

Deutsche Kälte- und Klimatagung 2025

Magdeburg

19. – 21. November 2025

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 Magdeburg

Otto-von-Guericke-Straße 87
39104 Magdeburg
T. +49 (0) 391 5949-863
E. meeting.mag@maritim.de
H. www.maritim.de
H. www.maritim.com

Inhaltsverzeichnis

Studierendenvorträge	3
Arbeitsabteilung 1.....	10
Kryotechnik	
Arbeitsabteilung 2.....	22
Grundlagen und Stoffe der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung 3.....	37
Anlagen und Komponenten der Kälte- und Wärmepumpentechnik	
Arbeitsabteilung 4.....	50
Kälteanwendung	
Arbeitsabteilung 5.....	65
Klimatechnik	
Arbeitsabteilung 6.....	76
Wärmepumpenanwendung	
Energieeffiziente Kühlung von Rechenzentren	92

Hinweis:

* bei den Autoren steht für Korrespondenzautor

S.01

Akustische Leckagedetektion in Propan-Wärmepumpen unter Verwendung von Ultraschallsensoren

Felix Lacher

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg am Breisgau

Diese Bachelorarbeit untersucht den Einsatz von Ultraschall-Piezosensoren zur Detektion von austretendem Kältemittel im Falle einer Leckage in einer Wärmepumpe mit dem Kältemittel R290 (Propan). R290 stellt aufgrund seiner Brennbarkeit ein Sicherheitsrisiko dar, was eine zuverlässige Erkennung von Leckagen erfordert. Herkömmliche Gassensoren sind entweder zu kostspielig, detektieren R290 nur lokal um den Sensor herum oder bieten keine langfristige Zuverlässigkeit. Eine vielversprechende Alternative sind Ultraschallsensoren, da sie das Geräusch austretender Fluide erfassen und so Lecks in Echtzeit erkennen können. Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Lecks ein breites akustisches Spektrum mit signifikanten Emissionen im Ultraschallbereich aufweisen. Dabei kann in Versuchen Druckluft als Ersatz für R290 verwendet werden, da beide Gase bei gleichem Druck nahezu identische akustische Signaturen erzeugen. Sind die Rohre nicht isoliert, können Ultraschallsensoren selbst bei laufendem Verdichter Lecks mit einer effektiven Fläche von nur 0.021mm^2 detektieren (bei 3 bar entspricht das einem R290-Massenstrom von $\dot{m} = 0.015\text{ g/s}$). Eine Leckagedetektion mittels Ultraschall ist somit ein vielversprechender Ansatz, der in ersten Tests auch die Anforderungen der DIN EN IEC 60335-2-40 erfüllt. Die Versuche haben zudem gezeigt, dass übliche Wärmepumpengehäuse die Umgebungsgeräusche (und insbesondere deren Ultraschallanteil) weitgehend abschirmen.

Im Vortrag werden der Messaufbau, die verwendete Sensorik und die Messergebnisse vorgestellt und das Konzept hinsichtlich Eignung für Wärmepumpen bewertet.

S.02

Vergleich der Energieeffizienz eines RE170/R600-Gemischs mit R600a in einer Kompressionskälteanlage

**Maurice Fenge^{*a}, Daniel Calleja-Anta^b, Salvador Orts-Gomez^b, Daniel Sanchez^b, Fatih Meral^a
Andrea Luke^a, Rodrigo Llopis^b**

^a Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland

^b Universitat Jaume I, Fachgebiet Thermal Engineering Group,
Av. de Vicent Sos Baynat, 12071 Castelló de la Plana, Spanien

Als energieeffiziente und umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Kältemitteln wird ein binäres Gemisch aus Dimethylether (RE170) und n-Butan (R600) als Ersatz für Isobutan (R600a) in einem kommerziellen Getränkekühler analysiert. Aufbauend auf vielversprechenden Ergebnissen vorangegangener Laboruntersuchungen wird das Kältemittelgemisch erstmals unter realitätsnahen Betriebsbedingungen getestet.

Aufbauend auf einer theoretischen Prozesssimulation wird das Gemisch in einem kommerziellen Getränkekühler eingesetzt. Dazu wird dieser so umgebaut, dass unter realitätsnahen Bedingungen das Gemisch untersucht wird. Die Versuche erfolgen unter Normbedingungen, d. h. bei konstanter Umgebungstemperatur von 25°C und einer Innentemperatur für das Kühlgut (Getränkedosen) von 3°C wird der Energiebedarf bestimmt. Der Aufbau der Versuchsanlage und die Durchführung der Versuche erfolgt im Rahmen eines Erasmusaustausches bei dem Partner Professor Rodrigo Llopis von der Universitat Jaume I, FG Thermal Engineering Group in Castelló de la Plana (Spanien). Die theoretische Analyse und Diskussion insbesondere der Energiewandlung in den verschiedenen Komponenten der Kältemaschine wird am Fachgebiet Technische Thermodynamik der Universität Kassel durchgeführt. In dem Beitrag wird diskutiert, in welchen Fall der Energiebedarf bei Verwendung von Gemischen steigt oder sinkt. Bekannt ist, dass der Wärmeübergang in den Verdampfern und Kondensation im

Falle von Gemischen geringer ist als im Falle von Reinstoffen, so dass insgesamt die Apparate größer werden müssten und der gesamte Energiebedarf steigt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass das RE170/R600-Gemisch mit einer optimalen Füllmenge im Vergleich zu R600a sogar effizienter ist, der gesamte elektrische Energiebedarf des Systems wird über einen 16-stündigen Testzeitraum um 8,65 % reduziert. Betrachtet man nur den Verdichter, ergibt sich sogar eine Einsparung von 16,55 %. Dies ist in Zukunft mit genaueren Versuchen zu validieren.

Stichwörter:

Energieeffizienzanalyse, Isobutan (R600a), Kältemittelgemisch, n-Butan, Dimethylether (RE170)

S.03

Untersuchung einer Grenzschichtturbine für R744 im Versuchsaufbau eines transkritischen Kältekreislaufs

Lukas Leon Bruchhaus^{1,2,3}

¹ Purdue University, Ray W. Herrick Laboratories, 177 S. Russell St., West Lafayette, IN 47907-2099, USA
lbruchha@purdue.edu

²Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung, Theo-Mack-Straße 3, 63477 Maintal, Deutschland

³technotrans solutions GmbH, Scherl 10, 58540 Meinerzhagen, Deutschland
lukas.bruchhaus@technotrans.de

Die Verwendung natürlicher Kältemittel gewinnt weltweit an Bedeutung; R744 (CO₂) ist eine Option in der gewerblichen und industriellen Kühlung. Zeitgleich steigen die Anforderungen an die Anlageneffizienz, die bereits heute signifikant durch Economiser-Schaltungen oder Ejektoren bei R744-Anlagen erhöht wird. Diese Bachelorarbeit untersucht den Einsatz einer Grenzschichtturbine (Tesla Turbine), die anstelle eines konventionellen Expansionsorgans das Kältemittel entspannen soll, um irreversible Verluste durch Entropieerzeugung zu reduzieren und Energie rückzugewinnen. Ziel ist es, einen Versuchstand für die Turbine zu vervollständigen, eine Simulation für diesen – insbesondere der Expansion – zu erstellen und die Turbine experimentell zu charakterisieren. Für den isentropen Gütegrad der Turbine wurde eine neue Gleichung auf Basis viskosen Drehmoments hergeleitet und mit einer dimensionslosen Korrelationsgleichung auf Basis früherer Experimente, einem Berechnungsansatz aus der Literatur sowie mit den Ergebnissen des Experiments verglichen. Abschließend wurden die optimalen Betriebsbedingungen der Turbine für den Versuchsaufbau abgeleitet. Das Experiment wurde aufgrund der Grenzen des Versuchsaufbaus in einem subkritischen Brayton-Zyklus (Gasbetrieb) durchgeführt. Die hergeleitete Gleichung und die weiteren Ansätze lieferten realistische Simulationswerte. Im Experiment betrug die Gesamteffizienz der Turbine mit Generator und Gleichrichter $\eta_{\text{EXP}} = 0,619 \%$ bei $P_{\text{EXP}} = 5,14 \text{ W}$. Der daraus abgeleitete isentrope Gütegrad betrug $\eta_{\text{is,ex}} = 1,123 \%$, wobei die hergeleitete Gleichung einen Wert von $\eta_{\text{is,sim}} = 1,524 \%$ ergab.

Stichwörter:

R744, Grenzschichtturbine, Expander, Simulation, Experiment

Untersuchung von R744-Kältesystemen für die Anwendung in Flugzeugküchen

Lennart Rosenbrock^{1,2*}, Henrik Waßmuth¹, Torsten Trümper², Wilhelm Tegethoff¹, Jürgen Köhler¹

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

²Airbus Operations GmbH, 1YVC Air Conditioning, Kreetzlag 10, 21129 Hamburg, Deutschland

* Korrespondenzautor lennart.rosenbrock@airbus.com

In der kommerziellen Luftfahrt stellen spezielle Kühlgeräte Kaltluft für die Kühlung von Lebensmitteln in Bordküchen bereit. Im Zuge der Bestrebungen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen durch die schrittweise Einschränkung des Einsatzes fluoriierter Treibhausgase (F-Gase) sowie der Diskussionen zum Verzicht auf per- und polyfluorierter Alkylsubstanzen (PFAS) rückt die Entwicklung nachhaltiger Kühlsysteme im Flugzeug zunehmend in den Fokus. Kohlendioxid (R744) gilt aufgrund seiner geringen Umweltwirkung und Nichtbrennbarkeit als vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Kältemitteln. Die Anforderungen an die Kühlsysteme in Flugzeugküchen sind aufgrund strenger Vorgaben hinsichtlich Sicherheit, Bauraum, Gewicht und Energieeffizienz besonders hoch.

In dieser Studie werden verschiedene R744-Kältekreislaufvarianten hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in Flugzeugküchen untersucht und bewertet. Betrachtet werden für ein zweistufiges Verdichtungssystem drei Kältekreislaufvarianten: die Zwischeneinspritzung von Flashgas, die Integration eines internen Wärmeübertragers sowie der Einsatz eines luftgekühlten Zwischenkühlers. Die Untersuchungen umfassen sowohl die modellbasierte Analyse der Systeme als auch die Konzeption und experimentelle Erprobung eines Prüfstands. Dieser ermöglicht es, unterschiedliche Systemvarianten unter realitätsnahen Betriebsbedingungen zu testen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Zwischeneinspritzung von Flashgas zu einer Effizienzsteigerung von etwa 30 % gegenüber einer Referenzarchitektur ohne effizienzsteigernde Maßnahmen führt. In einem weiteren Test-szenario ermöglichte der Einsatz des internen Wärmeübertragers eine Einsparung an elektrischer Leistung von 660 W. Der durch zusätzliche Komponenten bedingte Gewichts-nachteil konnte insbesondere in den Grenzszenarien durch erhebliche Leistungseinsparungen kompensiert werden. Das System erreichte einen maximal gemessenen COP von 1,94. Auch gegenüber konventionellen Kühlgeräten war eine Effizienzsteigerung nachweisbar. Die Bewertung weiterer Kriterien wie der Betriebssicherheit und der baulichen Integration bestätigt die Realisierbarkeit eines R744-Kühlgeräts für den Einsatz in Bordküchen.

Stichwörter:

Flugzeugküchen, R744-Kältesysteme, natürliche Kältemittel, Energieeffizienz

Simulation transkritischer Wärmeübertragung bei Verdichtung mit Flüssigkeitseinspritzung

Lennart Berg

¹Hochschule Karlsruhe, Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
bele1030@h-ka.de

Diese Arbeit untersucht die optimale Konfiguration der Flüssigkeitseinspritzung in Hubkolbenverdichtern für transkritische CO₂-Kälteanlagen. Im Mittelpunkt steht die Identifikation des effizientesten Betriebspunkts durch thermodynamische Simulationen. Zur realitätsnahen Abbildung der Wärmeübertragungscharakteristik wird ein Modell für die transkritische Wärmeübertragung entwickelt und validiert. Die Simulationen werden für einen

üblichen Anwendungsfall in der Tiefkühlung bei 25 °C Umgebungs- und -30 °C Verdampfungstemperatur durchgeführt.

Die Simulationen zeigen, dass die Flüssigkeitseinspritzung im Druckbereich von 100–120 bar die maximale Wirkung erreicht. Der optimale Betriebspunkt liegt bei 110 bar Gaskühlereintrittsdruck und einer durch Einspritzung auf 69 °C abgesenkten Verdichteraustrittstemperatur – dies entspricht einer Temperaturreduktion von 55 K gegenüber dem isentropen Referenzfall (124 °C). Bei dieser Konfiguration wird ein maximaler COP von 1,9 erreicht, was einer Effizienzsteigerung von 6,7 % gegenüber dem Referenzbetrieb ohne Einspritzung (COP 1,78 bei 100 bar) entspricht.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass eine präzise abgestimmte Einspritzstrategie die Systemeffizienz in transkritischen CO₂-Anlagen signifikant verbessern kann, insbesondere bei hohen Betriebsdrücken. Weiterhin wird deutlich, dass mit der Einspritzung ein angepasster Anlagenbetrieb, insbesondere hinsichtlich des idealen Hochdrucks, notwendig wird.

Stichwörter:

Flüssigkeitseinspritzung, transkritisches CO₂, Optimaler Betriebspunkt, Gaskühlermodellierung, Energieeffizienz

S.06

NH₃-Leckage: Transiente CFD-Validierung

Transiente CFD-Simulation und Experiment-Validierung durch PPM-Messung einer realistischen NH₃-Leckage

Lorenz Lünswilken

Europäische Studienakademie Kälte-Klima-Lüftung, Theo-Mack-Straße 3, 63477 Maintal, Deutschland
Heidinger GmbH & Co.KG, In den Waldäckern 38, 75417 Mühlacker, Deutschland

Luenswilken@heidinger-kuehlsysteme.de

Der Einsatz von Ammoniak (NH₃) als Kältemittel bietet sowohl ökologische als auch thermodynamische Vorteile, birgt jedoch erhebliche Risiken im Störfall. Besonders in geschlossenen Technikräumen, wie sie in modularen Kälteanlagen vorkommen, kann eine plötzliche Leckage rasch zu gesundheitsgefährdenden Konzentrationen führen. Konventionelle Bestimmungen von Leckageszenarien sind häufig stark vereinfacht und berücksichtigen komplexe Innenraumgeometrien nur unzureichend. Zur realitätsnahen Bewertung technischer Schutzmaßnahmen wurde daher ein kombinierter Ansatz aus physikalischer Messung und numerischer Strömungssimulation verfolgt, wie er auch in der harmonisierten ATEX-Norm IEC 60079-10-1:2020-12 empfohlen wird. Ziel der Arbeit war die Entwicklung, Durchführung und Analyse eines realistischen kontrollierten Leckageszenarios in einem realen Versuchsstand. Die Ammoniakfreisetzung wurde unter reproduzierbaren Bedingungen in einem Seecontainer umgesetzt und durch ein dreidimensionales Sensorraster mit 36 NH₃-PPM-Sensoren erfasst. Parallel dazu wurde ein transientes CFD-Modell in ANSYS STUDENT 2025 R1 aufgebaut, das die reale Geometrie sowie das Lüftungskonzept abbildet. Der Abgleich zwischen Mess- und Simulationsdaten diente der Modellvalidierung. Im Zentrum stand die quantitative Bestimmung des Modellfehlers. Dabei zeigte sich, dass sowohl der begrenzte Messbereich und die Unsicherheit der Sensorik als auch die vereinfachte Geometrie des Simulationsmodells die Aussagekraft konkreter numerischer Ergebnisse einschränkten. Der konzeptionelle Nachweis der Methodik konnte dennoch erfolgreich erbracht werden. Die entwickelte Vorgehensweise bietet eine übertragbare Grundlage zur Validierung numerischer Modelle und zur sicherheitstechnischen Bewertung geschlossener Kälteräume.

Stichwörter:

Ammoniakleckage, 2-Phasen-Freisetzung, CFD-Simulation, 3D-PPM-Messraster, Modellfehlerquantifizierung.

Wärmepumpen in urbanen Multi-Energiesystemen

Experimentelle Untersuchung des Teillastverhaltens und dessen Einfluss auf die optimale Auslegung

Robin Graessner¹

¹ RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center,
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, Aachen, Germany
robin.graessner@rwth-aachen.de

Wärmepumpen können als elektrifizierter Wärmeerzeuger bei der Dekarbonisierung der Wärmenetze einen signifikanten Beitrag leisten.

Im Betrieb sind Wärmepumpen jedoch durch eine hohe Sensitivität hinsichtlich der Betriebsparameter, wie den Temperaturniveaus in der Wärmequelle und der Wärmesenke sowie der Verdichterdrehzahl, gekennzeichnet. Für die Ausschöpfung des vollen Potentials der Wärmepumpen sollten die Betriebsparameter und deren Wechselwirkungen schon während der Auslegung berücksichtigt werden.

Deshalb wird im Rahmen dieser Arbeit zunächst die drehzahlabhängige Betriebscharakteristik, in Abhängigkeit der Temperaturniveaus, experimentell an einem Sole-Wasser-Wärmepumpenprüfstand ermittelt. Darauf aufbauend wird die ermittelte Betriebscharakteristik in eine Auslegungs- und Betriebsoptimierung für Energiezentralen urbaner Energiesysteme integriert.

Die Effizienz der Wärmepumpe (COP) schwankt in Abhängigkeit der Drehzahl, um bis zu 18,5 % im Vergleich zum Maximalwert.

Die experimentell ermittelte Betriebscharakteristik wird mittels dreier Bausteine schrittweise in das Referenzszenario der Auslegungs- und Betriebsoptimierung integriert: (1) Begrenzung der minimalen Teillast, (2) Begrenzung der maximalen thermischen Leistung in Abhängigkeit der Wärmequellentemperatur und (3) Lastabhängigkeit des COPs. Im Referenzszenario wird 15,2 % der von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärmemenge außerhalb des Betriebsbereichs der Wärmepumpe bereitgestellt. Die Modellierung mit den Bausteinen (1) und (2) ermöglicht den vollständigen Betrieb der Wärmepumpe innerhalb des Betriebsbereichs.

Stichwörter:

Dekarbonisierung, Wärmenetze, Drehzahl, COP, Betriebsbereich

Konzeptionierung einer Versuchseinrichtung zur Untersuchung einer Vollglasvitrine für die Ausstellung sensibler archäologischer

Julia Sophy Stenzel

Duale Hochschule Glauchau, Versorgungs- und Umwelttechnik - Kältetechnik

Dieser Abstract fasst die wesentlichen Inhalte der Studienarbeit und der darauf aufbauenden Diplomarbeit zusammen. Die Arbeiten untersuchten die technische Konditionierung von Vollglasvitrinen zur Ausstellung empfindlicher archäologischer Funde in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Museum für Archäologie Chemnitz. Das primäre Ziel bestand darin, spezifische Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen zu gewährleisten, wobei die Anlagentechnik für Besucher unsichtbar bleibt. Im Zuge der Voruntersuchungen wurden technische Lösungen entwickelt, die die Unsichtbarkeit der Technik ermöglichen, darunter die Erstellung eines Lastenhefts, Marktrecherchen zu bestehenden Vitrinen und Klimakomponenten sowie Vorschläge zur Realisie

rung der Anlagentechnik. Basierend auf einem ursprünglichen technischen Entwurf wurde ein Peltier-Element als Lösung eingesetzt, begleitet von einem speziell angefertigten Gehäuse und einem Umluftsystem zur gleichmäßigen Kühlung. Die Diplomarbeit dokumentierte die praktische Umsetzung dieses Entwurfs, einschließlich der Herausforderungen und notwendigen Anpassungen. Abschließend wurde die Funktionalität der Anlage durch Experimente und Messungen validiert.

Abschließend wurde festgestellt, dass das Umluftsystem insgesamt gut funktionierte, jedoch an einigen Stellen Optimierungspotenzial aufwies. Es konnte nachgewiesen werden, dass mit dem vorliegenden Kühlmodulaufbau eine Kühlung möglich ist. Für den Anwendungsfall war das System jedoch zu klein dimensioniert. Eine Neu-dimensionierung der Komponenten wurde als notwendig erachtet, um die Leistung zu verbessern.

S.09

Entwicklung nachhaltiger Verdichtertechnologien für Kältemittel mit niedrigem GWP

**Paul Ellend^{*a}, Yash S. Parmar^b, Fatih Meral^a, Samuel F. Yana Motta^c,
Andrea Luke^a, Eckhard A. Groll^b, Riley B. Barta^b**

^a Universität Kassel, Fachgebiet Technische Thermodynamik,
Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Deutschland

^b Ray W. Herrick Laboratories, School of Mechanical Engineering, Purdue University,
177 W. Russell Street, West Lafayette, IN, 47907, USA

^c Oak Ridge National Laboratory, 1 Bethel Valley Rd #5200, Oak Ridge, TN 37830, USA

ttk@uni-kassel.de

Systeme zur Klimatisierung, Kühlung und Heizung verursachen einen erheblichen Anteil des globalen energiebedingten CO₂-Ausstoßes. Die Kigali-Ergänzung zum Montreal-Protokoll fordert eine schrittweise Reduktion klimaschädlicher Kältemittel mit hohem Treibhauspotenzial (GWP). Damit eine tatsächliche CO₂-Reduktion erreicht wird, darf der Energiebedarf der Systeme nicht über dem Niveau bisheriger Kältemittel liegen. Um den Energiebedarf zu senken, ist die Steigerung der Verdichtereffizienz neben der Erhöhung der Wärmeübertragungsleistung von zentraler Bedeutung. Vor dem Hintergrund der notwendigen Substitution von R-410A werden verschiedene Rollkolbenverdichter experimentell in einem Verdichterleistungsprüfstand (sog. Heißgas-Bypass-Teststand) mit dem bisherigen Kältemittel R-410A sowie den potenziellen Alternativen Propan (R-290) und R-454C untersucht. Dabei werden die Eingangs- (Verdampfungs)- und Ausgangs- (Kondensations-) temperaturen systematisch variiert, um die Leistungskennwerte der Verdichter unter unterschiedlichen Bedingungen zu analysieren. Ziel ist es, die Eignung und Effizienz bestehender Verdichtertechnologien im Zusammenspiel mit den neuen Kältemitteln zu bewerten sowie technologische Grenzen und Potenziale aufzuzeigen. Die Ergebnisse sollen eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung klimafreundlicher Verdichtersysteme liefern.

