diagnosis, FDD) spielt in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle. Da der Kälte-, Klima- und Wärmepumpensektor etwa 20 % des weltweiten Stromverbrauchs ausmacht, ist die Betriebseffizienz von entscheidender Bedeutung. Unentdeckte Fehler führen oft zu unbemerkten Effizienzverlusten, erhöhtem Verschleiß oder einem Totalausfall des Systems. Vor diesem Hintergrund ist eine frühzeitige, automatisierte Fehlererkennung unerlässlich, um sowohl ökologische als auch ökonomische Ziele nachhaltig zu sichern.

Basierend auf einer systematischen Auswertung wissenschaftlicher Publikationen der letzten Jahre, untersucht dieser Beitrag den aktuellen Stand der Technik sowie vorherrschende Forschungstrends. Die Analyse erfolgt anhand einer Vielzahl technischer und methodischer Kriterien. Dazu gehören neben Anwendungsbereichen und Anlagentypen insbesondere die eingesetzten ML-Algorithmen und die Art der adressierten Fehlerbilder. Ziel dieses Beitrags ist es, die Entwicklungen im Bereich der ML-basierten Fehlererkennung umfassend abzubilden und ein präzises Bild der aktuellen Forschungslandschaft zu zeichnen.

3.06

CO_2 Systems: Lubricants & Oil Management

Giacomo Pisano

Officine Mario Dorin S.p.A., Via Aretina 388, 50061 Loc. Compiobbi, Fiesole-Firenze, Italy
g.pisano@dorin.eu

The use of carbon dioxide (CO_2) has gained a lot of traction in the last decades, especially in industrial refrigeration systems. As for any equipment, a correct lubricant choice and a proper oil management strategy are key for a safe, reliable and efficient system operation. This paper deals with and describes how to select the most appropriate lubricant, both from a compressor and a system perspective: lubrication properties, Daniel plots, viscosity drops and system oil management are described for the most common lubricants used in CO_2 refrigeration systems – primarily POE (polyolester) and PAG (polyalkylene glycol). Oil management design features and guidelines are provided for the most common system configurations, such as DX, pumped and overfed (ejector) executions so that the most appropriate lubricant and oil management strategy could be selected for any application involving CO_2 as the refrigerant.

3.07

Inline-Messung und Echtzeit-Bestimmung der Öl-Umlaufrate in Propan-Kälteanlagen

Caner Cikmaz[1], Xiaoxian Yang[1], Markus Richter[1,2]*

Technische Universität Chemnitz, Technische Thermodynamik,
Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Deutschland
Caner.cikmaz@mb.tu-chemnitz.de

Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland
m.richter@ift.uni-hannover.de

Dampfkompressionskälteanlagen werden üblicherweise mit reinen Kältemitteln simuliert, obwohl Öl im Kältemittelkreislauf die thermophysikalischen Eigenschaften beeinflusst. Neuere Untersuchungen von Yang et al. zeigen diese Einflüsse deutlich, weshalb diese Arbeit eine Propan-Forschungskälteanlage mit Inline-Sensoren zur OCR-Bestimmung einsetzt. Die mit Wasser und Propan kalibrierten Sensoren messen Dichte, Schallgeschwindigkeit und Viskosität. Eine Korrekturfunktion reduziert die Dichteabweichung auf 0,02 %, während die erweiterten Unsicherheiten (k = 2) 0,18 % für die Dichte, 0,40 % für die Schallgeschwindigkeit und 20,0 % für die Viskosität betragen. Thermophysikalische Eigenschaften von Propan–HATCOL®4467-Gemischen wurden bei Öl-Umlaufraten (OCR) von 1,2, 3,3 und 5,2 Gew.-% gemessen. Auf Basis kalibrierter Dichtemessungen und der Yang-Frotscher-Richter-Zustandsgleichung wurde eine Echtzeit-OCR-Bestimmung mit Sekundenauflösung entwickelt. Betriebstests zeigten durchschnittliche OCR-Werte von 0,8 %, wobei die Temperaturmessung über 90 % zur Unsicherheit beiträgt. Die kombinierte erweiterte Unsicherheit liegt bei 6,35 % für OCR-Werte über 1,5 % und bei 78,63 % für Werte unter 0,5 %. Die zukünftige Integration in Ebsilon®Professional demonstriert die praktische Anwendbarkeit für verbesserte Anlagenauslegung und Regelstrategien.

Stichwörter:
Öl-Umlaufrate (OCR), Inline-Sensoren, thermophysikalische Eigenschaften, natürliche Kältemittel, Ebsilon

3.08

Einfluss der Schmierstoffzirkulation auf das Komponenten- und Systemverhalten

Tim Rudzik et al.

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
tim.rudzik@tu-dresden.de

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt hin zu effizienten und umweltverträglichen Kälteanlagen und Wärmepumpen ist der Übergang zu natürlichen Kältemitteln, insbesondere zu Kohlenwasserstoffen wie Isobutan (R-600a), Propan (R-290) und deren Gemischen. Der Einsatz dieser Kältemittel erfordert jedoch systematische Untersuchungen, um sowohl die Sicherheit als auch die Leistungsfähigkeit entsprechender Anlagen zu gewährleisten. Ein wichtiger Bestandteil dieser Untersuchungen ist die Betrachtung der Löslichkeit von Kohlenwasserstoffen im Verdichterschmierstoff.

Diese Studie stellt einen Prüfstand zur Untersuchung von Wärmepumpensystemen für Wohngebäude mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel und unterschiedlichen Schmierstofftypen vor. Ziel ist es, den Einfluss des Schmierstoffs auf das System- und Komponentenverhalten besser zu verstehen.

Erste Ergebnisse bewerten den Einfluss von PAG VG 68 auf einen R-290-Kreisprozess. Im Fokus stehen Abweichungen der Wärmeübertragung und des Druckverlusts in Kondensator und Verdampfer gegenüber ölfreien

Referenzmessungen, untersucht bei variierenden Ölumlaufraten sowie unterschiedlichen thermischen Randbedingungen.

3.09

Elektrostatische Ölabscheidung – Grundlagen und Herausforderungen

Miriam Ballarin et al.

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU), Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
miriam.ballarin@h-ka.de

Ölabscheider erfüllen in vielen Kälteanlagen und Wärmepumpen zwei wesentliche Funktionen: Zum einen unterstützen sie einen zuverlässigen Verdichterbetrieb, indem sie das mit dem Kältemittel ausgetragene Öl abscheiden und zum Verdichter zurückführen, wodurch eine ausreichende Schmierung gewährleistet wird. Zum anderen tragen sie zur Effizienz des Gesamtsystems bei, da sie die im Kältekreislauf zirkulierende Ölmenge reduzieren. Konventionelle Ölabscheider sind häufig als Koaleszenz-, Drahtgestrick- oder Zyklonabscheider ausgeführt. Während elektrostatische Abscheideverfahren in der industriellen Gasreinigung und Aerosolabscheidung etablierte und weit verbreitete Technologien zur effizienten Abscheidung kleiner Partikel darstellen, finden sie in Kälteanlagen und Wärmepumpen bislang keine Anwendung.

Eine zentrale Voraussetzung für die elektrostatische Ölabscheidung ist die elektrische Aufladung der im Kältemittelgas befindlichen Öltröpfchen. In dieser Arbeit werden hierfür zwei Mechanismen betrachtet: die direkte Tropfenaufladung durch Kontaktaufladung sowie die indirekte Aufladung mittels Koronaentladung. Bei der indirekten Aufladung wird zunächst das Kältemittelgas ionisiert. Da diese Ionisierung potenziell mit einer chemischen Zersetzung des Kältemittels einhergehen kann, wird das Zersetzungsrisiko theoretisch anhand einer umfassenden Literaturrecherche durch den Vergleich der Ionisierungs-, Dissoziations- und Auftrittsenergien ausgewählter Kältemittel bewertet. Die Ergebnisse zeigen hier ein sehr undifferenziertes Bild, was aus Sicht der Autoren keinen genauen Schluss über eine gesicherte Zersetzung zulässt – wenngleich sie als wahrscheinlich gelten darf.

Ergänzend zur theoretischen Betrachtung werden mögliche experimentelle Untersuchungsmethoden vorgestellt. Für die Aufladung mittels Koronaentladung sollen sowohl die Entladungscharakteristik in Kältemittelatmosphäre als auch potenzielle chemische Zersetzungsprodukte des Kältemittels mittels geeigneter Messmethoden (z.B. Massenspektrometrie) untersucht werden.

3.10

Ölfreie Turbokompressoren für Luft-Luft-Wärmepumpen mit R290

Dr.-Ing. Artur Schimpf

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KGaA & Co. KG., Bachmühle 2, 74673 Mulfingen
Artur.Schimpf@de.ebmpapst.com

Der Vortrag thematisiert die Entwicklung eines zweistufigen, ölfreien, gasgelagerten Hochgeschwindigkeits Turbokompressors für Wärme und Kälteanwendungen mit dem natürlichen Kältemittel Propan (R290). Der Einsatz des Turbokompressors soll Effizienz, Kompaktheit und Lebensdauer von Wärmepumpen und Kälteanlagen signifikant steigern und gleichzeitig den Kältemittel und Ressourcenbedarf deutlich reduzieren.

Als Beispiel wird die Auslegung einer Kältemaschine mit Turbokompressor gezeigt, sowie die Messergebnisse zu Performance des Kompressors und der Kältemaschine aus Labortests.

Es wird im Vortrag auf konkrete Entwicklungsschritte eingegangen, wie z. B. die Entwicklung optimierter Gaslager für den Einsatz mit R290, die Entwicklung eines neuen Turbulenzmodells für die Lagerauslegung sowie der

experimentelle Nachweis in einem anwendungsnahen Demonstrator und die Entwicklung geeigneter Sicherheits- und Regelungskonzepte für den Einsatz des Turbokompressors mit dem brennbaren Kältemittel Propan in Kälteanlagen.

Die vorgestellten Ergebnisse sind u.A. im geförderten Verbundvorhaben „Eco High-SCoRe“ entstanden.

3.11

Flüssigkeitseinspritzung bei Hubkolbenverdichtern: Experimentelle Untersuchungen

Jonas Schmitt et al.

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU), Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
jonas.schmitt@h-ka.de

Das gezielte Einspritzen von flüssigem Kältemittel durch Injektoren in den Arbeitsraum eines Hubkolbenverdichters trägt durch Verdampfung der Flüssigkeitströpfchen zur Gaskühlung und Absenkung der Verdichtungsendtemperatur bei. Da für Anwendungen mit hohen Verdichtungsverhältnissen die Verdichtungsendtemperatur häufig der limitierende Faktor ist, kann sich durch die Flüssiginjektion eine erhebliche Erweiterung der Einsatzgrenzen ergeben – je nach Kältemittel auch eine Absenkung der spezifischen Verdichtungsarbeit.

In vorangegangenen Veröffentlichungen wurden bereits das theoretische Potenzial sowie Konzept und Aufbau eines R717-Verdichterprüfstands zur experimentellen Untersuchung der Flüssigkeitseinspritzung behandelt. In dieser Arbeit werden die experimentellen Ergebnisse zur Flüssigkeitseinspritzung diskutiert. Insbesondere werden dabei der Einfluss der Einspritzung auf die Verdichtungseffizienz sowie auf die Heißgastemperatur und das resultierende Potenzial zur Einsatzgrenzenerweiterung betrachtet. Zur Effizienzbewertung werden dabei die indizierte Arbeit sowie die mechanische Antriebsleistung berücksichtigt.

Weiterhin wird auf Besonderheiten und Erkenntnisse zur Messtechnik eingegangen, u. a. hinsichtlich der Zylinderdruckindizierung und der hochschnellen Messung des Einspritzmassenstromverlaufs.

Abschließend werden die Herausforderungen der Technologie sowie die erforderlichen Schritte bis zur praktischen industriellen Umsetzung diskutiert.

3.12

COMTEST – COMpressor LifeTimeTEST und Zustandsbewertung

Diandra Maria Küçükkaya*, Jan Hauptmann, Matthias Böhm

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
diandra.kuecuekkaya@ilkdresden.de

Die Funktionalität des Verdichters hat einen entscheidenden Anteil am energieeffizienten Betrieb von Kälteanlagen. Dieser ist sowohl von seinen individuellen konstruktiven Merkmalen als auch von den Betriebszuständen abhängig. Diese Zustände können sich in einem weiten Feld innerhalb (normal operation) und außerhalb (transient operation) der zugelassenen Einsatzgrenzen bewegen. Viele Betriebszustände ergeben sich auch durch das unplanmäßige Zusammenwirken unterschiedlicher äußerer Einflussparameter. Sie sind dem Betreiber der Anlage nicht direkt zugänglich. In der Folge kann es zu Verdichterausfällen vor Ablauf der geplanten Lebensdauer kommen, deren Ursachen nicht eindeutig zuzuordnen sind. Damit viele Einsatzspezifika schon in der Planung und Entwicklung der Anlage beachtet werden können sind unterschiedliche Beanspruchungstests sowohl der Anlagen (z. B. Wärmepumpen) als auch der Verdichter üblich.

Ziel dieses Projektes ist die Weiterentwicklung der bereits kommerziell angewendeten LifeTimeTests für Scroll-, Hubkolben- und Rollkolbenverdichter in Wärmepumpenanwendungen. Es wird ein grundlegend flexibles, zugeschnittenes und die relevanten Beanspruchungen berücksichtigendes Prüfverfahren über ca. 1.000 h zum Test

unterschiedlicher Verdichterbauarten entwickelt. Diese Beanspruchungen werden aus vielfältigen Normen und Richtlinien identifiziert und kombiniert. Der Fokus dieses Projektes liegt auf der Steigerung der Zuverlässigkeit der Tests bei zeitlich reduziertem Testaufwand.

Schlüsselwörter:
LifeTimeTest, FMEA, FTA, Zustandsanalyse, Kältemittelverdichter, natürliche Kältemittel

3.13

Development and Testing of an Oil-Free Wankel-Type Refrigerant Compressor

Florian Ausserer

fautech GmbH, Stadtstrasse 33, 6850 Dornbirn, Österreich
florian.ausserer@fautech.at

The Wankel machine, developed in the mid-20th century, has been widely used as an internal combustion engine and as an air compressor, but its application as a refrigerant vapor compressor has remained limited. A key reason is the unfavorable ratio between swept volume and leakage paths, which becomes particularly critical under oil-free operating conditions. To address this challenge, a novel oil-free sealing concept was developed and patented, in which discharge-side pressure actively loads flexible sealing lips against the chamber side walls, thereby improving sealing performance with increasing pressure without the need for lubrication.

The tribological behavior of the sealing interfaces is a central aspect of the proposed concept. A dedicated experimental setup was designed to investigate sealing material pairings under dry sliding conditions in a gas atmosphere at pressures of up to 10 bar and elevated temperatures. The setup enables well-defined oscillating relative motion under contact conditions representative of rotary compressor operation. Selected polymer–metal material combinations were evaluated with respect to friction behavior, wear characteristics, and tribology-induced material changes.

Based on the tribological results, an oil-free Wankel-type refrigerant compressor prototype was developed with a minimized number of components to demonstrate good manufacturability. Two geometric variants were realized, featuring compression ratios of 2:1 and 3:2, respectively, to address different operating requirements and performance levels.

First experimental data obtained with R1234yf and R290 include mass flow rate, power consumption, as well as volumetric and isentropic efficiency as functions of suction pressure and pressure ratio. The operating envelope is estimated, and the compressor concept demonstrates a potential heating capacity of up to 8 kW. Overall, the results highlight the importance of tribological optimization for oil-free rotary compressors and demonstrate the promising potential of the proposed sealing and compressor concept.

3.14

MODBUS Elektronik Data Sheet (EDS)

Standardisierung der Datenbeschreibung für die Datenübertragung

Matthias Kordon, Alexander Schütz*

Wurm GmbH & Co. KG, Elektronische Systeme, Morsbachtalstraße 30, 42857 Remscheid
matthias.kordon@wurm.de, alexander.schuetz@wurm.de

Das elektronische Datenblatt zur Beschreibung von Daten, die über ein Bussystem übertragen werden (Electronic Data Sheets (EDS)), bietet eine standardisierte und digitalisierte Sprache.

Die Nutzung der einheitlichen Definitionen verspricht eine einfache und automatisierbare Integration von Komponenten verschiedener Hersteller in ein Bus-System. Das aufwändige und fehlerträchtige manuelle Abschreiben von Datenpunkt-Spezifikationen entfällt. Die Beschreibung kann per Download von einem Server oder aus dem Gerät auslesbar bereitgestellt werden.

Das digitale Verfahren ist auch für die Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagenbranche (HLK) von Bedeutung, da dort häufig eine Vielzahl unterschiedlicher Geräte zum Einsatz kommt, die in ein Gesamtsystem integriert werden müssen. Das EDS ist sowohl mit Modbus RTU als auch mit Modbus ASCII oder Modbus TCP kompatibel. Zukünftig kann die Beschreibung leicht für andere Bussystem adaptiert werden.

Die Vereinigung der europäischen Hersteller von Komponenten der RACHP-Branche, ASERCOM (Asssociaton of European Refrigeration Component Manufacturers), hat in der Arbeitsgruppe „Electronics, Cyber Security and Controls“ unter Initiative der Fa. Wurm den Standard der einheitlichen Beschreibung entwickelt. Er schließt eine große Lücke auf dem Weg zur Digitalisierung.

3.15

Effizienzsteigerung von R744-Bestandsanlagen

Einsatz einer mechanischen, quasi-stufenlosen Leistungsregelung

Jakob Fünfgeld*, Oliver Javerschek

BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, Anwendungstechnik und Sonderprojekte,
Peter-Schaufler-Straße 3, 72108 Rottenburg-Ergenzingen, Deutschland
jakob.fuenfgeld@bitzer.de
oliver.javerschek@bitzer.de

Die Vorteile einer Leistungsregelung von Verdichtern in Kälteanlagen gegenüber einer Zwei-Punkt-Regelung im ON-/OFF-Betrieb sind hinlänglich bekannt. Entsprechend stellt der Einsatz von in der Regel einem leistungsgeregelten Verdichter in Verbundanlagen den Stand der Technik dar. Häufig wird hierzu der Führungs-Verdichter mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, der eine stufenlose Drehzahl- und Leistungsanpassung innerhalb des zugelassenen Frequenzbereichs ermöglicht. Die nachgeschalteten Verdichter werden meist ohne Leistungsregelung betrieben. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass der erreichbare Modulationsbereich trotz Einsatz eines Frequenzumrichters oftmals zu begrenzt ist. Insbesondere bei überdimensionierten Anlagen oder bei der Verwendung weniger, großer Verdichter, kann die erforderliche Minimallast nicht adäquat abgedeckt werden. Die Folge sind diskontinuierliche Betriebszustände mit häufiger Taktung der Verdichter. Insbesondere die Stabilisierung der Betriebsweise bietet aber Potenzial zur Steigerung der Anlagen-Effizienz. Die positiven Effekte einer gut abgestimmten Leistungsregelung können exemplarisch anhand von zwei in Betrieb befindlichen R744-Supermarkt-Verbundkälteanlagen mit Hubkolbenverdichtern dargestellt werden. Bei beiden Anlagen wurde der Führungs-Verdichter von Leistungsregelung durch Frequenzumrichter auf eine mechanische, quasi-stufenlose Leistungsregelung durch Zylinderabschaltung umgerüstet. Die Auswertung der realen Betriebsdaten zeigt die Vorteile des modifizierten Modulationsbereichs und der daraus resultierenden besseren Minimallastabdeckung hinsichtlich Betriebsweise und Effizienz. Daraus wird ersichtlich, dass die relativ einfache und kostengünstige Nachrüstung einer mechanischen Leistungsregelung großes Potenzial zur energetischen Optimierung von Bestandsanlagen bieten kann. Im abschließenden Ausblick wird die weiterführende Kombinationsmöglichkeit von mechanischer und drehzahlgeregelter Leistungsanpassung vorgestellt.

3.16

Messen, modellieren, optimal regeln: das Expansionsventil im Kältekreislauf

Florian Will*, Niclas Kalter*, Matthias Mersch, Christian Vering, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Mathieustraße 10, 52072 Aachen, Deutschland
florian.will@eonerc.rwth-aachen.de, niclas.kalter@eonerc.rwth-aachen.de
matthias.mersch@eonerc.rwth-aachen.de, cvering@eonerc.rwth-aachen.de,
dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

Die Regelung des Kältemittelkreislaufs einer Wärmepumpe hat maßgeblichen Einfluss auf deren Energieeffizienz und Betriebssicherheit. Das Expansionsventil ist dabei das zentrale Regelorgan: Gemeinsam mit der Verdichterdrehzahl bestimmt sein Öffnungsgrad die Regelgrößen Vorlauftemperatur und Überhitzung am Verdichtereintritt. Dabei muss ein Kompromiss zwischen Effizienz und Betriebssicherheit gefunden werden, eine geringe Überhitzung erhöht durch einen höheren Verdampfungsdruck die Effizienz, muss aber ausreichend hoch bleiben, um Flüssigkeitströpfchen in der Saugleitung und damit Verdichterschäden zu vermeiden. Die zugehörigen Regelstrecken sind durch starke Nichtlinearitäten und Kopplungen zwischen den Stellgrößen charakterisiert, die konventionelle, dezentrale Regelstrategien nicht abbilden können und daher mit hohen Sicherheitsmargen bei der Überhitzung kompensieren müssen.

Voraussetzung für fortschrittliche Regelalgorithmen sind detaillierte Kenntnisse des Ventilverhaltens über einen weiten Betriebsbereich. Hierfür wurde ein Prüfstand zur Charakterisierung von Expansionsventilen unter variierenden stationären Bedingungen entwickelt. In einem gepumpten Kältemittelkreislauf wird das zweiphasige Kältemittel am Ventilaustritt vollständig kondensiert, über eine Membranpumpe verdichtet und auf den gewünschten Eintrittszustand erwärmt. Dies ermöglicht eine Trennung von Öl- und Kältemitteleffekten sowie eine präzise Einstellung der Ein- und Austrittsbedingungen; die Sicherheitsumgebung für A3-Kältemittel erlaubt zudem die Untersuchung natürlicher Kältemittel. Aus den Messdaten werden mit einem Polynom- sowie einem Pi-Theorem-Ansatz Massenstromkorrelationen abgeleitet, die für die meisten Betriebspunkte Abweichungen von unter 10 % aufweisen.

Auf dieser Basis wird ein modellprädiktiver Regelungsansatz vorgestellt, der in jedem Zeitschritt die beste Kombination aus Ventilöffnungsgrad und Verdichterdrehzahl ermittelt. Eine dynamische Simulationsstudie in Modelica/Dymola zeigt, dass die prädiktive Berücksichtigung der Systemdynamik die Überhitzung verringert, die Sicherheit gegenüber Tropfenschlag gewährleistet und so die Effizienz gegenüber einer konventionellen PI-Regelung substanziell steigert.