Stichwörter:

Verdichter, Kältemittel, GWP, Energieeffizienz

Untersuchungen zum Kavitationsverhalten einer Flüssigheliumpumpe

Jakob Uhrig

Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
TU Dresden, 01062 Dresden
jakob.uhrig@mailbox.tu-dresden.de

Flüssighelium ist ein wichtiger Bestandteil von Technik und Forschung, für dessen Gewinnung enorme Energiemengen aufgewendet werden müssen. Um möglichst effizient mit diesem kostbaren Rohstoff umzugehen, müssen alle Prozesse der Lagerung und des Transports so weit wie möglich optimiert werden.

Ein wichtiger Teil dieser Transferprozesse ist die Abfüllung aus Speichergefäßen für kryogene Flüssigkeiten. Hierfür wird an der TU Dresden ein Transfersystem entwickelt. Essenzieller Bestandteil dieses Transfersystems ist eine Flüssighelium-Turbopumpe. Deren experimentelle Untersuchung im Hinblick auf Kavitation ist Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit.

Im Interesse der Förderleistung und Langlebigkeit der Pumpe ist Kavitation ein Prozess, der dringend zu vermeiden ist. Die Arbeit erläutert das Wesen und Zustandekommen von Kavitation. Der Stand der Forschung zu Kavitation in Turbopumpen für kryogenen Flüssigkeiten wie Flüssighelium wird zusammengefasst.

Als Teil der Kavitationsuntersuchungen wird ein Einlassrohr an der Pumpe montiert, mit Hilfe dessen die Saugfähigkeit der Pumpe untersucht wird. Es wird festgestellt, dass die Flüssighelium-Turbopumpe bei Nenndrehzahl aus über 30 cm Tiefe selbstansaugen und bei negativen Vordrücken arbeiten kann, ohne dass messbare Kavitation entsteht. Aus diesen Erkenntnissen werden Rückschlüsse für die Weiterentwicklung der Pumpe und des Transfersystems gezogen.

1.01

Die kryogene Infrastruktur des Teilchenbeschleunigers MESA

Timo Stengler

Institut für Kernphysik, JGU Mainz, 55128 Mainz
stengler@kph.uni-mainz.de

An der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz entsteht mit MESA ein energierückgewinnender Elektronenbeschleuniger, der künftig bedeutende Beiträge zur Präzisionsphysik leisten soll. Eine Schlüsselrolle in der Fertigstellung und des Betriebs übernimmt dabei die anspruchsvolle kryotechnische Infrastruktur, die den Betrieb der supraleitenden Module bei Temperaturen bis 1,8 K ermöglicht. Die Entwicklung und Implementierung eines solchen Systems stellt Ingenieurteams vor komplexe Aufgaben: Neben der effizienten Handhabung unvermeidbarer Wärmeeinträge gilt es, optimale Betriebsstrategien zu identifizieren und sicherheitstechnische Anforderungen konsequent umzusetzen. Der Vortrag beleuchtet zentrale ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen, zeigt Lösungsansätze auf und diskutiert mögliche Betriebsrisiken. Darüber hinaus wird aufgezeigt, welches Potenzial die eingesetzte Technologie für MESA und darüber hinaus eröffnet. Ziel ist es, einen Einblick in die kryogene Versorgung des Beschleunigers zu geben und die Bedeutung dieser Technologie für zukünftige Anwendungen zu unterstreichen.

1.02

Die Kryoversorgung für FAIR- ein Schritt weiter zum ersten Strahl

Marion Kauschke^{1*}, Holger Kollmus¹, CRY-Gruppe der GSI

¹GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, CRY, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt, Germany
M.Kauschke@gsi.de

In den nächsten Jahren wird bei GSI das neue internationale Beschleunigerzentrum FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Betrieb genommen und die ersten Experimente mit Schwerionen durchgeführt. An FAIR wird eine nie dagewesene Vielfalt an Experimenten möglich sein, durch die Physiker aus aller Welt neue Einblicke in den Aufbau der Materie und die Entwicklung des Universums, vom Urknall bis heute, erwarten. Das Herzstück ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 1100 Metern. An diesen schließt sich ein komplexes System von Speicherringen und Experimentierstationen an. Sowohl der Ringbeschleuniger SIS100 wie auch der supraleitende Fragment Separator (Super-FRS) bestehen hauptsächlich aus supraleitenden Magneten, die in internationalen Kollaborationen entwickelt und gefertigt werden.

Die Kryoversorgung wird sowohl durch Direktbeauftragungen (wie zum Beispiel die Kälteanlage mit 50 kW @ 50-80 K und 14 kW @ 4,5 K) wie auch In-Kind-Lieferungen durch verschiedene Firmen aufgebaut. Die Abnahmetests einzelner Komponenten werden gezeigt und ein Ausblick auf die Inbetriebnahme gegeben.

Stichwörter:

FAIR, Helium-Kälteanlage, Kryoversorgung

1.03

Eine kryogene Kühlanlage für den ersten Quantencomputer der Welt im industriellen Maßstab

Lutz Decker, Burkhard Zinzus, Hermann Stiasny

Linde Kryotechnik AG, 8422 Pfungen, Schweiz

lutz.decker@linde-kryotechnik.ch

Quanteneffekte werden bereits seit Langem genutzt. Technologien wie Röntgen, Transistoren, Laser, LEDs, ..., alles beruht auf der Kontrolle von Quantenbündeln. Heute können einzelne Quanten gezielt manipuliert werden. Ihre Verschaltung zu Millionen Qubits ermöglicht den Bau von brauchbaren Quantencomputern. Dieser Schritt findet jetzt statt. Von der Quanteninformatik werden Fortschritte in den Bereichen Gesundheitswesen, Energie, Materialdesign und Verschlüsselung erwartet.

Quantencomputer können auf ganz unterschiedlichen Ansätzen basieren – allen gemeinsam ist jedoch die Notwendigkeit, äußere Einflüsse auf den Zustand der Qubits zu minimieren, zum Beispiel durch Kälte. Als besonders weit fortgeschritten gelten Quantencomputer basierend auf supraleitenden elektronischen Schaltungen beziehungsweise auf photonisch integrierten Schaltkreisen. Beide Systeme werden in mehreren Kühlstufen auf tiefkalte Temperatur heruntergekühlt.

Linde Kryotechnik hat mit PsiQuantum einen Vertrag über die Lieferung einer kryogenen Kälteanlage für den weltweit ersten Quantencomputer im industriellen Maßstab in Brisbane, Queensland, Australien, unterzeichnet. Mit einer gesamten Kühlleistung von 36 kW bei einer Temperatur von 4.5 K ist diese Anlage mit Abstand das weltweit leistungsstärkste Kühlsystem im Bereich der Quantencomputer und zugleich eines der leistungsfähigsten kryogenen Kühlsysteme überhaupt. Sie wird Zehntausende der neuen Omega-Photonikchips von PsiQuantum kühlen, die in Schränken untergebracht sind, die mit Standard-Glasfasern miteinander vernetzt werden.

1.04

Helium Kälteanlagen für 2 K bis 20 K – am Beispiel Hamburg und Warschau

Maximilian Gierlinger, Wilhelm Vorbuchner*

Vorbuchner GmbH & Co. KG, 84558 Kirchweidach

maximilian.gierlinger@vorbuchner.com

wilhelm.vorbuchner@vorbuchner.com

Tieftemperaturkälteanlagen sind für eine Vielzahl von Anwendungen essenziell. Diese hocheffizienten Kühlsysteme kommen in der Forschung, der Industrie und der Medizintechnik zum Einsatz und sind für den Erfolg zahlreicher hochpräziser Technologien von entscheidender Bedeutung, insbesondere für die Kühlung von Supraleitern. Im Reallabor SuprAL der Firma TRIMET in Hamburg demonstrieren Forschende, wie sich die konventionellen Stromschienen einer Aluminiumproduktion durch Hochtemperatursupraleiter ersetzen lassen, die bei einer Temperatur von 20 Kelvin betrieben werden. Der 2K-Refrigerator kühlt den „Polish Free-Electron-Laser (polFEL)“ in Warschau. Dieser erzeugt Synchrotronstrahlung, welche eine Strahlung mit höchster Leistung und Helligkeit erzeugt, die um Größenordnungen höher ist als die von herkömmlichen Quellen.

1.05

LH2-Versorgung durch Kryobehälter: Sicherheit, Vorschriften, Lösungen

Jos Wulfestieg, Bernd Gottschlich

Cryotherm GmbH&Co.KG, Euteneuen 4, 57548 Kirchen

Bernd.Gottschlich@Cryotherm.de

Für flüssigen Wasserstoff steht aktuell nur eine Infrastruktur für große Mengen (in Form von großen Standtanks, Sattelaufliegern und Containern) zu Verfügung.

Für gewisse Anwendungen (Betankung von kleinen unbemannten Luftfahrzeugen, kleine Testvorrichtungen, Forschung) werden auch LH2-Mengen <1000l nachgefragt.

Hier bietet sich eine LH2-Versorgung mittels ortsbeweglichen Kryobehältern an, die an vorhandenen LH2-Standtanks befüllt werden.

Für das Medium Wasserstoff müssen Kryobehälter baumustergeprüft und mit besonderen Sicherheitsausrüstungen ausgerüstet sein, um das Handling mit dem sensiblen Medium so sicher wie möglich zu gestalten.

Die TPED2010/35 (ADR) und EN1251 geben den gesetzlichen Rahmen für den Gefahrgut-Transport auf der Straße vor.

An einem neu entwickelten Wasserstoffbehälter werden mögliche Lösungen beispielhaft gezeigt.

1.06

Flüssiger Wasserstoff als Energieträger im LKW-Fernverkehr

Dirk Bessey, Mathias Keck

BIN Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG

Carl-Friedrich-Gauss-Str. 4, 72202 Nagold

dirk.bessey@bin.boysen-online.de, mathias.keck@bin.boysen-online.de

Um die weltweit vereinbarten CO₂-Reduktionen für schwere Nutzfahrzeuge zu erreichen, werden derzeit verschiedene Technologien verfolgt: batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) und Verbrennungsmotoren (ICE), die mit Wasserstoff oder E-Fuels betrieben werden. Insbesondere im LKW-Fernverkehr und bei Anwendungen mit einem hohen Leistungsbedarf im Land- und Baumaschinensektor bietet sich die Speicherung von Wasserstoff in tiefkalt-flüssiger Form aufgrund der hoher Speicherdichte als bevorzugte Variante an. Vor dem Hintergrund hat BOYSEN die letzten Jahre intensiv an der Entwicklung von Systemen für flüssig- und gasförmige Speicherung von Wasserstoff gearbeitet. Der Beitrag behandelt wichtige Aspekte, welche bei der Entwicklung entsprechender Systeme signifikant sind. Wie verhält sich beispielsweise das thermodynamische System in Bezug auf den unvermeidlichen Wärmeeintrag sowie die mechanische Beanspruchung aufgrund von Fahrbahnanregungen. Die Ausführungen sollen das Potential der Technik aufzeigen und eine Vorstellung der zukünftigen Applikation vermitteln.

1.07

Forschungs- und Entwicklungswerkzeuge für LH2-Speichertechnologien

Alexander Trattner^{1,2}, Nejc Klopčič¹, Patrick Pertl¹

¹ HyCentA Research GmbH, 8010 Graz, Österreich

² Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, TU Graz

trattner@hycenta.at

Das HyCentA (Hydrogen Research Center Austria) in Graz beschäftigt sich seit über 20 Jahren intensiv mit der Forschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien – zunehmend auch im Kontext der Luftfahrt. Träger des Zentrums sind unter anderem die TU Graz sowie verschiedene Industriepartner. In zahlreichen Forschungsprojekten arbeiten wissenschaftliche Einrichtungen und Unternehmen eng zusammen. Für die Entwicklung und Erprobung stehen modern ausgestattete Prüfanlagen, Simulationswerkzeuge und Teststände für Wasserstoffanwendungen zur Verfügung.

In der vorliegenden Arbeit werden aktuelle Forschungs- und Entwicklungsansätze für LH₂-Speichertechnologien in der Luftfahrt vorgestellt. Im Mittelpunkt stehen experimentelle Untersuchungen sowie fortschrittliche CFD- und FEM-Methoden zur Simulation thermodynamischer Prozesse. Ziel ist die Optimierung des Wärmemanagements und der Systemauslegung für künftige wasserstoffbasierte Antriebssysteme.

1.08

Forschung zur Sicherheit von Kryo-Wasserstoff

Thomas Jordan und Eugenio Torres de Ritter

Abteilung Wasserstoff, Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit ITES

Karlsruher Institut für Technologie, 76131 Karlsruhe

thomas.jordan@kit.edu

Der Transport von Wasserstoff selbst, sowie Transportanwendungen, wie der Schwerlastverkehr auf Straße und Schiene und insbesondere die Luftfahrt profitieren von der relativ hohen Dichte von Kryo-Wasserstoff (Flüssigwasserstoff LH₂, „sub-cooled“ LH₂, kryo-verdichteter Wasserstoff CcH₂). Für solche zukünftigen Anwendungen gibt es jedoch noch einige relevante Wissenslücken hinsichtlich des unfallbedingten Verhaltens von Kryo-Wasserstoff und es fehlt nahezu vollständig die spezifische, normative Basis. Letzteres betrifft zum Beispiel sichere, leistungsfähige Transferprotokolle zum Umfüllen von bzw. Betanken mit Kryo-Wasserstoff. Diverse Forschungsgruppen betreiben daher pre-normative Forschung, um diese Wissenslücken zu füllen und die Grundlagen für eine international harmonisierte, leistungsbasierte Normung zu ermöglichen. Der Beitrag gibt einen kurzen Überblick über diese internationalen Forschungsaktivitäten, fokussiert dann aber auf das europäische Projekt ELVHYS. Die Zielsetzung und das experimentelle Programm werden vorgestellt. So werden Versuche und teilweise schon Ergebnisse von Luftanreicherung in LH₂, Brandtests von Kryotransferleitungen, Rohrversuche zum BLEVE Phänomen mit über- und unterkritischen Startdrücken präsentiert. Der Beitrag schließt mit einem Überblick über noch offenen Fragestellungen zur Sicherheit von Kryo-Wasserstoff und präsentiert eine entsprechende Priorisierung, die aus dem von HySafe (International Association for Hydrogen Safety) organisierten Reserach Priorities Workshop resultiert.

Steps towards a safe integration of LH₂ into energy systems

Aliasghar Hajhariri, Robert Eberwein

Bitzer-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik
BAM – Department for safety of gas storage, Unter den Eichen 44-46, 12203 Berlin
aliasghar.hajhariri@bam.de

Liquid hydrogen (LH₂) is a promising energy carrier for decarbonizing heavy-duty transport and future energy systems. However, its cryogenic storage poses significant challenges, particularly regarding safety and insulation efficiency. In mobile applications, multilayer insulation (MLI) under vacuum conditions is widely used due to its lightweight and high thermal resistance. Yet, under accidental scenarios such as fire exposure, MLI can degrade rapidly—leading to increased heat ingress and potential hazards like BLEVE or jet fires. To enable the safe integration of LH₂ into transport infrastructure and, eventually, broader energy supply chains, critical safety concerns must be addressed to gain public and industrial acceptance. This study investigates the thermal degradation behavior of MLI under extreme conditions and introduces a model to quantify its impact on heat transfer. The results demonstrate that insulation integrity plays a pivotal role in system safety, and tailored mitigation strategies can be developed accordingly. These findings contribute essential knowledge toward safer LH₂ storage and support the broader adoption of hydrogen as a sustainable energy vector.

Modellierung und Simulation der Flüssigwasserstoffbetankung mit unterkühlter Flüssigkeit

Fabian Primke^{1*}, Alexander Alekseev², Sebastian Rehfeldt¹, Harald Klein¹

¹ Technische Universität München, TUM School of Engineering and Design, 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

Als Treibstoff für zukünftige Antriebe wird Flüssigwasserstoff (LH₂) aufgrund seiner hohen volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte als vielversprechender Treibstoff betrachtet, der insbesondere in Bereichen Anwendung finden könnte, in denen große Speichermengen benötigt werden. Zwei wichtige Faktoren bei der Betankung mit LH₂ sind die Druckentwicklung im Tank und die Gasmenge, die abgeführt werden muss, um den Druckanstieg durch die eingespeiste Flüssigkeit auszugleichen. Eine Möglichkeit, die abzuführende Gasmenge zu reduzieren, ist der Einsatz unterkühlter Flüssigkeit, wodurch Gas kondensiert und der eingespeiste Volumenstrom kompensiert wird. Dadurch kann der Druckanstieg im Tank verringert oder vollständig ausgeglichen werden. Zur Beschreibung der Betankung mit unterkühlter Flüssigkeit wurde ein Tankmodell entwickelt, das die Kondensation von Gas durch die eingespeiste Flüssigkeit berücksichtigt. Mithilfe dieses Modells wird die Betankung mit unterkühlter Flüssigkeit ohne Entnahme von Gas bei verschiedenen Bedingungen simuliert und die resultierenden Ergebnisse und Einflussfaktoren werden diskutiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Grad der Unterkühlung der eingespeisten Flüssigkeit und ihre Interaktion mit der Gasphase die wichtigsten Einflussfaktoren sind.

Stichwörter:

Flüssigwasserstoffbetankung, Thermodynamisches Modell, Flüssigwasserstofftank, LH₂

1.11

Prototyp für eine einstufig CMRC-gekühlte Stromzuführung

Jonas Arnsberg^{1*}, Timo Weckerle¹, 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
jonas.arnsberg@kit.edu, timo.weckerle@kit.edu

² Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21, 76331 Karlsruhe, Deutschland
steffen.grohmann@kit.edu

Stromzuführungen zur Stromversorgung von supraleitenden Magneten und Kabeln tragen maßgeblich zur Wärmelast auf das kryogene System bei. Eine Reduktion des Leistungsbedarfs für die Kühlung derartiger supraleitender Systeme kann durch eine Optimierung der Stromzuführungen erreicht werden. Aus thermodynamischer Sicht ist dabei eine aktive Kühlung der Stromzuführungen entlang ihrer gesamten Länge erstrebenswert. Eine solche Kühlung mit einem geschlossenen Kühlkreislauf ist in kompakten bis mittelgroßen Anlagen aktuell noch nicht realisierbar.

Kryogene Gemischkältekreisläufe (cryogenic mixed-refrigerant cycles, CMRC) stellen eine vielversprechende Technologie zur Kühlung von Stromzuführungen technischen Anwendungen der Supraleitung dar. Basierend auf dem Joule-Thomson-Effekt bieten CMRC eine nahezu beliebige Skalierbarkeit bei gleichzeitig hoher Energiedichte sowie energetischer und ökonomischer Effizienz. Der Vortrag beschreibt den komplexen Optimierungsprozess einer einstufigen, mikrostrukturierten CMRC-gekühlten Stromzuführung. Der resultierende 10 kA Prototyp wird in-house gefertigt und anschließend im Versuchsstand COMPASS am Karlsruher Institut für Technologie experimentell untersucht werden.

Stichwörter:

Gemischkältekreislauf, Stromzuführungen, Supraleiter

1.12

Kühltechnik für eine supraleitende Stromschiene

F. Herzog¹, T. Kutz¹, S. Huwer², C. Hanebeck²

¹Messer SE & Co. KGaA, Kleinewefersstr. 1, 47803 Krefeld, Germany

²Vision Electric Super Conductors GmbH, Morlauterer Str. 21, 67657 Kaiserslautern, Germany

friedhelm.herzog@messergroup.com

Im Jahr 1911 wurden supraleitende Materialien entdeckt, die bei Kühlung mit flüssigem Helium ihren elektrischen Widerstand vollständig verlieren. Seit 1986 sind sogenannte Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) bekannt, die bereits bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff supraleitend werden. Dies ermöglicht den wirtschaftlichen Aufbau von quasi verlustfreien Stromkabeln. Das erste Projekt dieser Art in Deutschland war das AmpaCity-Kabel, welches ab 2013 über eine Strecke von 1 km die Innenstadt von Essen mit Elektroenergie versorgte.

Aktuell befindet sich nun bei dem Aluminiumhersteller Trimet in Hamburg ein Projekt in der Umsetzung, bei welchem durch Installation eines supraleitenden Kabels die Ohm'schen Verluste einer 600 m langen Stromschiene (ca. 2 MW) zu über 90 % vermieden werden. Das System soll Mitte 2026 in Betrieb gehen.

Bei diesem Projekt kommen Supraleiter zum Einsatz, die zwar ihren elektrischen Widerstand bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff verlieren, hier aber trotzdem bei einer Temperatur unterhalb von 20 K (-253°C) betrieben werden. Dadurch lassen sich die HTS-Materialkosten um den Faktor 5 reduzieren, da deren Stromtragfähigkeit

mit sinkender Temperatur exponentiell steigt. So wird es möglich, innerhalb eines verhältnismäßig kleinen Rohrkryostaten einen elektrischen Strom von 200.000 Ampere zu übertragen.

Die Tiefkälte-Erzeugung wird mittels einer Kältemaschine realisiert, die üblicherweise für die Wasserstoff-Verflüssigung zur Anwendung kommt. Hier dient sie jedoch zur Rückkühlung eines Helium-Gasstroms, der zur Kühlung der Supraleiter durch den Kryostaten geleitet wird. Die Maschine wird durch eine Flüssigstickstoff-Vorkühlung unterstützt. Außerdem kommt flüssiger Stickstoff zur Kühlung der Stromzuführungen und zum Betrieb der Kühlschilde des Rohrkryostaten zum Einsatz.

Stichworte:

Supraleitung, Hochtemperatur-Supraleiter, Flüssigstickstoff, Unterkühler, Kryotechnik

1.13

Entwicklungsaspekte und Anwendungsbeispiele gasgelagerter Turbomaschinen im Umfeld miniaturisierter Kryo-Kühler

Fabian Dietmann^{1*}, Patrik Fröhlich¹, Martin Bartholet¹

¹ Celeroton AG, Industriestrasse 22, 8604 Volketswil, Schweiz
info@celeroton.com

Die Notwendigkeit für kryogene Betriebsstoffe erlebt durch die Energiewende und technologische Entwicklungsschritte im Space- und Forschungs-Bereich einen starken Aufschwung. In der Verflüssigungstechnik sind neben Grossanlagen gerade auch dezentrale Optionen mit kleinen Anlagen ein wichtiger Entwicklungstrend. Sei es zur lokalen Produktion von flüssigem Wasserstoff für Tankstellen oder als Energiespeicher zur Netzstabilisierung, zur Kühlung von Quanten-Computern, optischen Apparaturen sowie supraleitender Kabel und Magnete, oder zur Wiederverflüssigung der Verdampfungsgase kryogener Tanks.

Dabei wird oft ein „Reverse Brayton-Prozess“ eingesetzt. Dieser zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Effizienz und einen damit tiefen Energieverbrauch zur Erzeugung der notwendigen Kälteleistung aus. Innerhalb des Reverse Brayton-Prozesses wird ein Gas, oft Helium oder Neon im Kreis gepumpt. Der Wärme-Eintrag und -Austrag erfolgt über diverse Wärmeübertrager. Die eigentliche Kälte wird in einem Expander generiert, indem Energie aus dem Gas entzogen wird.

In diesem Paper werden die kritischen Auslegungskriterien für gasgelagerte Turbomaschinen (Kompressor und Expander) als Kernelemente dieses Prozesses diskutiert. Gasgelagerte Turbomaschinen zeichnen sich besonders durch hohe Effizienz, Wartungsfreiheit, lange Lebensdauer und einen vibrationsfreien Betrieb aus. Letzteres ist besonders zur Kühlung von optischen Instrumenten relevant. Das Paper beginnt mit einer Einführung in die Entwicklungs-Anforderungen, die Technologie und die kritischen Auslegungskriterien. Vorgestellt werden zudem die Vor- und Nachteile ölfreier, gasgelagerter Turbokompressoren im Bereich Kryo-Kühler und Kryo-Fans. Nachfolgend liegt ein besonderer Fokus auf der Darstellung von Messergebnissen bei Betrieb der Systeme bei kryogenen Temperaturen. Abschliessend werden weitere Messergebnisse zu Mikrovibrationen dargestellt. Das Paper schliesst mit einem Ausblick der Gaslager-Technologie in weitere Marktbereiche.

Stichwörter:

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

1.14

Entwicklungsergebnisse für eine kryogene Kolbenpumpe

**Ulrich Zerweck-Trogisch*, Gunar Schroeder, Frank Schoepe,
Thomas Jande, Steffen Rackow, Steffen Richter, Andreas Kade**

Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
ulrich.zerweck@ilkdresden.de

Es wird die Entwicklung einer zweistufigen, systemintegrierten kryogenen Kolbenhochdruckpumpe speziell für flüssiges Helium und für flüssigen Wasserstoff vorgestellt. Die beiden Pumpenstufen sind dabei mechanisch miteinander gekoppelt und arbeiten synchron, so dass die erste Stufe eine Vorverdichtung des zu fördernden Mediums bei einer geringen Druckerhöhung zwecks Unterkühlung und damit Siedeblassen-Vermeidung durchführt und die eigentliche Hochdruckkompression in der zweiten Stufe stattfindet. Wesentliche technische Parameter sind dabei insbesondere ein Auslassdruck von 40 bar und ein Volumenstrom von 3 Litern pro Minute. Zudem wird die Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines Verschleiß- und Konzeptprüfstands beschrieben, welcher eine vereinfachte experimentelle Überprüfung verschiedener Konzepte derartiger Pumpen und verschiedener Dichtungstypen (sowohl hinsichtlich des Materials als auch hinsichtlich der Geometrie) sowie die Vermessung von deren Verschleiß ermöglicht. Aufgrund der beengten geometrischen Verhältnisse mussten besondere konstruktive Lösungen wie beispielsweise im Zylinder integrierte Ansaugventile und eine verwinkelte Fluidführung durch ineinandergreifende Bohrungen und Fräsungen angewendet werden. Die Auslegung wird durch Erprobungsmessungen weitgehend bestätigt.

Stichwörter:

Förderpumpe, Hochdruck, Helium, Wasserstoff, Stickstoff

1.15

SI-rückführbare Durchflussmessung von kryogenen Flüssigkeiten

Daniel Schumann, Hans-Benjamin Böckler,

Fachbereich 1.4 „Gase“,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

daniel.schumann@ptb.de, hans-benjamin.boeckler@ptb.de,

Christian Günz,

Fachbereich 7.43 Kryo- und Primärthermometrie,

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Abbestraße 2, 10587 Berlin

Christian.günz@ptb.de

Im Rahmen des EMPIR-Projekts „MetHyInfra“ wurde ein Verfahren zur SI-rückführbaren Bestimmung des Massenstroms kryogener Flüssigkeiten experimentell untersucht. Ziel war die Entwicklung und Validierung eines Kalibrierverfahrens – der sogenannten *Vaporisationsmethode* – zur präzisen Durchflussmessung insbesondere von verflüssigtem Wasserstoff mithilfe eines Coriolis-Massenstromsensors. Aufgrund sicherheitsrelevanter Beschränkungen kamen in den durchgeführten Versuchen alternativ flüssiger Stickstoff (LN₂) sowie flüssiges Helium (LHe) als kryogene Testmedien zum Einsatz.

Ein kommerziell erhältlicher Coriolis-Durchflussmesser wurde zunächst unter Normbedingungen mit Luft und Wasser kalibriert und anschließend in eine speziell konzipierte Vaporisationsapparatur integriert. Das durch den Sensor strömende kryogene Fluid wurde nach dem Durchflussmesser in einem Wärmetauscher vollständig verdampft. Der resultierende Gasstrom wurde nachfolgend mittels SI-rückführbarer laminarer Durchflusselemente (LFE), die zuvor an den Prüfständen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) charakterisiert wurden, messtechnisch erfasst.

Die Ergebnisse belegen prinzipiell die Eignung der Vaporisationsmethode zur Rückführung kryogener Massenströme auf das Internationale Einheitensystem (SI), wobei insbesondere für flüssigen Stickstoff eine hinreichende Messgenauigkeit erreicht werden konnte.

1.16

Kryostat für die Darstellung und Weitergabe der internationalen Temperaturskala von 0,65 K bis 273 K und weitere Anwendungen

Christof Gaiser, Bernd Fellmuth, Christian Günz

Arbeitsgruppe Kryo- und Primärthermometrie, PTB Berlin, 10587 Berlin

Christof.gaiser@ptb.de

An der PTB wird momentan ein weltweit einzigartiger Kryostat getestet, der einen kontinuierlichen Betrieb von 0,5 K bis 300 K erlaubt. Dieser Kryostat sichert deutschlandweit die Darstellung und Weitergabe der Internationalen Temperaturskala von 1990 (ITS-90) im Bereich von 0,65 K bis 273 K ab. Darüber hinaus bietet dieser Kryostat die Möglichkeit in Zukunft direkte Messungen der thermodynamischen Temperatur durchzuführen, die seit der Neudefinition der Einheit Kelvin im Jahr 2019 eine erlaubte Alternative zur ITS-90 darstellen. Der Beitrag gibt eine kurze Einführung in die Internationale Temperaturskala, thermodynamische Temperaturmessung und die Auswirkungen der Neudefinition und beschreibt den Aufbau und die Messmöglichkeiten des neuen Kryostaten. Im Ausblick werden Projekte der nächsten Jahre im Rahmen der Wasserstoffforschung in der Arbeitsgruppe vorgestellt.

1.17

Löslichkeit von Wasserstoff in Flüssighelium – Messprojekt und Orientierungsexperiment

Julian Will¹, Christoph Haberstroh¹

¹ Technische Universität Dresden,

Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,

01062 Dresden, Deutschland

julian.will@tu-dresden.de

Wasserstoffkontaminationen in Flüssighelium sind nunmehr seit etlichen Jahren als Problem bekannt. Als Quelle konnten von den Autoren bereits vor Längerem bestimmte industrielle Heliumgewinnungsanlagen im Mittelmeerraum identifiziert werden. Mittlerweile lassen sich Wasserstoffkontaminationen bereits bei einer Vielzahl von lokalen Heliumanlagen nachweisen, bei welchen diese Verunreinigungen offensichtlich über Heliumnachlieferungen eingeschleppt wurden und dort z.T. weiter akkumulieren. Nicht selten resultiert das in erheblichen Betriebsstörungen bei den betroffenen Universitäten oder Forschungszentren: Etwa in Form regelmäßiger Verblockungen bei Helium-Durchflussskryostaten oder an Drosselstellen von gepumpten Systemen.

Die Löslichkeit von Wasserstoff in Flüssighelium ist sehr gering, der genaue Wert noch unbekannt. Es ist davon auszugehen, dass noch andere Effekte eine Rolle spielen.

Das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt *HyLiqHe* hat unter anderem zum Ziel, dies näher zu untersuchen. Entsprechende Messaufbauten und Messungen sind in Vorbereitung. Eine besondere Herausforderung stellt dabei, neben der verlässlichen Quantifizierung von Wasserstoff im ppb-Spurenbereich (parts per billion), die Unterscheidung zwischen Dispersion und Lösung dar.

Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse eines vorangestellten Orientierungsexperiments vorgestellt. Ziel war es, einen ungefähren Wert für die Löslichkeitsgrenze zu erlangen. Eine Standard-Labor Dewarkanne wurde absichtlich mit einer vergleichsweise großen Menge an Wasserstoff kontaminiert, sodann mittels Gaschromato

graphie an verschiedenen Stellen innerhalb des Heliumreservoirs beprobt. Es konnten Agglomerationen von festem, ausgefallenen Wasserstoff an der Phasengrenze nachgewiesen werden, überdies hohe Kontaminationswerte im tiefkalten Bereich der Gasphase. In der Flüssigkeit wurden reproduzierbar Werte etwas unterhalb von 100 ppb bestimmt. Die Ergebnisse werden diskutiert; sie unterstützen die bestehenden Hypothesen zum Kontaminationsverhalten.

Stichwörter:

Flüssighelium, Wasserstoffkontamination, Wasserstoffspuren, Wasserstofflöslichkeit, Durchflussskryostat

1.18

Charge control of transcritical R784 ULT systems

Lukas Köster^{1*}, Armin Hafner¹, Bart Verlaet², Krzysztof Banasiak³, Luca Contiero^{1,2}, Paolo Petagna²

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

²European Organization for Nuclear Research, Geneva, 1211, Switzerland

³SINTEF Energy Research, Sem Sælands vei 11, 7465 Trondheim, Norwegen

lukas.koester@ntnu.no

Future particle detectors at CERN will be subject to challenging working conditions in terms of operating temperature (-50°C to -80°C and lower) and resistance to radiation (ionising doses cumulated in 10 years of operation up to 10 MGy). Therefore, the cooling system must be suitable for the required temperature range while operating in heavily irradiated environments. Within previous studies, R784 (krypton) has been identified as a suitable refrigerant. The combination of the thermophysical properties of krypton, the changes in temperature and pressure level and the partial change from a one-phase to a two-phase state require a charge control system. This study examines potential working principles and concepts of such a charge control system and discusses their practical implications and foreseen challenges.

Keywords:

R784, ultra-low temperature, oil free compressor, Krypton, compressor

1.19

Magnetokalorische Verflüssigung von Wasserstoff

Aufbau eines Demonstrators am Hochfeldlabor Dresden

Thomas Platte^{1*}, Tino Gottschall²

¹Magnotherm Solutions GmbH, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Deutschland

platte@magnotherm.com

²HZDR e.V., Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden, Deutschland

t.gottschall@hzdr.de

Deutschland hat sich eine Klimaneutralität bis 2045 zum Ziel gesetzt. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, werden alternative Kraftstoffe, wie z.B. Power-to-X Produkte oder Wasserstoffderivate benötigt. Dies ist insbesondere für Anwendungen von Bedeutung, welche nicht elektrifiziert werden können und welche eine sehr hohe Energiedichte benötigen. Flüssiger Wasserstoff kann dafür eine zentrale Rolle spielen, da er herkömmliche Kraftstoffe nicht nur ersetzt, sondern ein besseres Energie zu Masse Verhältnis als alle vergleichbaren Produkte aufweist.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz von flüssigem Wasserstoff muss jedoch die Verfügbarkeit stark erhöht werden und der Erzeugungspreis sinken. Um diese Ziele zu erreichen haben sich die Projektpartner MAGNOTHERM Solutions GmbH und das Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf entschlossen einen Demonstrator zur magnetischen Kühlung im Tieftemperaturbereich aufzubauen. Dieser soll zeigen, dass eine Verflüssigung mittels magnetokalorischen Effekts machbar und wirtschaftlich sinnvoll ist. Dazu wurde ein erster Versuchsaufbau in Betrieb genommen. Dieser arbeitet mit einer Masse von 1 kg an magnetokalorischem Material und stellt somit einen der größten magnetokalorischen Aufbauten im Tieftemperaturbereich weltweit dar. Im Artikel werden die Ergebnisse der erzeugten Temperaturspanne und Kühlleistung gezeigt. Diese werden insbesondere im Hinblick auf eine zukünftige Produktentwicklung diskutiert.

Stichwörter:

Magnetokalorik, Wasserstoff, Verflüssigung

1.20

Konzeptionelles Design eines He-II Versorgungskryostaten für die experimentelle Untersuchung kryogener Spiegelaufhängungen in Gravitationswellendetektoren

Timo Weckerle^{1*}, Steffen Grohmann^{1,2}

¹ Karlsruher Ins,tut für Technologie (KIT), Ins,tut für Beschleunigerphysik und Technologie (IBPT),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland
timo.weckerle@kit.edu

² Karlsruher Ins,tut für Technologie (KIT), Ins,tut für Technische Thermodynamik und Kältetechnik (ITTK),
Engler-Bunte-Ring 21, 76131 Karlsruhe, Deutschland
steffen.grohmann@kit.edu

Im Rahmen des ERC-Projekts GRAVITHELIUM sollen kryogene Spiegelaufhängungen für die optischen Elemente in Gravitationsdetektoren in vollem Maßstab auf ihre mechanischen Dissipationseigenschaften untersucht werden. Hierfür sollen neben monokristallinen Aufhängungen auch mit superfluidem Helium (He-II) gefüllte doppelwandige Titanrohre vermessen und ihre Tauglichkeit für das Einstein-Teleskop untersucht werden. Zusätzlich soll der noch unbekannte fundamentale Rauschbeitrag von statischem He-II zur mechanischen Dissipation in einem Schwingssystem charakterisiert werden. Für GRAVITHELIUM wird deshalb ein He-II Versorgungskryostat auf Labormaßstab benötigt, welcher eine Kälteleistung von 400 mW bei 1.8 K über eine ca. 5 m lange Transferleitung bereitstellen kann. Das vorgestellte Konzept, das einen speziell entwickelten, neuartigen Wärmeübertrager einsetzt, verspricht eine signifikante Steigerung der Systemleistung im Vergleich zu kompakten kommerziellen He-II Verflüssigern. Zusätzlich erlauben ein überkritischer Heliumstrom und ein warmer Bypass eine schnelle, kontrollierbare Abkühlung des Kryostaten, der Transferleitung und des Experiments.

1.21

Strahltechnikentwicklung mit wassereisbasierten Strahlmitteln

Martin Klupsch, Matthias Schneider*, Gunar Schroeder, Frank Schoepe, Erik Selbmann[#], Andreas Kade

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

[#] Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU, Pforzheimer Straße 7a, 01189 Dresden
matthias.schneider@ilkdresden.de

Im Verbundvorhaben SHOWS wird eine robotergeführte Strahleinheit für das Präzisionsstrahlspannen mit Druckluft und wassereisbasierten Strahlmitteln entwickelt. Projektpartner des ILK Dresden sind das Fraunhofer-Institut IWU Dresden, die KF Strahltechnik Dresden GmbH und die A. Richter Kälte- und Klimatechnik Plauen. Die

Nutzung der speziellen Eisphysik und hohen Härte der Eispartikel bei $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermöglicht eine abrasive Oberflächenbearbeitung. Das Projektziel besteht dabei in der Realisierung eines nachhaltigen, kontaminationsfreien Prozesses für medizinische und industrielle Anwendungen. Durch den Einsatz einer Luftkältemaschine zur Erzeugung tiefer Temperaturen entfällt die Nutzung umweltschädlicher Kühlmittel. So können beispielsweise Implantatoberflächen nachhaltig strukturiert werden, ohne Rückstände des Strahlguts auf der Oberfläche zu hinterlassen. Schwerpunkte dieses Beitrags sind die Entwicklung des Eisspeichers auf Basis numerischer Simulationen für den Transport des Wasser-/Wassereis-/Luftgemischs, seine konstruktive Gestaltung und die gegenständliche Umsetzung als Teil der Gesamtanlage. Die mehrkomponentige Strömung weist neben dem Phasenübergang flüssig/fest stark variierende Werte für die Dichte der Komponenten und zudem einen weiten Temperaturbereich auf, was im Modell erfasst und im Anlagendesign berücksichtigt wird.

Stichwörter:

Oberflächenbearbeitung, Kältemaschine, Wassereis, Strömungssimulation

1.22

Nukleationsstudie an Racks für das Controlled Rate Freezing von Multiwellplatten

Holger Reinsch, René Kretschmer*, Ronald Miksche, Andreas Kade

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

rene.kretschmer@ilkdresden.de

Die kontrollierte Einfrierung hoher Probenzahlen in der Multiwell- und Mikroplatte erfordert nicht nur einen einheitlichen Wärmeartrag auf allen Probenpositionen, sondern auch einen einheitlichen Start des Gefrierprozesses in allen Kavitäten der Probenplatte. Voraussetzung dafür ist das zeitgleiche Auslösen der Eisbildung mit geeigneten technischen Mitteln, ein Prozess der auch als Seeding bezeichnet wird. Nur ein synchroner Start des Gefrierprozesses ermöglicht eine identische Abkühlung aller Proben mit der gewünschten Gefriertrate. In der Kryobiologie sind verschiedene Seedingverfahren, wie zum Beispiel das Kontaktseeding mit einer kalten Nadel bekannt. Das ILK MultiRACK, welches für die Kryokonservierung von Wellplatten in computergesteuerten Kammereinfriergeräten mit LN₂-Kühlung entwickelt wurde, synchronisiert die Eisbildung in den Kavitäten der Wellplatte kontaktfrei mit Hilfe leistungsstarker Vibrationsmotoren. Im Rahmen der vorgestellten Nukleationsstudie soll das Seedingverfahren auf einen neu entwickelten Pocket Freezer übertragen werden, welcher das Controlled Rate Freezing hoher Probenzahlen mit programmierbaren Kühl- und Heizraten von bis zu 20 K/min in einer handelsüblichen Laborgefriertruhe erlaubt.

Stichwörter:

Nukleation, Multiwellplatte, Multiwellfreezing, Eisbildung

2.01

Kältemittelbenetzung durch induziertes Blasensieden

Konzept eines Wasserverdampfers für Sorptionskälteanlagen und experimentelle Ergebnisse

Simon Boda^{1*}, Gerrit Földner¹, Alexander Warlo¹, Lena Schnabel¹

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
simon.boda@ise.fraunhofer.de

Wasser findet als Kältemittel häufig Verwendung in Sorptionskälteanlagen. Es bietet aufgrund seiner hohen Verdampfungsenthalpie und Umweltfreundlichkeit viele Vorteile, jedoch stellen seine physikalischen Eigenschaften auch Herausforderungen dar, besonders bei der Umsetzung der Verdampfer. Der niedrige Sättigungsdampfdruck und die geringe Dampfdichte machen großvolumige und vakuumdichte Komponenten notwendig. Zudem sind Verdampfungsformen wie das Strömungssieden aufgrund der erforderlichen niedrigen Grädigkeiten ausgeschlossen. Um das Potential des Kältemittels Wasser sowohl für die Entwicklung von Kompressionskälteanlagen als auch für thermisch angetriebene Ad- und Absorptionskälteanlagen auszuschöpfen, befasst sich das Fraunhofer ISE im vom BMWK geförderten Projekt H2OSplash mit der Untersuchung eines neuartigen Konzepts für die Kältemittelverteilung in einem Wasserverdampfer.

Die Verdampfung über dünn benetzte Wärmeübertrageroberflächen (z. B. Rieselfilmverdampfer) stellt eine bewährte Methode in Kälteanlagen mit dem Kältemittel Wasser dar. Im hier vorgestellten „Splash-Verdampfer“ wird der zu verdampfende Dünnsfilm jedoch nicht durch Hilfskomponenten, wie etwa eine Berieselungspumpe und ein Aufgabesystem erzeugt, sondern durch gezielte lokale thermische Aktivierung im Kältemittel-Pool. Die dadurch lokal erzeugten Dampfblasen verdrängen das Kältemittel und verspritzen dieses auf den Wärmeübertrageroberflächen. Ein Labormuster eines solchen Splash-Verdampfers mit Blasenerzeugung über elektrische Widerstandsheizelemente wird gezeigt und die experimentellen Ergebnisse (Verdampfungsleistung, optische Untersuchung der Benetzung) werden vorgestellt. Die Ergebnisse werden mit herkömmlichen Bautypen, wie etwa dem Rieselfilmverdampfer und dem kapillargestützten teilgefluteten Poolverdampfer verglichen. Zukünftig könnte das Splashing-Konzept in Rieselfilmverdampfern integriert werden, um die Benetzung der Rohrbündel zu verbessern.

Schlüsselwörter:

Wasser, Kältemittel, Sorptionskälteanlage, Verdampfer, Oberflächenbenetzung, lokales Blasensieden, Vermesung

2.02

Magnetische Kühlung

Einsatzmöglichkeiten in der gewerblichen Kühlung und darüber hinaus

Hendrik Gillert

¹ Magnotherm Solutions GmbH, Pfungstädter Straße 102, 64297 Darmstadt, Deutschland
gillert@magnotherm.com

Die Kältebranche befindet aufgrund u. a. der F-Gase-Verordnung sowie Diskussionen über ein mögliches PFAS-Verbot in einem starken Wandel. Natürliche Kältemittel bieten hier zukunftsfähige Lösungen, haben allerdings teilweise Nachteile, wie etwa Brennbarkeit. Die magnetische Kühlung ermöglicht demgegenüber einen Baustein im Bereich der Kältemittel frei von F-Gasen sowie frei von PFAS freisetzenden Kältemitteln und dabei ohne die bekannten Gefahrenpotenziale anderer natürlicher Kältemittel.

Die MAGNOTHERM Solutions GmbH entwickelt Kältesysteme ganz ohne klassische Kältemittel. Anstatt eines Kompressors nutzt sie das Prinzip der Magnetokalorik. Vorgestellt wird der Prozess des magnetokalorischen Effekts, bei dem der Kühleffekt durch Magnetisierung und Entmagnetisierung erreicht wird, sowie die Umsetzung als Kältesystem. Einen wesentlichen Bestandteil der Entwicklung stellen dabei die unterschiedlichen magnetokalorischen Materialien dar.

Erläutert werden ferner die Vorteile der Technologie sowie aktuelle und zukünftige Grenzen. Potenziale ergeben sich hierbei insbesondere aus dem Verzicht auf Kältemittel, der Kreislauffähigkeit und ein Potenzial für höhere Energieeffizienz als bei klassischer Kompressionskälte.