3.17

Modellbasierte Systemoptimierung von Kälte- und Klimasystemen mit Ventilator- und Wärmeübertrager-Wechselwirkungen

Markus Engert [1]*, Jan Breitenbach [1], Markus Mößner [1], Daniel Conrad [1], Jan Weltzer [2], Thaddäus Hinterberger [2]

[1] ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KGaA & Co. KG., Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Deutschland

[2] ebm-papst Landshut GmbH, Hofmark-Aich-Str. 25, 84030 Landshut, Deutschland
Markus.Engert@de.ebmpapst.com

Steigende Anforderungen an Energieeffizienz, Kostenreduktion und Geräuschminimierung erfordern neue Vorgehensweisen für das Design von Kälte- und Klimasystemen. Die ebm-papst Gruppe stellt ein innovatives Verfahren vor, das eine gezielte Optimierung unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen aller Einzel

komponenten ermöglicht. Der Ansatz basiert auf einer Modellierung des Gesamtsystems, wobei Ventilatoren und Wärmeübertrager mit dem angebundenen Kälte- oder Wasserkreislauf detailliert analysiert werden.

Die physikalischen Interaktionen zwischen Ventilator, Wärmeübertrager und Anlage werden mit Hilfe der Simulationsumgebung Dymola® (Dassault Systèmes) in Kombination mit der TIL Suite (TLK-Thermo) abgebildet. Das von ebm-papst entwickelte TIL-Modul *ebmFan* integriert die firmeneigene Ventilatordatenbank direkt in Dymola und ermöglicht so eine realitätsnahe Beschreibung des Ventilatorverhaltens bzgl. Aerodynamik und Akustik. Zur Beschleunigung werden KI-basierte Modelle zur Vorhersage von Geschwindigkeitsfeldern auf dem Wärmeübertrager eingesetzt. Diese beeinflussen maßgeblich die thermodynamische Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers und werden mittels einer TIL-Erweiterung im Systemmodell berücksichtigt.

Mit dem vorgestellten Workflow lassen sich die Auswirkungen von Optimierungsmaßnahmen auf Betriebspunkt, Wirkungsgrad und Geräuschemissionen von Kälte- und Klimasystemen analysieren. Das ermöglicht bereits in frühen Entwicklungs- und Designphasen eine gezielte Minimierung der gewünschten Zielfunktionen auf Systemebene.

3.18

Die nächste Evolutionsstufe der Wärmetauscher:

Platten-Lamellen-Technologie für industrielle Wärmepumpen

Christian Wehling

Alfa Laval Mid Europe GmbH, Überseeallee 10, 20457 Hamburg, Deutschland
Christian.Wehling@alfalaval.com

Die Wärmetauscher-Technologie steht vor einem evolutionären Schritt: Mit dem neuen Platten-Lamellen-Wärmetauscher (Plate & Fin) entsteht erstmals ein Konzept, das die bewährte Plattenstruktur mit hochflexiblen Lamellen vereint – und damit Konstruktionsfreiheiten eröffnet, die bisher nur teure Spezialapparate erlaubten. Durch die Kombination beider Geometrien lassen sich asymmetrische Strömungen in völlig neuen Dimensionen realisieren, sodass selbst anspruchsvolle Gas-Flüssig-Anwendungen mit geringem Druckverlust effizient beherrschbar werden. Gleichzeitig ermöglicht der Aufbau eine extrem hohe spezifische Oberfläche, ein ultrakompaktes Volumen und eine deutlich reduzierte Kältemittelfüllmenge – ein entscheidender Faktor für industrielle Wärmepumpen der nächsten Generation. Für Anlagenbauer bedeutet dies: mehr Leistung pro Kubikmeter, größere Flexibilität beim Design, robuste Bauweise und die Möglichkeit, Wärmepumpensysteme bis in hohe Temperaturbereiche effizient zu skalieren.

Alfa Laval entwickelt Plate & Fin gezielt für die industrielle Serienproduktion, wodurch die Technologie nicht nur technisch überlegen, sondern auch wirtschaftlich attraktiv wird. Der Vortrag zeigt, wie Plate & Fin die Zukunft der industriellen Wärmepumpentechnologie gestaltet – als nächster logische Schritt in der Evolution vom Rohrbündel über gelötete Plattenapparate hin zur flexiblen Lamellenarchitektur.

Das Plate-&-Fin-Design basiert auf einer Geometrie, die die Wärmeübertragungsfläche maximiert und gleichzeitig den Strömungswiderstand minimiert. Dies ist insbesondere bei gasförmigen Medien von großem Vorteil und ermöglicht eine hocheffiziente Wärmeübertragung auch unter anspruchsvollen Bedingungen. Zum Einsatz kommen neue Werkstofflegierungen, die eine besonders hohe Beständigkeit gegenüber mechanischer und thermischer Ermüdung bieten und so auch bei aggressiven Kältemitteln und hohen Betriebstemperaturen eine lange Lebensdauer gewährleisten. Durch eine gezielte strömungstechnische Optimierung wird eine gleichmäßige Verteilung der Medien erreicht, Fehlverteilungen werden vermieden und sowohl Flexibilität als auch Effizienz des Gesamtsystems deutlich gesteigert. Darüber hinaus verfügt die Plate-&-Fin-Technologie über einen erweiterten Leistungsbereich: Die Wärmetauscher sind für Temperaturen bis zu 200 °C ausgelegt und ermöglichen höhere Kapazitäten sowie verbesserte COP-Werte.

3.19

Heißgasabtauung bei überfluteten Ammoniak-Verdampfern

Tamara Vujinovic

Güntner GmbH & Co. KG, Hans-Güntner-Straße 2-6, 82256 Fürstenfeldbruck
Research Engineer, Abteilung: Applied Thermo & Fluid Dynamics, Future Solutions
tamara.vujinovic@guentner.com

Ammoniak Kälteanlagen sind seit mehr als 100 Jahren eine zuverlässige, effiziente und weit verbreitete Technik zur Kälteerzeugung. Bei luftgekühlten Verdampfern ist die Bildung von Reif und Eis auf den Lamellen unvermeidbar. Erstaunlicherweise gibt es nur wenig Literatur, die quantitative Messungen zur Heißgasabtauung beschreibt, obwohl dieses überwiegend als Verfahren zur Entfernung von Eis angewendet wird.

In diesem Vortrag wird eine bei der Firma Güntner vorhandene Versuchseinrichtung beschrieben, mit der ein lamellierter Ammoniak Verdampfer unter verschiedenen thermischen Randbedingungen kontrolliert bereift werden kann. Anschließend erfolgt die Abtauung des Verdampfers mittels Ammoniak-Heißgas. Neben den üblichen Messgrößen wie Drücken und Temperaturen werden dabei sowohl die zeitliche Entwicklung der Reifmenge als auch der eingesetzten Heißgasmenge im Zeitverlauf erfasst. Aus diesen Daten kann die Effizienz der Abtauung bewertet und optimiert werden.

Ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung ist der direkte Vergleich der Heißgasabtauung mit einer Abtauung mittels elektrischer Heizstäbe. Der Vergleich kann dabei sowohl energetisch als auch im Zeitverlauf vorgenommen werden.

Mithilfe dieser Versuche kann eine echte Beurteilung von Ammonaik Heißgasabtauungen sowohl im Allgemeinen, als auch unter variierenden Betriebs- und Randbedingungen auf Basis von realen Messwerten erfolgen.

Stichwörter:
Ammoniak, Heißgasabtauung, Experimentelle Beurteilung

3.20

Steigerung des äußeren Wärmeübergangskoeffizineten in Rohrbündelwärmeübertragern

Hochleistungsrohre für die Sprühverdampfung von Ammoniak

Louis Tafelmaier*, Luisa Haak, Johannes Brunder, Simon Klink

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart, Deutschland
louis.tafelmaier@igte.uni-stuttgart.de

Ammoniak ist ein natürliches und somit zukunftsfähiges Kältemittel, weshalb es in industriellen Kälteanlagen und Wärmepumpenanwendungen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die Ammoniaksprühverdampfung stellt dabei einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Leistungsdichte von Rohrbündelwärmeübertragern zu steigern und gleichzeitig die benötigte Kältemittelfüllmenge zu reduzieren. Durch das Einsprühen feiner Ammoniaktropfen wird die Verdampfung auf der Mantelseite begünstigt, was insbesondere bei kleinen Wärmestromdichten zu einer höheren Leistung bei gleicher Wandüberhitzung führt.

Trotz dieses Potenzials besteht kein verlässliches Vorhersagemodell für den mantelseitigen Wärmeübergangskoeffizienten. Vorhandene empirische Korrelationen basieren auf Betriebsparametern, sind jedoch in ihrer Anzahl begrenzt und weisen erhebliche Inkonsistenzen auf. Zudem wird ein Großteil der in der Literatur publizierten Untersuchungen lediglich an einzelnen Rohren und nicht an einem gesamten Bündel angestellt. Eine wesentliche

Herausforderung stellt die Bildung von Trockenstellen infolge ungleichmäßiger Flüssigkeitsverteilung im Rohrbündel, sowie die Skalierung dieser Sprühverdampfer hin zu großen Leistungen dar.

Das an der Universität Stuttgart durchgeführte Forschungsprojekt verfolgt die Ziele, Hochleistungsrohre für die Ammoniaksprühverdampfung zu entwickeln und zu vermessen, alternative Düsentypen und -positionen im Bündel zu untersuchen sowie die Vorhersage des mantelseitigen Wärmeübergangskoeffizienten zu verbessern.

Dieser Beitrag präsentiert experimentelle Untersuchungen der Sprühverdampfung von Ammoniak und fokussiert sich dabei auf den Vergleich eines glatten Referenzrohres mit einem Rohr mit Hochleistungsstruktur. Durchgeführt werden die Untersuchungen an einem 50-kW-Rohrbündelprüfstand. Durch Messstellen in den Passumlenkungen ist eine im Bündel örtlich aufgelöste Erfassung des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten möglich. Diese örtlich aufgelösten Wärmeübergangskoeffizienten lassen Rückschlüsse hinsichtlich des Zusammenhangs aus Benetzungsverhalten und gemessenem mantelseitigen Wärmeübergang im Rohrbündel zu. Die untersuchten Betriebsparameter umfassen Wärmestromdichten bis 25 kW/m², Sättigungstemperaturen bis +60 °C sowie Rezirkulationsraten bis 10-mal der verdampften Ammoniakmasse. Die Ergebnisse werden hinsichtlich des Einflusses der Oberflächenstrukturierung auf den Wärmeübergangskoeffizienten diskutiert und mit Versuchsreihen aus dem Behältersieden verglichen.

Stichwörter:
Sprühverdampfung, Ammoniak, Füllmengenreduzierung, Hochleistungsrohre, äußerer Wärmeübergang, experimentelle Untersuchung

3.21

TPMS-basierter Kupfer-Wärmeübertrager

Neuartige hybride Fertigung und erste Erprobung

Sami TUFFAHA [1], Konrad KLOTSCHE [1], Christiane THOMAS [1], Maurice GROSSELINDEMANN [2]

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik, Dresden, Germany
Sami.Tuffaha@tu-dresden.de
Konrad.Klotsche@tu-dresden.de
Christiane.Thomas@tu-dresden.de

[2] Fichtner und Schicht GmbH, Schlangen, Germany
m.grosselindemann@fi-sch.de

Die Steigerung der Energieeffizienz von Kälte-, Wärmepumpen- und Leistungselektronik-Kühlsystemen setzt Wärmeübertrager mit erheblich vergrößerter Oberfläche und optimierten strömungsdynamischen Eigenschaften im Vergleich zum Status quo voraus. Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)-Strukturen, wie der Gyroid bieten, aufgrund ihres großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses und der Durchmischung der Fluidströme, eine vielversprechende Lösung. Ihre hohe geometrische Komplexität stellt jedoch eine erhebliche Herausforderung für die Fertigung monolithischer, metallischer Wärmeübertragerstrukturen – insbesondere aus hochwärmeleitenden Werkstoffen wie Kupfer – dar, was dem Übergang vom optimalen Design zum funktionalen Prototyp bisher im Weg steht.

In diesem Beitrag wird ein neuartiges hybrides Fertigungsverfahren vorgestellt, mit dem ein monolithischer TPMS-Wärmeübertrager aus Kupfer ohne den Einsatz herkömmlicher additiver Fertigungstechnologien hergestellt werden kann. Der Prozess basiert auf der additiven Fertigung eines polymeren Negativs des TPMS-Gitters, das anschließend durch elektrochemische Abscheidung mit einer Millimeterdicken Kupferschicht beschichtet wird. Der Polymerkern wird anschließend chemisch aufgelöst, sodass eine reine TPMS-Kupferstruktur verbleibt. Abschließend werden standardisierte Einlass- und Auslassrohrverbindungen an den Kern angebracht, um den funktionsfähigen Prototyp zu vervollständigen. Die thermische Leistung des Wärmeübertragers wird experimentell untersucht, wobei der übertragene Wärmestrom bei variierenden Volumenströmen und Temperaturdifferenzen gemessen wird, während die Sekundärseite durch einen Badthermostaten bei konstanter Temperatur gehalten wird.

Stichwörter:
Kupfer-Wärmeübertrager, additive Fertigung, Triply Periodic Minimal Surface (TPMS), elektrochemische Abscheidung, Prototyp, Erprobung

4.01

Ausgewählte Themen aus den Zeitschriften des DKV von 1911-73 zu Kälteanwendungen

Dr.-Ing. Rainer Jakobs

DMJ Beratung, Breuberg
dr.rainer.jakobs@t-online.de

In der Zeitschrift für die gesamte Kälteindustrie und in der Kältetechnik – Zeitschrift für das gesamte Gebiet der Kälteerzeugung und Kälteanwendung – wurden viele wissenschaftliche Erkenntnisse zur Kälteerzeugung und Anwendung veröffentlicht. Ausgewählte Themen werden vorgestellt und die Entwicklung dargestellt.

4.02

Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland – Neuauflage der VDMA Studie

Guntram Preuß

VDMA e.V., Allgemeine Lufttechnik, Lyoner Straße 18, 60528 Frankfurt/Main
guntram.preuss@vdma.eu

Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik inkl. Wärmepumpen nach Einsatzgebieten 2024 – herausgegeben vom Forschungsrat Kältetechnik e.V.

Der Vortrag stellt Methodik und Kernergebnisse der Neuauflage der Studie „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ (Basisjahr 2024) vor. Im Fokus stehen die Abschätzung des Endenergiebedarfs der Kältetechnik einschließlich Wärmepumpen und reversibler Systeme sowie die Ableitung belastbarer Größenordnungen zum Bestand an Kältesystemen in Deutschland. Damit bietet der Beitrag eine praxisnahe Grundlage, um Anwendungsentwicklung und Effizienzpotenziale im Kälte- und Wärmepumpensektor faktenbasiert einzuordnen.

Die Abschätzung folgt einer mit den Vorgängerstudien (Basisjahre 2009 und 2017) kompatiblen Segmentierung nach Einsatzgebieten und fasst die Ergebnisse in elf Anwendungsbereichen zusammen. Der Vortrag erläutert, wie Bestandszahlen, typische Leistungs- und Nutzungsprofile sowie Energiekennwerte je Segment zu einem konsistenten Gesamtbild zusammengeführt werden. Im Mittelpunkt der Fortentwicklung gegenüber 2017 stehen die stärkere Verbreitung reversibler Klimatisierung, die wachsende Rolle von Wärmepumpen sowie die Trennung von elektrischer und nicht elektrischer Endenergie.

Auf Basis der Ergebnisse für 2024 werden die „Hotspots“ des Energiebedarfs sowie die wesentlichen Treiber der Entwicklung seit 2017 herausgearbeitet. Vorläufig ergibt sich ein Gesamtendenergiebedarf von rund 95 TWh/a (davon ca. 82 TWh/a Strom) und ein Bestand von rund 166 Mio. Systemen; der Anteil am deutschen Endstromverbrauch liegt damit bei etwa 17–18 %. Der Beitrag liefert damit konkrete Orientierungswerte für Planung, Politik und Forschung in der Kälte- und Wärmepumpentechnik.

4.03

Kaskadierbare Kältespeicher- und Kälteverteileinheiten für Kühllager mit solarer Energieversorgung

Wolfgang Hernschier*, Jörg Waschull, Thomas Häntzschel, Ronny Künanz

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH,
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
wolfgang.hernschier@ilkdresden.de

Kälteanlagen in einer Lebensmittelkühlkette müssen einen zuverlässigen Kühlraumbetrieb auch bei instabiler oder unterbrochener Energieversorgung gewährleisten. Naturgemäß herrschen solche Randbedingungen bei photovoltaisch betriebenen off-grid Kühlsystemen. Im Vortrag werden hierfür neuartige, kaskadierbare Kältespeicher- und -verteileinheiten (storage and distribution systems, SDUs) vorgestellt, die in off-grid Systemen einen kontinuierlichen Kühlbetrieb ermöglichen. Jede SDU umfasst einen Tank mit einer Vielzahl von verkapselten (Wasser-Eis) - PCM-Elementen, einen Luftkühler, eine Pumpe, eine Steuereinheit sowie Schnittstellen für die Kaskadierung. Das System arbeitet mit einem sekundären Kühlkreislauf, so dass im Kühlraum kein Kältemittel zirkuliert und die Anwendungsvorschriften für den Einsatz brennbarer Kältemittel auf eine komplette Außenaufstellung beschränkt bleiben können. Eine einzelne SDU ist so dimensioniert, dass mit ihr ein typischer 10ft Isoliercontainer in heißen Klimazonen mit einer PV-Anlage in Normalkühlung betrieben werden kann. Zur Kostensenkung der SDU finden wiederverwendete PET-Flaschen und ein Berieselungssystem für ein minimiertes Volumen an Wärmeträgerflüssigkeit Anwendung. Ein besonderer Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit lag auf dem Nachweis der Stabilität der PET-Flaschen unter wiederholten Gefrier-Tau-Zyklen und den damit verbundenen mechanischen Belastungen. Die Tests bestätigten, dass die Flaschen dicht und strukturell stabil bleiben, was einen sicheren Langzeitgebrauch ermöglicht. Bei experimentellen Tests mit einem Prototypensystem wurde die thermische Leistung optimiert. Ein Software-Tool unterstützt Kunden bei der Implementierung der neuen SDU in solar betriebene Kühllager.

4.04

Effiziente Kälte für Barcelona

Netzerweiterung im Fernkältesystem mit Turboverdichter-Chiller

Rouven Otto

ENGIE Refrigeration GmbH, dkwa, Josephine-Hirner-Straße 1, 88131 Lindau
rouven.otto@engie.com

Fernkältenetze stellen eine zentrale Technologie zur nachhaltigen Energieversorgung im Gebäudesektor dar und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende. Der vorliegende Beitrag behandelt die Planung, Auslegung und den Betrieb eines rund 22 km langen Fernkältenetz, das aktuell 134 Gebäude versorgt.

Die Kältebereitstellung erfolgt über insgesamt fünf hocheffiziente Kälteanlagen mit Turboverdichtern und dem Kältemittel R1234ze. Der modulare Aufbau der Anlagen ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Lastanforderungen und gewährleistet eine hohe Versorgungssicherheit durch Redundanzkonzepte. Der Ausbau des Netzes erfolgt schrittweise, wodurch die installierte Leistung sukzessive an den steigenden Bedarf angepasst werden konnte.

Im Rahmen des Vortrags werden das Gesamtprojekt sowie die eingesetzten Anlagen und deren auslegungstechnische Grundlagen vorgestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz moderner Turboverdichtertechnologie in Kombination mit einem modularen Anlagenkonzept hohe Effizienzwerte sowohl unter Volllast- als auch unter Teillastbedingungen erreicht werden können. Damit liefert das Projekt einen praxisnahen Nachweis für die Effizienz und Zukunftsfähigkeit zentraler Energieversorgungssysteme im urbanen Kontext.

Stichwörter:
Effizienz, Turboverdichter, Chiller, Fernkälte

4.05

R744 in Supermarktkälteanlagen: Analyse globaler Standorte

Andreas Schulte[1*], Wilhelm Tegethoff[1], Nicholas Lemke[1], Jürgen Köhler[1]

[1]TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik, Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland
andreas.schulte@tu-braunschweig.de

Kälteanlagen mit R744 sind in Europa der Standard für die Kälteerzeugung im Supermarkt. Gegenwärtig existiert eine Vielzahl von Technologien zur Steigerung der Effizienz dieser Anlagen z. B.: Ejektor, Parallelverdichter oder mechanische Unterkühlung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die klimatischen Randbedingungen einen wesentlichen Einflussfaktor auf den Energiebedarf der Supermarktkälteanlage darstellen. Sowohl die Kältelast im Supermarkt als auch der Energieaufwand für die Wärmeabgabe an die Umgebung sind abhängig von den Umgebungsbedingungen.

Zur Evaluierung des standortspezifischen Einflusses des Klimas auf den Energiebedarf werden Simulationsmodelle von Supermärkten als geeignetes Werkzeug eingesetzt. Simulationen erlauben sowohl die Evaluation des Energiebedarfs in der Vergangenheit als auch in der Zukunft unter Berücksichtigung des Klimawandels. Darüber hinaus zeichnet sich ihre Anwendung durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich einer Vielzahl von Standorten aus. Des Weiteren besteht die Option, verschiedene Technologien hinsichtlich ihres gegenwärtigen und zukünftigen Einsatzes zu evaluieren.

Abgesehen von technologischen Aspekten ist auch eine sozioökonomische Betrachtung, wie beispielsweise die Bevölkerungs- und Supermarktdichte, von Relevanz, um die Gewichtung globaler Standorte zu bestimmen. Dies ermöglicht eine Einordnung der globalen Standorte im Kontext ihrer Relevanz.

Diese Studie baut auf einen vorhergehenden Beitrag auf der DKV-Tagung 2023 auf. Dabei wurde das methodische Vorgehen erweitert, insbesondere wurde die Analyse von europäischen auf globale Standorte ausgeweitet und eine Gewichtung der Standorte entwickelt. Hierfür werden zunächst die Modellannahmen und methodisches Vorgehen erläutert. Im Anschluss werden die Resultate der globalen Standortanalyse aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt.

Stichwörter:
Supermarkt, R744, Klimawandel, Energiebedarf, Effizienz

4.06

PFAS – Die neue ökologische Herausforderung in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik

Michael Kauffeld

Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik – IKKU,
Moltkestaße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
Michael.kauffeld@h-ka.de

Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) haben sich aufgrund ihrer Persistenz, Mobilität und potenziellen Toxizität zu einem weltweit bedeutenden Umweltproblem entwickelt. Während PFAS in Konsumgütern große Aufmerksamkeit geschenkt wurde, wird ihr Zusammenhang mit fluorierten Kältemitteln, die in Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen (KKW) verwendet werden, nach wie vor unterschätzt. In diesem Beitrag wird dargelegt, dass fluorierte Kältemittel eine bedeutende und wachsende Quelle für PFAS-Kontaminationen darstellen, insbesondere durch die Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) als stabiles Abbauprodukt in der Atmosphäre. Es

werden Belege für eine weit verbreitete TFA-Kontamination in Gewässern, Lebensmitteln und Ökosystemen sowie regulatorische Entwicklungen in Europa aufgezeigt. Der Beitrag bewertet ferner die ökologischen Kompromisse der aktuellen Kältemittelumstellungen und hebt PFAS-freie Alternativen hervor, insbesondere natürliche Kältemittel. Die Ergebnisse legen nahe, dass ein Übergang zu PFAS-freien KKW-Technologien sowohl notwendig als auch machbar ist.

Stichwörter:
PFAS, TFA, Kältemittel, Umweltauswirkungen, natürliche Kältemittel, HFO, HFKW, Wasserverschmutzung, Nachhaltigkeit

4.07

Risikobewertung bei der Verwendung von Kältemitteln

Dipl.-Ing. Karsten Beermann

IKKE gGmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg-Rheinhausen
info@i-k-k-e.com

Der Umgang mit Kältemitteln ist aufgrund von möglichen Gefrierverbrennungen und wegen der Drucklage ein Sicherheitsproblem. Entsprechende Sicherheitsvorkehrungen und Schutzmaßnahmen, wie das Tragen von Schutzbrille und Schutzhandschuhe, sind zu ergreifen. Hinsichtlich der Druckgefährdung ist der maximal zulässige Betriebsüberdruck abzusichern.

Daneben ist aber auch das Entstehen von giftigen Zersetzungsprodukten beim Anlagenbetrieb durch kleine Leckagen, bei Havarien oder bei Instandhaltungsarbeiten zu berücksichtigen und daraus folgende Schutzvorkehrungen abzuleiten.

Weiterhin ist die Brennbarkeit von Kältemitteln der Klassifikation A2L, A2 oder A3 zu betrachten und dabei die entsprechenden Schutzmaßnahmen einzuhalten, die beim Anlagenbetrieb, bei Havarien oder bei der Instandhaltung zu berücksichtigen sind.

Gemäß der Betriebssicherheitsverordnung ist für den Anlagenbetrieb und den Instandhaltungsarbeiten eine Gefährdungsbeurteilung vom Anlagenbetreiber zu erstellen.

4.08

Stationäre Simulation einer R290-Klimaanlage

Auf Basis eines integralen Modells eines Scrollverdichters

Thomas Meyer [1*], Stefan Elbel[1]

[1] Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wärmübertragung und -wandlung,
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland
Thomas.Meyer@tu-berlin.de

In dieser Studie wird eine stationäre Zyklussimulation einer Klimaanlage für die beiden Kältemittel R32 und R290 vergleichend vorgestellt. Kernstück ist ein Modell des Scrollverdichters, das auf einem integralen physikalischen Modell der Dampfströmung im Verdichter basiert. Zur numerischen Bestimmung der Kältemitteldampfzustände wird eine polytrope Kompression angewendet. Das Verdichtermodell berücksichtigt spezifische Geometrien, die Eigenschaften des Rückschlagventils und das daraus resultierende Verhalten im Verdichter. Die beiden Wärmetauscher werden mit einem vereinfachten NTU-Ansatz modelliert. Ziel dieser Studie ist es, auf Basis der zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien aussagekräftige Erkenntnisse zu gewinnen, anstatt Black-Box-Modelle zu verwenden. Die resultierenden Kühlleistungen, Lufttemperaturen und -feuchtigkeiten sowie Kältemittelzustände und isentrope Wirkungsgrade werden als Funktionen verschiedener Drehzahlen des Verdichters

visualisiert. Dadurch lassen sich die Leistungstrends unterschiedlicher Scrollverdichtertypen für verschiedene Kältemittel unter gegebenen Betriebsbedingungen leicht vergleichen. Die Ergebnisse werden für R290 und R32 bei gegebener Auslegung des Scrollverdichters und gegebenen Umgebungsbedingungen verglichen.

Stichwörter:
Kreislaufsimulation, isentrope Wirkungsgrade, Scrollverdichterauslegung, Kältemittelleistung, R290, R32

4.09

Kohlenwasserstoffe

Anwendung als Kältemittel in der Schienenfahrzeugklimatisierung

Lutz Boeck*, Erwan Jounot, Steffen Poser, Rene Vollrath

Wabtec Germany GmbH | Industriestrasse 60 | 04435 Schkeuditz
lutz.boeck@Wabtec.com

1. Risikoidentifikation
   Leckage als maßgebliches Ereignis bei der Risikobetrachtung
   - Der Kältemittelkreislauf als dauerhaft technisch dichtes System
   - „Dennoch-Leckagen“ – typische Leckraten, Auftretenswahrscheinlichkeit, Einflussgrößen für eine Gefährdungsentstehung
2. Risikominimierende Maßnahmen/ technisch betriebliche Konzepte
   Bewertung der Leckageeinflussgrößen und ihre Auswirkung zum Betriebsfall
   - konstruktive Maßnahmen an Klimagerät und gerätenaher Umgebung
   - Definition betrieblicher Maßnahmen bei Fahrzeugbetrieb und Service
3. Stand der Normung im Bahnbereich
4. und Ausblick zum Einsatz von Kohlenwasserstoffen als natürliche Kältemittel in der Bahnbranche

4.10

Kohlenwasserstoffkältemittel unter industriellen Extrembedingungen

Maik Strauch*

CoolTool Technology GmbH
Technisches Büro für Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik
Kruppstr. 184, 47229 Duisburg
info@cooltool-technology.com

Im Zuge der F-Gase-Verordnung und der damit verbundenen Substitution synthetischer Kältemittel gewinnen Kohlenwasserstoffe als natürliche, klimaneutrale Alternative zunehmend an Bedeutung. Während ihr Einsatz in stationären und gewerblichen Kälteanlagen mittlerweile als etabliert gilt, bestehen in der Praxis nach wie vor Vorbehalte gegenüber ihrer Anwendung unter erschwerten industriellen Randbedingungen – insbesondere bei mobilen Systemen, die thermischen Belastungen, hoher Verschmutzung und aggressiven Umgebungsatmosphären ausgesetzt sind.

Der Vortrag stellt ein Planungsprojekt vor, in dessen Rahmen insgesamt acht Schienenfahrzeuge eines Kokereibetriebs mit mobilen Kompaktkälteerzeugern auf Basis von Kohlenwasserstoffkältemitteln ausgerüstet werden. Anhand der konkreten Anlagenkonzeption werden die spezifischen Herausforderungen des Einsatzortes – hohe

Umgebungstemperaturen, Koksstaubbelastung sowie potenziell explosionsgefährdete Bereiche – sowie die daraus abgeleiteten sicherheitstechnischen Maßnahmen erläutert.

Die vorgestellten Anlagen belegen, dass ein sicherer und zuverlässiger Betrieb von Kohlenwasserstoffkältemitteln auch unter widrigen industriellen Einsatzbedingungen technisch realisierbar ist. Der Beitrag liefert damit einen praxisnahen Nachweis für die Übertragbarkeit etablierter KW-Sicherheitskonzepte auf anspruchsvolle mobile Anwendungsfälle und leistet einen Beitrag zur weiteren Marktdurchdringung natürlicher Kältemittel in industriellen Nischenbereichen.

4.11

Flächenheizung und -kühlung im Schienenfahrzeug

Konzept, Potenziale und Herausforderungen

Max Schott[1,2*], Oliver Garack[2]

[1] Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik,
Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

[2] HÖRMANN Vehicle Engineering GmbH, Abteilung Systementwurf und Auslegung,
Fetscherstraße 72, 01307 Dresden, Deutschland
Max.Schott@hoermann-gruppe.com

Steigende Ansprüche an die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen, sowohl thermisch als auch energetisch, bedingen neue Klimatisierungskonzepte. Im letztjährigen Beitrag „Flächenheizung und -kühlung im Schienenfahrzeug – Konzept, Potenziale und Herausforderungen“ (*Schott und Garack*, DKV-Tagung 2025, Magdeburg) wurde daher bereits der Einfluss aktiv beheizter bzw. gekühlter Oberflächen auf die thermische Behaglichkeit sowie auf die Raumklimaparameter im Fahrgastraum eines Schienenfahrzeugs untersucht. Basierend auf der vielversprechenden Potenzialanalyse wurden mögliche Anlagenkonzepte eines kombinierten Klimasystems aus Flächentemperierung und Luftaufbereitung abgeleitet. Die Temperierung der Flächen soll dabei flüssigkeitsbasiert erfolgen, wobei die notwendige Energie durch das Kompakt-Klimagerät bereitgestellt wird.

Basierend auf ersten Entwürfen des kombinierten Klimasystems wird in diesem Beitrag die Wärme- und Kälteerzeugung mittels Kompressionskälteanlage detaillierter betrachtet. Dafür werden zunächst verschiedene Kältekreisläufe auf ihre Eignung unter schienenfahrzeugtypischen Randbedingungen untersucht und Möglichkeiten der Wärmeübertragung an die Luftaufbereitungsanlage sowie das Flächentemperierungssystem betrachtet. Aus dem Zusammenspiel von Kältekreislauf und Klimasystemtopologie wird ein favorisiertes Anlagenkonzept abgeleitet, dass der Komplexität der schienenfahrzeugspezifischen Anforderungen gerecht wird. Abschließend wird für dieses Konzept der Jahresenergieverbrauch nach DIN EN 50591 berechnet und mit dem eines herkömmlichen Kompakt-Klimagerätes mit reiner Luftaufbereitung verglichen.

Stichwörter:
Schienenfahrzeug, Klimatisierung, Flächentemperierung, Luftaufbereitung, Kompressionskälteanlage

4.12

Untersuchung der Luftaustauschprozesse der Fahrzeug-Klimatisierung im PKW

Florian Jäger[1,2*], Christoph Schmitt[1], Sven Twenhövel[1], Nicholas Lemke[2], Jürgen Köhler[2]

[1] Volkswagen AG, EKAE
florian.jaeger1@volkswagen.de

[2] Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik,
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig

Die Anforderungen an die Effizienz der Fahrzeugklimatisierung sind in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Besonders getrieben durch strengere Verbrauchs-/Emissionsvorgaben. Ein Zentraler Hebel zur Bedarfsreduktion der Klimatisierung stellt die reduzierte Zuführung von Außenluft dar. Im Fahrzeug wird Außenluft zugeführt um Beschlagsfreiheit (besonders bei sehr kalten Umgebungsbedingungen) zu gewährleisten und interne Schadstoffe (z. B. VOC, CO2) abzuführen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es die Effizienz/Effektivität des Luftaustauschprozesses bei verschieden Luftverteilung-, Gebläse-, Umlufteinstellungen zu untersuchen. Dafür werden Konzentrationsabklingversuche mit CO2 als Tracergas an einem Fahrzeug durchgeführt und anschließend der Luftaustauschwirkungsgrad ermittelt. Außerdem werden die Auswirkungen unterschiedlicher Bilanzgrenzen und Modelleinteilungen anhand einfacher simulativer Modelle erläutert.

Der Luftaustauschwirkungsgrad ε^{a} ist eine etablierte Kenngröße in der Gebäudetechnik, um die Wirksamkeit der Lüftung zu quantifizieren. Für Fahrzeugkabinen liegen bisher nur wenige Untersuchungen vor, obwohl die komplexe Geometrie und variable Betriebsweisen eine detaillierte Betrachtung erfordern.

Die Untersuchung haben gezeigt, dass ... *(hier wird nach Vollendung der Messreihe das Ergebnis kompakt zusammengefasst.)*

Stichwörter:
Fahrzeugklimatisierung, Bedarfsreduktion, Konzentrationsabklingversuche, Lüftungseffektivität, Lüftungswirksamkeit, CO2, Schadgasabfuhr, Tracergas, Feuchtemanagement, Luftqualität, BEV, HVAC

4.13

Parallelverdichtung in der mobilen Klimatisierung

Implementierung in einem Hubkolbenverdichter für R744

Jan Pitz

KONVEKTA AG, Versuch und Validierung, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, Deutschland
janpitz@konvekta.com

Das natürliche Kältemittel R744 ist in der Anwendung Thermomanagement für batterieelektrische Fahrzeuge verbreitet. In der Regel beinhalten die Systeme einen elektrisch angetriebenen Hubkolbenverdichter. Bei hohen Umgebungstemperaturen sinkt die Leistung von transkritischen Kältemaschinen ab, dem steht ein erhöhter Leistungsbedarf gegenüber. Um die Leistung und die Effizienz des Kreisprozesses in diesen Betriebspunkten zu steigern, bietet sich der Einsatz von Parallelverdichtung an.

Um ein Mitteldruckniveau im System zu implementieren wird ein Economiser bevorzugt. Um Kältesysteme in der mobilen Anwendung weiterhin mit einem mehrzylindrigen Hubkolbenverdichter betrieben zu können, benötigt dieser einen Mitteldruckeingang.

Der am Verdichter durchgeführte Umbau, der für einen Zylinder einen Mitteldruckanschluss vorsieht, welcher saugseitig umgeschaltet werden kann, wird vorgestellt. Eine Abschätzung der zu erwartenden Prozessverbesserungen wird vorgestellt. Die Implementierung in eine Aufdachklimaanlage für batterieelektrische Fahrzeuge wird untersucht. Eine Vergleichsmessung zeigt die Vorteile des Economisers auf. Zukünftig durchzuführende Entwicklungsschritte, die zur Serienreife führen, werden evaluiert.

Stichwörter:
R744, natürliche Kältemittel, Parallelverdichtung, Economiser, mobile Kälte

4.14

Thermomanagement batterieelektrischer Fernbusse mit natürlichen Kältemitteln

Systemvergleich im Kontext weltweiter Klimate und Klimawandelszenarien

Jan Friedrich Hellmuth[1*], Andreas Schulte[1], Ludwig von Harling[1], Markus Pollak[2], Wilhelm Tegethoff[1,2], Nicholas Lemke[1,2], Thomas M. Koller[1], Jürgen Köhler[1]

[1] Technische Universität (TU) Braunschweig, Institut für Thermodynamik,
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland
jan.hellmuth@tu-braunschweig.de

[2] TLK-Thermo GmbH, Rebenring 31, 38106 Braunschweig, Deutschland

Fernbusse haben weltweit eine sehr große Relevanz für das kostengünstige und ressourceneffiziente Reisen. Bei batterieelektrischen Fernbussen hat das Thermomanagement einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge. Neben der Minimierung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Reichweitenmaximierung sind konkurrierende energieintensive Aspekte wie die Fahrzeugklimatisierung für den Personenkomfort sowie die optimale Temperierung der Batterie und Elektronik zu erfüllen. Dies macht das Design des Thermomanagement-Systems mit einer umschaltbaren Wärmepumpe für Heiz- und Kühlzwecke auf Basis von natürlichen Kältemitteln zur zentralen Herausforderung, insbesondere bei stark variierenden klimatischen Randbedingungen und möglichen Änderungen durch den Klimawandel.

Der vorliegende Beitrag untersucht das Thermomanagement von batterieelektrischen Fernbussen mittels eines physikbasierten Gesamtfahrzeugmodells im Kontext weltweiter Klimate. Unter Nutzung der natürlichen Kältemittel Propan (R290) und Kohlenstoffdioxid (R744) werden verschiedene Querkopplungen im System und die Randbedingungen der realen Anwendung berücksichtigt, wobei ein besonderer Fokus auf der Betrachtung des Thermomanagements für Standorte weltweit mit unterschiedlichen Klimaten (und Klimawandelszenarien) liegt. Basierend auf einer kürzlich entwickelten Methodik mit Fokus auf Europa [1] wird hier die Analyse auf ausgewählte repräsentative Standorte in Asien sowie Nord- und Südamerika erweitert. Die simulativen Ergebnisse für den Coefficient of Performance (COP) bzw. Energieverbrauch zeigen regional stark variierende Trends, woraus verschiedene Maßnahmen zur Effizienzsteigerung beleuchtet und diskutiert werden. Fernbusse haben weltweit eine sehr große Relevanz für das kostengünstige und ressourceneffiziente Reisen. Bei batterieelektrischen Fernbussen hat das Thermomanagement einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch der Fahrzeuge. Neben der Minimierung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Reichweitenmaximierung sind konkurrierende energieintensive Aspekte wie die Fahrzeugklimatisierung für den Personenkomfort sowie die optimale Temperierung der Batterie und Elektronik zu erfüllen. Dies macht das Design des Thermomanagement-Systems mit einer umschaltbaren Wärmepumpe für Heiz- und Kühlzwecke auf Basis von natürlichen Kältemitteln zur zentralen Herausforderung, insbesondere bei stark variierenden klimatischen Randbedingungen und möglichen Änderungen durch den Klimawandel.

Der vorliegende Beitrag untersucht das Thermomanagement von batterieelektrischen Fernbussen mittels eines physikbasierten Gesamtfahrzeugmodells im Kontext weltweiter Klimate. Unter Nutzung der natürlichen Kältemittel Propan (R290) und Kohlenstoffdioxid (R744) werden verschiedene Querkopplungen im System und die Randbedingungen der realen Anwendung berücksichtigt, wobei ein besonderer Fokus auf der Betrachtung des

Thermomanagements für Standorte weltweit mit unterschiedlichen Klimaten (und Klimawandelszenarien) liegt. Basierend auf einer kürzlich entwickelten Methodik mit Fokus auf Europa [1] wird hier die Analyse auf ausgewählte repräsentative Standorte in Asien sowie Nord- und Südamerika erweitert. Die simulativen Ergebnisse für den Coefficient of Performance (COP) bzw. Energieverbrauch zeigen regional stark variierende Trends, woraus verschiedene Maßnahmen zur Effizienzsteigerung beleuchtet und diskutiert werden.

Stichwörter:
Batterieelektrische Fahrzeuge, Klimawandel, Fahrzeugklimatisierung, Thermomanagement, Wärme-pumpe,

[1] Hellmuth, J. F.; Schulte, A.; Pollak, M.; Menke, P.; Tegethoff, W.; Lemke, N.; Köhler, J. "Klimatische Einflüsse auf das Thermomanagement batterieelektrischer Fernbusse." In: Deutsche Kälte-Klima-Tagung, DKV. Dresden, 20.–22. November 2024.

4.15

Thermal Management für PKW mit natürlichen Kältemitteln

Fokus auf elektrische und teilelektrische Fahrzeuge

Florian Wieschollek[1*], Dr. Roman Heckt[2]

[1] Hanon Systems Deutschland, Thermal Management, 50170 Kerpen, Deutschland
fwiesch1@hanonsystems.com

[2] Hanon Systems Deutschland, Natural Refrigerant Systems, 50170 Kerpen, Deutschland
rheckt@hanonsystems.com

Mit dem kontinuierlich steigenden Marktanteil von Elektro- und Plug-in-Hybridfahrzeugen (EV, PHEV) rückt das thermische Management zunehmend in den Fokus. Es wird zu einem Schlüsselfaktor zur Sicherstellung von Effizienz, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer des elektrischen Antriebsstrangs.

Die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums erfolgt über einen Kältemittelkreislauf, der häufig durch eine Wärmepumpenfunktion ergänzt wird, um auch bei geringer Abwärme eine effiziente Beheizung zu ermöglichen. Gleichzeitig müssen zentrale Komponenten wie Elektromotor, Leistungselektronik und Hochvoltbatterie innerhalb enger Temperaturfenster betrieben werden, um Performance und Dauerhaltbarkeit sicherzustellen. Das Zusammenspiel mit einer integrierten Kühlmittelarchitektur bildet dabei die Grundlage für ein ganzheitlich effizientes Thermomanagementsystem.

Ein wesentlicher Entwicklungstrend ist die Modularisierung des Thermalmanagements. Standardisierte und skalierbare Komponenten sowie Systemarchitekturen ermöglichen es, unterschiedliche Fahrzeugplattformen effizient zu bedienen, Entwicklungszeiten zu verkürzen und Kosten zu senken. Gleichzeitig schafft der modulare Ansatz die notwendige Flexibilität zur Integration neuer Technologien und Kältemittel.

Das aktuell weit verbreitete Kältemittel R1234yf steht aufgrund potenzieller PFAS- bzw. TFA-Emissionen unter zunehmendem regulatorischem Druck. Der entsprechende EU-Regulierungsprozess ist derzeit noch nicht abgeschlossen, wodurch für Hersteller weiterhin Unsicherheiten bestehen. Gleichzeitig zeichnen sich globale Entwicklungen ab: So ist es durchaus denkbar, dass China ab etwa 2029 verstärkt auf natürliche Kältemittel in Elektrofahrzeugen setzt. In diesem Kontext gewinnen Alternativen wie R290 (Propan) und R744 (CO_2) weiter an Bedeutung.

Hanon Systems hat hierfür bereits serientaugliche Lösungen entwickelt, die seit 2020 im Einsatz sind. Diese umfassen sowohl spezifische Komponenten als auch optimierte, modular aufgebaute Kreislaufarchitekturen, die kontinuierlich hinsichtlich Effizienz, Robustheit und Plattformkompatibilität weiterentwickelt werden.

Stichwörter:
Automobil, Klimatisierung, PFAS, natürliche Kältemittel, R290, R744

4.16

Systemvergleich R744 vs. R290 – Auswirkungen auf die Kompressorauslegung

Robert Scherzer

thyssenkrupp Dynamic Components Chemnitz GmbH
robert.scherzer@thyssenkrupp-automotive.com

Die Umstellung mobiler Klimatisierungs- und Wärmepumpensysteme auf Kältemittel mit niedrigem GWP führt zu einer Neubewertung natürlicher Kältemittel. R744 und R290 stehen dabei besonders im Fokus, werden jedoch häufig aus unterschiedlichen Blickwinkeln bewertet: R290 erscheint auf Komponentenebene zunächst als naheliegender Ersatz für heutige R1234yf-Systeme, während R744 im Automobilbereich oft mit hohen Drücken, erhöhten Kosten und größerer technischer Komplexität verbunden wird.

Dieser Beitrag stellt beide Kältemittel aus Sicht realer Fahrzeugarchitekturen gegenüber. Im Mittelpunkt steht nicht der reine Stoffvergleich, sondern die Frage, welche Systemkonzepte unter den Randbedingungen aktueller Elektrofahrzeuge tatsächlich umsetzbar und effizient betreibbar sind. Grundlage sind vergleichende Systemsimulationen direkter und indirekter Kältekreislaufkonzepte mit harmonisierten Randbedingungen, einheitlicher Regelungslogik sowie Berücksichtigung von Bauraumrestriktionen, Druckverlusten und transienten Abkühlszenarien.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Systemvergleich nicht durch das Kältemittel allein bestimmt wird, sondern maßgeblich auch durch Sicherheitskonzept, Wärmeübertragerintegration, Package, Druckverluste, Kompressorauslegung und Regelstrategie. Abschließend werden die Erkenntnisse aus der Systembetrachtung auf die Anforderungen an geeignete Kompressorkonzepte übertragen und hinsichtlich ihrer Dimensionierung für zukünftige automobile Thermomanagement-Systeme eingeordnet.

4.17

Kompaktes R290 Thermomodul mit Boostfunktion

Lukas Löhmer* | Tam Nguyen | Pascal Prüß

Pierburg GmbH, Alfred-Pierburg-Straße 1, 41460Neuss
Lukas.Loehmer@de.rheinmetall.com

Der Wärmeübergang beim Blasensieden wird seit Jahrzehnten experimentell und theoretisch untersucht, trotzdem besteht bisher keine geschlossene Theorie zu den eigentlichen physikalischen Vorgängen während der Verdampfung. Daher werden heutzutage in verschiedenen verfahrenstechnischen Prozessen die Verdampfer zu groß ausgelegt oder arbeiten ineffizient. Neuartige, effiziente Strukturen werden häufig nicht eingesetzt, da zuwenig Referenzdaten zur Verfügung stehen und die Berechnungsmethoden bislang aufgrund vieler Einflussgrößen keine eindeutigen Ergebnisse liefern. Dies gilt insbesondere für technisch sehr raue oder speziell strukturierte Rohre, für die die Datenbasis im Vergleich zu Glattrohren sehr gering ist. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Untersuchung des Einflusses der Rauheit bzw. der Mikrostruktur auf den Wärmeübergang beim Blasensieden. Bisher wird die Oberflächenstruktur durch den Mittenrauwert in den empirischen Gleichungen unabhängig von weiteren Einflußparametern wie Siededruck, Wärmestromdichte und Fluideigenschaften berücksichtigt.