Die erste Produktgeneration wurde insbesondere für den Einsatz in Kühlmöbeln entwickelt. Dargestellt werden darüber hinaus zukünftige Einsatzmöglichkeiten mit größerer Kälteleistung und erweiterten Temperaturfenster für weitere Applikationen.

Stichwörter:

Magnetokalorik, Natürliche Kältemittel, Gewerbliche Kühlung, IT-Kühlung, Industriekühlung, Raumkühlung

2.03

Absorptionstechnologien in der Tiefengeothermie –

Inbetriebnahme und erste Ergebnisse des Prüfstandes GeoREACH

Ludwig Irrgang^{1*}, Hartmut Spliethoff¹, Christopher Schifflechner¹

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 hat eine sehr hohe Verfügbarkeit. Dabei trifft die konstante Wärmebereitstellung auf schwankende Wärmenachfrage was Überschusswärme im Sommer und die Nutzung zusätzlicher Wärmequellen im Winter zur Folge hat. Dieser Problematik kann mithilfe von Absorptionstechnologien Abhilfe geschaffen werden. Absorptionskältemaschinen erlauben die Nutzung von überschüssiger Geothermiewärme zur Kältebereitstellung im Sommer. Absorptionswärmepumpen und –transformatoren erhöhen die Wärmebereitstellung aus der Geothermie im Winter. Eine Anlage, die diese beiden Nutzungsmöglichkeiten verbindet, kann ganzjährig genutzt werden und bietet eine flexible Infrastruktur für ein sich änderndes Energiesystem. Die Versuchsanlage „GeoReACH“ demonstriert einen entsprechenden Betrieb für die Rahmenbedingungen der Geothermie. Ein Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Kompromiss aus Leistungsfähigkeit der Anlage und Auskühlung der Geothermiequelle abhängig von der Desorbtemperatur. Mithilfe der Ergebnisse kann ein Einsatz dieser Anlagen für verschiedene Geothermiestandorte anhand der vorherrschenden Rahmenbedingungen bewertet werden. In dieser Arbeit werden die Inbetriebnahme sowie die ersten Ergebnisse der Untersuchung im Hinblick auf die geothermischen Rahmenbedingungen gezeigt. Neben technischen Aspekten der Anlage steht dabei vor Allem die Betriebsstrategie im Fokus.

Stichwörter:

Absorptionskältemaschine, Absorptionswärmepumpe, Geothermie, Sektorenkopplung

2.04

Konzept zur Erhöhung der Energiedichte von thermochemischen Speichern

Dorian Höffner^{1*}, Stefan Elbel¹

¹Technische Universität Berlin, Fachgebiet für Wärmeübertragung und -wandlung,
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Berlin

In dieser Arbeit wird ein innovatives Konzept für thermische Absorptionswärmespeicher mit erhöhter Energiedichte vorgestellt. Die erreichbare Energiedichte ist maßgeblich von technischen Randbedingungen wie Temperaturniveaus und Stoffeigenschaften der eingesetzten Arbeitsmittel abhängig. Zwei zentrale Ansätze zur Steigerung der Energiedichte werden verfolgt: die Erhöhung der Konzentrationsdifferenz durch Überschreiten der Kristallisationsgrenze sowie die Minimierung des Systemvolumens durch einen geschichteten Tankaufbau. Der entwickelte Speicher besteht aus mehreren Zonen, die lediglich durch ihre Dichteunterschiede getrennt werden: Salzkristalle, hochkonzentrierte Lösung, niedrigkonzentrierte Lösung, und Wasser. Diese Schichtung bedarf einer gezielten Anordnung von Ein- und Auslässen, da sich die Flüssigkeitsspiegel je nach Beladungszustand signifikant verschieben. Technische Herausforderungen wie die Kristallabscheidung, die Verhinderung möglicher Blockaden durch ungewollte Kristallisation, und der diffusive und konvektive Stofftransport zwischen den Schichten werden systematisch analysiert und Lösungsansätze diskutiert. Zur Bewertung des Konzepts wird die theoretische Self-Discharge-Rate, sowie eine Szenarioanalyse zur Materialeinsparung durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination der Lösungskonzepte zu einer erheblichen Kosten- und Platzeinsparung führt, wenn die dargestellten technischen Herausforderungen gelöst werden können.

2.05

Hybrid air conditioning with absorption cooling

Simulation of coupled absorption dehumidification–vapor compression systems

Christian Thoms-Meyer*, Jannik Iwersen, Thomas Meyer, Stefan Elbel

Technical University of Berlin, Institute of Energy Engineering, Chair for Heat transfer and heat conversion,
Secretary KT 2, Marchstraße 18, 10587 Berlin, Germany
c.thoms-meyer@tu-berlin.de

The global rise in air conditioning demand calls for technologies that drastically reduce electrical energy consumption. Hybrid cooling systems based on Separate Sensible and Latent Cooling (SSLC) offer a promising solution by independently managing temperature and humidity, thereby improving indoor comfort and system performance. This study presents a simulation model that couples a conventional vapor compression system with an NTU-based open absorption dehumidification model developed by [1]. The dehumidification process employs ionic liquids—promising working fluids due to their low melting points and compatibility with stainless steel or aluminium. Prior work showed potential electrical energy savings of up to 80 % in warm, humid climates using thermally driven dehumidification [2]. The coupled model quantifies impacts on key performance indicators such as compressor load and overall (electrical) energy demand. Simulations across varying ambient conditions illustrate the operational benefits and limitations as well as control strategies of the hybrid configuration, supporting system design for next-generation energy-efficient cooling.

Keywords:

Air conditioning, hybrid cooling, separate sensible and latent cooling (SSLC), electrical energy savings, NTU-based model, absorption dehumidification, ionic liquids

References

- [1] T. Meyer, "NTU-Model for Describing the Coupled Heat and Mass Transfer in Open Absorption Dehumidification Systems", in *proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference*, Cape Town, South Africa, Aug. 14–18, 2023.
- [2] T. Meyer and C. Ricart, "Reduction of the Electricity Consumption of a Compression Refrigeration System for Air Conditioning by a Preceding Thermally Driven Absorptive Air Dehumidification System", in *Proceedings of the 26th International Congress of Refrigeration*, Paris, France, Aug. 21–25, 2023.

2.06

Partiell kristallisierender Absorptionskältespeicher

Aufbau und experimentelle Untersuchung einer 100-kWh-Laboranlage

Dieter Preßl^{1*}, Michael Radspieler¹, Tobias Schubert¹, Luis Enrique Monleón Oliveros¹, Eberhard Lävemann¹

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

Absorptionskältemaschinen stellen eine nachhaltige Technologie zur Kältebereitstellung dar, wenn sie beispielsweise mit Abwärme aus einem industriellen Prozess angetrieben werden. Hierbei ist es erforderlich, dass Abwärmeaufkommen und Kältebedarf annähernd deckungsgleich sind. Da dies in vielen potenziellen Anwendungsfällen jedoch nicht der Fall ist, kommen Absorptionskältemaschinen trotz des hohen Potenzials an ungenutzter industrieller Abwärme vergleichsweise selten zum Einsatz. Daher untersuchen wir im laufenden Forschungsvorhaben PAKS (BMWK, FKZ 03EN6017) die Möglichkeit, Abwärmeaufkommen und Kältebereitstellung voneinander zu entkoppeln, indem eine H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschine um einen Speichertank zur Bevorratung einer größeren Menge wässriger LiBr-Lösung erweitert wird. Die LiBr-Lösung dient dabei nicht nur als Sorbens, sondern auch als Speichermedium. Absorptions- und Desorptionsprozess können in einem derartigen System unabhängig voneinander ablaufen: Steht Abwärme zur Verfügung, wird ein Teil des enthaltenen Kältemittels aus der Lösung desorbiert und diese dadurch aufkonzentriert. Bei Kältebedarf läuft der Absorptionsprozess ab, wobei die LiBr-Lösung wieder verdünnt wird. Durch eine geeignete Prozessführung kann in der LiBr-Lösung Energie mit hoher Energiespeicherdichte gespeichert werden. Die Energiespeicherdichte korreliert dabei mit der Konzentrationsdifferenz zwischen konzentrierter und verdünnter Lösung. Daher lässt sich die Energiespeicherdichte nochmals deutlich steigern, wenn ein Großteil der Lösung im Speicherprozess zyklisch in Monohydrat mit sehr hoher LiBr-Konzentration umgewandelt und wieder aufgelöst wird. Wir bezeichnen ein derartiges System als partiell kristallisierenden Absorptionskältespeicher. Im laufenden Forschungsprojekt untersuchten wir bereits die einzelnen Teilprozesse des Speicherprozesses. In einem nächsten Schritt bauen wir nun eine experimentelle Laboranlage dieses Speichers in der Größenordnung 20 kW Lade-/Entladeleistung und 100 kWh Speicherkapazität auf, um den Gesamtprozess erstmalig technisch umzusetzen. Die Laboranlage besteht aus einer kommerziellen Absorptionskältemaschine, die um ein im Forschungsvorhaben entwickeltes Speichermodul erweitert wird. Im Rahmen eines Vortrags möchten wir den Aufbau der Laboranlage sowie erste Ergebnisse ihrer experimentellen Untersuchung vorstellen.

Stichwörter:

Absorptionskältemaschine, Absorptionskältespeicher, Energiespeicher, Abwärme, Energieeffizienz

2.07

NH₃/H₂O-Absorptionswärmetransformator

Entwicklung einer Regelstrategie zur Effizienz- und Leistungsoptimierung im stationären Betrieb

Luisa Haak*, Louis Tafelmaier, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiaropoulos

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 Wärme von einem mittleren auf ein höheres Temperaturniveau bei gleichzeitig geringem Strombedarf. Damit stellen sie eine vielversprechende Technologie zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse dar. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts wurde ein Ammoniak/Wasser-AWT mit einer Nutzwärmeleistung von ca. 10 kW aufgebaut und in Betrieb genommen.

Im Fokus dieses Beitrags steht die Entwicklung einer Regelstrategie für den stationären Betrieb des AWT. Zu regelnde Aktoren sind die Kältemittelpumpe, die Lösungsmittelpumpe und das Expansionsventil. Die Drehzahlen der Kältemittel- und Lösungsmittelpumpe werden so geregelt, dass sich konstante Füllstände in den entsprechenden Vorlagebehältern einstellen. Anhand von Messungen wird gezeigt, dass sich der Hochdruck des AWT gezielt über den Öffnungsquerschnitt des elektronischen Expansionsventil beeinflussen lässt. Es wird eine Regelstrategie entwickelt, die sowohl den Betrieb bei konstantem Hochdruck als auch eine Optimierung hinsichtlich maximaler Effizienz oder maximaler Nutzwärmeleistung erlaubt. Hierfür wird ein gradientenbasiertes Verfahren erprobt.

Stichwörter:

Absorption, Wärmetransformator, Ammoniak/Wasser, Regelung

2.08

Performance Enhancement in Absorption Systems by Nanoparticles

Salman Muradi*, Andrea Luke

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

Nanoparticles have attracted increasing attention in recent years due to their outstanding thermophysical properties and potential to enhance heat and mass transfer in various thermal applications, including absorption chillers. However, despite the promising outlook, there is still some criticism persists regarding the enhancement potential of nanoparticles and their practical benefits, owing to the ambiguity of the underlying enhancement mechanisms. In this study, we conducted a comprehensive state-of-the-art review of experimental and numerical studies related to the enhancement of absorption refrigeration systems using nanoparticle additives, aiming to assess their enhancement potential, uncover the underlying mechanisms involved, and identify the challenges hindering their practical implementations. The review reveals that a wide variety of nanoparticles have been examined in both NH₃-H₂O and H₂O- LiBr- falling-film absorption refrigeration systems, ranging from carbon-based materials such as single- and multi-walled carbon nanotubes and carbon black to metals and metal oxides. Interestingly, despite possessing lower thermal conductivity, metallic nanoparticles outperform carbon-based counterparts owing to their relatively good dispersibility in the base fluid. Inconsistencies are observed between the experimental findings for the same category of nanoparticles, likely due to the lack of a standard procedure for nanofluid preparation, stabilization, and testing. Additionally, recent trends indicate that CuO and TiO₂ as most promising candidate for LiBr-H₂O and NH₃-H₂O systems, respectively. To further investigate the

enhancement mechanisms, a cause-effect analysis based on reported findings in literature was performed along with a frequency-of-occurrence analysis to identify the most relevant mechanisms. As a result, several potential mechanisms were identified including micro-convection effects associated with random molecular movement of nanoparticles in the solution, Marangoni convection and the resulting interfacial turbulence, the grazing effect and changes in interfacial properties of the solution. These phenomena are attributed as key contributors to enhancements observed by nanoparticle use. Nevertheless, further research is required on validate these mechanisms (including thermophysical properties, etc.) and the long-term stability issue of nanofluid, which remain as the major obstacle for practical application of nanoparticle in absorption refrigeration systems. First experimental results are represented in a H₂O- LiBr-falling film apparatus.

Keywords:

Falling-film absorption, heat and mass transfer, absorption chiller/heat pump, Brownian motion, Marangoni convection

2.09

Alternative Sorptionsmittel für AWP

Stoffeigenschaften von IL und DES sowie Betriebsverhalten im „gläsernen Demonstrator“

**Michael WERNHART^{1-1*}, René RIEBERER¹⁻¹, Christoph WEINZETTL¹⁻², Marlene KIENBERGER¹⁻²,
Markus DAMM², Roland KALB², Mike OTTO³, Christian KEMMERZEHL³**

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 findet das Arbeitsstoffpaar Wasser/Lithiumbromid (H₂O/LiBr) aufgrund der hohen Verdampfungsenthalpie von Wasser und seiner niedrigen Sättigungsdrücke breite Anwendung. Insbesondere bei hohen Antriebstemperaturen kann jedoch das Sorptionsmittel Lithiumbromid zu Problemen wie Korrosion und Kristallisation führen.

Im Rahmen des Projekts "AbSorbEnt" werden daher alternative Sorptionsmittel wie ionische Flüssigkeiten (IL) und stark eutektische Lösungsmittel (DES) entwickelt. Ihr Einsatz in Absorptionswärmepumpen wird bei Temperaturen der Wasser/Sorptionsmittel-Gemische zwischen 30 °C und 200 °C bzw. bei Drücken zwischen 10 mbar und 1,4 bar analysiert und bewertet.

In diesem Konferenzbeitrag werden experimentell ermittelte Stoffeigenschaften (z. B. thermische Stabilität, Korrosionsverhalten, Lösungswärme, spezifische Wärmekapazität, Kontaktwinkel) der Stoffpaarungen H₂O/1-Ethyl-3-methylimidazolium-Methansulfonat (H₂O/[EMIM][MeSO₃]) und H₂O/[Betain:Glycerol] analysiert. Außerdem werden die thermodynamischen und fluiddynamischen Eigenschaften von H₂O/[EMIM][MeSO₃] im geschlossenen Absorptionswärmepump-Prozess eines „gläsernen Demonstrators“ bewertet. In beiden Fällen dient H₂O/LiBr als Benchmark.

Stichwörter:

Stark eutektische Lösungsmittel, Ionische Flüssigkeiten, Lithiumbromid, Absorptionswärmepumpen

2.10

Auslegung Niederdruckseite einer Luft-Wasser-Wärmepumpe

Experimentelle Untersuchung zu IHX, Druckabfall, Lamellenabstand und Füllmenge mit dem Kältemittel Propan

Raffaella Menet*, Michael Uhlmann, Leon P. M. Brendel, Stefan S. Bertsch

OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme,
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs SG, Schweiz
raffaella.menet@ost.ch

Die Effizienz von Luft-Wasser-Wärmepumpen wird massgeblich durch die Auslegung der gesamten Niederdruckseite, bestehend aus Lamellenverdampfer, internem Wärmeübertrager (IHX) und Saugleitung, beeinflusst. In dieser Studie wurde untersucht, wie sich der Einsatz eines IHXs auf die Verdampfungstemperatur und den COP einer 20 kW-Wärmepumpe mit Propan als Kältemittel auswirkt. Die experimentellen Untersuchungen wurden in einer Klimakammer unter variierenden Quellentemperaturen (-10 °C bis $+12\text{ °C}$) und Lastzuständen durchgeführt. Basismessungen ohne IHX als Referenz wurden ebenfalls durchgeführt. Mit IHX konnte die Verdampfungstemperatur im Volllastbetrieb um bis zu 1.7 K gesteigert werden, jedoch stieg der Saugdruck wegen des Druckverlustes des IHXs effektiv nicht an. Im Teillastbetrieb waren die Druckverluste vernachlässigbar und es konnten Anstiege der Sättigungstemperaturen des Sauggases von bis zu 1.8K gemessen werden. Zusätzlich wurde das Vereisungsverhalten bei unterschiedlichen Lamellenabständen untersucht. Beim getesteten Abstand von 2.5 mm sank die Heizleistung über 170 Minuten um 1.5 %. Weitere Messreihen mit 2.3 mm und 2.0 mm Lamellenabstand sollen Aufschluss über das Potenzial zur Effizienzsteigerung und die Grenzen durch Vereisung geben. Darüber hinaus wurde untersucht, wie sich die Massnahmen auf die Kältemittelfüllmenge auswirken, da dies insbesondere bei brennbaren Kältemitteln wie Propan ein sicherheitsrelevanter Aspekt ist.

Stichwörter:

Verdampfungstemperatur, Verdampfer, Luft-Wasser-Wärmetauscher, Wärmepumpe, Lamellenwärmetauscher

2.11

Verdampfungsverhalten von Methanol in Minikanälen

Patrick Koschel^{1*}, Markus Schönheit², Mario Raddatz², Yixia Xu¹, Christiane Thomas¹

¹ Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
patrick.koschel@tu-dresden.de

² Technische Universität Dresden, Professur für thermische Energiemaschinen und-Anlagen,
01062 Dresden, Deutschland
markus.schoenheit@tu-dresden.de

Neben der Kühlung von PEM-Brennstoffzellensystemen gewinnt auch das Thermal Management von PEM-Elektrolyseuren zunehmend an Bedeutung. In beiden Fällen stellt die Abfuhr größerer Wärmeströme eine Herausforderung dar. Derzeit kommt für die genannten Anwendungen vorwiegend eine einphasige Kühlung mit einem Wasser-Glykol-Gemisch zum Einsatz. Im Gegensatz dazu kann durch eine Zweiphasenkühlung die größere latente Wärme genutzt werden, wodurch sich der benötigte Massenstrom reduzieren lässt und ein geringeres Gesamtgewicht des Systems erzielt werden kann. Besonders Methanol eignet sich aufgrund seiner hohen Verdampfungsenthalpie und der günstigen Lage der Dampfdruckkurve für den Einsatz in Brennstoffzellen- und

Elektrolyseursystemen. Die bestehenden Wärmeübergangskorrelationen stoßen jedoch bei den typischerweise sehr geringen Wärme- und Massenstromdichten in Minikanälen an ihre Grenzen.

Zur experimentellen Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten bei der Verdampfung von Methanol in Minikanälen wurde ein Prüfstand aufgebaut. Die ermittelten Werte werden mit etablierten Korrelationen aus der Literatur verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse und Korrelationen ermöglichen eine zuverlässigere Auslegung zukünftiger Zweiphasenkühlsysteme und Wärmeübertrager, welche auch in den Bereichen der Hochtemperaturwärmepumpen sowie in Wärmepumpen für Fernwärmenetze integriert werden können.

Stichwörter:

Zweiphasenkühlung, Brennstoffzellenkühlung, Verdampfungskorrelation, Methanol, Minikanal-Wärmeübertrager

2.12

NH₃-Sprühverdampfung in Rohrbündeln mit Hochleistungsrohren

Forschungsbedarf, Prüfstandkonzeption und Inbetriebnahme

Louis Tafelmaier*, Luisa Haak, Johannes Brunder, Konstantinos Stergiaropoulos

¹ Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 10, 70569 Stuttgart, Deutschland
louis.tafelmaier@igte.uni-stuttgart.de

Großwärmepumpen mit Leistungen im Megawattbereich gelten als vielversprechende Technologie für Industrie- und Fernwärmeanwendungen auf dem Weg der Transformation in Richtung Klimaneutralität. Aufgrund von Vorgaben wie der F-Gase-Verordnung und eines möglichen PFAS-Verbots gelten ausschließlich natürliche Kältemittel wie Ammoniak als sicher zukunftsfähig. Ammoniak weist sehr gute thermodynamische Eigenschaften auf. Werden bestimmte Füllmengen überschritten greifen zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen (z. B. TRAS 110), was eine Reduktion der Füllmenge nahelegt. An dieser Stelle setzt das Prinzip der Sprühverdampfung in einem Rohrbündel an. Die Verteilung des Kältemittels durch im Mantelraum platzierte Sprühdüsen ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der Füllmenge im Vergleich zu einem gefluteten Betrieb und steigert gleichzeitig die Leistungsfähigkeit des Wärmeübertragers. Die Einflussgrößen der Sprühverdampfung sind vielfältig und reichen nach den in der Literatur publizierten Erkenntnissen von den Betriebsrandbedingungen über geometrische Eigenschaften des Bündels bis hin zu spezifischen Einflüssen des Sprühsystems. In der Literatur lässt sich eine klare Forschungslücke im Bereich der Vorhersage des mantelseitigen Wärmeübergangs sowie der Auswirkung strukturierter Oberflächen auf den Prozess identifizieren.

Das hier vorgestellte Projekt HoVAG (**H**ochleistungsrohre für die **V**erdampfung von **A**mmoniak in **G**roßwärmepumpen) wird in Zusammenarbeit mit der Wieland-Werke AG durchgeführt und im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms unter dem Förderkennzeichen 03EN4095A gefördert. Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung spezialisierten Hochleistungsrohre für die Sprühverdampfung von Ammoniak und eine Entwicklung von Korrelationen zur Vorhersage des mantelseitigen Wärmeübergangs in Rohrbündeln. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen sollen unter anderem Einflüsse der Wärmestromdichte, Sättigungstemperatur, Oberflächenstrukturierung, Passanordnung, Düsenpositionierung und Rezirkulationsrate untersucht werden. Dieser Beitrag bietet einen Überblick über die Grundlagen und den aktuellen Stand der Forschung, stellt die Konzeption des Prüfstands aufbau vor und präsentiert erste experimentelle Ergebnisse des Projekts.

Stichwörter:

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

2.13

Eisbrecher für Verdampfer: Auslegung und Regelung im Hinblick auf Reifbildung

Moritz Beckschulte^{1*}, Niclas Kalter¹, Jonas Klauke¹, Christian Vering¹, Dirk Müller¹

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, Mathieustraße 10, 52074 Aachen
moritz.beckschulte@eonerc.rwth-aachen.de

Die Bereifung von Wärmepumpenverdampfern führt zu Effizienzverlusten, die durch Anpassungen der Verdampfergeometrie oder optimierte Regelungsstrategien reduziert werden können. Der vorliegende Beitrag demonstriert, dass Auslegung und Regelung als zusammenhängendes Wechselspiel bereits in sehr frühen Planungsphasen integriert betrachtet werden müssen, um das volle Effizienzpotenzial im System auszuschöpfen. Zu diesem Zweck werden die Effekte einer veränderten Verdampfergeometrie in ein Wärmepumpenmodell integriert. Dieses Modell berücksichtigt die Veränderungen der Wärmeübertragung im Betrieb sowie die Beeinflussung der Reifwachstumsgeschwindigkeit durch die veränderte Geometrie. In drei Fallstudien wird anhand der Effizienz der Einfluss von (1) der Abtaustrategie, (2) der Geometrie und (3) des Einsatzstandorts bewertet. Insgesamt sind Effizienzsteigerungen von bis zu 10 % realisierbar. Die Studie unterstreicht die Notwendigkeit einer integrierten Auslegung und Regelung von Wärmepumpenverdampfern. Darüber hinaus deutet die beobachtete Standortabhängigkeit darauf hin, dass adaptive Abtauregler das Potenzial haben, die Systemperformance unter lokalen Gegebenheiten weiter zu verbessern.

Stichwörter

Luft-Wasser-Wärmepumpe, Bereifung, Abtauerung, Standortabhängigkeit, Effizienz

2.14

Untersuchung der Methanolverdampfung in parallelen Mikrokanälen

Saija Schäfer^{1*}, Prof. Dr.-Ing. Arne Speerforck¹

¹Technische Universität Hamburg, Institute of Engineering Thermodynamics (M-21),
Denickestrasse 15, Hamburg
saija.schaefer@tuhh.de

Im Rahmen der Luftfahrtforschung wurde ein experimenteller Teststand entwickelt, um das Verdampfungsverhalten von Methanol in parallelen Mikrokanälen zu untersuchen. Dabei liegt der Fokus auf der Analyse von Druckverlusten, lokalen und globalen Wärmeübergängen sowie der Ermittlung von Instabilitäten bei der Verdampfung. Die Verdampferplatte, die der Bipolarplatte einer Brennstoffzelle nachempfunden ist, enthält 40 parallele Mikrokanäle. Diese haben eine quadratische Querschnittsfläche mit der Kantenlänge 1 mm und einer Länge von 250 mm. Einlass- und Auslassplenum sorgen für eine gleichmäßige Durchströmung der Kanäle.

Ziel der Versuche ist es, lokale Überhitzungen frühzeitig zu erkennen sowie die Grenzen stabiler Verdampfung zu bestimmen. Am Teststand können Betriebsparameter wie Massenstromdichte, Wärmestromdichte, Druckniveau und Unterkühlung gezielt eingestellt und geregelt werden. Die Beheizung der Teststrecke erfolgt elektrisch von der Unterseite der Verdampferplatte, wobei eine Silikonschicht für eine gleichmäßige Wärmestromdichte sorgt. Um Wärmeverluste zu reduzieren und präzise Wärmeübergänge messen zu können, ist der Verdampfer gedämmt und in einer temperierten Einhausung untergebracht.

Bei dem Vortrag sollen das Konzept des Teststandes sowie einphasige Testergebnisse zur Validierung der Druckverlust- und Wärmeübergangsmessungen bei laminaren Strömungen vorgestellt werden.

2.15

Kondensation zeotroper Gemische im Rohrbündel

Julius V. W. Kühl¹, Jochen Dietl², Jean El-Hajal², Achim Gotterbarm²,
Michael H. Rausch¹, Tobias Klein^{1*} und Andreas P. Fröba¹

¹ Lehrstuhl für Advanced Optical Technologies – Thermophysical Properties (AOT-TP),
Department Chemie- und Bioingenieurwesen (CBI) und Erlangen Graduate School in Advanced Optical
Technologies (SAOT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen
tobias.klein@fau.de

² Wieland-Werke AG, Ulm

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

Im vorliegenden Beitrag werden experimentelle Ergebnisse für α_{kond} von binären zeotropen Gemischen bestehend aus Propan und *n*-Butan oder *n*-Pentan an horizontalen Einzelrohren und in Rohrbündeln vorgestellt. Zur experimentellen Simulation des Einflusses des Rohrbündeleffektes wird die obere Rohrreihe des Rohrbündelkondensators zusätzlich mit Kondensat beaufschlagt. Die Diskussion der experimentellen Ergebnisse zeigt den Einfluss der Transport- und Gleichgewichtseigenschaften der Gemische, einschließlich Gleittemperatur, und der Rohreigenschaften, wie z. B. Rohrmaterial sowie Geometrie und Oberflächenstruktur, einschließlich Rippenhöhe und Rippendichte, auf α_{kond} auf. Im Fokus der Diskussion steht dabei jeweils ein Vergleich des Kondensationsverhaltens der Gemische mit dem entsprechenden für die reinen Alkane. Für die Kondensation zeotroper Gemische an glatten und berippten Einzelrohren werden die experimentellen Ergebnisse einem weiterentwickelten analytischen Modell gegenübergestellt, was innerhalb der Gültigkeitsgrenzen eine zuverlässige Vorhersage des Wärmeübergangskoeffizienten α_{kond} demonstriert.

2.16

CO₂-basierte Kältemittel-Gemische für T < -50 °C

Jaromir Jeßberger*, Jakob Wölfel, Florian Heberle, Dieter Brüggemann

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse
Zentrum für Energietechnik, Universität Bayreuth
jaromir.jessberger@uni-bayreuth.de

Seit Anfang 2024 bringt die vom Europäischen Parlament verabschiedete Überarbeitung der F-Gase-Verordnung weitergehende Einschränkungen für den Einsatz halogenierter Kohlenwasserstoffe in Kälte- und Wärmeanwendungen mit sich. Diese Verschärfungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen fördern den Umstieg auf natürliche Kältemittel, die ein geringeres Potenzial zur Erderwärmung (GWP) aufweisen. Ein besonders prominentes Kältemittel, das durch diese Verordnung betroffen ist, ist R23 (Trifluormethan), das aufgrund eines sehr hohen GWP-Werts von 14.800 in den Fokus rückt. Dieser hohe GWP-Wert bedeutet, dass R23 trotz seiner Effizienz in tiefkalten Anwendungen maßgeblich zur globalen Erwärmung beiträgt, was den Forschungsbedarf und die Suche nach umweltfreundlicheren Alternativen unterstreicht.

Für die Erzeugung von Temperaturen unter -50 °C kommen typischerweise kaskadierte Kälteanlagen zum Einsatz, die in Bereichen wie der Kryotechnik, der Lebensmittelverarbeitung, der pharmazeutischen Industrie und der Halbleiterfertigung notwendig sind. Diese Anlagen, die extrem niedrige Temperaturen erfordern, werden oft mit R23 betrieben. Ziel dieser Arbeit ist es, ein vereinfachtes Simulationsmodell für den kaskadierten Kältekreis zu

entwickeln, um potenzielle Alternativen zu identifizieren und zu bewerten. Der Schwerpunkt liegt auf CO₂-Kohlenwasserstoff-Gemischen, die als klimafreundlichere Ersatzstoffe für R23 untersucht werden.

Durch Sensitivitätsanalysen an verschiedenen Betriebspunkten sollen unterschiedliche Fluidkombinationen hinsichtlich ihrer thermodynamischen Eigenschaften verglichen werden, um deren Eignung als Ersatz für R23 zu evaluieren. Diese Untersuchungen sollen auch dazu beitragen, den optimalen Einsatzbereich und die Leistungsfähigkeit der CO₂/Kohlenwasserstoff-Gemische in kaskadierten Systemen zu bestimmen. Die Arbeit umfasst eine umfangreiche Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik, die Entwicklung eines Simulationsmodells in Matlab, die Definition geeigneter Arbeitsmedien und -gemische sowie die Bewertung dieser Kältemittel anhand thermodynamischer Parameter, um die besten Alternativen für tiefkalte Anwendungen zu identifizieren und deren potenzielle Vorteile in Bezug auf Umweltfreundlichkeit und Effizienz zu quantifizieren.

Stichwörter:

CO₂-KW-Gemische, Fluidscreening, Kältebereitstellung, Simulationsmodell

2.17

Validierung eines Daten getriebenen Modells zum Wärmeübergang beim Sieden

Ziad Elekiaby*, Andrea Luke

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

Wärmeübertrager, insbesondere Verdampfer, werden mit empirischen Gleichungen, die auf mehr oder weniger genauen experimentellen Daten beruhen, ausgelegt. Verdampfungsprozesse sind durch verschiedene Übertragungsmechanismen geprägt. Blasensieden ist der effizienteste Wärmeübertragungsprozess, der jedoch von einer Vielzahl an Einflussparametern geprägt ist, deren Wechselwirkungen bislang nicht umfassend aufgeklärt sind. Dadurch wird die Entwicklung eines vollständigen Modells zur Beschreibung der Transportprozesse bislang sehr erschwert. Die Anwendung der Methoden des maschinellen Lernens auf große experimentellen Datenmengen mit einer breiten Parametervariation bietet das Potential, gegenwärtig nicht berücksichtigte Einflussgrößen zu identifizieren und in die Vorhersage des Wärmeübergangs einzubeziehen, um die Genauigkeit und den Gültigkeitsbereich über bestehende Grenzen hinweg zu erweitern.

Belastbare empirische Daten zum Wärmeübergang beim Blasensieden für natürliche Kältemittel an Kupferoberflächen werden zusammengestellt, falls möglich werden sowohl lokal als auch integral ermittelte Daten berücksichtigt. Ein Standard zur Bewertung experimenteller Daten wird vorgestellt, um die Genauigkeit des erstellten Modells zu optimieren. Das Modell wird mit neuartigen experimentellen Daten zum Wärmeübergang bei der Verdampfung im Referenzzustand validiert, um die Allgemeingültigkeit zu beweisen. Das Programm beinhaltet Gleichungen aus der Literatur zur Berechnung des Wärmeübergangs unter Referenzbedingungen, insbesondere zur Beschreibung des Stoffeinflusses.

Stichwörter:

Wärmeübergang, Blasensieden, Natürliche Kältemittel, Machine-Learning-Modell, Stoffeinfluß,

2.18

Optische Messung der Ölphase nach dem Verdichter

Jonathan Laun^{1*}, Caner Cikmaz¹, Thorsten Urbaneck¹, Markus Richter²

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

² Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, An der Universität 1, 30823 Garbsen, Deutschland
m.richter@ift.uni-hannover.de

In einer klassischen Kältemaschine mit ölgeschmiertem Kompressor besteht der zirkulierende Stoffstrom (Primärkreis) in bestimmten Teilstrecken aus Kältemittel und Öl. Der Öl-Anteil verändert die effektiven thermodynamischen Eigenschaften im Vergleich zu einem reinen Kältemittel-Stoffstrom. Deswegen nimmt die Bestimmung der Ölzirkulationsrate (OCR) im Primärkreislauf eine Schlüsselrolle ein. In der Literatur wird der Ölstrom in der Druckleitung nach dem Kompressor als ringförmige Nebelstrom von Öltröpfen in Kombination mit einem Ölfilm beschrieben. Mit herkömmlichen Messmethoden, wie der Probenahme oder dem Einsatz von Schallgeschwindigkeitssensoren, kann man die Ölzirkulationsrate während des Anlagenbetriebs schwer erfassen oder es ist eine aufwendige Kalibrierung erforderlich.

Im Rahmen der Forschungsplattform für Kälte- und Energietechnik (KETEC-Verbundprojekt, Teilprojekt 3) wird dieses Problem durch ein optisches Messverfahren adressiert. Den optischen Zugang ermöglicht eine Sichtzelle in der Druckleitung eines Scrollverdichters. Diese Leitung ist Bestandteil einer Forschungskältemaschine mit dem Kältemittel R290. Die Maschine verfügt über eine Kälteleistung von 22 kW und ein Fördervolumenstrom von 17,1 m³/h bei 50 Hz. Zum Einsatz kommt ein Schattenwurfverfahren (Shadowgraphie), bestehend aus einer Leuchtdiode (LED) als Lichtquelle, einer Kamera sowie einer Trigger-Einheit mit zugehöriger Auswertesoftware. Die Optik erlaubt eine Auflösung im Bereich weniger Mikrometer. Eine externe Kalibrierung mit Kalibrierplatten stellte die korrekte Skalierung sicher. Aus den gemessenen Öltröpfengrößen und -geschwindigkeiten an verschiedenen Punkten in der Sichtzelle kann schließlich der Volumenstromanteil des Öls und damit die Ölzirkulationsrate berechnet werden.

Dieser Beitrag stellt die ersten Ergebnisse der Öltröpfenmessung vor. Die berechnete Ölzirkulationsrate wird mit den Messungen der Inlinesensoren verglichen. Des Weiteren gibt der Beitrag ein Ausblick auf zukünftige Verbesserungen und Limitationen der Methode gegeben.

Stichwörter:

Schattenwurfverfahren, Shadowgraphie, Öl-Kältemittel-Gemisch, Ölzirkulationsrate

2.19

Zusammensetzungsverschiebung als Potential

Beobachtungen zum Rekuperativen Zweiphasen-Prozess

Benedikt G. Bederna^{1*}, Christiane Thomas¹

¹ Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
01062 Dresden, Deutschland
benedikt.bederna@tu-dresden.de

Der Rekuperative Zweiphasen-Prozesses ist eine thermodynamische Kreisprozesskonzeption, die darauf abzielt, isenthalpe Drosselverluste in Kaltdampf-Kompressionsprozessen mittels einer großen Unterkühlung der flüssigen Phase zu reduzieren. Möglich ist dies durch den Einsatz asymmetrischer Arbeitsfluidgemische, wobei auf der Niederdruckseite des Rekuperators das Arbeitsfluid unter Temperaturänderung verdampft wird. Erste

Versuche konnten belegen, dass eine solche flüssig-zweiphasige Rekuperation durch eine entsprechende Wahl des Arbeitsfluidgemisches möglich ist. Bekannt ist, dass bei Arbeitsfluidgemischen in Kreisprozessen Zusammensetzungsverschiebungen auftreten können. Dies betrifft sowohl die umlaufende als auch die lokal auftretende Zusammensetzung. Die Ursache hierfür ist die unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeit der Dampf- und Flüssigkeitsphase, sowie deren unterschiedliche Arbeitsfluidzusammensetzungen. Asymmetrische Gemische sind wegen ihrer hohen relativen Volatilität und ihrer großen Dichteunterschiede besonders von diesem Effekt betroffen. Die vorläufigen Messungen legen das Auftreten solcher Effekte nahe. Dies stellt eine Herausforderung sowohl für die Evaluierung als auch für die grundsätzliche Auslegung von Rekuperativen Zweiphasen-Prozessen dar. Eine lokale Zusammensetzungsverschiebung bedeutet aber auch, dass das nichtlineare Verhalten des Arbeitsfluids noch stärker ausgeprägt ist, als das bei einem Gemisch ohne Zusammensetzungsverschiebung möglich wäre. Dies ist für den Kreisprozess vorteilhaft, was in den Messungen auch beobachtet werden konnte.

Stichwörter:

Zusammensetzungsverschiebung, Rekuperativer Zweiphasen-Prozess, Wärmepumpen, Experiment

2.20

Two-phase flow in brazed plate heat exchangers

- Visualization and characterization of flow maldistribution issues

Carsten Hausherr^{1*}, Stefan Elbel¹

¹Technische Universität Berlin, Chair of Heat Transfer and Heat Conversion, 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 (BPHE) design. Maldistribution of two-phase flow in BPHE 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. BPHE 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 BPHE designs for applications with low-GWP refrigerants, which can lead to significant efficiency improvements and thus reduce manufacturing costs and CO₂ emissions during operation.

Keywords:

Brazed plate heat exchanger, two-phase flow maldistribution, flow visualization, IR thermography, low-GWP refrigerants

2.21

Öl-Management in einem umkehrbaren Hochtemperaturwärmepumpen/ORC-Prüfstand mit Doppelschraubenmaschine

Jannik von Zabienski^{1*}, Florian Kaufmann¹, Christopher Schifflechner¹, Hartmut Spliethoff¹

¹Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiesysteme,
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland
jannik.zabienski@tum.de

Umkehrbare Hochtemperaturwärmepumpen/Organic Rankine Cycle-Systeme - in englischer Literatur oft als reversible ORC (rev. ORC) referenziert - rücken zunehmend in den Fokus von Forschung und Industrie, da sie eine flexible Umwandlung zwischen Wärme- und Strombereitstellung ermöglichen. Während ihr Einsatz in Carnot-Batterien und kleinen Energiesystemen gut erforscht ist, wurde ihr Potenzial in geothermischen KWK-Anlagen bislang kaum ausgeschöpft. Hier können rev. ORCs als Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) in Spitzenlastzeiten zusätzliche Wärme in Fernwärmenetze (FWN) einspeisen oder bei geringer Wärmenachfrage im klassischen ORC-Modus Strom erzeugen mit lediglich einer Maschine. Die vorliegende Arbeit stellt aktuelle experimentelle Ergebnisse der rev. ORC-Versuchsanlage an der Technischen Universität München vor, die seit April 2024 mit dem Arbeitsmedium R1233zd(E) betrieben wird. Die Anlage nutzt einen 200 kW_{th}-Heißwasserkreis als Wärmequelle und eine umkehrbare 20 kW_{mech} Doppelschraubenmaschine. Ein geschlossener Zwischenkreislauf simuliert dynamische Bedingungen eines FWN mit variierenden Temperatur- und Volumenströmen. Bereits in der Inbetriebnahmephase zeigte sich, dass der ursprünglich eingesetzte Ölabscheider unterdimensioniert war, was vor allem im ORC-Betrieb zu unzureichender Schmierung der Maschine und Effizienzverlusten führte. In dieser Arbeit wird der Einfluss eines neu installierten, leistungsstärkeren Ölabscheiders auf die System- und Maschinenperformance analysiert. Zusätzlich wird ein Messkonzept zur Überwachung des Ölzustands präsentiert, das genaue Einblicke in die Zusammensetzung und Verteilung des Kältemittel-Öl-Gemischs in der Anlage erlaubt. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für das Design effizienter und robuster rev. ORC-Systeme und leisten einen entscheidenden Beitrag zur Entwicklung eines 200 kW_{el}-Demonstrators im Rahmen des EU-Projekts FlexGeo, das den Weg für den industriellen Einsatz dieser Technologie ebnet.

Stichwörter:

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Organic Rankine Cycle, reversibel, Öl-Management

2.22

Evaluierung von Messverfahren zur nicht-invasiven Füllstandsüberwachung

Gerhard Pertiller^{1*}, René Rieberer¹, Markus Neumayer²

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

² Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik - Technische Universität Graz,
Inffeldgasse 33/I, 8010 Graz, Österreich

Aufgrund von größerer Beachtung des Umweltschutzes beim Einsatz von Kälteanlagen und Wärmepumpen und damit einhergehenden Regulatorien (z. B.: F-Gase-Verordnung, REACH-Verordnung), gewinnen natürliche Kältemittel immer mehr an Bedeutung. Diese sind jedoch meist brennbar und / oder giftig. Dies hat zu strengen Vorschriften für ihre Verwendung geführt und erhöht die Notwendigkeit einer Leckageerkennung.

Ein kostengünstiger Sensor zur Online-Messung des Füllstands in Kältemittelsammlern würde die Entwicklung von Kältekreisläufen erleichtern und Hemmnisse bei der Nutzung natürlicher Kältemittel abbauen. Bei den untersuchten Verfahren wurde besonderes Augenmerk auf die Nicht-Invasivität der Messverfahren gelegt, wodurch die Verfahren auch nachträglich in bestehende Systeme eingebaut werden können. Dies führt potentiell zu einer kostengünstigen Ausführung des Sensors, da der Sensor nicht den im Kältekreislauf vorherrschenden Drücken und Temperaturen ausgesetzt ist. Dieser Sensor soll den Füllstand - kontinuierlich oder als Level-Switch - in den Sammlern von Kälteanlagen und Wärmepumpen während des Betriebs ermitteln und damit eine zustandsorientierte Diagnose erleichtern, die den Weg zu einer vorausschauenden Wartung („Predictive Maintenance“) ebnet.

Im Rahmen des Projektes „CLEAR“ wurden verschiedene Messprinzipien evaluiert und an unterschiedlichen Prüfständen untersucht. Der finale Prüfstand wurde als funktionsfähiger Kältekreislauf aufgebaut, um Quereffekte wie Vibrationen und strömende Medien bei variablem Füllstand zu berücksichtigen. Der vorliegende Beitrag fasst den Versuchsaufbau, die untersuchten Messverfahren und ausgewählte Messergebnisse zusammen.

Stichwörter:

Messprinzipien, Füllstandsmessung, Experiment

3.01

Vom Rohrbündel- zum Plattenwärmetauscher

Sicherer Technologiewechsel dank neuer Reinigungsverfahren

Christian Wehling, Business Development Manager Clean Tech

Alfa Laval Mid Europe GmbH, Energy Division, Überseeallee 10, 204576 Hamburg, Deutschland
christian.wehling@alfalaval.com

Bisher galt die Technologie der Rohrbündelwärmetauscher der Plattenwärmetauschertechnologie bei der Installation in Großwärmepumpen als überlegen. Diese Ansicht ist heute überholt. Dank neuer Entwicklungen und angepasster Reinigungsstrategien können jetzt auch Großwärmepumpen von den Vorteilen der Plattenwärmetauscher profitieren: Sie sind kompakter, effizienter, flexibler in der Anpassung, einfacher zu warten und zu reinigen und damit kostengünstiger und nachhaltiger. Mutmaßliche Verunreinigungen durch zusätzliche Wärmequellen aus Grund-, See-, Fluss- oder Abwasser löst Alfa Laval mit einem 5-stufigen Sicherheitskonzept rund um die Auslegung der richtigen Plattengeometrie, automatischer Rückspülung, Alfa Laval Filter (ALF), CIP-Reinigung und Rekonditionierung.

Als Referenz stellt Alfa Laval europäische Großwärmepumpen-Projekte unter Nutzung von Wasser und Rechenzentren als Wärmequelle vor. Allen Projekten gemeinsam ist der Einsatz semigeschweißter und gelöteter Plattenwärmetauscher, die in ihren Ausführungen auch höchsten Ansprüchen wie an Temperatur, Drücke und Medien gerecht werden. In den vergangenen Jahren hat sich ein Trend entwickelt, sie auch in größeren industriellen und kommerziellen Wärmepumpen einzusetzen, die mit natürlichen Kältemitteln wie Ammoniak, Kohlenwasserstoffen und CO₂ betrieben werden.