In dem Beitrag werden die unterschiedlichen Gleichungen aus der Literatur vorgestellt und anhand einer großen Vielzahl von experimentellen Daten diskutiert. Für Mittenrauhwerte von ca. 0,4 µm liegen diese Daten vor, für höhere Rauheiten kaum. Daher werden die Oberflächen von Rohren durch Sandstrahlen mit einem arithmetischen Mittenrauheitwert von Pa≥ 10µm bearbeitet. Die Analyse der Oberflächentopographie erfolgt mit zwei verschiedenen berührungslosen Tastschnittverfahren. Dabei werden Topographien in azimutaler sowie axialer Richtung aufgenommen und ausgewertet. Die Wärmeübergangsmessungen werden für Propan entlang der gesamten Dampfdruckkurve durchgeführt.

Stichwörter:
Sandstrahlen, potentielle Keimstellen, normierte Rauheitswerte, Wärmeübergang

4.18

Anwendung eines Ultra Low GWP / A2L Kältemittel in Monoblock Wärmepumpen

Christian Macrí, Alvaro de Leon, Felix Flohr*

Daikin Chemical Europe GmbH, Am Wehrhahn 50, 40211 Duesseldorf, Germany
felix.flohr@daikinchem.de

Die EU-F-Gas-Verordnung von 2024 schreibt eine drastische Reduzierung der verfügbaren F-Gas-Quoten auf etwa 5 % des Referenzwerts von 2015 bis zum Jahr 2030 vor. Um diese strengen Anforderungen zu erfüllen, werden langfristig Kältemittel mit einem GWP_{100} < 10 erforderlich sein.

Im Bereich Klimatisierung und Wärmepumpen (AC/HP) steht R-290 für einige Anwendungen zur Verfügung; aufgrund seiner erhöhten Brennbarkeit kann es jedoch in bestimmten Einsatzbereichen aus Sicherheitsgründen – gemäß geltenden Sicherheitsnormen und Bauvorschriften – nicht verwendet werden. Die derzeit verfügbaren A2L-Kältemittel, die diese Anwendungen abdecken könnten, weisen hingegen einen GWP_{100} von etwa 150 auf.

Die Präsentation stellt R-474B als neues A2L-Kältemittel mit einem GWP_{100} < 1 vor. Testergebnisse belegen die Eignung dieses neuen Kältemittels für den Einsatz in einer handelsüblichen Monoblock-Wärmepumpe, die ursprünglich für R-454C (ein A2L-Kältemittel mit GWP_{100} ~150) ausgelegt war. Die Prüfungen erfolgten gemäß den Normen EN14511 und EN14825 bzw. den Keymark-Anforderungen.

Im Rahmen der Tests wurde die Leistung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe beim Vergleich von R-454C und R-474B unter Drop-in-Bedingungen untersucht. Die Prüfung für beide Kältemittel erfolgte ohne Änderungen an der Hardware – wie etwa dem Expansionsventil oder der Auslegung der Wärmetauscher – und unter Verwendung des Originalkompressors sowie des Original-Kompressoröls.

Abschließend gibt die Präsentation einen Ausblick auf die künftige anwendungsorientierte Entwicklung neuer Kältemittelgemische für Wärmepumpen, die ursprünglich für R-290 ausgelegt sind. Ziel ist es, den Einsatz von R-290-Wärmepumpen auch in sicherheitskritischen Bereichen zu ermöglichen und Herstellern so mehr Flexibilität bei der Anwendung ihrer Geräte zu bieten.

4.19

CO_2-Kälteanlage mit Energie-Transfer-System

Erfahrungsbericht aus der Praxis

Jonas Schönenberger [1*], Erik Wiedenmann [1], Marcel Bärtsch [1]

[1] Frigo Consulting AG, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz
j.schoenenberger@frigoconsulting.ch
e.wiedenmann@frigoconsulting.ch
m.baertsch@frigoconsulting.ch

Im Herbst 2022 ging in einem Cash und Carry Markt im Raum Zürich eine energiesparende Weltneuheit in Betrieb. In die, im Rahmen einer Erneuerung installierte CO2-Kälteanlage, wurde ein Energie-Transfer-System integriert. Das letztere wandelt Hochtemperatur-Abwärme der CO2-Kälteanlage mittels eines Rankine-Kreisprozesses in nützliche Kälte um und entlastet dabei wiederum die CO2-Kälteanlage. Das ETS wurde entwickelt, gebaut und vor Ort in die neu installierte CO2-Kälteanalge integriert. Im Anschluss an die Installation wurde die CO2-Kälteanalge zusammen mit dem ETS in Betrieb genommen. Seither werden Betriebserfahrungen

und Messdaten gesammelt und der Betrieb und das System wird laufend optimiert. Aktuell erfolgt eine detaillierte Untersuchung des Gesamt-Systems in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie. Das Konzept vom ETS ist nicht zuletzt deshalb vielversprechend, da es auch losgelöst von CO2-Kälteanlagen, Hochtemperatur-Abwärme aus beliebigen Prozessen in nützliche Kälte umwandeln vermag.

Dieser Beitrag ist die Fortsetzung, der an der DKV-Tagung 2023, präsentierte ersten Feldanlage. In der Zwischenzeit wurde das System basierend auf wertevollen Betriebserfahrungen weiterentwickelt und weitere Feldanlagen in Betrieb genommen. Darüber hinaus werden Ergebnisse einer detaillierten Untersuchung in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie präsentiert.

Stichwörter:
CO2, R744, Kälteanlage, Energie-Transfer-System, Rankine, Exergie

4.20

CO_2-Kältemittelgemische – Anwendung mit variabler Konzentration

Dr.-Ing. Kristian Huchtemann

Copeland Europe GmbH, Pascalstraße 65, 52076 Aachen
kristian.huchtemann@copeland.com

CO_2 als Kältemittel bietet zahlreiche Vorteile, darunter vor allem die relativ geringe Umweltbelastung, die Nichtentflammbarkeit und die hohe volumetrische Kälteleistung. In der Kältetechnik besteht der größte Nachteil von CO_2 in der niedrigen kritischen Temperatur, was insbesondere im transkritischen Betrieb, d. h. bei hohen Umgebungstemperaturen, zu Leistungseinbußen führt.

Um den transkritischen Betrieb zu vermeiden, kann CO_2 mit Kältemitteln gemischt werden, die eine hohe kritische Temperatur aufweisen. Eine solche Mischung weist jedoch spezifische Eigenschaften auf, insbesondere einen starken Temperaturgleit.

Ein neuartiger Kältekreislauf ermöglicht einen effizienten Betrieb mit derartigen Gemischen. Entgegen bisherigen Ansätzen mit fester Konzentration wird dabei die zirkulierende Kältemittelkonzentration aktiv geregelt und den Betriebsbedingungen angepasst.

Anhand theoretischer Analysen sowie Versuchen an modifizierten CO_2-Kälteanlagen wird aufgezeigt, wie Kältekreisläufe mit CO_2-Gemischen optimal betrieben werden können.

4.21

Kältemittel-Boxerverdichter für R290

Ulrich Schindler[1*], Robin Langebach[1]

[1] Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte- Klima- und Umwelttechnik,
Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Germany
Ulrich.Schindler@h-ka.de
Robin.Langebach@h-ka.de

Derzeit werden Verdichter für die vielfältigen Anwendungen in der Kälte- und Wärmepumpentechnik in dreistelliger Millionenhöhe produziert. Im Falle einer Übereinstimmung der individuellen Anforderungen mit am Markt verfügbaren Verdichtern werden häufig leistungsfähige und kostengünstige Modelle angeboten. In spezifischen mobilen Anwendungen, wie sie beispielsweise im Bereich der Luftfahrt oder in Sonderanwendungen der stationären Kältetechnik zu finden sind, können zusätzliche Anforderungen, wie beispielsweise die Bauraumdimensionen, dazu führen, dass marktverfügbare Modelle als unzureichend erachtet werden. Bei Betrachtung

der räumlichen Dimensionen zeigen sich marktverfügbare Modelle überwiegend mit zylindrischer oder kugelförmiger Gehäuseform. Dies kann zu Einschränkungen hinsichtlich der Integration in flache oder geometrisch stark begrenzte Einbauräume führen. Die vorliegende Untersuchung widmet sich der Diskussion über die Anwendung bewährter, jedoch selten verwendeter Verdichterbauarten.

In diesem Zusammenhang wird ein Konzept präsentiert, das auf dem Boxerprinzip basiert und für den Betrieb mit dem natürlichen Kältemittel R290 konzipiert ist. Das Boxerprinzip zeichnet sich durch eine flache Bauweise aus, die durch die gegenüberliegende Anordnung der Arbeitsräume ermöglicht wird. Gleichzeitig bietet es ein hohes Potenzial für eine hohe Leistungsdichte. Darüber hinaus weist das Konzept Vorteile hinsichtlich der Skalierbarkeit auf, da Motorleistung und Fördervolumen nicht zwangsläufig eine Dickenänderung der Maschine zur Folge haben müssen. Darüber hinaus besteht durch eine modulare Bauweise die Möglichkeit, unterschiedliche Anwendungen zu bedienen.

Die Veröffentlichung beinhaltet eine Konzeptstudie des R290-Boxerverdichters sowie die Präsentation initialer Resultate. Im Rahmen der Diskussion werden die grundlegende konstruktive Umsetzung, die erwarteten Vorteile der Bauform sowie zentrale technische Herausforderungen erörtert. Die Resultate demonstrieren das Potenzial des Boxerprinzips für kompakte Kältemittelverdichter in bauraumkritischen Anwendungen und bilden die Grundlage für weiterführende Untersuchungen zur Auslegung.

Stichwörter:
Kältemittelverdichter, Boxerprinzip, Leistungsdichte, Bauraumverfügbarkeit

4.22

Erkennung von Anomalien mit Ultraschall und KI

Erkennung von Leckagen in Kältemittelkreisläufen mithilfe eines KI-gestützten Ultraschallsensors

Mathias Venschott[1*], Chinmay Kulkarni[1]

[1] Truma Group GmbH & Co. KG, Strategisches Business Development,
Wernher-von-Braun-Straße 12, 85640 Putzbrunn, Deutschland
m.venschott@truma.com

Die frühzeitige Erkennung von Leckagen in Kältekreisläufen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Gründe hierfür sind einerseits der verstärkte Einsatz natürlicher Kältemittel wie R290, bei dem Sicherheitsaspekte eine zentrale Rolle spielen, sowie R744, dass aufgrund hoher Betriebsdrücke und kleiner Molekülgröße besondere Anforderungen an die Dichtheit stellt. Darüber hinaus steigen die Anforderungen an den Service, bei dem potenzielle Ausfälle frühzeitig erkannt werden sollen und Wartungsmaßnahmen planbar durchgeführt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Plattform entwickelt, die mithilfe eines akustischen Sensors und künstlicher Intelligenz Anomalien im Ultraschallbereich identifiziert. Die Plattform umfasst ein Simulationstool zur Bestimmung optimaler Sensorpositionen, einen Edge-basierten Sensor, einen personalisierten Zugang mit Dashboards und Berichten, ein Teaching-Tool für die KI, ein Servicetool mit Updates und einer Soundlibrary.

Der Sensor überwacht mehrere charakteristische Signaturen im Frequenzspektrum und ermöglicht damit neben der Leckageerkennung auch andere Anwendungen im Bereich Predictive Maintenance, etwa für Lüfter, Verdichter, Leistungselektronik oder Stellmotoren und viele weitere. Das System wurde unter verschiedenen Einflussgrößen untersucht und in einem Transportkältefahrzeug validiert.

Stichwörter:
Leckageerkennung, Predictive Maintanance, Ultraschall, künstliche Intelligenz, DKV

5.01

Natural Cooling Panel – Indirekte Verdunstungskühlung über Membranen

Hannes Rosenbaum

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
hannes.rosenbaum@ilkdresden.de

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

Um die positiven Effekte der indirekten Verdunstungskühlung in Kleingeräten und Bestandsgebäuden umzusetzen und gleichzeitig das Aerosolproblem zu lösen, hat das ILK Dresden im Rahmen eines öffentlichen Forschungsvorhabens ein innovatives Kühlpanel mit einem neuartigen Wärme- und Stoffübertrager entwickelt. Dieser Wärmeübertrager besteht aus gestapelten 4-lagigen Textillaminaten und wird gleichzeitig von Wasser, Zuluft und Prozessluft durchströmt. Während Wasser durch eine wasserdampfdurchlässige Membran in den Prozessluftstrom verdunstet, wird die Kühlwirkung über eine diffusionsdichte Sperrschicht zum Zuluftstrom wirksam. Darüber hinaus verfügt das dezentrale Kühlpanel über einen eigens entwickelten impulsarmen Luftauslass, der gleichzeitig als Strahlungsfläche fungiert. Damit ermöglicht er sowohl die Kompensation konvektiver als auch radiativer Lasten.

Der Vortrag gibt einen Einblick in die Entwicklung des neuartigen Kühlpanels (Gerätekonzept, Wärme- und Stoffübertrager, strahlungswirksamer Luftauslass), die messtechnischen Analysen sowie die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse. Abschließend werden Optimierungs- und Anwendungspotenziale der Verdunstungskühlung über Membranen sowie der Membranwärmeübertrager allgemein thematisiert.

5.02

Sorptions-gestützte Raumklimatisierung

Erste experimentelle Ergebnisse zur Untersuchung der Effizienzsteigerung

Christian Thoms-Meyer*, Dario Umberto De Falco, Alan Alvy, Thomas Meyer

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Fachgebiet Wärmeübertragung und -wandlung,
Sekretariat KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland
c.thoms-meyer@tu-berlin.de

Konventionelle Klimaanlagen sind nicht in der Lage, latente und sensible Lasten getrennt voneinander zu regeln. Zur Luftentfeuchtung sind Verdampfertemperaturen unterhalb des Taupunkts, typischerweise bei etwa 5 °C erforderlich. Anschließend ist eine Erwärmung der Prozessluft notwendig, um Komfortbedingungen im Innenraum herzustellen. Der resultierende große Temperaturhub reduziert die Effizienz dieser Anlagen erheblich.

Sorptions-gestützte Raumklimatisierungssysteme stellen eine energieeffiziente Alternative dar. In dem untersuchten System erfolgt die sensible Kühlung mittels Kompressionskälte, während die Luftentfeuchtung durch einen absorptiven Prozess mit Ionischer Flüssigkeit erzielt wird. Resultierende Sorptionseffekte ermöglichen niedrigere Kondensatortemperaturen sowie höhere Verdampfertemperaturen und damit eine deutliche Steigerung der Systemeffizienz.

In diesem Paper werden erste Messergebnisse einer sorptions-gestützten Raumklimatisierungsanlage präsentiert, wobei der Fokus auf den erzielten Effizienzgewinnen liegt. Ergänzend erfolgt ein Vergleich der Messdaten mit Simulationsergebnissen aus vorherigen Veröffentlichungen, in denen eine Verdreifachung der Arbeitszahl prognostiziert wurde.

Stichwörter:
Effiziente Raumklimatisierung, elektrische Energieeinsparungen, Absorptive Luftentfeuchtung, Ionische Flüssigkeiten

5.03

Analyse von Kältesystemen mit Freier Kühlung

Simulations- und Toolgestützter Effizienzvergleich hydraulischer Konzepte und Betriebsführungsstrategien

Simon R. Wagner[1]*, Elias Vuic, Sebastian Haußer[1], Martin Becker[1]

[1]Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach, Deutschland
simon.wagner@hochschule-bc.de

Die Transformation der Energieversorgungslandschaft in Deutschland hin zur Treibhausgasneutralität bis 2045 betrifft auch den Kältesektor. Dieser steht mit einem Anteil von rund 14 % am elektrischen Endenergiebedarf vor der Herausforderung, Effizienzpotenziale zu erschließen und fossile durch erneuerbare Energieträger zu substituieren. Die Integration einer indirekten Freien Kühlung wird dabei in der Literatur durchgehend als wirkungsvolle Maßnahme zur Effizienzsteigerung von Kältesystemen beschrieben, sofern geeignete System- und Randbedingungen vorliegen. Der Einsatz der Freikühltechnologie bietet ein hohes Effizienzpotenzial, dessen tatsächlich realisierbare Effizienzgewinne jedoch maßgeblich von der hydraulischen Einbindung sowie der umgesetzten Betriebsführungsstrategie abhängen.

Zur systematischen Analyse und Untersuchung wurde ein modular aufgebautes, mit Messdaten validiertes Laborkälteanlagenmodell eingesetzt, um Betriebskennfelder der Freien Kühlung und der Kältemaschine im Einzel- und Simultanbetrieb zu generieren. Dabei wurden Betriebskennfelder für unterschiedliche Regelstrategien und hydraulische Integrationskonzepte bei gemeinsamer kühlwasserseitiger Einbindung von Freier Kühlung und Kältemaschine über ein Rückkühlwerk ausgewertet.

Die Betriebskennfelder wurden in ein neu entwickeltes Jahressimulationstool integriert, das stundenbasierte Effizienzvergleiche unter identischen Last- und Umgebungsbedingungen bei variierender Betriebsführung (Regelstrategien, Umschaltstrategien, eingesetzte Betriebsmodi) ermöglicht. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Kennzahlen nach VDMA 24247-7.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl das Hydraulikkonzept als auch die Betriebsführungsstrategie einen deutlichen Einfluss auf die Jahresarbeitszahl nehmen, sich gegenseitig beeinflussen und gezielt optimiert werden sollten, um die Freie Kühlung möglichst effizient im Jahresbetrieb nutzen zu können.

Stichwörter:
Indirekte Freie Kühlung, Energieeffizienzvergleich, Jahressimulation, Hydraulik, Betriebsoptimierung

5.04

Modellierung und entropiebasierte Optimierung sorptiver Entfeuchtungsprozesse

Jan Segura Schreiber*, Prof. Dr.-Ing. Arne Speerforck

Technische Universität Hamburg
jan.segura.schreiber@tuhh.de

Von der Produktion von Li-Ion-Batterien bis zur Fertigung von Mikrochips und medizintechnischen Produkten erfordern viele industrielle Fertigungsprozesse eine sehr geringe Luftfeuchtigkeit. Diese wird oftmals durch sorptionsbasierte Entfeuchtungsprozesse bereitgestellt, deren Energiebedarf bei einer tiefen Entfeuchtung erheblich sein kann. Zur Analyse und Optimierung sorptionsgestützter Systeme, wurde ein Modelica-basiertes Modell entwickelt und validiert. In dem Modell werden verschiedene irreversible Mechanismen durch eine direkte und lokale Berechnung der Entropieproduktion erfasst und quantifiziert.

Die Untersuchungen zur Entropieproduktion zeigen, dass obwohl die Effekte von Stoffübertragung, Druckverlust und Mischung nicht vernachlässigbar sind, der Großteil der Irreversibilitäten allerdings auf die Wärmeübertragung zurückzuführen sind. Weiterhin konnte die Existenz und Lage eines optimalen Betriebspunktes (Kombination aus Regenerationstemperatur und Drehzahl) hinsichtlich Entropieproduktion gezeigt werden. Durch Analyse der lokalen Entropieproduktion wird gezeigt, dass in diesem Punkt ein größerer Anteil des Sorptionsrads „aktiv“ ist und Entropie auf einer größeren Fläche verteilt entsteht, als bei einem nicht-optimalen Punkt. Da der Großteil des Exergiebedarfes aus der Entropieproduktion stammt, ist es wichtig, eine solche Anlage möglichst nahe am optimalen Punkt zu betreiben (Segura Schreiber et al. (2026)). Es werden Regelungsstrategien vorgeschlagen, um eine solche Anlage in einem optimalen Betriebspunkt zu bringen und zu halten. Weiterhin wird auf die Möglichkeit eingegangen, den sorptionsgestützten Entfeuchtungsprozess mit Solarenergie zu betreiben. Dies ist besonders dann möglich, wenn die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Entropieproduktion genutzt werden, um den optimalen Betriebspunkt einzustellen und somit die nötige Regenerationstemperatur niedrig zu halten.

Stichwörter:
Klimatisierung, Entfeuchtung, Sorption, Modelica

Literatur:

Segura Schreiber, Jan, Evgenia Makhova and Arne Speerforck. 2026. *“Understanding Irreversible Processes in a Desiccant Wheel via Direct Entropy Generation Modeling.”* International Communications in Heat and Mass Transfer 175 (June): 111172. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111172.

5.05

Von der Potentialstudie zum Demonstrator

Regelbare Dämmelemente in der anwendungsnahen Prüfung

Michael Müller[1*], Maurizio Calandri[1], Jonina Felbinger[2], Leon Pauly[3], Tobias Henzler[1], Marc Linder[2], Sibylle Schmied[3], Konstantinos Stergiaropoulos[1]

[1]Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (**IGTE**), Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart

[2]Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (**DLR**), Institut für Technische Thermodynamik, Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart

[3]Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (**DITF**), Technologiezentrum Maschentechnik, Körschtalstraße 26, 73770 Denkendorf
michael.mueller@igte.uni-stuttgart.de

Eine Reduktion des Energiebedarfs und eine ausreichende Verfügbarkeit von Speichermöglichkeiten für thermischer Energie sind wesentliche Voraussetzungen, um zukünftig eine weitestgehend erneuerbare Wärme- und Kälteversorgung in Deutschland zu erreichen. Ein hoher Dämmstandard und eine hohe Luftdichtheit von Gebäudehüllen führen zur Reduzierung des Heizenergiebedarfs, können jedoch bereits bei moderaten Außentemperaturen aufgrund interner Wärmelasten in einem erhöhten Kühlenergiebedarf resultieren. Eine Möglichkeit, den Gesamtenergiebedarf von Gebäuden zu reduzieren, bieten adaptive Gebäudehüllen, bei denen der Wärmedurchgang durch regelbare Dämmelemente gezielt eingestellt werden kann. In Kombination mit Speichermassen (z. B. tragende Massivbauteile) können diese außerdem gezielt, als raumnahe thermische Speicher genutzt werden.

Im Rahmen des Projekts ReVaD (Industrielle Gemeinschaftsforschung, FKZ: 01IF22617N) werden Simulationsstudien durchgeführt, um das Energieeinsparpotential von Fassadensystemen mit regelbaren Dämmelementen zu untersuchen.

Zur Berücksichtigung der zeitlich veränderlichen Wärmeleitfähigkeit regelbarer Dämmelemente wurde in MATLAB ein eigenes Modell entwickelt. Eine veränderliche Wärmeleitfähigkeit und die Abbildung unterschiedlicher Schaltfaktoren (Quotient aus maximaler und minimaler Wärmeleitfähigkeit) bei Einhaltung bauphysikalischer Kriterien ermöglichen je Zeitschritt die Berechnung der bilanziell für das Gebäude idealen Wärmeleitfähigkeit des Dämmelements. Die so ermittelten theoretischen Einsparpotentiale des Kühlenergiebedarfs liegen bei bis zu 70 %, je nach Randbedingungen und angenommenem Schaltfaktor der Dämmelemente. Durch eine Erweiterung der Simulationsumgebung können zudem auch innenliegende, aktivierbare Speichermassen und deren Einfluss auf die thermischen Bedingungen im Innenraum untersucht werden.