Keywords:

Alfa Laval, Großwärmepumpen, Plattenwärmetauscher, Rohrbündelwärmetauscher, Großwärmepumpen,

3.02

Downsizing Falling Film H₂O Evaporators by Design

Samuel Smock¹, Felix Ziegler¹, Stefan Petersen² (Factor4Solutions), Stefan Elbel¹

¹) Technische Universität Berlin, Fakultät III - Prozesswissenschaften
Institut für Energietechnik, KT2, FG Wärmeübertragung und -wandlung
s.smock@tu-berlin.de

²) Factor4Solutions

Uniform refrigerant distribution in thin-film shell-and-tube evaporators is essential for maximizing heat transfer and minimizing component size, yet achieving this uniformity remains a persistent challenge. Dryout resulting from poor distribution significantly impairs performance and poses a major barrier to the adoption of many sustainable heating and cooling technologies by necessitating oversized components. This study investigates the techno-economic trade-offs of various wetting-enhancement strategies aimed at downsizing falling film evaporators. A 50 kW LiBr/H₂O absorption chiller with pure water on the tube side is taken as a representative example and provides concrete parameters for modelling. Analyzed measures include a significantly increased refrigerant recirculation rate, surface roughening techniques such as sandblasted or low-finned tubes, and multi-tiered tube bundle designs with numerous feed points and/or intermediary refrigerant redistributors. Using representative values from small-scale experiments and published data, models are constructed for each measure based on anticipated costs and their impact on the required heat transfer area relative to a baseline evaporator with smooth copper tubes and a single refrigerant distributor positioned at the top. Ongoing costs are reconciled with upfront manufacturing savings using a net present value (NPV) framework, and these life cycle estimates are weighed against desired traits such as reduced device footprint and increased power density.

Findings offer actionable insights for the design of next-generation evaporators and contribute to advancing the market readiness of numerous sustainable heating and cooling using water as a refrigerant.

Keywords:

Component-level optimization, falling-film evaporators, techno-economic analysis, absorption chillers

3.03

Teststand zur Untersuchung von Wärmeübertragern mit Propan

Vasco Wild, Arne Speerforck

Technische Universität Hamburg, Institut für Thermodynamik

vasco.wild@tuhh.de

In dem vorgestellten Forschungsvorhaben wird ein experimenteller Prüfstand zur Untersuchung von Wärmeübertragern (WÜ) unter Einsatz von Propan als Arbeitsmedium entwickelt. Ziel ist es, sowohl Kondensatoren als auch Verdampfer unter variablen Betriebsbedingungen zu analysieren. Der Prüfstand ermöglicht die Untersuchung von Wärmeübertragern mit Leistungen im Bereich von 0,2 bis 10 kW. Der Systemdruck lässt sich dabei zwischen 8,4 bar und 30 bar einstellen, was zu möglichen Siede- und Kondensationstemperaturen von 20,2 °C bis zu 77,7 °C führt. Der Propan-Massenstrom kann flexibel zwischen 0,001 kg/s und 0,05 kg/s variiert werden, um die unterschiedlichen Leistungen der WÜs zu realisieren. Die Teststrecke des Prüfstands ist 70 cm lang und erlaubt durch den Einsatz von Schnellschlusskupplungen einen schnellen Austausch der WÜ-Geometrien. Diese Einrichtung ermöglicht es insbesondere, optimierte Kondensatorgeometrien zu untersuchen, die auf eine Reduktion der Füllmenge abzielen. Durch systematische Variationen der Geometrien und die Analyse des resultierenden Übertragungsverhaltens können wertvolle Erkenntnisse über mögliche Effizienzsteigerungen und Materialeinsparungen gewonnen werden. Die Ergebnisse dieser Studie sollen einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung zukünftiger Kondensatordesigns leisten.

Bei dem Vortrag sollen der Teststand und das Konzept vorgestellt werden. Aktuell befindet sich der Teststand in Aufbau und im Sommer dieses Jahrs sollen erste Messungen erfolgen. Diese Ergebnisse sollen ebenfalls Teil des Vortrags sein.

Stichwörter:

Wärmeübertrager, Propan, R290, Teststand, Verdampfung, Kondensation

3.04

Digitalisierung von Ventilatorsystemen EC-Motoren und Smart Services zur Verbesserung von Effizienz und Zuverlässigkeit

Moritz Schmitt

ZIEHL-ABEGG SE, Heinz-Ziehl-Straße, 74653 Künzelsau

Moritz.schmitt@ziehl-abegg.de

Die Digitalisierung von Ventilatoren stellt einen bedeutenden Fortschritt in der modernen Technologie dar. Ein zentraler Bestandteil dieser Entwicklung sind EC-Motoren (elektronisch kommutierte Motoren), die für ihre hohe Energieeffizienz und präzisen Steuerungsmöglichkeiten bekannt sind. Diese Motoren liefern wichtige Betriebsdaten wie Drehzahl, Temperatur und Schwingungsdaten, die für die Überwachung und Optimierung des Ventilatorbetriebs unerlässlich sind.

In dem Vortrag wird detailliert auf die verschiedenen Lösungen eingegangen, die die Digitalisierung von Ventilatoren ermöglicht. Der Nutzen der Technologien wird kurz und prägnant dargestellt. Neben der Datenauslese per Bluetooth oder MODBUS liegt der Hauptfokus auf der Speicherung, Verarbeitung und Auswertung der Daten

anhand von Praxisbeispielen. Diese Ansätze bieten wertvolle Einblicke in die Effizienzsteigerung und Zuverlässigkeit moderner Ventilatorsysteme.

Durch die Integration dieser Technologien können Unternehmen ihre Betriebsabläufe optimieren und die Lebensdauer ihrer Systeme verlängern. Zudem wird die kontinuierliche Überwachung und Analyse der Betriebsdaten eine optimierte Wartung und Fehlererkennung ermöglichen, was zu einer erhöhten Betriebssicherheit führt.

3.05

„ErP2026“ für Ventilatoren – Sprungbrett oder Hürde?

Simon Engert

ZIEHL-ABEGG SE, Public Affairs & Associations, Heinz-Ziehl-Straße, 74653 Künzelsau, Deutschland

simon.engert@ziehl-abegg.de

Auch Ventilatoren als wichtige Komponenten der Kältetechnik stehen zunehmend im Fokus von Regulierungen, sowohl in der EU als auch weltweit. Der Verkauf und Betrieb werden weltweit reguliert, um Energieeffizienz und Nachhaltigkeit zu fördern.

Die EU verfolgt mit der ErP-Verordnung (EU) 2024/1834 das Ziel, den Energieverbrauch zu senken und die Klimaziele zu erreichen. ErP2026 hat weitreichende Auswirkungen auf die Industrie und zukünftige Produkte. Besonders die Kältetechnik, die häufig noch AC-Technologie verwendet, muss sich wandeln und effizientere Produkte einsetzen.

Der Vortrag beleuchtet die Hintergründe der neuen Ventilator-Verordnung und gibt Antworten auf zentrale Fragen der Industrie: Welche Einflüsse hat die aktuell gültige ErP-Verordnung? Wo führt uns ErP2026 hin und welche Herausforderungen bringt die nächste nachfolgende Stufe mit sich?

Ist ErP2026 ein Sprungbrett in die Zukunft oder eine Hürde? Die Antwort ist klar: Es ist eher ein Sprungbrett, das Innovationen fördert und die Wettbewerbsfähigkeit steigert.

Stichwörter:

ErP2026, EU-Regulierungen, 2024/1834, Ventilator, DKV

3.06

Das thermostatische Hochdruckregelventil

Aufbau und Thermostatfüllungen zur Regelung des optimalen Hochdrucks

Jan Pitz

KONVEKTA AG, Versuch und Validierung, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, Deutschland

janpitz@konvekta.com

Im transkritischen Betrieb von Kältemaschinen existiert ein anlagen- und betriebspunktabhängiger energie-, sowie leistungsoptimaler Hochdruck. Im Kältemaschinenbetrieb ist dieser im Wesentlichen von der Temperatur des Kältemittels am Austritt des Gaskühlers abhängig. Kältemaschinen ohne eine Regelung des Hochdrucks weisen im transkritischen Betrieb folglich verringerte Leistungs- und Effizienzwerte auf. Um bei kompakten, einstufigen Kältemaschinen eine einfache Hochdruckregelung zu implementieren, bieten sich thermostatisch gesteuerte Ventile an.

Das Konzept eines Hochdruckregelventils innerhalb eines einfachen Kältekreislaufs wird vorgestellt. Durch den Einsatz einer hydraulischen Übersetzung, sowie einer konstanten Verstärkung kann eine, im Betrieb, zweiphasige Thermostatfüllung bestehend aus einem Gemisch von Kohlenwasserstoffen realisiert werden. Verschiedene

Ausführungen bezüglich Aufbau, Thermostatfüllung und Fühlerpositionierung des Hochdruckregelventils ermöglichen den Betrieb in Kältemaschinen- und Wärmepumpenanwendungen.

Berechnete Gemische für anwendungsbezogene Thermostatfüllungen werden vorgestellt. Der Aufbau der Ventile wird schematisch beschrieben. In der Anwendung auftretende Ungenauigkeiten bezüglich Stoffanteilen und Füllmengen der Thermostatventilfüllungen werden untersucht. Durch Einstellmöglichkeiten am Ventil kann das Ventilverhalten an den realen Einsatz angepasst werden.

Stichwörter:

CO₂, optimaler Hochdruck, thermostatisches Ventil, mobile Kälte, natürliche Kältemittel

3.07

OD Modellierung von Kolben- und Schraubenkompressoren für R290 und R32

Thomas Meyer*, Stefan Elbel

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wärmübertragung und -wandlung,
Marchstraße 18, 10587 Berlin, Deutschland

Thomas.Meyer@tu-berlin.de

Eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung stützt sich derzeit größtenteils auf die effiziente Einbindung regenerativ bereitgestellter elektrischer Energie. Hierfür bieten elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpen mit umweltfreundlichen Arbeitsmitteln hervorragende Möglichkeiten. Die Entwicklung hocheffizienter Wärmepumpenprozesse bei gleichzeitigem Austausch bzw. Ersatz der Kältemittel stellt nicht nur die Industrie vor große Herausforderungen.

Aufgrund der Vielzahl, der sich aus diesen gleichzeitigen Anforderungen ergebenden Möglichkeiten sind zuverlässige, auf einfachen physikalischen Prinzipien beruhende Simulationswerkzeuge von großer Bedeutung, um die Auswirkungen der sich verändernden Kältemittelleigenschaften in Verbindung mit den eingesetzten Komponenten des Wärmepumpenprozesses schnell und verständlich zu erfassen und einzuordnen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Zustandsänderungen der Kältemitteldämpfe von R290 und R32 in Kolben- und Schraubenkompressoren inklusive der Strömungsdruckverluste sowie der Leckströme modelliert. Die Ergebnisse für variierende prozessseitig anliegende Druckverhältnisse und Drehfrequenzen werden vergleichend für beide Kältemittel und Kompressortypen gegenübergestellt und die jeweiligen Verdichtercharakteristika diskutiert.

Mithilfe dieses physikalisch basierten Simulationswerkzeugs lassen sich übersichtlich Vor- und Nachteile der eingesetzten Kältemittel in Verbindung mit den hierfür verwendeten Verdichtern und deren geometrischen Parametern vergleichen. Die Auswirkungen einzelner Stoff- oder Geometrieparameter lassen sich isoliert untersuchen und helfen somit bei der ersten Prozesssynthese.

3.08

Flüssigkeitseinspritzung bei Hubkolbenverdichtern

Design und Inbetriebnahme einer Ammoniak-Versuchskälteanlage

Jonas Schmitt*, Robin Langebach

Hochschule Karlsruhe, Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik
jonas.schmitt@h-ka.de

Das gezielte Einspritzen von flüssigem Kältemittel durch Injektoren in den Arbeitsraum eines Verdichters 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.

Das theoretische Potenzial der Einspritzung wurde in vorangegangenen Veröffentlichungen bereits auf Basis thermodynamischer Modellierung aufgezeigt. Im nächsten Schritt soll eine experimentelle Validierung der Methode anhand einer R717-Versuchskälteanlage erfolgen. Diese umfasst einen Zweizylinderhubkolbenverdichter mit modifiziertem Zylinderkopf zur Aufnahme der Einspritzventile und der Instrumentierung für eine Zylinderdruckindizierung, ein echtzeitfähiges Mess- und Steuerungssystem zur kurbelwinkelabhängigen Steuerung der Injektoren sowie eine Kolbenmembranpumpe zur Bereitstellung des Einspritzdrucks. Weiterhin macht die Verwendung von R717 ein Sicherheitskonzept, bestehend aus Umhausung und Absauganlage, erforderlich.

In der vorliegenden Studie werden das Design des Prüfstands und die Auslegung des Sicherheitskonzepts unter Berücksichtigung der DIN EN 378 diskutiert. Insbesondere wird auf Besonderheiten eingegangen, die sich für R717-Anlagen mit vergleichsweise kleiner Kälteleistung hinsichtlich Anlagenschema, Komponentenverfügbarkeit und Sicherheitskonzept ergeben. Letztlich werden erste Erfahrungen aus Inbetriebnahme und Betrieb der Versuchsanlage vorgestellt.

Stichwörter:

Kältemittelspritzung, Prüfstand, DIN EN 378, Hubkolbenverdichter, Ammoniak

3.09

Proof of Concept of a R290 oil-free turbo compressor

Ahmet Çokşen*, Tatvakumar Bhanderi, David Klüpfel, Martin Müller, Mihai Dobrica

ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KGaA & Co. KG, Business Incubator HighSpeed Solutions,
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Germany

Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com; Tatvakumar.Bhanderi@de.ebmpapst.com;
David.Kluepfel@de.ebmpapst.com; M.Mueller@de.ebmpapst.com; mihaib.dobrica@de.ebmpapst.com

With growing emphasis on sustainable living and energy efficiency, there is an increasing demand for environmentally friendly heating and cooling technologies in residential, light-commercial, and commercial applications. To explore such solutions, this study presents the proof of concept for an ebm-papst's oil-free turbo compressor, CompaNamic, integrated into a ground source brine-water heat pump system using the natural refrigerant R290 (propane). A dedicated heat-pump demonstrator test bench is designed and built in-house at ebm-papst's facilities in Mulfingen. The system consists of two stage compression, economizer, interstage injection, and integrated motor cooling concept. The performance of such a system is investigated by both system simulation studies and experimental measurements integrating turbo compressor unit from ebm-papst P3-platform (maximum 10 kWel. drive power). The compressor is able to deliver variable application loads as well as high-temperature supply for domestic hot water and space heating with reduced noise levels. For seasonal performance assessment of the system, experimental measurements are conducted based on EN14825

standard. The results confirm the technical viability and energy performance benefits of operating an oil-free turbo compressor with R290 in a ground source heat pump. This innovative compressor technology offers a promising pathway toward more efficient and sustainable HVAC solutions.

Keywords:

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

3.10

Vorauslegungssoftware für radiale Turboverdichter

Leonard Kneflowski*, Robin Langebach

Hochschule Karlsruhe, Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
Leonard.Kneflowski@h-ka.de, Robin.Langebach@h-ka.de

In Kälte-, Klima- und Wärmepumpensystemen werden sowohl in stationären als auch in mobilen Anwendungen bis auf wenige Ausnahmen Verdichter nach dem Verdrängerprinzip eingesetzt. Radiale Turboverdichter hingegen konnten sich in der Kältetechnik bisher nur in wenigen Anwendungen in vergleichsweise hohen Leistungsbereichen unter Verwendung von HFKWs und HFOs etablieren. Durch strengere Vorgaben für fluoriierte Kältemittel im Zuge der F-Gase Verordnung, als auch technologischen Fortschritt im Bereich der elektrischen Hochdrehzahlantriebe und der Fertigungstechnik haben schnelldrehende Radialverdichter in Forschung und Entwicklung zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen. Ein zentrales Kriterium bei der Auslegung von Turboverdichtern ist ihre starke Abhängigkeit vom Arbeitsmedium, der Drehzahl, dem Betriebspunkt und der Leistungsgröße der Maschine. Mit Hilfe des vorgestellten Vorauslegungstools können auf Grundlage dimensionsloser Kenngrößen zur Auslegung von Turboverdichtern realisierbare Einsatzbereiche für den Verdichter vorausgesagt und verschiedene Kältemittel miteinander verglichen werden. Anschließend kann ein Designprozess zur Auslegung eines Impellers durlaufen werden. Der Designprozess basiert auf thermodynamischen Kreislaufberechnungen, wodurch der Verdichter direkt für eine vom Benutzer festgelegten Anwendung ausgelegt werden kann. Durch Verwendung des Auslegungstools können somit die physikalischen Einschränkungen erkundet und ein tieferes Verständnis für Radialverdichter gewonnen werden. In der vorliegenden Arbeit wird das dafür programmierte Softwaretool vorgestellt, zugrundeliegende Berechnungsalgorithmen diskutiert und an konkreten Anwendungsfällen beispielhaft Dimensionierungen vorgenommen. Es kann gezeigt werden, dass die Vorauslegungsergebnisse auch mit kommerziellen Auslegungstool gut übereinstimmen.

Stichwörter:

Turboverdichter, Natürliche Kältemittel, Dimensionierung, Software

3.11

Inline Überwachung des Ölanteils in Kältemittelkreisläufen zur Optimierung der Energieeffizienz

Tien Duc Le

SensoTech GmbH, Steinfeldstr. 1, 39179 Magdeburg-Barleben
tien-duc.le@sensotech.com

Im Rahmen des Vortrags wird eine innovative In-line-Methode zur Bestimmung der Öl-Kältemittel-Konzentration vorgestellt. Diese Technologie reduziert den Pumpenverschleiß signifikant und trägt zu einer verbesserten Gesamtleistung des Systems bei.

Ein wesentlicher Vorteil liegt in der Möglichkeit der Echtzeitüberwachung: Die kontinuierliche, nicht-invasive Messung erlaubt einen unterbrechungsfreien Betrieb, ohne dass der Prüfstand gestoppt werden muss. Dadurch wird der Prozessfluss erhalten und die Effizienz gesteigert.

Die neue, auf Schallgeschwindigkeit basierende Methode wurde mit der von ASHRAE 41.4 anerkannten gravimetrischen Referenzmethode verglichen. Neben der Einhaltung internationaler Standards überzeugt sie insbesondere durch einfache Handhabung und hohe Betriebseffizienz.

Die Ergebnisse sind für Fachkreise der HLK&R-Branche von besonderem Interesse, da die Methode flexible Einsatzmöglichkeiten beim Wechsel zwischen unterschiedlichen Kältemitteln und Ölen eröffnet. Das vorgestellte In-line-Messsystem bietet somit eine praxisnahe, anpassungsfähige Alternative zu etablierten Verfahren und verspricht einen deutlichen Zugewinn an Betriebstransparenz und Systemleistung.

3.12

Optimierte Regelung von Kälteanlagen

Betriebsstrategien für Kaltwassersätze mit Trockenrückkühlern

Matthieu, Chaigneau, Timo Hennemann, Björn Nienborg*

Fraunhofer ISE – Institut für Solare Energiesysteme, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg
björn.nienborg@ise.fraunhofer.de

Energieeinsparungen durch Effizienzsteigerung stellen einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele dar. Da Kälteprozesse rund 15% des deutschen Stromverbrauchs verursachen, gilt es auch in diesem Bereich Optimierungspotenziale zu heben.

Daher untersucht das Fraunhofer ISE das Energieeinsparpotenzial für trocken rückgekühlte Kaltwassersätze sowohl theoretisch als auch praktisch. Der Fokus liegt auf einem einfachen, aber robusten Regelungsansatz: die drei regelbaren Aktoren (Verdichter, Kühlmediumspumpe und Ventilator des Trockenkühlers) werden über den zulässigen Bereich proportional zueinander auf die angefragte Kältelast geregelt und dabei als Strömungsmaschinen mit ähnlichem Verhalten behandelt. Dieser Regelungsansatz wird einerseits mit zwei konventionellen Regelungsstrategien (Stand der Technik) und andererseits mit einer optimalen Regelung verglichen. Im letzteren Fall berechnet ein modellbasierter Regler für jeden Zeitschritt unter den aktuellen Betriebsbedingungen die bestmöglichen Sollwerte für die drei Aktoren, um die Gesamtleistungsaufnahme zu minimieren und gleichzeitig die Lastanforderungen zu erfüllen. Die Auswertung von Simulationen und Experimenten in einer Laboranlage zeigt, dass die einfach umzusetzende Proportional-Regelungsstrategie bis zu 28 % Energie gegenüber einer Regelung nach Stand der Technik einspart und damit nah an das – in der Praxis nur aufwändig erreichbare – Optimum von 35 % Einsparung herankommt. Wie schwierig es ist, eine genaue modellbasierte Steuerung selbst unter Laborbedingungen zu implementieren, hat sich ebenfalls bei den Untersuchungen gezeigt.

Stichwörter: Rückkühler, Betriebsführung, Kälteanlage, Regelung, Energieeffizienz

Danksagung:

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

3.13

Zustandserkennung in Kälteanlagen durch neuronale Netzwerke

Jonas Gronemann, Andreas Rittsche

Institut für Luft- und Kältetechnik, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden Deutschland

jonas.gronemann@ilkdresden.de

Algorithmen des maschinellen Lernens sind in der Lage, komplexe Zusammenhänge automatisiert zu erlernen und zur Klassifizierung und Vorhersage einzusetzen. Damit können komplexer und „digitaler“ werdende Kälteanlagen gezielter gewartet, schneller entstört und effizienter betrieben werden.

Mit der ursprünglich aus der Bilderkennung stammenden Methode der „Convolutional Neural Networks“ wurde im Rahmen des Verbundprojektes GOKAS (FKZ 03EN6003) ein KI-Modell entwickelt und trainiert, das speziell auf Messdaten von Kälteanlagen zugeschnitten ist.

Dazu wurden umfangreiche Sensordaten gesammelt und zu zweidimensionalen „Bildern“ zusammengefügt. Diese Datenpakete sind dabei jeweils einer Situation, also einem Betriebs- oder Fehlerzustand, zugeordnet.

Mit diesen Daten trainiert soll das neuronale Netz Zusammenhänge zwischen den Zeitverläufen verschiedener Sensoren erlernen, um Fehler zu erkennen oder abweichendes Verhalten melden zu können, ohne dass ein Nutzer Messwerte auswerten muss.