Neben der Simulation wird im Projekt ReVaD auch eine technische Realisierung adaptiver Gebäudehüllen in Form von regelbaren Vakuumdämmelementen erarbeitet und experimentell untersucht. Im Projekt entwickelt das DLR einen Metallhydridreaktor zur Gasdruckregelung über thermochemische Reaktionen. Die DITF realisieren die daran angeschlossenen Paneele mit textilem Füllkern und spezifischen Poreneigenschaften. In porösen Strukturen korreliert die effektive Wärmeleitfähigkeit mit dem Gasdruck [1]. Um das entwickelte System anwendungsnah zu prüfen, wurde im Forschungsvorhaben ein adaptives Fassadenelement der Größe 1 m x 1 m entwickelt und dessen thermisches Betriebsverhalten im Raumluftströmungslabor mittels Demonstrator vermessen. Damit kann der Einfluss einer regelbaren Fassade sowohl bei konstanten als auch variablen, im Labor emulierten, Außenbedingungen getestet und die Schaltdynamik des Systems bewertet werden. Fokus des Beitrags ist der Funktionsnachweis und die experimentelle Demonstration des Systems in anwendungsrelevanter, gebäudenaher Laborumgebung.

Stichwörter:
Adaptive Gebäudehülle, Regelbare Dämmelemente, Kühlenergiebedarf, Aktivierung von Speichermassen, Flexibilisierung, Regelstrategien, Demonstrator

[1] KAGANER,M.G.:Thermal Insulation in Kryogenic Engineering. Israel Program for Scientific Translations, 1969.

5.06

Optimierung der Wärmeübertrager Flächenverteilung in Sorptions-Wärmepumpen

David Dehler[1*], Stefan Elbel[1], Felix Ziegler[1]

[1] Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wärmübertragung und -wandlung,
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland
david.dehler@tu-berlin.de

Für die Auslegung von Sorptionswärmepumpen müssen mindestens fünf Wärmeübertrager dimensioniert werden. Neben dem Verdampfer und dem Kondensator, in denen das Kältemittel seinen Phasenwechsel durchläuft, muss zusätzlich der Absorber, der Desorber und der Lösungswärmeübertrager im Lösungskreislauf thermisch und hydraulisch ausgelegt werden. Jeder dieser Wärmeübertrager hat einen Einfluss auf den gesamten Wärmepumpenprozess. Das gilt sowohl für die Bereitstellung von Kälte (Absorptionskälteanlagen, Sorptionswärmepumpen Typ 1) als auch für die Bereitstellung von Wärme (Absorptionswärmetransformatoren, Sorptionswärmepumpen Typ 2). Es wird eine neuartige Methodik vorgestellt, mit der alle Wärmeübertragerflächen einer Sorptionswärmepumpe als System für beliebige Konfigurationen optimiert werden können. So werden Grenzkurven zwischen COP und der kleinstmöglichen Gesamtfläche für gegebene Anforderungen an den Wärmepumpenprozess ermittelt. Mit Hilfe dieser Grenzkurven lässt sich die kleinstmögliche Fläche eines jeden Wärmeübertragers für eine geforderte Nutzleistung (Kälte, Wärme) und einem gefordertem COP ermitteln. Es werden die Annahmen und Unsicherheiten der Methodik am Beispiel einer simultanen Kaltwasserbereitstellung auf zwei Temperaturniveaus in einer Biodieselproduktion im Rahmen eines europäischen Demonstrationsprojektes (RE-WITCH) vorgestellt und diskutiert.

Stichwörter:
Wärmepumpen, Wärmeübertrager, Flächenverteilung, Absorptionskälte, Absorptionswärmetransformator

5.07

Einfluss von Wärme- und Stofftransport auf die Adsorberleistung einer Kühlbox

Paula Sauter*, Katharina Laquai, Thomas Meyer, Christian Thoms-Meyer, Jannik Iwersen

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, Sek. KT2,
Marchstraße 18, 10587 Berlin
k.laquai@tu-berlin.de

Der Transport temperatursensibler Güter in elektrischen Lieferfahrzeugen erfordert Alternativen zu konventionellen Kompressionskälteanlagen, da deren Strombedarf die Fahrzeugreichweite reduzieren kann. Adsorptionskältespeicherkonzepte erscheinen vielversprechend, da sie thermisch angetrieben werden, gespeicherte Wärme zur zeitversetzten Kältebereitstellung nutzen und aufgrund ihres robusten, kompressorfreien Aufbaus besonders für mobile Anwendungen geeignet sind.

Die hier untersuchte, vom Bordnetz entkoppelte Adsorptionskühlbox verwendet feste Adsorbentien und Wasser als umweltverträgliches Arbeitspaar und kann mit nachhaltigen Wärmequellen wie Solarthermie oder Abwärme betrieben werden. Die Arbeit fokussiert sich auf Vorabschätzungen sowie die numerische Simulation des Adsorptionskältekreislaufs einschließlich gekoppelter Wärme- und Stofftransportprozesse im Adsorber. Als zentrale Designentscheidung wird die Wahl zwischen Luft- und Wasserkühlung untersucht, die Leistungsdichte und Systemkomplexität maßgeblich beeinflusst. Auf Grundlage der Simulationen werden Leistungskennzahlen wie COP und Kälteleistung unter variierenden Betriebsbedingungen abgeschätzt und Design- und Funktionsentschei

dungen abgeleitet. Eine experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Teststandmessungen ist Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

Stichwörter:
Adsorberdesign, mobile Adsorptionskälteerzeugung, Adsorptionskältespeicher, Wärmemanagement, Simulation

5.08

Experimentelle Analyse der Selbstentladung von thermischen Absorptionsspeichern

Dorian Höffner

Technische Universität Berlin, Institut für Energietechnik, KT2,
Marchstraße 18, 10587 Berlin
dorian.hoeffner@tu-berlin.de

Absorptionswärmespeicher (Absorption Thermal Batteries) auf Basis von Natronlauge ($NaOH/H_2O$) bieten ein hohes Potenzial zur kompakten Speicherung thermischer Energie für Heiz- und Kühlanwendungen. Konventionelle Systemkonzepte erfordern jedoch separate Tanks für die konzentrierte Lösung, die verdünnte Lösung sowie das Kältemittel (Wasser). Da sich die jeweiligen Flüssigkeitsmengen mit dem Lade- bzw. Entladezustand stark ändern, entstehen in den einzelnen Tanks erhebliche Leervolumina, die die effektive volumetrische Energiedichte des Systems etwa halbieren. Ein vielversprechender Lösungsansatz besteht darin, die drei Fluide dichtegetrieben in einem gemeinsamen Tank zu schichten, sodass das verfügbare Speichervolumen unabhängig vom Betriebszustand nahezu vollständig ausgenutzt werden kann. Da sowohl die Langzeitstabilität einer solchen Schichtung als auch die durch diffusiven Stofftransport verursachte Selbstentladung bisher nicht experimentell quantifiziert wurden, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Prototyp entwickelt und charakterisiert. Der Prototyp besteht aus einem Tank aus optischem Glas, in dem das konzentrationsabhängige Brechungsindexprofil mit einer höhenverstellbaren Messeinrichtung – bestehend aus Laser und Zeilenlichtsensor – kontinuierlich abgetastet wird. Durch wiederholtes Abfahren der gesamten Tankhöhe wird ein zeitaufgelöstes Konzentrationsprofil rekonstruiert, aus dem die Selbstentladerate sowie die effektive Diffusivität abgeleitet werden. Die experimentellen Daten dienen anschließend zur Parametrisierung eines 2D-Diffusionsmodells, das eine Übertragung auf anwendungsrelevante Tankgeometrien ermöglicht. Die Ergebnisse ermöglichen eine fundierte Bewertung des Zielkonflikts zwischen volumetrischer Energiedichte und diffusionsbedingter Selbstentladung und liefern damit eine Auslegungsgrundlage für kompakte thermochemische Energiespeicher.

5.09

Experimentelle Ergebnisse einer hybriden Split-Klimaanlage mit Adsorptionseffizienzbooster

Roland Kühn1*, Kai König1

[1] Coolar UG, Wolfener Str. 32-34/Haus C, 12681 Berlin, Deutschland
roland@coolar.de

Die installierte Leistung von Kälteanlagen wächst stetig. Während in den letzten Jahren erste hybride Prozesse zur Effizienzsteigerung von Großkälteanlagen untersucht und teilweise sogar eingesetzt wurden, gibt es hierfür bei kleinen Kälteanlagen bisher wenig Aktivität. Dabei steigt der Energieeinsatz für die Klimatisierung insbesondere auch durch den Privatsektor durch die steigende Installation von Split-Klimaanlagen zur Klimatisierung einzelner Räume.

In dieser Arbeit werden erste experimentelle Ergebnisse einer hybriden Split-Klimaanlage vorgestellt. Bei der Klimaanlage handelt es sich um ein handelsübliches Splitklimagerät mit einer Leistung von 3,5 kW und dem Kältemittel R32, welches durch zusätzliche Wärmeübertrager, zur internen Wärmerückgewinnung durch einen Adsorptionskälteprozess, umgerüstet wurde. Dem Kompressionskreislauf wird Wärme aus dem überhitzten Kältemittel am Austritt aus dem Verdichter entzogen, um damit einen Adsorptionskältekreislauf anzutreiben, welcher wiederum das Kältemittel nach der Kondensation unterkühlt, um die spezifische Kälteleistung zu erhöhen.

Es zeigt sich, dass der Einfluss der zusätzlichen Enthitzung und Unterkühlung auf den Kompressionskältekreislauf sehr komplex ist. So konnte einerseits in den Experimenten nur eine deutlich kleinere Unterkühlung erreicht werden, als dies anhand von Berechnungen zu erwarten war. Auf der anderen Seite konnte trotz der geringeren Unterkühlung eine deutlich größere Effizienzsteigerung erreicht werden, als die thermodynamische Analyse vorhersagte. Es konnte in diesem ersten Schritt eine Steigerung des COP um bis zu 15 % gezeigt werden.

Stichwörter:
Hybride-Kälteerzeugung, Split-Klimaanlagen, Adsorptionskälte, Wasser als Kältemittel, Prozessanalyse

5.10

Optimierter Betrieb von Luft-Wasser-Wärmepumpen im Feld: Potenziale und Grenzen prädiktiver Regelung

Tobias Schrag[1*], David Schmitt[1], Lucas Müller[1]

[1] Institut für neue Energie-Systeme, Technische Hochschule Ingolstadt,
Esplanade 10, 85049 Ingolstadt, Deutschland
Tobias.Schrag@thi.de

Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWP) sind eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors. Nachteilig ist jedoch, dass ihre Effizienz stark von äußeren Randbedingungen wie der Außentemperatur abhängt, die im Falle des Heizbedarfs naturgemäß niedrig ist.

Modellprädiktive Regelung (MPC) bietet einen vielversprechenden Ansatz, da sie zukünftige Entwicklungen, wie Wetterprognosen und Systemzustände, in die Betriebsführung einbezieht. Dadurch kann der Betrieb der LWP gezielt in Zeiträume mit günstigeren Bedingungen (bspw. hohe Außentemperaturen oder niedrige Strompreise) verschoben werden. In Kombination mit der Nutzung der Gebäudemasse als thermischer Speicher ergibt sich ein großes Flexibilitätspotenzial, welches auf niedrigem Temperaturniveau aktiviert werden kann.

In dem Forschungsprojekt *optLWP* wurde der Betrieb zweier Einfamilienhäuser (Neubau und Sanierungsgebäude) über mehrere Heizperioden untersucht. Eine MPC wurde entwickelt und im realen Betrieb getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Leistungszahl der LWP im Neubau zeitweise um bis zu 27 % verbessern lässt, während der Wärmebedarf trotz thermischer Aktivierung der Gebäudemasse nahezu konstant bleibt.

Die Ergebnisse zeigen, ein hohes Potenzial zur Effizienzsteigerung und somit einen relevanten Mehrwert zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor. Der Einsatz bedarf jedoch einer sorgfältigen Entwicklung und Abstimmung zwischen Komfort, Energiebedarf und Systemauslegung.

Stichwörter:
Modellprädiktive Regelung, Bauteilaktivierung, Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizen, Kühlen

5.11

Gute Luft, guter Unterricht?

Lehrkräfte bewerten maschinelle Lüftung in Schulen

Undine Fleischmann

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
undine.fleischmann@ilkdresden.de

In Deutschland sind nur etwa 10 % der Schulgebäude mit raumlufttechnischen Anlagen ausgestattet [1], weshalb die meisten Schulen auf manuelle Fensterlüftung angewiesen sind. Eine unzureichende Außenluftzufuhr beeinträchtigt jedoch nachweislich die Konzentrations- und Lernfähigkeit von Schülern. Bisher konzentriert sich die Forschung überwiegend auf technische Messwerte, während die subjektiven Erfahrungen von Lehrkräften nach der Nachrüstung von Lüftungssystemen kaum systematisch untersucht wurden. Diese Studie schließt diese Forschungslücke, indem sie die Wahrnehmungen von Lehrkräften in Bezug auf Luftqualität, Raumklima und Unterrichtsgeschehen nach der Installation von Lüftungsanlagen erfasst.

Zentrale Forschungsfragen sind:

- Nehmen Lehrkräfte eine Verbesserung der Luftqualität wahr?
- Führen Lüftungsanlagen zu einer subjektiv empfundenen Entlastung, beispielsweise durch eingesparte Zeit für manuelles Lüften?

Die Datenerhebung erfolgt durch eine Kombination aus direkten persönlichen Interviews und einer breiter angelegten, Online-Umfrage, um die Erfahrungen der Lehrkräfte systematisch zu erfassen. Die Analyse der anonymisierten Daten dient der Ableitung von praxisrelevanten Empfehlungen. Die Studie liefert neue Einblicke in die Wahrnehmung und Bewertung von Lüftungsanlagen aus Nutzersicht. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, wie sich moderne Lüftungssysteme konkret auf den Unterrichtsalltag auswirken. Darüber hinaus sollen die Erkenntnisse Entscheidungsträger in der Bildungspolitik für die Bedeutung guter Luftqualität sensibilisieren und so als fundierte Grundlage für zukünftige Sanierungs- und Nachrüstungsmaßnahmen dienen.

[1] Raumlufttechnische Anlagen in Zeiten von COVID-19-Grundlagen zum Betrieb und zur Nutzung, VDMA e.V.,2020

5.12

quickTAIL – Self-Assessment der Innenraumqualität in Klassenräumen

Tobias Burgholz

Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Mathieustraße 18, 52074 Aachen
tobias.burgholz@htx-wissenschaft.de

Steigende Anforderungen an schulische Lernumgebungen – u. a. klimawandelbedingte Temperaturspitzen, erhöhte Anforderungen an die Raumakustik infolge zunehmender Mehrsprachigkeit sowie längere Aufenthaltszeiten durch Ganztagsbetreuung – erhöhen den Bedarf an evidenzbasierten, zugleich praxistauglichen Bewertungsverfahren für die Innenraumqualität.

Vor diesem Hintergrund wird im Projekt quickTAIL eine skalierbare Methodik für ein niedrigschwelliges Self-Assessment von Klassenräumen entwickelt. Das Verfahren knüpft an das dänische TAIL for schools an und kombiniert eine standardisierte Kurzbegehung mit einer anschließenden mehrwöchigen, sensorbasierten Messphase. Erfasst werden zentrale Einflussgrößen auf Lernen und Gesundheit: Thermische Bedingungen, Akustik Innenluftqualität und Licht.

Die seit Februar 2026 laufende Pilotstudie umfasst aktuell 35 Klassenräume in fünf deutschen Städten. Erste Ergebnisse zeigen Handlungsbedarf in mehreren Bereichen: CO_2-Konzentrationen überschreiten wiederholt 3000 ppm, was auf unzureichende Lüftung hinweist. Auffällig ist zudem, dass die CO_2-Werte über Wochenenden aufgrund dichter Gebäudehüllen nicht ausreichend absinken, sodass montags erhöhte Ausgangsniveaus vorliegen. Neben der Luftqualität zeigen sich auch Defizite in weiteren Dimensionen: Nachhallzeiten von bis zu 1,5 s beeinträchtigen die Sprachverständlichkeit, und auch Beleuchtungsstärken von teilweise unter 300 lx entsprechen nicht den Forderungen der Technischen Regeln für Arbeitsstätten.

Die im weiteren Verlauf der Studie erhobenen Daten werden insbesondere die Temperaturentwicklung und daraus resultierende Kühlbedarfe adressieren, auch im Kontext zunehmender sommerlicher Hitzebelastungen. quickTAIL zielt darauf ab, Schulträgern und Nutzenden eine robuste Entscheidungsgrundlage für Priorisierung, Verhaltensanpassungen und bauliche Sanierungsmaßnahmen bereitzustellen und damit die Resilienz schulischer Lernumgebungen nachhaltig zu stärken.

5.13

Untersuchung von Lüftungskonzepten in Schulen

Einfluss auf Raumluftqualität, thermischen Komfort und Gesundheit in Praxis und Simulation

Arno Dentel et al.

Technische Hochschule Nürnberg Simon Georg Ohm, Institut für Energie und Gebäude (ieg),
Keßlerplatz 12, 90489 Nürnberg
arno.dentel@th-nuernberg.de

Gute Luft und ein angenehmes Raumklima in Klassenräumen können die Leistungsfähigkeit, das Wohlbefinden und die Gesundheit von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften fördern. Die Covid-19-Pandemie hat dabei deutlich gemacht, wie wichtig eine gute Belüftung von Innenräumen ist, um ein Ansteckungsrisiko von über die Luft übertragbaren Infektionen zu senken. Dennoch zeigen aktuelle Studien, dass die Luftqualität in vielen Schulen häufig noch unzureichend ist. Wenn keine maschinellen Lüftungsanlagen vorhanden sind, ist regelmäßiges Lüften über die Fenster im Klassenraum unverzichtbar. Das lässt sich im Schulalltag jedoch oft nur schwer konsequent umsetzen – vor allem dann, wenn draußen sehr kalte oder sehr warme Temperaturen herrschen, was den thermischen Komfort im Raum stark beeinträchtigen kann. Maschinelle Lüftungsanlagen bieten gegenüber der Fensterlüftung den großen Vorteil einer kontrollierten Frischluftzufuhr – unabhängig von den Umgebungsbedingungen (wie z. B. Außentemperatur, Wind, Lärm) und vom Nutzerverhalten. In der Anwendung können jedoch Fehler auftreten. Neben Komfort- und gesundheitlichen Aspekten sollte auch darauf geachtet werden, Lüftungskonzepte möglichst energieeffizient umzusetzen.

Hier knüpft das interdisziplinäre Forschungsprojekt an. Der Schwerpunkt liegt auf der Anwendung dezentraler Lüftungstechnik mit Außenluftwechsel, da diese gut für die Nachrüstung von Räumen in Bildungseinrichtungen geeignet ist. Für eine ganzheitliche Betrachtung werden eine zentrale raumlufttechnische Anlage und eine reine Fensterlüftung in Kombination mit CO2-Ampeln in die Untersuchungen eingeschlossen. Es wird der Einfluss auf physikalische Parameter auf der einen Seite und den Menschen auf der anderen Seite analysiert. Dabei werden die Aspekte Raumluftqualität, thermischer Komfort, Gesundheit und Energie betrachtet.

Zur umfassenden Bewertung von Lüftungsstrategien verbindet das Projekt Simulationsstudien und eine empirische Feldstudie. In einer siebenmonatigen, kontrollierten Beobachtungsstudie wurden drei Lüftungskonzepte in der Praxis an drei Grundschulen über die Winterinfektionssaison 2023/24 detailliert untersucht.

Im Rahmen eines umfangreichen Langzeit-Monitorings wurden Parameter zur Luftqualität und des thermischen Raumklimas sowie Fensteröffnungszustände in acht Klassenräumen und Wetterdaten an den drei Schulstandorten erfasst. Während der Studie kamen Fragebögen zu Raumkomfort und Wohlbefinden der Schulkinder sowie zu Erkältungssymptomen zum Einsatz. Ergänzend wurden Speichelproben der Schulkinder auf Infektionsparameter ausgewertet.

In numerischen Strömungssimulationen wurden Lüftungskonzepte für ein dezentrales Lüftungsgerät untersucht. Zusätzlich wurden Jahressimulationen sechs verschiedener Lüftungskonzepte in einer gekoppelten thermisch-energetischen Gebäudesimulation durchgeführt.

Auf Basis der Ergebnisse aus Simulation und Feldstudie wurden praxisnahe Handlungsempfehlungen für gute und effiziente Lüftungskonzepte für Schulen formuliert und potenzielle Fehlerquellen im Umgang mit maschinellen Lüftungsanlagen identifiziert. Fachgerecht geplante und gut betriebene Lüftungstechnik – idealerweise mit Wärmerückgewinnung und bedarfsabhängiger Regelung – kann dazu beitragen, eine hohe Raumluftqualität in Klassenräumen zu gewährleisten, das Infektionsrisiko zu senken, den thermischen Komfort zu erhalten und Energie einzusparen.

5.14

Gebäudeintegrierte CO_2-Direktabscheidung im Umluftbetrieb:

Entkopplung von Raumluftqualität und Lüftungsenergiebedarf in Nichtwohngebäuden

Sascha Nehr et al.

Hochschule Düsseldorf University of Applied Sciences, Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf
sascha.nehr@hs-duesseldorf.de

Die Lüftung von Nichtwohngebäuden sichert die Raumluftqualität, ist zugleich aber ein wesentlicher Treiber des Energiebedarfs: Höhere Luftwechselraten verbessern die – mit CO_2 als Leitparameter bewertete – Luftqualität, erhöhen jedoch proportional Heiz-, Kühl- und Transportlasten. Mit konventioneller Außenluftlüftung lässt sich die CO_2-Konzentration zudem prinzipiell nicht unter das Außenluftniveau (~420 ppm) absenken. Indoor Direct Air Capturing (IDAC) entschärft diesen Zielkonflikt, indem CO_2 adsorptiv aus der Umluft abgeschieden wird. Eine Konzeptstudie zur Kopplung von Lüftungstechnik und IDAC im Umluftbetrieb zeigt, dass durch vermiedene Lüftungswärmeverluste im Winterhalbjahr – je nach Gebäude- und Anlagenkonfiguration – bis zu 2,57 MWh pro Tonne abgeschiedenem CO_2 für den Abscheideprozess bereitstehen; dies liegt in der Größenordnung des Energiebedarfs sorbensbasierter DAC (laut IEA ca. 2–2,64 MWh pro Tonne) und eröffnet damit energetisch vorteilhafte Betriebsfenster.