Im Rahmen des Projektes zeigte sich, dass die Anomalieerkennung mit vergleichsweise geringem Aufwand an die Datensammlung auskommt, während eine Zustands- und Fehlerklassifikation höhere Anforderungen an die Datenbasis stellt. Da Klassifikations- und Prognosemodelle neben der Rechenleistung im Wesentlichen durch Umfang und Qualität der Trainingsdaten beschränkt sind, ist dies bei der zukünftigen Entwicklung von intelligenten Steuerungen bei der Wahl der Ziele und Methoden zu beachten.

3.14

Faseroptische Temperaturmessung von Eisspeichersystemen

Experimentelle Untersuchung der partiellen Vereisung und Abtauung an Kapillarmatteneisspeichern

Michael Dölz*, Diana Stein, Prof. Dr.-Ing. Thomas Schlosser

Hochschule Hof, Institut für Wasser- und Energietechnik, Alfons-Goppel-Platz 1, 95028 Hof

mdoelz@hof-university.de

thomas.schlosser@hof-university.de

Eisspeicher sind Latentspeicher und nutzen für die Energiespeicherung den Phasenübergang zwischen dem festen und dem flüssigen Aggregatzustand des verwendeten Speichermediums. Die Schmelz- und Erstarrungsenthalpie von Wasser ist um den Faktor 79,4 größer als die spezifische Wärmekapazität, welche bei sensiblen Speichern verwendet wird.

Eine Herausforderung bei der Anwendung von Eisspeichern ist die korrekte Messung des Speicherzustandes und damit der Verfügbarkeit als Quelle oder Senke. Das Verhältnis von Eis und Wasser wird meist indirekt über den Füllstand des Eisspeichers, welcher sich aus dem Dichteunterschied von Wasser und Eis ergibt, oder über Temperaturen gemessen. Beide Methoden können bei einer partiellen Be- und Entladung zu Fehlinterpretationen führen. Eine Bilanzierung der ein- und ausgespeicherten Wärmemenge kann mittels einem gewünschten oder ungewünschten Wärmeeintrag durch die Hülle des Eisspeichers ebenfalls zu erheblichen Fehlern führen.

In dem vorliegenden Paper sollen die Ergebnisse aus einer Vergleichsstudie vorgestellt werden, welche die aufgezeigten Methoden zur Bestimmung des Beladungszustandes eines Eisspeichers mit den Messergebnissen einer

faseroptischen Temperaturmessung vergleicht. Mit Hilfe der hochauflösenden Temperaturmessung werden im Anschluss Messmethoden für den Betrieb von Eisspeichern abgeleitet.

3.15

Ölabscheider in der Kälte- und Wärmepumpentechnik

Eine systematische Übersicht

Miriam Ballarin^{*}, Robin Langebach

Hochschule Karlsruhe, Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
miriam.ballarin@h-ka.de

Ölabscheider stellen für viele Anlagen eine wesentliche Komponente in Dampfkomppressionsprozessen dar. Sie tragen maßgeblich zur Betriebssicherheit der Verdichter bei und Erhöhen – bei hinreichendem Abscheidegrad – die Gesamteffizienz der Anlagen. Grundsätzlich unterliegen die Ölabscheider am Markt jedoch keiner normativen Leistungsprüfung, die Gewährleistung eines hohen Abscheidegrades in allen Betriebspunkten ist damit zumindest spekulativ. In dieser Arbeit wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich Ölabscheidern in der Kälte- und Wärmepumpentechnik näher beleuchtet. Im Fokus steht eine prinzipielle Gegenüberstellung verschiedener Ölabscheidertypen am Markt und deren Leistungsdaten. Die verfügbare Literatur wird analysiert und grundsätzliche Zusammenhänge einflussnehmender Größen diskutiert.

Ziel dieses Review-Artikels ist es, den aktuellen Stand der Forschung zur Ölabscheidung systematisch zusammenzufassen und den Kontext zu neuen Forschungsansätzen darstellen. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf der Identifikation bestehender Herausforderungen und Forschungslücken.

Stichwörter:

Ölabscheider, Abscheideeffizienz, Abscheidegrad

3.16

Effiziente Kältemittelunterkühlung für Supermärkte

auf Basis von Ejektoren und des Kältemittels CO₂

Felix Pfeiler^{*1}, Dominik Herden², Yixia Xu², Christiane Thomas²,

¹ compact Kältetechnik GmbH, F&E, Dieselstraße 3, 01257 Dresden, Deutschland
f.pfeiler@compact-kaeltetechnik.de

² Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und
Kompressorentchnik, 01062 Dresden, Deutschland

Eine Testanlage mit dem natürlichen Kältemittel CO₂ wurde vonseiten der ¹compact Kältetechnik GmbH aufgebaut und in Anlehnung an die künftigen marktnahen Auslegungsbedingungen angepasst. Im Vergleich zum Flash-Gas-Bypass-System (Stand der Technik) wird mithilfe eines Parallelverdichters sowie einer Ejektor-Unterkühler-Einheit (EJCO₂) das hohe Expansionspotential nach dem Gaskühler nutzbar gemacht.

Mittels eines durch den ²Forschungspartner Technische Universität Dresden entwickelten Berechnungstools konnten spezielle Geometrien der Unterkühler-Ejektoren entworfen und gefertigt werden. Durch umfangreiche Messergebnisse mit veränderlichen Rand- und Regelparametern sowie Lastfällen erfolgte eine Validierung der Ejektoren. Ebenso konnte eine optimierte Regelstrategie für die Gesamtanlage implementiert werden.

Neben einem vereinfachten Regelverhalten der Ejektoren und Erhöhung der Betriebssicherheit war ein Hauptanliegen, die Gesamteffizienz der Anlage durch Hinzufügen von EJCO₂ zu erhöhen. Diese Erwartungen konnten mit ca. 40 % Effizienzgewinn im Auslegungspunkt bei maximaler Außentemperatur erreicht werden.

Investitionskosten und Amortisationszeit im Vergleich zum Referenzsystem werden erläutert und dargestellt, warum aufgrund der niedrigen Anzahl an benötigten Bauteilen, der Amortisationszeitraum kurz ausfällt.

Stichwörter:

Kälteanlagen, Supermarkt, CO₂, R744, Ejektor, Kältemittelunterkühlung, EJCO₂

3.17

Kennlinienmodelle für Ejektoren auf Basis symbolischer Regression

Dominik Herden*, Tom-Alexander Müller, Yixia Xu, Christiane Thomas

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

Ejektoren stellen, aufgrund ihres Potentials zur Effizienzsteigerung, eine Schlüsseltechnologie in kältetechnischen Anwendungen dar, insbesondere in transkritischen R-744-Kälteanlagen und -Wärmepumpensystemen. Durch die Rückgewinnung eines Teils der Expansionsverluste ermöglichen Ejektoren eine Steigerung der Leistungszahl der Anlage. Um Ejektoren möglichst genau zu simulieren und die Effizienzsteigerung im Kältemittelkreislauf zu charakterisieren, sind typischerweise numerisch aufwändige Rechenmodelle notwendig.

In diesem Beitrag wird ein vereinfachtes Kennlinienmodell für Ejektoren vorgestellt, um die Massenströme vorherzusagen und wichtige Ejektorkennzahlen wie das Entrainment Ratio, die Ejektoreffizienz und den Druckhub ohne aufwendige numerische Verfahren zu untersuchen. Grundlage der Modellbildung sind umfangreiche experimentelle Messdaten unterschiedlicher R-744-Ejektoren sowie ergänzende Messdaten aus der Literatur zu R-290-Ejektoren. Für die Datenanalyse wurde mittels Python die Open-Source-Bibliothek PySR für symbolische Regression eingesetzt. Diese Methode ermöglicht es, aus einer großen Anzahl an Messdaten verständliche mathematische Formeln zu extrahieren. Mit diesem Ansatz konnten interpretierbare mathematische Zusammenhänge zwischen den Ejektorkennzahlen und Geometrienparameter sowie Fluideigenschaften identifiziert werden.

Die Ergebnisse des Beitrages ermöglichen eine schnelle und zuverlässige Berechnung von wesentlichen Ejektorkennzahlen zur Integration in Berechnungsprogramme, ohne auf komplexe numerische Simulationen zurückgreifen zu müssen.

Stichwörter:

Ejektor, Zweiphasen-Ejektor, Kennlinien, Kälteanlagen, Wärmepumpen, symbolische Regression, Simulation, R-290, R-744

Simulation und Optimierung eines Waterloop-Systems

Gegenüberstellung von MIQCP mit MILP-Modellierungsverfahren

Jens Lücke*, Christopher Mäkel, Dr. Stella Schrapf

perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH, Am Viadukt 3, D-52066 Aachen

j.luecke@perpendo.de

Um Einsparpotenziale in komplexeren Energiesystemen zu erkennen, eignet sich der Einsatz mathematischer Optimierungsverfahren. Dies gilt im Speziellen für kältetechnische Systeme, die Freiheitsgrade in den Temperaturen und Wärmeströmen aufweisen. Insbesondere durch den Einsatz thermischer Speicher und der damit ermöglichten Flexibilisierung des Lastprofils sowie der Nutzung der Kondensationsabwärme werden die Potenziale, aber auch die Komplexität weiter erhöht.

In einem konkreten Semi-Plug-In bzw. Waterloop-System wurden verschiedene Verschaltungsvarianten mit und ohne Wärmerückgewinnung in Stundenschritten über ein Jahr optimiert. Dabei wurden zwei Modellierungsmethoden verglichen und hinsichtlich der Gesamtgenauigkeit, Abbildung des Anlagenverhaltens sowie Berechnungs- und Modellierungszeiten bewertet.

Bislang werden überwiegend gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle (MILP) verwendet, die in der Lage sind, komplexe Probleme in kurzer Zeit zu lösen. Hierbei müssen sowohl die Zielfunktion als auch alle Nebenbedingungen linear sein. In der Realität sind viele physikalische und technische Zusammenhänge nicht linear und werden häufig zu Lasten der Ergebnisgenauigkeit linearisiert.

Mittlerweile lassen sich aber auch gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle mit quadratischen Ausdrücken (MIQCP) durch kommerziell verfügbare Solver lösen. MIQCP-Verfahren bieten den Vorteil, dass sowohl in der Zielfunktion als auch in den Nebenbedingungen quadratische Ausdrücke verarbeitet werden können. So können Energiesysteme realistischer abgebildet und optimale Betriebspunkte mit einer höheren Genauigkeit bestimmt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass die Methode nicht nur höhere Genauigkeit bietet, sondern in vielen Anwendungsfällen trotz erhöhter Berechnungszeiten sogar zeitlich effektiver und praxistauglich ist.

Stichwörter:

Systemoptimierung, MIQCP, Energieeffizienz, Waterloop, Supermarktkälte

Energieeffiziente Steuerung von Kältemaschinen durch KI

Manfred Klimke ¹

Trevisto AG, Nunnenbeckstr. 6/8, 90489 Nürnberg Deutschland

manfred.klimke@trevisto.de

Überall dort, wo es darum geht, Steuerparameter in dynamischen, nichtlinearen Systemen, z. B. Kältemaschinen, über die Zeit zu optimieren, um z.B. die Energieeffizienz zu erhöhen, ist der Einsatz von Deep Reinforcement Learning sinnvoll. Das gilt vor allem dann, wenn klassische Regelungsansätze an ihre Grenzen stoßen, aufgrund komplexer Wechselwirkungen, verzögertem Feedback oder fehlender exakter Systemmodelle.

Soll das Optimierungsmodell vorausschauend arbeiten, ist es sinnvoll zunächst ein Prognosemodell zu erstellen, um zukünftige Zustände vorhersagen zu können. Auf der Basis dieses Prognosemodells wird das Optimierungsmodell trainiert. Der Vorteil dieses hybriden Ansatzes ist, dass das Training schneller wird, weil zukünftige Daten aus der Prognose vorhanden sind.

Im Rahmen des Verbundvorhaben „GOKAS - Gesamtsystemoptimierung von kältetechnischen Anlagensystemen für Energiewende und Klimaschutz“ wurden auf der Basis von Sensordaten für eine Kältemaschine ein Prognosemodell erstellt und das Optimierungsmodell trainiert.

Das so trainierte Netz ist in der Lage Steuerungsvorschläge zu generieren, wodurch die Energieeffizienz bei gleichbleibender Kälteleistung gesteigert werden kann.

3.20

Modellprädiktive Laststeuerung einer indirekten Kälteanlage

Experimentelle Erprobung der Reglerimplementierung

Daniel Pfeiffer*, Sebastian Haußer, Stefan Hudjetz, Martin Becker

Hochschule Biberach, Karlstraße 11, 88400 Biberach an der Riß, Deutschland
pfeiffer@hochschule-bc.de

Seit mehr als einem Jahrzehnt werden in der Literatur unter anderem zur Effizienzsteigerung, aber auch im Zusammenhang eines netzdienlichen Lastmanagements, modellprädiktive Regelungs- und Steuerungsansätze als vorteilhaft gegenüber einfacheren Regelungskonzepten eingestuft. Jedoch beruhen diese Einschätzungen bislang überwiegend auf Simulationsstudien, in welchen die regelungstechnische Implementierung nur vereinfacht abgebildet wird. Durch diese Vereinfachungen besteht bislang immer noch zu wenig Klarheit, welche konkreten regelungstechnischen Anforderungen sich für modellprädiktive Steuerungsalgorithmen in der realen Anwendung ergeben.

Ausgehend von der detaillierten Betrachtung realer Kälteanwendungen im Rahmen des Forschungsvorhabens GOKAS (FKZ: 03EN6003A) wird im vorliegenden Beitrag die experimentelle Untersuchung einer modellprädiktiven Laststeuerung für indirekte Kälteanlagen mit thermischem Speicher vorgestellt. Die Untersuchung basiert auf einer kältetechnischen Versuchsanlage der Hochschule Biberach, welche sich insbesondere durch ihren hohen Freiheitsgrad zur Regelungs- und Steuerungsimplementierung gegenüber anderen Versuchsanlagen auszeichnet. Basierend auf einer üblichen Basisautomatisierung der Kälteanlage werden Steuerungsalgorithmen unterschiedlicher Prognosegüte und Komplexität miteinander verglichen. Die experimentellen Ergebnisse verdeutlichen den hohen Stellenwert eines adäquaten Zusammenspiels mit der bestehenden Anlagenregelung insbesondere, wenn durch Prognoseabweichungen in Grenzbereichen eines vollständig abgekühlten oder aufgewärmten Kaltwasserspeichers eine energieeffiziente Betriebsführung gewährleistet werden soll.

Stichwörter: Model predictive control, Lastverschiebung, Flexibilisierung, Kaltwasserspeicher, MSR-Implementierung

3.21

Messtechnik und Methodik zur Regelung von Kompressionskältemaschinen nach dem Flüssigkeitsanteil am Verdampferaustritt

Lennart Böse¹, Michael Wensing²

¹ Malum GmbH, Meuschelstraße 12, 90408 Nürnberg

² Professur für Fluidsystemtechnik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg,
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen
lennart.boese@malum.eu

Die am Verdampferaustritt gemessene Überhitzung des Kältemittels stellt in Kompressionskältemaschinen eine verbreitete Regelgröße für das Expansionsventil dar, begrenzt aber die Verdampferleistung und kann die Effizienz

des Gesamtprozesses verringern. Als effizientere Alternative werden zwei neue Sensorverfahren zur Regelung nach dem Flüssigkeitsanteil am Verdampferaustritt vorgestellt: Infrarotabsorption des Kältemittels R410A sowie Bildanalyse der Zweiphasenströmung.

Ein Kompressionskältekreislauf mit Scrollverdichter und Plattenwärmeübertragern als Verdampfer und Kondensator dient als Versuchsanlage. Ein spezielles Strömungsschauglas ermöglicht die Ermittlung einer Korrelation zwischen Sensorsignal und Messdaten für beide Verfahren. Daraufhin wird eine Regelung für den gesamten Kälteprozess nach dem Flüssigkeitsanteil am Verdampferaustritt entworfen und experimentell erprobt.

Bei starken Lastwechseln kann mit dieser Art von Regelung das Auftreten von unerwünscht hohen Flüssigkeitsanteilen, die zu Verdichterschäden führen können, im Vergleich zur Überhitzungsregelung nach dem Stand der Technik gut vermieden werden. Auch instabile Betriebspunkte von Kältemaschinen lassen sich durch die geringeren Zeitkonstanten des neuen Regelverfahrens zufriedenstellend stabilisieren. Im Versuch konnte gezeigt werden, dass sich durch einen kontrollierten Flüssigkeitsanteil im Sauggas die Verdichtungsendtemperatur absenken lässt, was sich positiv auf die Lebensdauer von Kältekompressoren auswirken kann und Betriebspunkte von Kältemaschinen und Wärmepumpen mit hoher Kondensationstemperatur ermöglicht.

Stichwörter:

Flüssigkeitsanteile, Überhitzung, Regelung, Effizienz, Versuch, Stabilität

3.22

F-Sensor zur optischen Überwachung der Kältemittelfüllmenge

Ulrich Schindler*, Robin Langebach

Hochschule Karlsruhe, Schaufler-Professur für Verdichtertechnologie,
Institut für Kälte-, Klima und Umwelttechnik, Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe, Deutschland
ulrich.schindler@h-ka.de

Im Rahmen der Veröffentlichung wird ein weiterentwickelter Sensor zur qualitativen Detektion von Dampfblasen in flüssigem Kältemittel nach dem Verflüssiger in Kälteanlagen vorgestellt. Der Sensor basiert auf einer optischen Messmethode und wurde als Clip-on-Nachrüstlösung für Standard-Schaugläser entwickelt. Im Hauptanwendungsfeld wurde der optische Sensor für den Einsatz in der Saugleitung zur Erkennung von Flüssigkeitsanteilen in der Saugleitung entwickelt. Die vielversprechende Weiterentwicklung zeigt, dass das identische Messprinzip auf der Hochdruckseite nach dem Verflüssiger zur Überwachung des Füllstands eingesetzt werden kann. Trotz gleichem Messprinzip unterscheiden sich die Einflussgrößen sowie die Auswertelgorithmen aufgrund der geänderten Einsatzbedingungen erheblich. Die Auswertung und Bewertung des Sensorsignals muss durch geeignete Algorithmen und perspektivisch durch Methoden des maschinellen Lernens auf jede Anlage individuell angepasst werden.

Die Veröffentlichung zeigt den Aufbau des optischen Sensors und das Messprinzip, die Möglichkeiten der Füllstandsüberwachungen und erste Messergebnisse an einer Versuchsanlage. Zur experimentellen Validierung werden an der Versuchsanlage verschiedenen Betriebs- und Füllzustände durchlaufen. Die Messergebnisse zeigen, dass der Sensor in der Lage ist, Kältemittelmangel in Abhängigkeit von geänderten Betriebszuständen der Anlage sicher zu detektieren.

Stichwörter:

Optische Messmethode, Füllstandsüberwachung, Kältemittelverlagerung, Auswertelgorithmen

4.01

Arbeiten in den Ausschüssen Kältemaschinenöle und Kältemittel innerhalb des DIN-Normenausschusses Kältetechnik (FNKä)

Steffen Feja^{1*}, Wolfgang Bock², Felix Flohr³

¹ Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH Dresden, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
steffen.feja@ilkdresden.de

² FUCHS LUBRICANTS GERMANY GmbH, Friesenheimer Str. 19, 68169 Mannheim

³ Daikin Chemical Europe GmbH

Normung befasst sich mit dem Ziel, Sicherheit, Austauschbarkeit und Kompatibilität zur Steigerung von Effizienz und Produktivität mit hoher Akzeptanz zu erzeugen. Normen und auch Standards fördern durch deren flächen-deckende Erarbeitung und Anwendung die Zusammenarbeit auf dem Markt. Sie vereinheitlichen Prozesse, verbessern die Kommunikation durch klare Vorgaben und Strukturen und bauen so Handelshemmnisse ab. Auch für die Allgemeinheit sind Normen wichtig, da sie Geräte und Systeme sicher, qualitativ hochwertig und kompatibel machen, was die Nutzerfreundlichkeit und Kundenzufriedenheit erhöht. [1]

Der DIN-Normenausschuss Kältetechnik (FNKä) erarbeitet nationale, europäische und internationale Normen für Gestaltung, Ausrüstung sowie Aufstellung von Kälteanlagen einschließlich Wärmepumpen. Zum Aufgabengebiet gehören Normen für Haushaltsgeräte, Verkaufskühlmöbel, elektromotorisch angetriebene Wärmepumpen und Klimageräte, Verdichter, Kältemittel und Kältemaschinenöle sowie für die Fahrzeugkühlung. [2]

Zunächst geht der Vortrag auf die Struktur des FNKä ein und stellt die Aufgaben der einzelnen Ausschüsse anhand weniger Beispiele dar, bevor auf die Arbeiten der Unterausschüsse Kältemaschinenöle und Kältemittel eingegangen wird.

Im Bereich der Kältemaschinenöle wurde die Norm zu Mindestanforderungen für Kältemaschinenöle überarbeitet und sowohl in deutscher als auch englischer Sprache als DIN 51503-1:2021-12 veröffentlicht. Ein wichtiger Teil war hierbei die Zuordnung der HFO und HCFO zu den einzelnen Gruppen von Ölen. Im Vortrag werden die Grenzen der Einteilung und Möglichkeiten weiterer Einteilungsmöglichkeiten von Kältemaschinenölen dargelegt. Es wird auf Bestimmungsverfahren und die physikalischen Grenzen der Mindestanforderungen in Bezug auf die festgelegten Grenzwerte eingegangen. Derzeit befindet sich Teil 2 der Norm DIN 51503-2 „Gebrauchte Kältemaschinenöle“ in der Entwurfsphase. Die Experten des Ausschusses haben erstmalig Warnwerte für die Säurezahlen von gebrauchten Kältemaschineölen formuliert. Dies hilft jetzt deutlich bei der Beurteilung von gebrauchten Kältemaschinenölen, welche jedoch immer als Gesamtheit aller Warnwerte bzw. Parameter durchgeführt werden sollte. Denn auch bei Überschreitung von Warnwerten kann sich das Kältemaschinenöl noch in einem gebrauchsfähigen Zustand befinden [3]. Anhand von Beispielen werden Analysenwerte mit den Warnwerten verglichen und durch Hinzunahme weitere Parameter auf die Gebrauchsfähigkeit des Kältemaschinenöles geschlossen.