Den experimentellen Kern dieses Beitrags bildet die Charakterisierung fester Sorbenzien unter innenraumrelevanten Bedingungen: K_2CO_3-imprägnierte Aktivkohle wurde sowohl im Kammerexperiment hinsichtlich Sorptionskapazität als auch im Strömungsreaktor zusätzlich hinsichtlich Aufnahmekinetik sowie Feuchte- und Strömungsabhängigkeit untersucht. Die gemessenen massenspezifischen CO_2-Adsorptionskapazitäten von K_2CO_3-imprägnierter Aktivkohle, Polyethylenimin (PEI) und PEI/SiO2 betragen 6,5 ± 0,3 mg g^{-1}, 52,9 ± 4,9 mg g^{-1} bzw. 56,9 ± 4,2 mg g^{-1}; die Regeneration gelingt unter moderaten Bedingungen (~80 °C/100 mbar). Vor dem Hintergrund eines überwiegend nicht wärmerückgewinnenden Gebäudebestands und der ab 2027 auf den Gebäudesektor ausgeweiteten CO_2-Bepreisung (ETS II) leitet der Beitrag aus diesen Kennwerten Auslegungszielgrößen einer IDAC-gestützten Umluftführung ab – mit Schul- und Bürogebäuden als zentralen Anwendungsfällen.

Schlüsselwörter:
Indoor Direct Air Capturing; Umluftführung; Raumluftqualität; Lüftungsenergiebedarf; feste Sorbenzien; Nichtwohngebäude

5.15

ErP26 – die ersten 100 Tage vs. die nächsten 1000 Tage

Julien Grilliat

ebm-papst St. Georgen GmbH & Co. KG | Hermann-Papst-Straße 1 | 78112 St. Georgen
julien.grilliat@de.ebmpapst.com

Die Ökodesign Verordnung für Ventilatoren 2024/1834 – als ErP26 bekannt- wurde mit dem Text 2025/2481 ergänzt und tritt am 24. Juli 2026 in Anwendung. Am Tag des Vortrags werden also knapp über 100 Tage vergangen sein. Der Vortrag widmet sich der Auswirkungen dieser Verordnung auf die Ventilator- und Kältetechnikindustrie. Selbst wenn diese Auswirkungen aufgrund des sogenannten Übergansjahr sich maßgeblich ab dem 24. Juli 2027 spüren lassen werden, ist eine erste Bilanz von Bedeutung. Mit Blick auf in die Zukunft – auf die nächsten 1000 Tage- werden Einflüsse für die europäische Industrie in Betracht gezogen.

Der Vortrag wird in drei Teilen gegliedert:

- eine kurze Zusammenfassung der festgestellten Auswirkungen für die Industrie wird zunächst wiedergegeben, mit Fokus auf der Einführung der Ventilatordefinition
- die Aufgaben des Ventilatorherstellers werden dann und anhand der neuesten Gesetzinterpretationen bewertet
- die Anforderungen an Ersatzteile werden detailliert betrachtet sowie deren Konsequenzen für die Lieferkette werden im Kontext der geopolitischen Lage Europas erläutert.

5.16

Schätzung der Personenbelegung mit Kalman-Filter

Tim Jourdan

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart
tim.jourdan@igte.uni-stuttgart.de

Für einen bedarfsgeführten Betrieb der Anlagentechnik zur Raumklimatisierung ist die Information über die Anwesenheit von Personen im Raum und genauer die Personenbelegung hilfreich. In der Forschung sind verschiedene Methoden zur Schätzung der Personenbelegung aus CO2-Messwerten etabliert. Modellbasierte Ansätze, die Modellfehler und Messunsicherheiten stochastisch berücksichtigen, zeigen vielversprechende Ergebnisse. Es zeigen sich jedoch vor allem Herausforderungen und Unterschiede im Umgang mit typischerweise ebenfalls unbekannten Einflussgrößen auf die Stoffbilanz durch Luftströme zwischen innen und außen oder zu benachbarten Räumen.

Im vorliegenden Beitrag wird für die Schätzung der Personenbelegung ein Kalman-Filter eingesetzt, der prinzipbedingt Prozess- und Messrauschen in der Schätzung berücksichtigt. Dabei ist ein dynamisches Modell der CO2-Konzentration implementiert. Zusätzlich werden als unbekannt angenommene Terme in der zugrundeliegenden Stoffbilanzen wie Luftströme durch weitere Modelle approximiert. Diese werden hinsichtlich genutzter Eingangsgrößen unter der Prämisse gewählt, dass typische Datenpunkte eines Smart Home-Systems vorliegen, wie beispielweise Informationen zur Fenster- und Türstellungen. Im Zuge einer realen Demonstration werden die Algorithmen in einem Büroraum getestet, der hierfür mit verschiedener Sensorik und einem Smart Home-System ausgestattet ist. Neben gemessenen physikalischen Größen des Raumklimas wird dabei auf Kontaktsensoren an Türen und Fenstern zurückgegriffen. Hinsichtlich der Anpassung des Filters wird ein automatisiertes Verfahren zur Parametrierung des Filters eingesetzt und diskutiert, bei dem abweichende Eigenschaften zur erwarteten Verteilung des Vorhersagefehlers genutzt werden. In der Folge wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Filterparameter auf das Schätzergebnis und die Güte der Schätzung auswirken. Zudem wird das Schätzergebnis der Per

sonenbelegung für den Demonstrationsversuch anhand der erfassten tatsächlichen Personenbelegung validiert. Hierdurch wird herausgestellt, wann sich im gegebenen Beispiel das zusätzlich genutzte Modellwissen für Terme der unbekannten Luftströme positiv auf das Schätzergebnis bzw. auf die Unsicherheit der Schätzung auswirkt.

5.17

Energieverbrauchserfassung von (H)VRF-Systemen

Verursachungsgerechte Kostenverteilung auf mehrere Mietparteien

Grischa Dethlefs

Mitsubishi Electric B.V. Niederlassung Deutschland, Mitsubishi-Electric-Platz 1, 40882 Ratingen, Deutschland
grischa.dethlefs@meg.mee.com

In Wohn- und Nichtwohngebäuden sind (H)VRF-System nicht ausschließlich einem einzigen Anwender zugeordnet. Mehrere getrennte Parteien können sich die Nutzung einer Anlage teilen. Damit eine verursachungsgerechte Kostenverteilung stattfinden kann, bedarf es einer Aufteilung des Energieverbraus auf die separaten Parteien gemäß ihrer Nutzung. Im Vergleich zu wassergeführten Systemen ist eine exakte Messung oder die Verwendung von Messhilfsverfahren über Heizkostenverteiler über individuelle Verbraucher oder eine Gruppe von Verbrauchern in der Klimatechnik nicht bzw. nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Dieser Aufwand lässt sich nicht in der Praxis der Wohn- und Nichtwohngebäude umsetzen. Daher müssen geeignete Möglichkeiten genutzt werden, um eine Kostenverteilung zu realisieren. Vor allem vor dem Hintergrund, dass (H)VRF-Systeme als Heizsysteme genutzt und vom Markt auch als „Luft-Luft-Wärmepumpen“ eingesetzt werden, ist der Heizkostenverteilung eine wachsende Bedeutung zuzuordnen.

Der Vortrag behandelt ein geeignetes Verfahren, um die Energieverbräuche auf verschiedenen Parteien aufzuteilen. Dabei wird der systemische Aufbau der Energieverbrauchserfassung beschrieben und die Aufschlüsselung der Verbräuche auf die separaten Parteien erläutert. Dabei wird auf die Anwendung in Wohn- und Nichtwohngebäuden eingegangen und im speziellen auf die regulatorischen Anforderungen der Heizkostenverordnung.

5.18

Neue Perspektiven für RZ-Kühlung durch Abwärmenutzung mit LiBr/H_2O Absorption

Dmitrij Gorlovsky

Johnson Controls Systems und Service GmbH, Product Manager Absorption Chillers & Heaters,
Gottlieb-Daimler-Straße 8, 68165 Mannheim/Deutschland
Dmitrij.Gorlovsky@jci.com

Die Absorptionstechnologie wird in der EU für Wärme- und Kältenetze gefördert und gewinnt auch zunehmend an Bedeutung für die Kühlung von Rechenzentren. Aufgrund ihres geringen Strombedarfs, der Nutzung von Wasser als Kältemittel sowie ihrer hohen Eignung zur Abwärmenutzung aus der dezentralen Erzeugung elektrischer Energie wie z. B. KWK Anlagen leisten sie einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der Rechenzentrumskapazitäten.

Die Präsentation beleuchtet aktuelle Anwendungsfelder, wirtschaftliche Rahmenbedingungen und Nachhaltigkeit von Absorptionssystemen in der thermischen Energieversorgung und im Rechenzentrumsbereich. Hier lassen sich europäischer Erfahrungen mit dezentraler Stromerzeugung auf die Anwendung von Absorptionstechnik bei Rechenzentren übertragen.

Die Präsentation beinhaltet reale Anwendungsbeispiele aus europäischen Fernkältenetzen sowie eine technologiespezifische Einordnung des aktuellen Entwicklungsstands von Absorptionskältemaschinen für Rechenzentren auf Basis laufender Projekte.

Stichworte

- Analyse relevanter Abwärmequellen in Rechenzentren
- Überblick über Funktionsprinzipien von Absorptionskälte- und -wärmetechnologien
- Bewertung von Integrationskonzepten

5.19

Rückkühlung flüssigkeitsgekühlter Rechenzentren

Einfluss auf Stromverbrauch, Wasserbedarf und Wirtschaftlichkeit

Maximilian Stahlhut[1], Thorsten Urbaneck[1*]

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

Die wachsende Nachfrage nach digitalen Dienstleistungen führt zu einem steigenden Stromverbrauch von Rechenzentren. Gleichzeitig nehmen die Leistungsdichten moderner Server zu, wodurch konventionelle luftbasierte Kühlsysteme zunehmend an ihre Grenzen stoßen. Direktflüssigkeitsgekühlte Systeme ermöglichen eine effiziente Wärmeabfuhr auch bei hohen elektrischen Leistungen je Server. Weiterhin erlauben diese Kühlaustrittstemperaturen bis zu 55 °C (abhängig vom betrachteten System), sodass eine ganzjährig freie Kühlung mit Verdunstungs- und Trockenkühlern in Deutschland grundsätzlich realisierbar ist. Strom- und Wasserverbrauch sowie die Wirtschaftlichkeit des Rechenzentrumsbetriebs werden maßgeblich durch die Rückkühltechnologie beeinflusst. Ziel dieser Untersuchung ist daher ein umfassender Vergleich beider Rückkühltechniken beim Einsatz mit direktflüssigkeitsgekühlten Systemen. Um die Wechselwirkungen unter anderem mit der Kühltemperatur und einer möglichen Abwärmenutzung (Energy Reuse Factor, *ERF*) zu berücksichtigen, wurde ein Simulationsmodell in TRNSYS entwickelt, das die Informationstechnik, die Rechenzentrumskühlung und die Wärmeversorgung inklusive Wärmeabnehmer abbildet. Der Vergleich erfolgt anhand typischer Kennzahlen wie dem partiellen PUE der Kühlung ($pPUE_K$), dem Water Usage Effectiveness (*WUE*) sowie dem Anteil wiederverwendeter Energie (*ERF*). Dies ermöglicht eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Rechenzentrumsgrößen. Die Ergebnisse zeigen, dass der $pPUE_K$ beim Einsatz von Verdunstungskühlern erwartungsgemäß geringer ist als bei Trockenkühlern. Eine ganzjährig freie Kühlung ist mit Verdunstungskühlern bereits ab Kühleintrittstemperatur von etwa 34 °C möglich. Diese niedrigen Kühltemperaturen reduzieren den Gesamtstromverbrauch des Rechenzentrums und wirken sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus, führen jedoch gleichzeitig zu einem erhöhten Wasserverbrauch (Anstieg des *WUE*). Mit zunehmender Abwärmenutzung sinken sowohl der Stromverbrauch für die Kühlung ($pPUE_K$) als auch der Wasserverbrauch (*WUE*) bei beiden Rückkühltechniken. Die daraus resultierenden wirtschaftlichen Einsparungen bleiben jedoch im Verhältnis zum Gesamtstromverbrauch der Informationstechnik vergleichsweise gering. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind insbesondere für die Planung und den Betrieb von Rechenzentren relevant.

Stichwörter:
Rechenzentrum, Rückkühlung, Abwärmenutzung, Flüssigkeitskühlung, Simulation

5.20

From Air to Liquid: Datacenter technology challenges from a fan perspective

Michael Kraus

Ziehl-Abegg SE, Heinz-Ziehl-Str., 74653 Künzelsau
Michael.kraus@ziehl-abegg.de

The rapid increase in compute density driven by AI, HPC and hyperscale data center applications is pushing traditional air-based cooling concepts to their physical and economic limits. While liquid cooling technologies such as direct-to-chip or immersion cooling are gaining momentum, air movement remains a key element of cooling architectures.

This paper analyzes the technological challenges of modern data center cooling from a fan perspective, focusing on the interaction between airflow, heat transfer and system efficiency along the transition from purely air-based to liquid-assisted to liquid solutions. It discusses the limits of air cooling at rising rack power densities, the role of high-performance EC fan systems in rear-door heat exchangers, in-row units and air-to-liquid interfaces, and the implications for control strategies, redundancy and energy efficiency.

Special attention is given to the role of fans as enablers for thermal stability in the Balance of Plant. The contribution aims to provide planners and system designers with a technology-neutral assessment of future cooling architectures and the continuing relevance of air movement in liquid-cooled data centers.

5.21

Wichtige aktuelle HVAC Anforderungen an Plattenwärmetauscher

Jannis Müller-Ebhardt[1*], Julian Peschel[1], Ruben Steinhoff[1], Martin Dierich[1], René Stuke[1]

[1] Funke Wärmeaustauscher Apparatebau GmbH, Zur Dessel 1, 31028 Gronau (Leine), Deutschland
mueller-ebhardt@funke.de

Plattenwärmetauscher bieten ggü. anderen Wärmetauscherbauformen einen großen Vorteil u. a. hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Bauraum, Effizienz und Flexibilität. Nachteilig sind die eingeschränkten Druck- und Temperaturfestigkeiten. Bei gedichteten Plattenwärmetauschern werden die Temperaturgrenzen durch das Dichtungsmaterial bestimmt. Die Druckgrenzen werden vor allem durch eine hohe Fertigungsqualität und Detailgeometrien der Wärmetauscherplatten bestimmt. Die Auswahl von Plattenwärmetauschern ist sehr groß. Trotzdem ergeben sich schon aus den grundlegenden Geometrieeigenschaften große Unterschiede hinsichtlich der Anwendung (Abmaße).

In Bereichen wie der Rechenzentrumskühlung oder Fernwärmeanwendungen werden hohe NTU-Werte gefordert, die bspw. durch den Wellungswinkel, ein optimales Längen-Breitenverhältnis oder geringe Prägetiefen der Wärmetauscherplatte erreicht werden können. So können auch möglichst tiefe bzw. hohe Temperaturen auf der Brauchmedienseite erreicht werden. Im Gegenzug muss ein etwas höherer Druckverlust einkalkuliert werden.

Wichtig ist eine exakte und verlässliche Auslegung für diese Prozesse auch im Teillastbereich zu erhalten, damit die anderen Anlagenkomponenten hierauf abgestimmt werden können. Hierfür werden häufig Zertifizierungen wie die AHRI-400 Zertifizierung (The Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute) von Kunden gefordert. Apparate dieser Zertifizierung werden regelmäßig unabhängig überprüft. Dafür ist die Qualität der Wärmetauscherplatte von entscheidender Bedeutung. U. a. ist eine sehr gleichmäßige Prägetiefe ein entscheidendes Kriterium für das Erreichen der Auslegungsdaten. Weiter ist häufig nicht bekannt, dass eine Druckdifferenz zwischen kalter und warmer Seite bei Wärmetauscherplatten eine Asymmetrie erzeugen kann.

Durch das Berücksichtigen dieser Unterschiede in der Auslegung ist ein sicherer und effizienter Gesamtprozess möglich.

Stichwörter:
Plattenwärmetauscher, HVAC, Knackfrosch

6.01

Technologie-Review Industrie- und Hochtemperaturwärmepumpen

Ergebnisse des IEA HPT Project 68 aus deutscher Perspektive

Andreas Burger*, Benjamin Zühlsdorf[1], Florian Schlosser2

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
andreas.burger@ise.fraunhofer.de
[1]Danish Technological Institute, Energy and Climate, Kongsvang Allé 29, 8000 Aarhus, Dänemark

bez@teknologisk.dk

[2] Universität Paderborn, Energiesystemtechnik, Warburger Str. 100, 33098 Paderborn, Deutschland
florian.schlosser@upb.de

Das IEA-HPT-Projekt 68 unterstützt die Einführung von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTHPs) in der Industrie, indem es verlässliche und strukturierte Daten zu verfügbaren Technologien, installierten Anlagen und Integrationskonzepten bereitstellt. Der Vortrag stellt bisherige Ergebnisse des IEA HPT Project 68 vor.

HTHPs sind eine Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme, da sie Niedertemperatur-Abwärme mit geringem Stromaufwand auf höhere Temperaturniveaus anheben und so fossile Prozesswärme effizient ersetzen können. Die Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme ist entscheidend für das Erreichen der Klimaziele, da Prozesswärme weiterhin einen großen Anteil am Endenergieverbrauch und an den Treibhausgasemissionen der Industrie hat.

Trotz eines hohen technischen Reifegrads und aktuell 40 dokumentierter Demonstrationsfällen aus Task 1 ist die Marktdurchdringung noch gering.

Neben den technischen und marktbezogenen Erkenntnissen wird im Vortrag auch auf die spezifische Rolle Deutschlands im Kontext des internationalen Marktes für Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTHPs) eingegangen.

Im Mittelpunkt steht Task 1, in dem eine aktuelle, international einzigartige Datenbasis zu HTHPs für industrielle Anwendungen erarbeitet wurde.
Task 1 umfasst einen aktualisierten Katalog kommerzieller und marktnaher HTHPs mit Heizleistungen von etwa 30 kW bis 70 MW und maximalen Vorlauftemperaturen von rund 100 bis 300 °C. Querschnittsanalysen bewerten den technologischen Reifegrad (TRL 4–9), Verdichtertechnologien, Arbeitsmedien mit Schwerpunkt auf natürlichen und Low-GWP-Kältemitteln, typische Lebensdauern sowie COP-Bereiche in Abhängigkeit von Temperaturhub und Quell-/Senken-Gleiten. Des Weiteren werden realisierte Demonstrationsprojekte u. a. in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, in der Papier- sowie der Chemieindustrie systematisch ausgewertet. Betrachtete Integrationskonzepte reichen von geschlossenen Kompressionszyklen über offene und semi-offene Dampfkompression bis hin zu Hybridlösungen.

Der Ausblick bis 2030, basierend auf Herstellerpipelines und Demonstrationsprojekten, zeigt eine breite kommerzielle Verfügbarkeit von HTHPs bis etwa 130 °C und eine rasche Reifung von Lösungen bis rund 160 °C, insbesondere durch Dampfkonzepte und neue Anlagenarchitekturen. Gleichzeitig ist ein klarer Trend zu natürlichen bzw. Low-GWP-Arbeitsmedien erkennbar. Vor diesem Hintergrund wird die Rolle Deutschlands als wichtiger Technologie- und Anwendungsmarkt innerhalb des internationalen HTHP-Ökosystems beleuchtet, einschließlich regulatorischer Rahmenbedingungen, industrieller Leitmärkte und laufender Demonstrationsvorhaben.

Die technische Basis aus Task 1 verzahnt sich mit den markt- und stakeholderorientierten Arbeiten aus Task 2, in denen sektorale Anforderungen, Barrieren und Chancen zur Marktdurchdringung von HTHPs u. a. in Chemie, Papier und Textil identifiziert und in Roadmaps überführt werden. Ziel ist es, die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen den notwendigen Stakeholdern zu etablieren und zu fördern, die für sektorspezifische Lösungen notwendig ist.
Gemeinsam liefern beide Tasks eine belastbare Grundlage für die beschleunigte Planung, Auswahl und Umsetzung industrieller HTHP-Lösungen in den kommenden Jahren, deren bisherige Ergebnisse mit diesem Beitrag vorgestellt werden.

Stichwörter:
Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTHP), Industriewärmepumpen, Industrielle Prozesswärme, Dekarbonisierung, IEA HPT Project 68

6.02

Potenziale einer NH_3/H_2O-Hochtemperaturwärmepumpe

Jonas Hesse[1*], Markus Richter[1], Stephan Kabelac[1]

[1] Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823, Deutschland
hesse@ift.uni-hannover.de

Die Transformation der Energiesektoren hin zu klimafreundlichen Alternativen stellt eine der aktuellen Herausforderungen dar. Insbesondere der Wärmesektor hat noch hohe Potenziale zur Transformation. So können Wärmepumpentechnologien als ein Teil der Lösung Wärme für industrielle Prozesse bis 200 °C sicherstellen. Der Einsatz von Kompressionswärmepumpen mit Lösungskreislauf und dem umweltfreundlichen Arbeitsstoffpaar Ammoniak und Wasser ist besonders für Hochgleit-Prozesse ($\Delta T > 15\ \mathrm{K}$) interessant. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung des klassischen Kompressionskreislaufs, bestehend aus Verdampfer, Verdichter, Kondensator und Expansionsventil, um einen dem Verdichter parallelgeschalteten Flüssigkeits-Abschnitt mit einer Pumpe und einem internen Wärmeübertrager. Diese Erweiterung ist notwendig, da das NH_3-H_2O-Gemisch im Verdampfer nur teilweise verdampft und die verbleibende flüssige Phase nach der Abscheidung zum Kondensator geführt werden muss. Hierdurch entstehen zusätzliche Freiheitsgrade. In diesem Beitrag werden potenzielle Anwendungsfelder anhand von experimentellen Daten einer Technikumsanlage mit einer thermischen Leistung von etwa 50 kW bei Senkentemperaturen oberhalb von 100 °C vorgestellt und bewertet. Zur Bewertung werden der Lorenz-Wirkungsgrad und der daraus resultierende Gütegrad herangezogen.

Stichwörter:
Hochtemperaturwärmepumpe, Ammoniak-Wasser

6.03

HTHP implementation in the paper industry

Full-scale implementation of a High-Temperature Heat-Pump and waste heat valorisation in the paper industry

Reuven Paitazoglou[1*], Anja Hanßke[1], Dr. Tim Hamacher[2], Sebastian Helmling[3], Carsten Schmidt[4]

[1] Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Gulbener Straße 23, D-03046 Cottbus
reuven.paitazoglou@ieg.fraunhofer.de
anja.hansske@ieg.fraunhofer.de

[2] SPH Sustainable Process Heat GmbH, Zur Kaule 1, D-51491 Overath
tim.hamacher@copeland.com

[3] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, D-79110 Freiburg
sebastian.helmling@ise.fraunhofer.de

[4] Felix Schoeller GmbH & Co. KG, Burg Gretesch 49086 Osnabrück
cschmidt@felix-schoeller.com

The efficient use of energy and upgrade of waste heat from industrial processes is a key factor for the decarbonization of the industry. Therefore, a focus is placed on upgrading and re-integrating waste heat directly into industrial processes. Given this, in Germany and on a European level it is of vital importance to reduce any technical, economical and regulatory barriers that hinder the implementation of heat upgrade technologies. The project PUSH2HEAT funded by the European Union aims at demonstrating at full-scale next-gen heat upgrade technologies in various industrial contexts.

The following paper focusses on the integration of a High-Temperature Heat Pump into the paper production process of Felix Schoeller GmbH & Co. KG in Weißenborn (Saxony, Germany). Important steps during planning such as design of the heat pump technology and selection of an appropriate refrigerant are addressed. Moreover, an emphasis is placed on the technology's integration into the industrial environment along its control and monitoring system. Last but not least, this paper reports on gained experiences from the commissioning, presents first performance results from the High-Temperature Heat Pump's operation and provides an outlook on the optimization potential of the implemented Heat Upgrade System.

The goal of this paper is to highlight technical challenges in relation with the integration of full-scale High-Temperature Heat Pumps in industrial processes as well as to present a best-case example for its successful implementation processes.

Keywords:
High-Temperature Heat Pump, steam generation, waste heat utilization, industrial decarbonization, energy efficiency increase, monitoring

6.04

Experimental Analysis of a High-Temperature Heat Pump Test Stand

Andreas J. Höß*[1], Dr.-Ing. Eckhard A. Groll[2], Dr. Davide Ziviani[3]

Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University,
177 S Russell St, West Lafayette, IN 47907-2099, USA
[1] ahoess@purdue.edu
[2] groll@purdue.edu
[3] dziviani@purdue.edu

About 40 % of the global primary energy consumption is attributed to the industrial sector. Heat-intensive industrial processes and applications are related to 75% of that usage, particularly at temperatures below 400 °C. Increasing resource costs in industry require efficient use of available waste heat from production. High-temperature heat pumps (HTHPs) serve as a thermally efficient, technical solution in this context, as they do not require the direct use of fossil fuels. While the technology is widely established for industrial applications at temperatures below 160 °C, higher operating temperatures still require further development of system architectures and components.

The subject of this work is the experimental analysis of a test stand for a novel HTHP with a heat sink temperature of up to 200 °C. An external steam heating cycle serves as the heat source of the cycle, enabling temperature lifts of 30 to 100 K. The heating capacity at the design point is rated 40 kW with a compressor performance of 14.6 kW. The test stand is designed for the operation with the refrigerants R-1336mzz(Z) and cyclopentane. Due to the planned use of A3 refrigerants, additional safety measures have been implemented.

The distinctive feature of the novel test stand is that it can be operated with conventional compressor designs with and without intermediate cooling (economization)and also allows the performance testing of a novel screw compressor design with internal rotor cooling.

The focus of the characterization is on determining the performance envelope of the HTHP system based on key performance indicators such as COP, thermal efficiency, temperature lift and the capability of steady state operation. Furthermore, compressor-specific parameters such as the electrical power draw, system pressures, temperatures and mass flow rates of the refrigerant and the lubricant. These recorded measurements will directly support the improvement of the compressor design.

Key Words:
High-Temperature Heat Pump, Screw Compressor, Waste Heat Recovery, System Integration

6.05

SteamPump – Dampferzeuger mit Wärmepumpenmodul

René Paatzsch[1*], Richard Cluse[2], Waldemar Klempnauer[2]

[1]Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH
Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden, Deutschland
rene.paatzsch@ilkdresden.de

[2]SCHNEIDER Energy Systems GmbH
Hildburghauser Straße 79, 12249 Berlin, Deutschland
r.cluse@schneider-kessel.net

Im Rahmen eines durch das "Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)" geförderten Projektes wurde ein Dampferzeuger „SteamPump“ zur Erzeugung von Dampf und Prozesswärme entwickelt. Hauptkomponenten der „SteamPump“ sind ein Hochttemperatur-Wärmepumpenmodul mit einem Plattenwärmeübertrager als Niederdruckdampferzeuger, ein Dampfstrahl-Dampfverdichter und ein Hochdruckdampferzeuger.

Die SteamPump ist ideal für den Einsatz geeignet, wo gleichzeitiger Dampf- und Prozesswärmebedarf besteht, der Dampfbedarf jedoch deutlich höher ist als durch vorhandene (Ab)Wärmequellen über eine Hochtemperaturwärmepumpe erzeugt werden kann. Mit Hilfe der SteamPump können niedrig temperierte Wärmequellen bis 60°C nutzbar gemacht werden, um Dampf bis 6 bar (> 160°C) und Heiz- bzw. Prozesswarmwasser bis 95°C gleichzeitig zu erzeugen. Dabei erzeugt das Wärmepumpenmodul der SteamPump mehr als 30 % der erforderlichen Gesamtdampfmenge bei einem Druck von etwa 2,3 bar(a) und arbeitet somit mit deutlich besseren Leistungszahlen als dies für die Dampferzeugung bei 6 bar möglich wäre. Der Dampfstrahl-Dampfverdichter, welcher durch einen Dampftreibstrahl angetrieben wird, hebt den Niederdruckdampf auf das erforderliche Dampfdruckniveau. Der Dampftreibstrahl wird durch den Hochdruckdampferzeuger generiert. Durchgeführte Messungen an einem Prüfstandsprototypen bestätigten die Funktionalität und Effizienz. Es wurden Leistungszahlen größer 3,0 für das Wärmepumpenmodul erreicht. Somit kann die SteamPump einen erheblichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele und der Energiewende leisten, da sie Dampf mit einem für Wärmepumpen noch effizienten Temperaturhub erzeugt. Das Ziel einer Energieeinsparung von mindestens 25 % gegenüber einer rein elektrischen Dampferzeugung konnte am Prüfstand erreicht werden.

Stichwörter:
Dampferzeugung, Hochtemperaturwärmepumpe, Dampfstrahl-Dampfverdichter, Plattenwärmeübertrager, Kältemittelverdichter

6.06

Hochtemperaturwärmepumpen mit Butan in der Industrie

Tim Hamacher

SPH Sustainable Process Heat GmbH, Zur Kaule 1, 51491 Overath
tim.hamacher@copeland.com

Nachdem in den letzten Jahren mehrere ThermBooster-Hochtemperatur-Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln mit niedrigem GWP im Temperaturbereich zwischen 120 °C und 160 °C erfolgreich in der Industrie installiert wurden, sind nun auch die ersten Projekte mit dem natürlichen Kältemittel Butan (R600) fertiggestellt worden und im industriellen Betrieb. ThermBooster ist eine Kompressionswärmepumpe mit einem speziell entwickelten Kolbenkompressor.

Im ersten Projekt in der pharmazeutischen Industrie wird Dampf mit einem Druck von 1–2 bar über dem atmosphärischen Druck aus einer Wärmequelle von ca. 70 °C/60 °C erzeugt, anschließend über einen Dampfkompressor auf 11 bar verdichtet und in das Hauptdampfnetz eingespeist. Es kommt ein System mit zwei parallelen Kompressoren und direkter Dampferzeugung im Kondensator, einschließlich Speisewasser-Vorwärmung, zum Einsatz. Die Ergebnisse der Laborversuche sowie Erfahrungen und Daten aus den ersten Betriebsmonaten werden vorgestellt. Je nach Betriebsbedingungen wurden in den Laborversuchen COP-Werte > 4 an der Wärmepumpe gemessen. Erste Betriebserfahrungen zeigen eine sehr gute und schnelle Regelbarkeit bei schwankendem Dampfverbrauch sowie einen sehr guten Wirkungsgrad im Teillastbereich.

Das zweite Projekt stammt aus der Kunststoffindustrie und zeigt eine Anlage, die Thermoöl unter Verwendung einer Wärmequelle von 60 °C/45 °C auf 110 °C erwärmt. Es werden hier die Ergebnisse umfangreicher Labortests und Daten aus dem Feld gezeigt, die sich leicht auf andere Anwendungen übertragen lassen. Zu diesem Zweck wurde eine Kartierung über einen weiten Bereich von Druckbedingungen durchgeführt, um den Wirkungsgrad des Systems und des Kompressors mit Butan zu ermitteln.

6.07

Analyse von Industrieprozessen für HT-WP-Anwendungen

Erstellung einer Datenbank produktbasierter Prozesse im Temperaturbereich zwischen 70 °C und 200 °C

Arne Dittrich[1*], Sven-Yannik Schuba[1], Maximilian Loth[1]

[1] Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Forschungsgruppe Wärmepumpen
Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Deutschland
dittrich@isfh.de

Der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie ist für die Dekarbonisierung des Industriesektors von zentraler Bedeutung. Je nach Produkt und Prozess hängt die effiziente Erzeugung industrieller Prozesswärme mit Wärmepumpen vom gewählten Kreisprozess und der gewählten Kältemittel ab. Für die Auslegung sind detaillierte Informationen über die Anforderungen des industriellen Prozesses unerlässlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine umfassende Recherche zu produktbasierten industriellen Prozessen im Temperaturbereich zwischen 70 °C und 200 °C durchgeführt und ein Datensatz mit 390 Prozessen erstellt. Diese beinhaltet zentrale Parameter wie Prozess- und Abwärmetemperaturen, die Unterscheidung zwischen Prozess- und Energietransfermedien, Art der Wärme (sensibel/latent), prozessspezifische Energiemengen und Produktionsmengen in der Europäischen Union (EU). Anhand dieser Daten lassen sich thermische Potentiale für Hochtemperatur-Wärmepumpen nach Industriesektor, Prozess oder Produkt ableiten. Zudem können mögliche Abwärmequellen für Hochtemperatur-Wärmepumpen identifiziert werden.

Unser Vortrag gibt sowohl einen Einblick in die Methodik der Datenerhebung als auch in die Analyse des Datensatzes hinsichtlich prozessspezifischer Kenngrößen wie Temperaturdifferenzen, Verhältnis von latenter zu sensibler Wärme, sowie Art und Häufigkeit bestimmter Prozess- und Energietransfermedien. Als zentrales Ergebnis präsentieren wir einen Überblick über das Potential branchenspezifischer Prozesswärme und Abwärme für Hochtemperatur-Wärmepumpen in den EU-Mitgliedsländern.

Stichwörter:
Hochtemperatur-Wärmepumpe, Prozesswärme, Prozessdatenanalyse, Industrie, Datenbank

6.08

Schraubenverdichter für NH3-Wärmepumpen bis +95 °C

Winfried Renwanz*, Ole Fredrich

GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Straße 165, 13509 Berlin
Winfried.Renwanz@gea.com

In zahlreichen industriellen Prozessen als auch in der Umwelt stehen Wärmen zur Verfügung, die wegen ihres Temperaturniveaus nicht direkt nutzbar sind. Mit industriellen Wärmepumpen werden diese Wärmen auf ein für den Prozess nützliches Temperaturniveau angehoben, was ganz erheblich zur Energie- und Emissionseinsparung beitragen kann.

Basierend auf der seit mehr als 50 Jahren bewährten GEA Grasso Schraubenverdichtertechnologie, wurden die neuen Verdichter der L XHP Baureihe für Hochdruckanwendungen entwickelt. Wärmepumpen mit dem L XHP als Herzstück machen mit dem natürlichen Kältemittel Ammoniak bei hohem Temperaturniveau Heizleistungen im Bereich von 3 bis 8 MW erreichbar, die große Dekarbonisierungsprojekte ermöglichen. Die hervorragende

Effizienz und Leistungsdichte machen sie zur geeigneten Lösung für das Ziel, ein saubereres und effizientes Fernwärmenetz zu schaffen.

Die wesentlichen Merkmale der Verdichter werden vorgestellt und dabei auf die Vorteile gegenüber anderen Verdichtertechnologien eingegangen. Um sicherzustellen, dass der L XHP die von einer nachhaltigen Lösung erwartete Effizienz und Zuverlässigkeit bietet, wurde neue Rotoren entwickelt, in Kombination mit einer äußerst robusten Konstruktion.

Eines der realisierten Projekte für das Fernwärmesystem von Tallin wird vorgestellt. Durch die Wiederverwendung von Abwärme aus Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage wird in Spitzenlastzeiten die CO_2-Emissionen gesenkt und rund 8.000 Haushalte und Unternehmen mit stabiler Wärme versorgt.

Stichworte:
Industriewärmepumpe, Ammoniak, natürliche Kältemittel, Schraubenverdichter, Praxisbeispiel

6.09

Simulationsergebnisse und erste Umsetzungserfahrungen für eine neuartige Wärmepumpen-Versuchsanlage

Haochen Wang[1*], Stefan Hoppe[1], Felix Oestreich[1], Thorsten Urbaneck[1]

[1] Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Mechanik und Thermodynamik, Professur Technische Thermodynamik, 09107 Chemnitz, Deutschland
haochen.wang@mb.tu-chemnitz.de
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

Für die industrielle Bereitstellung von Prozesswärme wird derzeit ein erheblicher Anteil nicht-erneuerbarer Primärenergie eingesetzt. Zur Reduktion dieses Energieeinsatzes sowie zur Steigerung der Effizienz und Umweltfreundlichkeit der Wärmebereitstellung befassen sich die Autoren im Rahmen des Projekts KETEC (Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik, Teilprojekt 10) [1] mit der Entwicklung eines neuartigen Hochtemperatur-Wärmepumpen-Speicher-Systems [2], [3]. Dieses System wird zurzeit als Versuchsanlage aufgebaut. Mit dieser Versuchsanlage wollen die Autoren die anlagentechnische Umsetzbarkeit und die Funktion demonstrieren. Um diese Ziele zu erreichen, sind jedoch viele Arbeitsschritte und Vorbereitungen erforderlich. Deswegen präsentiert vorliegende Beitrag die Ergebnisse einer transienten Simulation der Versuchsanlage mit besonderem Fokus auf das Anfahrverhalten der Anlage sowie den Betrieb des Hochtemperatur-Speichers. Dabei wird insbesondere untersucht, wie man die Versuchsanlage aus einem kalten Zustand in einen stabilen Betriebszustand überführt kann. Dies umfasst unter anderem die Befüllung mit dem Arbeitsmedium, die thermische Vorwärmung zentraler Komponenten sowie den Kaltstart des Verdichters. Darüber hinaus wird analysiert, wie sich der Hochtemperatur-Speicher während der Be- und Entladung verhält. Die Simulation der Versuchsanlage erfolgt mithilfe der Software EBSILON®Professional [4].

Darüber hinaus werden praktische Erfahrungen aus dem Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage dargestellt. Hierzu zählen aufgetretene technische Herausforderungen sowie entsprechende Lösungsansätze, die zur Stabilisierung und Optimierung des Anlagenbetriebs beitragen.

Stichwörter:
Wärmepumpe, Speicher, Dampf, Simulation, Erfahrung, Demonstration, Anlage

[1] Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: www.ketec.online. Internetseite zum Verbundvorhaben 03.02.2024.
[2] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 10 2023 117 382.0, Patentanmeldung vom 30.06.2022
[3] Urbaneck, T.; Nefodov, D.; Wang, H.: Anlage und Verfahren zur Energie- und/oder Stoffversorgung mindestens eines Verbrauchers. DE 20 2023 103 656, Gebrauchsmusteranmeldung vom 30.06.2022, Eintragung am 22.08.2023
[4] STEAG Energy Services GmbH, 2024. EBSILON Professional 16.04.

6.10

A, B oder C? — Einführung von Kategorien für die Beladung mit Drall in schlanken Speichern

Felix Oestreich*, Thorsten Urbaneck

Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik,
Reichenhainer Straße 70 , 09126, Chemnitz, Deutschland
felix.oestreich@mb.tu-chemnitz.de
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

Im Teilprojekt 10 des Verbundvorhabens Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik – *KETEC* [1],[2] wurden innovative Beladesysteme für Hochtemperatur-Speicher (schlanke Bauweise, Druckbehälter, Fertigung im Werk, 100…200 °C [3]) mit numerischer Strömungssimulation (*Ansys CFX* [4]) untersucht. Diese schlanken Speicher bieten z. B. in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmepumpen großes Potenzial für die Erreichung der Ziele der Wärmewende [5]. Dafür sind effizientere Speicher erforderlich. Ein Ansatz zur Steigerung der Speichereffizienz ist die Reduktion der internen Verluste durch die Minimierung der Mischeffekte bei der Beladung und die Verbesserung der thermischen Schichtung. Dies gelingt mit der sog. *Beladung mit Drall* [6] auf Grundlage eines Europäischen Patents von *Platzer* et al. [7]. Dieser Beitrag zeigt das technische Potenzial der Beladung mit Drall ggü. dem Stand der Technik bzw. dem herkömmlichen radialen Diffusor ohne Einbauten. Aus einer umfangreichen Parameterstudie (Geometrie, Betrieb) werden Auslegungsempfehlungen abgeleitet. Es folgt die Einführung einer *neuen Kategorisierung* für die Beladung mit Drall. Insgesamt stellen die Ergebnisse ein Planungshilfsmittel bzgl. der Auslegung des radialen Diffusors mit Leitelementen für Planer, Betreiber und Entscheider bereit und ermöglichen den schnelleren Transfer der Beladung mit Drall in die Praxis.

Stichwörter
Speicher, Diffusor, Leitelemente, Drall, Auslegung, CFD

[1] Urbaneck, T.; Matthes, M.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Franzke, U.; Noack, R.; Honke, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.; de Oliveira, H. T.; Morgenstern, A.; Nienborg, B.; Gschwander, S.; Engelmann, P.; Benndorf, G.: www.ketec.online. Internetseite zum Verbundvorhaben 03.02.2024.
[2] Urbaneck, T.; Richter, M.; Hempel, O.; Safarik, M.; Müller, M.; Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.: KETEC Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik - Entwicklung, Ziele und fachliche Ausrichtung. ki - Kälte-, Luft- und Klimatechnik Hüthig 59. Jg. (2023) Heft 1-2 S. 38-41. – ISSN 1865-5432
[3] Urbaneck, T.: Warm- und Heißwasserspeicher: Stand der Technik und Entwicklungen. KI Kälte- Luft- Klimatechnik 56 Jg. (2020) Heft 06/07, S. 50–54. – ISSN1865-5432
[4] Ansys Inc.: Ansys CFX 2019 R2. Canonsburg (USA), 2019.
[5] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Dialog Klimaneutrale Wärme 2045, URL: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/dialog-klimaneutrale-waerme-ergebnispapier-publikation.pdf?blob=publicationFile&v=8, 2021. abgerufen 17.04.2026.
[6] Oestreich, F.; Urbaneck, T.: Drallbehaftete Beladung von schlanken Heißwasserspeichern– Detaillierte Simulation der Strömung im Diffusor und Speicher. DKV-Tagung 2023, Hannover, 22.11. bis 24.11.2023, Deutscher Kälte- und KlimatechnischerVerein.
[7] Platzer, B.; Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Winkler, T.: Verfahren und Vorrichtung zum Be- und/oder Entladen eines thermischen Energiespeichers. Europäisches Patent EP3704432, erteilt am 07.06.2023

6.11

Vom Flüssigeis zur Fernwärme – Erste Betriebserfahrungen im Zittauer Flusthermie-Projekt

Projekt AQVA HEAT III

Mathias Safarik[1], Marcus Honke[1], Thomas Gubsch[2], Johann Meyer-Scheffel[2], Clemens Schneider[2], Felix Panitz[2]

[1] Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige GmbH
[2] Hochschule Zittau/Görlitz
[3] Fraunhofer IEG
mathias.safarik@ilkdresden.de

Geringe Wassertemperaturen sind eine Herausforderung in Systemen zur Nutzung von Gewässern als Wärmequelle. Im AQVA HEAT-Konzept erfolgt der Wärmeentzug bei niedrigen Wassertemperaturen durch teilweises Gefrieren des Wassers zu einem pumpfähigen Wasser-Eis-Gemisch. Somit kann der Fluss ganzjährig als zuverlässige Wärmequelle genutzt werden.

Im Projekt AQVA HEAT I wurden im Rahmen einer Kurzzeiterprobung die Funktionalität und Machbarkeit des Konzeptes nachgewiesen sowie die wasserrechtliche Genehmigung durchlaufen [u.a. STEFFAN 2023].

Als Beitrag zur Umstellung der Wärmeerzeugung für das Zittauer Fernwärmenetz auf erneuerbare Quellen wurde nun eine komplette Wärmepumpenkaskade aufgebaut. Sie besteht aus einem R718 Direktverdampfer (Flüssigeiserzeuger) mit 350 kW Entzugsleistung sowie einer zweistufigen R717-Wärmepumpe, die max. 500 kW mit einer Vorlauftemperatur von 92 °C in das Fernwärmenetz einspeist.

Im Beitrag werden der Aufbau der Anlage, erste Erfahrungen aus dem Betrieb sowie Ergebnisse des gewässerökologischen Monitorings vorgestellt.

STEFFAN 2023 - Steffan, C.; Safarik, M.; Gubsch, T.; Leßmann, D.: Flusswasser-Wärmepumpe mit latentem Wärmeentzug durch Vakuum-Flüssigeis-Technologie. Deutsche Kälte-Klima-Tagung am 24.11.2023 in Hannover

6.12

Transkritische Wärmepumpen zur Flexibilisierung von Niedertemperatur-Wärmenetzen

Leonhard Göhler*, Stefan Lechner

Technische Hochschule Mittelhessen,
Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und Systemanalyse
Wiesenstraße 14, 35390 Gießen
leonhard.goehler@me.thm.de

Wärmenetze auf Umgebungstemperaturniveau gewinnen im Zuge der Dekarbonisierung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung zunehmend an Bedeutung. Aufgrund der saisonalen Temperaturschwankungen unterschiedlicher Niedertemperatur-Wärmequellen und ihrer begrenzten Verfügbarkeit ergeben sich umfangreichere Anforderungen an die Temperaturhaltung im Netz und den Betrieb dezentraler Übergabestationen. In Zeiten hoher Wärmenachfrage treten niedrige Netztemperaturen auf, die die Systemeffizienz des Wärmenetzverbundes reduzieren. Zur Aufrechterhaltung eines ausreichenden Netztemperaturniveaus können zusätzliche Wärmeerzeuger und Niedertemperatur-Wärmequellen eingesetzt werden. Dies führt zu steigender Systemkomplexität sowie höheren Investitions- und Betriebskosten und erschwert einen technisch-ökonomisch konkurrenzfähigen Betrieb gegenüber Alternativen. Eine Flexibilisierung der Wärmelast ermöglicht insbesondere in Starklastphasen

einen versorgungssicheren Netzbetrieb. Der Beitrag untersucht daher die lastabhängige thermische Entkopplung einzelner Verbraucher aus dem Wärmenetzverbund durch den Einsatz transkritischer CO_2-Wärmepumpen. Durch das Umschalten vom Wärmenetz auf Umgebungsluft als Wärmequelle wird die thermische Belastung des Netzes gezielt reduziert. Zusätzlich kann Wärme auf einem für den Verbraucher nicht nutzbaren Temperaturniveau über einen zusätzlichen Wärmeübertrager und die bestehende Hausanschlussleitung in das Wärmenetz eingespeist werden. Darüber hinaus steigt im Umgebungsluftbetrieb die Systemeffizienz der transkritischen Wärmepumpen. Die Einbindung des transkritischen Wärmepumpenprozesses ermöglicht eine standortunabhängigere Etablierung von Wärmenetzen auf Umgebungstemperaturniveau.

6.13

Gekoppelte Wärmepumpensysteme für die Transformation von Wärmenetzen

Modellierung von Wärmepumpensystemen für die Einspeisung in Wärmenetze

Felix Niedermeier, Madjid Madjidi, Christian Schweigler

CENERGIE – Forschungsinstitut für energieeffiziente Gebäude und Quartiere
Hochschule München, Lothstrasse 34, 80335 München, Deutschland
felix.niedermeier@hm.edu

Im Rahmen des Verbundvorhabens TrafoWaermeNetz wird ein integrales Planungswerkzeug für die Transformation kleinerer und mittlerer Bestandswärmenetze entwickelt. Dieses umfasst einen ganzheitlichen Workflow, beginnend bei der Gebäudesimulation zur Ermittlung des Wärmebedarfs, über die thermohydraulische Berechnung des Netzes bis zur Modellierung und Simulation der Wärmebereitstellung.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Teilaspekt der Modellierung der Wärmeerzeugung. Hierfür wird ein in einem vorangegangen Forschungsvorhaben entwickelter kennzahlenbasierter Modellansatz verwendet. Die Charakteristik der Erzeuger und deren hydraulische Kopplung wird in ein gleichungsbasiertes System-Modell überführt.

Die durch das Planungswerkzeug ermöglichte transiente Simulation gekoppelter Wärmepumpensysteme wird anhand von drei Pilotanlagen, die von den Industriepartnern des Verbundvorhabens betrieben werden, untersucht. Die Ergebnisse stellen den optimierten Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen in Wärmenetzen dar. Orientiert an der jeweiligen Betriebssituation, bestimmt durch Netz-Temperaturniveau, bivalenten Betrieb mit unterschiedlichen Bestandserzeugern und äußere Randbedingungen, bestehen dabei unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich der Integration der eingesetzten Wärmepumpen. Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen auf, wie Hochtemperaturwärmepumpen effizient für die Transformation von Wärmenetzen eingesetzt werden können.

Stichwörter:
Wärmepumpe, Wärmenetze, Integration, hydraulische Verschaltung, mehrstufig

6.14

Absorptionstechnologien in der Tiefengeothermie

Potentialbewertung anhand experimenteller Ergebnisse der Anlage GeoReACh

Ludwig Irrgang[1*], Konrad Ostermann[1], Hartmut Spliethoff[1], Christopher Schifflechner[1]

[1] Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme,
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, Deutschland
Ludwig.irrgang@tum.de

Tiefengeothermie bietet großes Potential für eine erneuerbare Wärmebereitstellung. Im Gegensatz zu anderen Erneuerbaren ist sie grundlastfähig und weist eine sehr hohe Verfügbarkeit auf. Dabei trifft die konstante Wärmebreitstellung auf schwankende Wärmenachfrage, was Überschusswärme im Sommer und die Nutzung zusätzlicher Wärmequellen im Winter zur Folge hat. Dieser Problematik kann mithilfe von Absorptionstechnologien begegnet werden. Absorptionskältemaschinen ermöglichen die Nutzung überschüssiger Geothermiewärme zur Bereitstellung von Kälte im Sommer. Absorptionswärmepumpen und -transformatoren erhöhen die Wärmebereitstellung aus der Geothermie im Winter. Eine Anlage, die diese Nutzungsmöglichkeiten verbindet, kann ganzjährig genutzt werden und bietet eine flexible Infrastruktur für ein sich wandelndes Energiesystem. Die Versuchsanlage „GeoReACh“ demonstriert einen entsprechenden Betrieb unter den Rahmenbedingungen der Geothermie. Nach der Inbetriebnahme der Anlage im Kältemaschinen- und -Wärmepumpenmodus werden in dieser Arbeit die ersten Versuchsergebnisse sowie eine Anlagencharakterisierung vorgestellt. Verschiedene Betriebsstrategien werden anhand der Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Geothermieressource diskutiert. Die in der Anlage vorgenommenen konstruktiven Anpassungen werden bewertet. Da die notwendige Antriebstemperatur für den Kältemaschinenbetrieb in der Geothermie besondere Bedeutung hat, werden die vorhandenen Geothermiepotenziale im Süddeutschen Molassebecken anhand der Versuchsergebnisse kritisch bewertet und ein Ausblick auf mögliche Ausbauszenarien gegeben.

Stichwörter:
Absorptionskältemaschine, Absorptionswärmepumpe, Geothermie, Sektorenkopplung

6.15

Demonstrator einer Gebäudewärmepumpe unter Nutzung automobiler Komponenten

Messergebnisse eines kompakten Plug & Play-Wärmepumpenmoduls

Jonas Hielscher[*], Fynn Linnenbrügger, Wilhelm Tegethoff, Nicholas Lemke, Thomas M. Koller

Technische Universität (TU) Braunschweig, Institut für Thermodynamik (IfT),
Hans-Sommer-Str. 5, 38106 Braunschweig, Deutschland
j.hielscher@tu-braunschweig.de

Die Dekarbonisierung des Gebäudesektors – insbesondere die Substitution fossiler Wärmeversorgungssysteme in bestehenden Mehrfamiliengebäuden – stellt eine zentrale Herausforderung der Energiewende dar. In diesem Kontext kommt der Wärmepumpentechnologie eine Schlüsselrolle zu, da diese einen skalierbaren Beitrag zur Reduktion gebäudebezogener Treibhausgasemissionen leisten kann. Vor diesem Hintergrund verfolgt die Forschungsplattform „Wärme“ im Rahmen des Verbundforschungsprojekts „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn) u.a. die Erforschung von Konzepten zu kompakten, modularen Plug & Play-Wärmepumpensystemen unter Einsatz von Komponenten des automobilen Thermomanagements.

Im vorliegenden Beitrag wird ein neuartiges Konzept eines kompakten Plug & Play-Wärmepumpenmoduls mithilfe eines geeigneten Prüfstandaufbaus demonstriert. Dabei werden Serienkomponenten des automobilen

Thermomanagements verwendet, da diese aufgrund ihrer Kompaktheit Vorteile gegenüber stationären Komponenten hinsichtlich des Bauraums und der Reduktion von Kältemittelfüllmenge mit sich bringen sowie einen großen dynamischen Einsatzbereich aufweisen. In einem ersten Schritt wird der Prüfstand mit einer Füllmenge des natürlichen Kältemittels Propan (R290) von unter 150 Gramm betrieben, um in Übereinstimmung mit derzeit geltenden DIN-Richtlinie eine Innenaufstellung der Wärmepumpe ohne sicherheitstechnische Restriktionen zu ermöglichen. Auf Basis eines ersten Demonstrators, der automobile Komponenten nutzt, werden experimentelle Untersuchungen zur Identifikation einer optimalen bzw. ausreichenden Kältemittelfüllmenge gezeigt und diskutiert. Dabei wird insbesondere der Einfluss der Kältemittelfüllmenge auf die Leistungszahl des Wärmepumpenmoduls anhand repräsentativer Betriebspunkte aus der Gebäudebeheizung thematisiert.

Stichwörter:
Automobile Komponenten, Kältemittelfüllmenge, Plug & Play, Propan, Prüfstand, Systemeffizienz, Wärmepumpe, Wohngebäude

6.16

Einstufige Kleinstwärmepumpe für die Warmwasserbereitung

Gerhard Pertiller1*, Fabian Prada1, Manuel Verdnik1, René Rieberer1

[1] Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25B, 8010 Graz, Österreich
gerhard.pertiller@tugraz.at

Der Einsatz von Wärmepumpensystemen zur dezentralen Warmwasserbereitung bietet im Vergleich zur direkten elektrischen Erwärmung ein beträchtliches Energieeinsparpotenzial. Im Zuge bereits durchgeführter Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit einem einstufigen R600a-Kältekreis und Raumlauft mit 20 °C als Wärmequelle Warmwasser in einem 4,6-Liter-Reservoir mit einer Arbeitszahl von 2,1 von 15 °C auf 93 °C erwärmt werden kann. Bei der Ermittlung der Arbeitszahl ergaben sich Unsicherheiten, da nicht genau quantifizierbare Verluste durch Wasserverdunstung auftraten. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der es ermöglicht, ein 3,5 Liter fassendes Wasserreservoir mit Druck zu beaufschlagen, um auf diesem Weg eine Wassertemperatur von über 100 °C bereitzustellen und die resultierenden Arbeitszahlen ohne Verdunstungsverluste zu ermitteln.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass mit einem einstufigen R600a-Kältekreislauf Wassertemperaturen über 100 °C bereitgestellt werden können. Betrachtet werden einerseits der Aufheizvorgang für ein Reservoir mit initial 15 °C und andererseits ein Zapfvorgang aus dem „geladenen“ Reservoir.

Stichwörter:
Hermetikkompressor, R600a, Kondensationstemperatur über 100 °C, experimentelle Untersuchung, einstufiger Kältekreislauf mit und ohne inneren Wärmeübertrager

6.17

R290-Inverter-Wärmepumpe mit reduzierter Füllmenge

Thermodynamische Performance und Systemstabilität

Henner Kerskes*[1], Manuel Schwarz [2], Ralf Jaudas [2]

[1] Universität Stuttgart, Institut für Gebäudetechnik, Thermotechnik und Energiespeicherung
henner.kerskes@igte.uni-stuttgart.de

[2] SchwörerHaus KG

Die Reduktion von Kältemittelfüllmengen in Wärmepumpen ist, insbesondere bei der Verwendung brennbarer natürlicher Kältemittel wie Propan (R290), ein zentrales Entwicklungsziel.

Die hier vorgestellten Ergebnisse sind Teil des Forschungsprojekts ProLuft „Entwicklung eines zukunftsfähigen Luftheizsystems mit Propan für eine energieeffiziente und flexible Wohngebäudeklimatisierung“, das im Programm InvestBW durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert wird. In dieser Arbeit wird die Entwicklung und experimentelle Untersuchung einer R290-Inverter-Wärmepumpe (Luft/Luft) für den Heizbetrieb vorgestellt. Primäres Ziel der Untersuchung war es, die Kältemittelfüllmenge gezielt auf einen Wert von unter 150 g zu reduzieren, um die strengen normativen Anforderungen für die Innenraumaufstellung zu erfüllen.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass durch die gewählten Maßnahmen die Füllmenge des Kältemittels erfolgreich von 260 g auf 140 g reduziert werden konnte, ohne signifikante Einbußen hinsichtlich der erzielten Heizleistung hinnehmen zu müssen. Durch eine Verdichter-Drehzahl-Variation (2000 bis 4500 rpm) und variierende Luftvolumenströme (80 bis 200 m³/h) bei einer Quellentemperatur von 22 bis 24 °C konnte eine maximale Heizleistung von ca. 1400 W erreicht werden. Die thermodynamische Auswertung belegt zudem einen äußerst stabilen thermischen Gütegrad zwischen 30 % und 33 % über einen weiten Betriebsbereich (120 bis 180 m³/h). Daraus resultiert ein hervorragender COP, der im Teillastbetrieb Spitzenwerte von bis zu 6,0 erreicht und bei Nennlast im Bereich von 3,5 liegt. Eine detaillierte Analyse des Netto-COPs unter Berücksichtigung der Lüfterleistung ergab zudem ein klares Effizienzoptimum bei einem Volumenstrom von 180 m³/h für mittlere bis hohe Teillasten.

Neben den sehr guten Effizienzwerten belegen die durchgeführten Untersuchungen die hohe Systemstabilität unter den Bedingungen dieser sehr geringen Füllmenge. Trotz der Reduktion der Kältemittelmenge auf 140 g konnte ein robuster Betrieb über das gesamte Kennfeld nachgewiesen werden. Weiterhin wurden die optimalen Betriebsgrenzen hinsichtlich der Kombination aus Verdichterdrehzahl und Luftvolumenstrom klar definiert, um Limitierungen im Wärmeübergang (z. B. bei niedrigen Luftströmen und maximalen Drehzahlen) zu vermeiden.

Die gewonnenen Erkenntnisse demonstrieren die prinzipielle Machbarkeit hocheffizienter und stabiler R290-Wärmepumpen mit geringen Füllmengen. Dies liefert wichtige Impulse für die zukünftige kompakte Bauweise und die sichere, normkonforme Skalierung von Propan-Wärmepumpen in der Praxis.

6.18

Experimentelle Untersuchung von Niedertemperaturhub-Wärmepumpen

Dominik Herden

Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
dominik.herden@tu-dresden.de

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SolKaN2.0 wird ein innovatives Konzept kalter Nahwärmenetze untersucht, das einen zukunftsweisenden Ansatz für die urbane Wärmeversorgung darstellt. Das System basiert auf dem Einsatz einer zentralen Wärmepumpe, die verschiedene regenerative Wärmequellen flexibel nutzen kann. Ein Schlüsselmerkmal des Konzepts ist die Aufrechterhaltung einer Netztemperatur oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser, wodurch Wasser als kosteneffizientes und umweltfreundliches Wärmeträgermedium im gesamten Verteilnetz eingesetzt werden kann. Dies vermeidet den Einsatz von Frostschutzmitteln und reduziert sowohl Investitions- als auch Betriebskosten.

Die dafür erforderliche zentrale Wärmepumpe zeichnet sich durch einen geringen Temperaturhub aus: Im Heizbetrieb wird eine Anhebung von -15°C bis 0°C auf 5°C bis 10°C realisiert, während im Kühlbetrieb Temperaturen von 20°C bis 25°C verdampferseitig auf 30°C bis 50°C kondensatorseitig angehoben werden. Dieses spezifische Temperaturniveau stellt herkömmliche Wärmepumpentechnologien vor erhebliche Herausforderung insbesondere in Bezug auf die Energieeffizienz, da am Markt verfügbare Systeme eine Mindestdruckdifferenz zwischen Verflüssiger und Verdampfer benötigen, um einen sicheren und stabilen Betrieb zu gewährleisten. Die bestehende Markttechnologie ist somit nicht auf die speziellen Anforderungen von Niedertemperaturhub-Anwendungen ausgelegt bzw. optimiert.

In diesem Beitrag wird eine Testanlage zur experimentellen Erprobung einer R-290 (Propan) Wärmepumpe vorgestellt. Der Fokus liegt auf zwei Ansätzen zur Effizienzsteigerung: Zum einen wird der Einsatz eines teilüberfluteten Verdampfers untersucht, der durch eine verbesserte Wärmeübertragung und reduzierte Sauggasüberhitzung zu einer Leistungsverbesserung gegenüber konventionellen Systemen mit Überhitzungsregelung beiträgt. Zum anderen wird die Integration von Low-Lift-Ejektoren in die Anlage analysiert, wobei neben den Effizienzsteigerungen auch die spezifischen Ejektorparameter (Druckhub, Entrainment Ratio und Ejektoreffizienz) untersucht werden. Die präsentierten Ergebnisse unterstreichen die hohe Relevanz der Optimierung von Kältemittelkreisläufen mit R-290, die gezielt auf die besonderen Temperaturanforderungen kalter Nahwärmenetze abgestimmt sind. Durch die Identifizierung und Reduktion wesentlicher Exergieverluste leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger, effizienter Heizlösungen für urbane Anwendungen und unterstützt die Transformation hin zu einer klimaneutralen Wärmeversorgung.

6.19

Kombination von Niedertemperaturhub-Wärmepumpe und Eisspeicher

Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen

Christian Lodroner[1]*, Peer Huber[1], Johannes Brunder[1], Harald Drück[1], Bernd Hafner[2], Ralf Dott[2], Dominik Herden[3], Yixia Xu[3], Christiane Thomas[3]

[1] Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland
christian.lodroner@igte.uni-stuttgart.de

[2] Viessmann Holding International GmbH
Viessmannstraße 1, 35108 Allendorf (Eder)

[3] Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
01062 Dresden, Deutschland

Kalte Nahwärmesysteme dienen der Beheizung und Kühlung von Gebäuden und Quartieren und bestehen im Allgemeinen aus Wärmepumpen, verschiedenen Wärmequellen, thermischen Energiespeichern und dem Nahwärmenetz zur Verteilung der Wärme bzw. Kälte. Die Besonderheit kalter Nahwärmesysteme ist die relativ niedrige Temperatur des Wärmeträgermediums im Netz. Dies hat einerseits den Vorteil, dass dadurch die Wärmeverluste an die Umgebung minimiert werden; teilweise werden dadurch sogar Wärmegewinne aus der Umgebung realisiert. Da üblicherweise wasserbasierte Wärmeträgermedien eingesetzt werden, muss andererseits ein Gefrieren des Wassers in den Rohrleitungen durch den Einsatz von Frostschutzmitteln verhindert werden. Der Einsatz von Frostschutzmittel stellt wiederum zusätzliche Anforderungen an die Sicherheit solcher Systeme, da Frostschutzmittel wie Ethylen- oder Propylenglykol als gewässergefährdend eingestuft werden. Zudem wird aufgrund der niedrigeren Wärmekapazität von Wasser-Frostschutz-Gemischen im Vergleich zu Wasser eine höhere Pumpenleistung benötigt. Das Forschungsvorhaben „SolKaN2.0“ (Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation) hat zum Ziel, eine neue Generation von solaren kalten Nahwärmesystemen zu entwickeln, bei denen als Wärmeträgermedium Wasser ohne Frostschutzmittel eingesetzt wird. Dadurch sollen die Investitionskosten und die Betriebskosten reduziert werden.

Um ein Gefrieren des Wassers im Netz zu verhindern, soll eine zentrale Wärmepumpe mit niedrigem Temperaturhub eingesetzt werden, die die Wärme aus den Quellen auf eine Temperatur von über 5 °C anhebt bevor sie in das Netz eingespeist wird. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen eines Labormusters einer solchen zentralen Wärmepumpe vorgestellt, die über eine thermische Leistung von ca. 25 kWth und einen Temperaturhub bis ca. 15 °C verfügt. Die Untersuchungen konzentrieren sich hauptsächlich auf die hydraulische und regelungstechnische Einbindung des Versuchseisspeichers am IGTE und den Einfluss des Vereisungsgrads des Speichers auf die Gesamtsystemeffizienz. Dabei werden verschiedene Wärmeübertrager-Konfigurationen im Eisspeicher bei unterschiedlichen Betriebsmodi sowie der Einfluss von dynamischen Betriebsweisen mit häufigeren Wechseln zwischen Wärmeentzug und Regeneration untersucht.

Stichwörter:
Kalte Nahwärmesysteme, Kalte Nahwärmenetze, Eisspeicher, Wärmeübertrager, Frostschutzmittel, Wärmepumpen

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

6.20

R-718 Wärmepumpe zur direkten thermischen Nutzung von Gewässern

Thomas Mösch

Combitherm GmbH, Friedrichstraße 14-16, 70736 Fellbach
moesch@combitherm.de

Die Nutzung von Gewässern als Wärmequelle nimmt im Hinblick auf die notwendige Defossilisierung des deutschen Wärmebedarfs an Bedeutung zu. Dabei gibt es bereits verschiedene Ansätze, die das Wasser des Gewässers selbst als Kälteträgerfluid verwenden und bei denen die Wärmequelle indirekt über Wärmeübertrager genutzt wird. Aufgrund der Wasserqualität und deren biologischer Zusammensetzung sind hier u. U. zusätzlicher Filterstufen und Anti-Fouling-Maßnahmen (z. B. Wartung/Säuberung) notwendig. Im Vergleich dazu können geeignete R-718-Wärmepumpen das Gewässer direkt als Kältemittel verwenden. Bisher lag dabei der Fokus auf der Wasserdampfverdichtung mittels Turboverdichter, sowie der Eis-Wasser-Erzeugung und deren Nutzung als thermischer Speicher. Solche Anlagen sind in ihrem Temperaturhub üblicherweise begrenzt und werden zur Anbindung an z. B. Fernwärmenetze mit weiteren Wärmepumpenstufen (z. B. R717) kaskadiert. Das hier vorgestellte Konzept ermöglicht die Bereitstellung von 75 °C Heizwasser unter Nutzung eines 3 °C Gewässers hingegen als reine R-718 Wärmepumpe. Dabei wird das Wasser des Gewässers direkt als Kältemittel genutzt und es wird gleichzeitig Frischwasser erzeugt. Als Dampfverdichter wurde ein Schrauben-Spindel-Verdichter mit geneigten Rotationsachsen konzipiert. Gemäß erster Potenzialanalyse ermöglicht die Anlage eine ressourcenschonende thermische Nutzung des Flusswassers bei marktfähigen Leistungszahlen.

6.21

Absorptionswärmepumpe als Wärmebooster an BHKW

Manuel Riepl [1*], Richard Gurtner [1], Manuel Kausche [2], Daniel Raab [3], Patrick Mlotzek [4], Raphael Lechner [4]

[1] eQrima Energy Solutions GmbH, Auweg 11, 85748 Garching
manuel.riepl@eQrima.de

[2] ZAE Bayern e.V., Walther-Meißner-Str. 6, 85748 Garching

[3] APROVIS Energy Systems GmbH., Ornbauer Str. 10, 91746 Weidenbach

[4] Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Kaiser-Wilhelm-Ring 23a, 92224 Amberg

Das Konsortium APROVIS, eQrima, ZAE Bayern und die OTH Amberg präsentiert die Ergebnisse des von der DBU geförderten Entwicklungs- und Demonstrationsprojekts „eQBooster“. Der eQBooster ist eine Absorptionswärmepumpe, die zwischen 20 und 30% mehr Nutzwärmeleistung aus Blockheizkraftwerken (BHKW) gewinnen lässt. Sie wird mit den heißen Abgasen des BHKW angetrieben und macht bisher ungenutzte Niedertemperaturwärmen des BHKW (Brennwert im Abgas und NT-Gemischkühlerabwärme) auf dem für den Verbraucher nutzbaren Temperaturniveau bei bis zu 95°C verfügbar. Sie verursacht hierbei einen nur sehr geringen zusätzlichen energetischen Aufwand, so dass das Wärmeplus mit nur sehr geringen Betriebskosten erschlossen werden kann und damit ein ökologisch und ökonomisch attraktives Energiesystem verfügbar ist.

Es werden das Systemkonzept sowie Ergebnisse aus dem Technikumsbetrieb mit einem 250 kWel-BHKW sowie Ergebnisse und Erfahrungen aus der realen Nahwärmeanwendung (550 kW_{el}-BHKW) präsentiert.

Stichwörter:
BHKW Booster, Absorptionswärmepumpe, Brennwertnutzung

6.21

Überblick zu Tankspeichern mit Schichtungsbetrieb

Thorsten Urbaneck[1*], Felix Oestreich[1]

[1] Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik, Reichenhainer Straße 70 , 09126, Chemnitz, Deutschland
thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

Im Bereich der thermischen Energiespeicher – hier sogenannte Wärmespeicher (50…200 °C) – besitzen Tankspeicher hervorragende Merkmale hinsichtlich der Konstruktion, des Betriebs und der spezifischen Investitionskosten. Tankspeicher lassen sich konstruktiv in Flachbodentanks und Druckbehälter einteilen. Diese Konstruktion bzw. die geometrische Gestaltung des Speicherraums wirken sich auf den Aufbau und Erhalt der Schichtung aus. Bei Flachbodentanks lagen 2014 bis 2017 schon sehr detaillierte Ergebnisse vor (*OBSERW*-Projekt). Bei den Druckbehältern mit schlanker und kompakter Form liefen Arbeiten ab 2011. Mit der Einführung der drallbehafteten Beladung ab 2018 entstanden neue Fragestellungen. Diese wurden im *INNOBES*-Projekt (2019-2022) und im Teilprojekt 10 des Verbundvorhabens Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik – *KETEC* (2021-2026) bearbeitet.

Der Beitrag liefert deswegen einen Überblick zu Speicherkonstruktionen und zu den Betriebsweisen mit thermischer Schichtung. In diesem Zusammenhang stellt der Beitrag eine einfache Berechnung zur wirtschaftlichen Bewertung der thermischen Schichtung vor. Damit lassen sich Simulations- und/oder Messergebnisse vergleichen und der Nutzen bewerten.

Stichwörter:
Speicher, Tank, Druckbehälter, Flachbodentank, Schichtung, Bewertung