Ein weiterer Teil des Vortrages beschäftigt sich mit dem Vorhaben der Überarbeitung der DIN 8960 „Kältemittel – Anforderungen und Kurzzeichen“ aus dem Jahr 1998 innerhalb des Arbeitsausschusses „Kältemittel“. Ein wesentlicher Bestandteil der DIN 8960 ist die Beschreibung qualitativer Eigenschaften von Kältemitteln und der Testmethoden zur Messung der genannten Eigenschaften. In diesem Teil des Vortrages wird kurz auf die Qualitätsmerkmale und deren Abweichungen zu anderen Normen eingegangen und deren Defiziten zum Beispiel bei Kohlenwasserstoffen und Ammoniak herausgestellt. Eine Auflistung neuer Kältemitteln und neuer Testmethoden, die sich seit 1998 etabliert haben bzw. die Stand der Technik sind, schließen diesen Teil des Vortrages ab.

Stichwörter:

Normung, Kältetechnik, Kältemittel, Kältemaschinenöle, Reinheit

- [1] DKE; Grundlagen der Normung 28.01.2020; <https://www.dke.de/de/normen-standards/grundlagen-der-normung>; letzter Zugriff 05.05.2025.
- [2] DIN-Normenausschuss Kältetechnik (FNKä); Jahresbericht 2023, DIN e.V., 18.07.2024.
- [3] Entwurf zur DIN 51503-2 „Schmierstoffe – Kältemaschinenöle – Teil 2: Gebrauchte Kältemaschinenöle; Deutsches Institut für Normung, Dezember 2024.

4.02

Fördermaßnahmen zur Umrüstung auf brennbare Kältemittel

Jörn Schwarz^{1*}, Michael Arnemann²

¹ Ice-TeX Ingenieurbüro, Rühlower Damm 36, 17039 Rühlow, Deutschland
icetex@web.de

² Hochschule Karlsruhe, Institut für Kälte, Klima und Umwelttechnologie (IKKU),
76133 Karlsruhe, Deutschland
michael.arnemann@hs-karlsruhe.de

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) fördert im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative der Bundesregierung seit 2008 Maßnahmen an stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen, wobei drei wesentliche Ziele verfolgt werden: die Steigerung der Energieeffizienz, die Minderung des Kältebedarfs sowie die Reduktion der Emissionen fluorierter Treibhausgase.

Die ab 2024 gültige F-Gase-Verordnung der EU führt schrittweise zu einem Rückgang der Marktverfügbarkeit bisher verwendeter Kältemittel, die daher für Servicezwecke in immer geringerem Umfang zur Verfügung stehen werden. In vielen Fällen ist vor diesem Hintergrund eine Umrüstung bestehender Anlagen auf brennbare Kältemittel sinnvoll. Im Rahmen der aktuellen Förderrichtlinie des BAFA wird dies bereits gefördert.

Der Vortrag beinhaltet einen Abriss der gesamten Fördermaßnahmen des BAFA, eine Darstellung der Förderung der „Energieeffizienz-Umrüstung“ von Kleinanlagen mit verpflichtenden und optionalen Maßnahmen sowie einen Überblick über das Antragsverfahren.

4.03

Gesetzliche und normative Rahmenbedingungen für den Einsatz von Kohlenwasserstoffen

Dipl.-Ing. Karsten Beermann

¹ IKKE gGmbH, Kruppstr. 184, 47229 Duisburg-Rheinhausen
info@i-k-k-e.com

Kältemittel auf der Basis von Kohlenwasserstoffen finden aufgrund guter technischer und energetischer Eignung eine immer größer werdende Verbreitung. Aufgrund ihrer Brennbarkeit werden diese in der Sicherheitsklasse A3 eingeordnet.

Somit müssen die Vorgaben aus den gesetzlichen Vorgaben, wie der TRGS (Technische Regeln Gefahrstoffe), der gültigen Explosionsschutz-Richtlinie, aber auch der Unfallverhütungsvorschriften und des Weiteren auch der Stand der Technik, der sich aus der Normung ergibt, berücksichtigt werden.

Das komplexe Regelwerk muss auf die für den Anwendungsfall relevanten Bereiche betrachtet werden. Dabei sind auch konstruktive Unterschiede in der Ausführung der Anlagen relevant. Ferner muss eine ordnungsgemäße Dokumentation gemäß den geltenden Vorschriften erstellt werden.

4.04

Risiko- und Effizienzbewertung von Anlagen mit R-290

Vilim Mergl

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

Das Kältemittel Propan (R-290) bietet theoretisch Energieeffizienzvorteile, gehört wegen seiner Brennbarkeit aber zur Sicherheitsklasse A3. Beim Einsatz in Kälte- und Klimaanlage muss letzterem Rechnung getragen werden.

Dazu wurden zunächst Untersuchungen über das Leckage- und Brandverhalten von Kohlenwasserstoffen und besonders R-290 durchgeführt, wobei durch geeignete optische Verfahren austretende Leckagen visualisiert und zündfähige Bereiche experimentell eingegrenzt wurden, so dass eine Risikobewertung vorgenommen werden konnte.

Die Energieeffizienz vorhandener Anlagen wurde sowohl im Betrieb vermessen als auch in Simulationsrechnungen bestimmt. Die theoretischen Energieeffizienzvorteile von Anlagen mit R-290 wurden dabei bestätigt.

Die Simulationssoftware wird im Rahmen der Förderung von Kälte- und Klimaanlage des BAFA als „Effizienz-Check“ kostenlos zur Verfügung gestellt.

4.05

Ausgeführte Neu- und umgerüstete Bestandsanlagen mit Kohlenwasserstoffen

Christoph Scholten

Scholten Kälte & Klima GmbH & Co. KG, Zeppelinstraße 6, 47638 Straelen
info@scholten-kaelte.de

Durch die Notwendigkeit, Kältemittel mit niedrigem GWP einzusetzen, ergeben sich in der Praxis für den Wartungs- und Anlagenbaubetrieb neue Herausforderungen. Dazu zählen neben der Materialverträglichkeit auch die langfristige Verfügbarkeit für Reparaturen, die einfache Handhabung und Regelbarkeit der zu verwendenden Komponenten und die Effizienz, die sich durch das verwendete Kältemittel ergeben.

Insgesamt haben sich durch mehrjährige Erfahrungen in erster Linie Kohlenwasserstoffe, wie R600a, R290 oder R1270 als geeignet herausgestellt. Die gesetzlichen und normativen Vorgaben hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten können einfach eingehalten werden und führen insgesamt für den Betreiber wie auch für den Anlagenbauer zu wirtschaftlichen Lösungen.

Anhand ausgeführter Objekte können die Entscheidungskriterien für den Einsatz von Kohlenwasserstoffen und die sich daraus ergebenden energetischen und wirtschaftlichen Vorteile dargelegt werden.

4.06

Vergleich von Regelungskonzepten kältetechnischer Anlagen

**M.Sc. Sebastian Haußer*, M.Sc. Daniel Pfeiffer, Dr. Stefan Hudjetz,
Prof. Dr.-Ing. Martin Becker**

Hochschule Biberach, Institut für Gebäude- und Energiesysteme, Karlstraße 11, 88400 Biberach, Deutschland
hausser@hochschule-bc.de

Zum Schutz des Klimas und der Umwelt ist neben der Nutzung von erneuerbaren Energiequellen zur Bereitstellung von elektrischer Energie eine effiziente Nutzung dieser notwendig. Bei elektrisch angetriebenen Kältesystemen hat die Automatisierung bzw. Anlagenregelung einen wichtigen Stellenwert hinsichtlich Betriebsstabilität und Energieeffizienz.

In diesem Beitrag werden am Beispiel einer indirekt betriebenen Laborkälteanlage der Hochschule Biberach unterschiedliche Regelungskonzepte implementiert, getestet und hinsichtlich der Energieeffizienz miteinander verglichen. Die Energieeffizienz wird unter Anwendung eines in der VDMA 24247-7 vorgeschlagenen, bilanzraumbasierten Berechnungsansatzes bewertet. Als Referenz wird ein aus einer realen Feldanlage abgeleitetes Regelungskonzept verwendet. Dieses Konzept ist charakterisiert durch einen statischen Betrieb von mehreren Anlagenkomponenten wie zum Beispiel Pumpen im Kühl- und Kaltwasserkreislauf. Das hinsichtlich der Energieeffizienz optimierte Regelungskonzept zeichnet sich hingegen durch eine dynamische Anpassung aller Komponenten im System in Abhängigkeit der von der Nutzungsstelle benötigten Kälteleistung aus. Die experimentell aufgenommenen Versuchsdaten an der bereits erwähnten Laborkälteanlage zeigen sowohl die unterschiedlichen Betriebsarten als auch eine Verbesserung der Energieeffizienz durch den dynamischen Betrieb aller Komponenten im Kältesystem.

Stichwörter:

Optimierung, Automatisierung, Energieeffizienz, VDMA 24247-7, Laborkältesystem

4.07

R-454C Anlagenoptimierung – Theorie und Praxis im Einklang – Messdaten treffen auf Simulation

Dominic Düing^{1*}, Hans-Dieter Küpper²

^{1,2}Chemours Deutschland GmbH, Dornhofstraße 34, 63263 Neu-Isenburg, Deutschland

dominic.dueing@chemours.com
hans-dieter.kupper@chemours.com

Europa gilt als globaler Vorreiter bei der Reduzierung von CO₂ Emissionen. Die Implementierung der EU-F-Gase-Verordnung EU 573/2024 sowie die steigenden Energieeffizienz-Anforderungen unterstreichen das Engagement der Europäischen Union. Basierend auf den gesetzlichen Anforderungen ergeben sich zusätzliche Herausforderungen für die gesamte H-V-AC-R Industrie und das Handwerk.

Mit der Einführung alternativer Niedrig-GWP Kältemittel steigen die Anlagenkomplexität und Sicherheitsanforderungen. Bei R-744 bspw. ist es Stand der Technik, zusätzliche Maßnahmen zu treffen, welche die Anlagensicherheit und die Energieeffizienz erhöhen. Bei F-Gasen hingegen, sind effizienz erhöhende Maßnahmen im Bereich der stationären Kältetechnik bislang nur gelegentlich anzutreffen.

Zur Bestimmung und zum Vergleich von Anlagendaten werden zwei identisch aufgebaute R-454C Kälteanlagen mit zusätzlichen Druck- und Temperatursensoren ausgestattet. Die Messdaten werden aufgezeichnet und ausgewertet. Basierend auf den Kältesystemen und den Messergebnissen, wird ein thermodynamisches Modell entwickelt und validiert.

Als Basis dafür, werden beide Systeme in Standard-Ausführung vermessen und verglichen. Eines der Systeme wird dann mit Hilfe des thermodynamischen Modelles technisch weiterentwickelt. Ziel ist die Anlagenoptimierung mit Fokus auf Energieeffizienz und Kälteleistung. Bei der optimierten Kälteanlage werden systemrelevante Parameter schrittweise angepasst und bautechnische Änderungen vorgenommen. Die Datensätze beider Anlagen (standard / optimiert) werden im Zuge des Projektes miteinander verglichen, Optimierungspotentiale werden aufgezeigt.

Stichwörter:

Energieeffizienz, Systemoptimierung, Systemanalyse, Anlagenparameter, Modellierung, Thermodynamik, Hardware, Software, A2L, Niedrig GWP, HFO, Kältemittel

4.08

R-744-Kälteanlage in der Umweltsimulation

Melanie Cop^{1*}, Yixia Xu¹, Christiane Thomas¹, Raimund Kögler²

¹ Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland
melanie.cop@tu-dresden.de

² Feutron Klimasimulation GmbH, Am Weberbrunnen 1, 07957 Langenwetzendorf, Deutschland
raimund.koegler@feutron.de

Zur Überprüfung der Qualität und Beständigkeit technischer Bauteile werden selbige künstlich erzeugten Umgebungsbedingungen in Umweltsimulationskammern ausgesetzt. Die Anwendung zeichnet sich durch besondere Anforderungen an die Temperaturänderungsgeschwindigkeit der Luft im Prüfraum und die Variabilität des Arbeitspunktes aus. Der Betriebsbereich der konventionellen Kälteanlage deckt typischerweise Temperaturen bis zu -40 °C ab. Vor dem Hintergrund der aktuellen F-Gase-Verordnung 2024/573 resultieren aus dem GWP₁₀₀ der fluorierten Kältemittel größer als 150 wirtschaftliche wie rechtliche Unwägbarkeiten.

In der Gewerbekälte ist der Einsatz des Kältemittels R-744 (CO₂) bereits etabliert und auch aktuelle Marktentwicklungen unterstützen den Einsatz dieses Arbeitsfluids in der Umweltsimulation, insbesondere wegen seiner Sicherheitsklasse A1 (nicht brennbar, nicht toxisch). Es gilt jedoch die anwendungsspezifischen Herausforderungen wie z. B. die Regelung der Kälteleistung zwischen 100 % und ca. 5 % zu bewältigen.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens erfolgte der Aufbau einer Versuchsanlage mit dem Kältemittel R-744 zur Abkühlung der Prozessluft auf bis zu -50°C unter Verwendung markverfügbarer Komponenten. Der Beitrag stellt die Untersuchungsergebnisse der Versuchsanlage vor, welche sich auf die Abkühlgeschwindigkeit der Luft (gem. DIN EN 60068 3-5) und der minimal möglichen Lufttemperatur fokussieren.

Stichwörter:

R-744, CO₂, Leistungsregelung, Umweltsimulationskammer, Abkühlgeschwindigkeit

Regelung von Kältekreisläufen in Haushaltsgeräten

Kevin Wimmer*, Jan Kummer, Michael Lang, Raimund Almbauer

Technische Universität Graz, Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme,
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria

kevin.wimmer@ivt.tugraz.at, jan.kummer@ivt.tugraz.at
lang@ivt.tugraz.at, almbauer@ivt.tugraz.at

In Haushaltskühl- und Gefriergeräten (HHKG) wird seit Jahrzehnten die Kapillardrossel als einfaches, zuverlässiges und kostengünstiges Expansionsorgan eingesetzt. Durch den zunehmenden Einsatz von Verdichtern und Ventilatoren mit variabler Drehzahl sowie durch unterschiedliche Umgebungstemperaturen für die Energieverbrauchs-zertifizierung wird der Kältekreislauf aufgrund der fixen Geometrie der Kapillardrossel oftmals weit vom Optimum entfernt betrieben. Elektronische Expansionsventile (EEV) bieten hier aufgrund der möglichen Anpassung des Öffnungsquerschnitts Vorteile, benötigen jedoch aufwändige Messungen zur Steuerung, da eine geeignete Regelung bislang fehlt.

Konventionelle Regelungskonzepte von Kältekreisläufen mit EEV, welche in größeren Anlagen bereits im Einsatz sind, arbeiten mit der Überhitzungstemperatur nach dem Verdampfer bzw. der Unterkühlungstemperatur nach dem Verflüssiger, um den Kältekreislauf in der Nähe seines Optimums zu betreiben. Jedoch können diese Regelungskonzepte in HHKG aufgrund der geringen Kälteleistungen und der thermischen Trägheit zu Schwingungen führen.

Daher werden in dieser Veröffentlichung zuerst die Probleme einer Regelung mit der Überhitzungstemperatur des Verdampfers analysiert. In weiterer Folge wird ein neues Regelungskonzept präsentiert. Das neue Konzept sieht den Einsatz eines Hoch- und eines Niederdrucksammlers vor, die jeweils siedende Flüssigkeit und Sattedampf enthalten. Dadurch gibt es eine weitere Regelgröße, nämlich den Füllstand des Hochdrucksammlers, die anzeigt, ob der Kreislauf nahe seines Optimums betrieben wird. Mithilfe des neuen Regelungskonzepts werden der Austritt aus dem Verflüssiger auf eine Dampffziffer von 0 (siedende Flüssigkeit) und der Austritt aus dem Verdampfer auf eine Dampffziffer von 1 (Sattedampf) eingeregelt und so der Kältekreislauf nahe seines Optimums betrieben.

Abschließend wird das neue Regelungskonzept mit dem hauseigenen Kältekreislauf-Simulationsmodell getestet und mit der konventionellen Verdampfer-Überhitzungstemperaturregelung verglichen. Es zeigt sich, dass die Verdampfer-Überhitzungstemperaturregelung zum Überspringen neigt. Die Füllstandsregelung hingegen verspricht ein stabiles Regelverhalten.

Stichwörter:

Kältekreislaufregelung, Füllstandsregelung, elektronisches Expansionsventil, einstellbares Expansionsventil, Haushaltskühlschrank, Haushaltsgefrierschrank

Messung der Eismassenverteilung am Verdampfer von Gefriergeräten

Jan Kummer*, Kevin Wimmer, Michael Lang, Raimund Almbauer

Technische Universität Graz, Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria

jan.kummer@ivt.tugraz.at, kevin.wimmer@ivt.tugraz.at
lang@ivt.tugraz.at, almbauer@ivt.tugraz.at

Der Energieverbrauch moderner Haushalts-Gefriergeräte wird durch Vereisungs- und Abtauprozesse beeinflusst. Insbesondere das Abtauen macht etwa 7–10 % des Gesamtenergieverbrauchs aus und stellt somit einen

erheblichen Anteil dar. Aktuelle No-Frost-Systeme nutzen elektrische Heizungen, um das Eis auf den Verdampfern zu entfernen. Das ist besonders relevant, da durch das Eis der Wärmeübergang und somit auch die Energieeffizienz des Gesamtsystems negativ beeinflusst wird. Diese Vorgehensweise führt jedoch häufig zu einem übermäßigen Energieeinsatz, da sichergestellt werden muss, dass das Eis restlos abgetaut wird. Die nachfolgende Abführung der eingebrachten Wärmeenergie stellt einen zusätzlichen Energieaufwand dar. In den am Markt verfügbaren Geräten, die üblicherweise keine direkte Messung der Eismasse vornehmen und lediglich auf zeitgesteuerte oder temperaturbasierte Abtauzyklen setzen, bleiben die Abtauprozesse daher potenziell ineffizient und energieintensiv.

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurde in der Forschungsgruppe ein Messverfahren entwickelt, mit dem sich die Eismasse sowie deren räumliche Verteilung auf dem Verdampfer präzise erfassen lassen. Dafür werden nahe dem Verdampfer an örtlich definierten Stellen mehrere Elektroden angebracht, durch die eine kapazitive Messung an mehreren Stellen ermöglicht wird. Das lässt eine Echtzeitüberwachung der Eisbildung zu und eröffnet neue Möglichkeiten für die Gestaltung bedarfsgerechter Abtauprozesse. Durch die gezielte Steuerung des Abtauvorgangs anhand der Messdaten können unnötige Abtauzyklen und die übermäßige Zuführung von Wärmeenergie vermieden und damit der Energieverbrauch reduziert werden.

Die vorgeschlagene Methode schafft die Voraussetzung, Abtauzyklen zukünftig gezielt und ressourcenschonend zu optimieren. Da keine wesentlichen Änderungen am bestehenden System erforderlich sind, eignet sich der Ansatz für die Integration in bestehende Systemarchitekturen.

Stichwörter:

Vereisung, Abtauprozess, Eismassenverteilung, Wärmeübertrager, Verdampfer, No-Frost-System, Haushaltsgefrierschrank, Optimierung von Abtauzyklen

4.11

Flächenheizung und -kühlung im Schienenfahrzeug – Konzept, Potenziale und Herausforderungen

Max Schott^{12*}, Oliver Garack²

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

Die Klimatisierung von Schienenfahrzeugen ist anspruchsvoll und energieintensiv, aufgrund hoher klimatechnischer Lasten auf engstem Raum sowie strenger Restriktionen hinsichtlich Masse und Bauraum. In den vergangenen Jahren rückten jedoch die Themen Energieeffizienz und thermische Behaglichkeit bei der Fahrzeugentwicklung immer mehr in den Fokus, nicht zuletzt durch alternative Antriebe sowie gestiegene Komfortansprüche bei den Fahrgästen. Deshalb werden zunehmend Verbesserungsmöglichkeiten der herkömmlichen Klimatisierung mit einer Luftaufbereitungsanlage untersucht.

In diesem Beitrag wird das Konzept eines flüssigkeitsbasierten Flächenheiz- und -kühlsystems für den Fahrgastraum in Schienenfahrzeugen systematisch dargestellt und vorhandene Potenziale sowie Herausforderungen erläutert. Dafür werden zunächst schienenfahrzeugspezifische Anforderungen und Problemstellungen der Klimatisierung thematisiert und daraus Randbedingungen für die Flächentemperierung abgeleitet. Darauf aufbauend wird näher auf den Einfluss temperierter Flächen auf das Raumklima und die thermische Behaglichkeit sowie auf Energieeinsparpotenziale eingegangen. Abschließend zu den theoretischen Betrachtungen wird die Integration der Flächentemperierung in das Fahrzeugklimasystem skizziert.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Flächentemperierung, insbesondere die der Decke und des Fußbodens, im Fahrgastraum von Schienenfahrzeugen den Energiebedarf des Klimasystems reduzieren und gleichzeitig die thermische Behaglichkeit der Fahrgäste auf gleichem, teilweise besserem, Niveau halten kann. Über einen Flüssigkeitskreislauf kann die Flächentemperierung in das Klimagerät direkt eingebunden werden

und bedarf dadurch keiner separaten Wärme- und Kälteerzeugung. Das senkt den anlagentechnischen Aufwand und bietet die Möglichkeit weitere Wärmequellen und -senken, wie Batterie- oder Brennstoffzellenkühlung, in das Klimasystem einzubinden.

Stichwörter:

Schienenfahrzeug, Klimatisierung, Flächenheizung, Flächenkühlung, Behaglichkeit

4.12

Intelligente Wartung von Klimaanlage am Use Case Schienenfahrzeug

Peter Schrank^{1*}, Hannes Allmaier¹, Christian Luger², Anna Klimt³, René Rieberer⁴

¹ Virtual Vehicle Research GmbH, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Österreich
peter.schrank@v2c2.at, hannes.allmaier@v2c2.at

² Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG, Liebherrstraße 1, 2100 Korneuburg, Österreich
christian.luger@liebherr.com

³ Siemens Mobility Austria GmbH, Leberstraße 34, 1110 Wien, Österreich
anna.klimt@siemens.com

⁴ Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25b, 8010 Graz, Österreich
rene.rieverer@tugraz.at

Die Instandhaltung eines Schienenfahrzeuges ist ein wesentlicher Faktor hinsichtlich Verfügbarkeit, Fahrgastzufriedenheit, Instandhaltungs- sowie Betriebskosten und Umweltfreundlichkeit. Das Forschungsprojekt „SMACS“ (Smart Maintenance of Rail HVAC Systems) verfolgt das Projektkernziel intelligente Instandhaltung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystemen (HLK) in Schienenfahrzeugen voranzutreiben. Fokusfelder sind dabei bedarfsorientierte, zustandsabhängige Instandhaltungsstrategien sowie effiziente, digital vernetzte Instandhaltungsprozesse und Tools. SMACS strebt durch ein technisch, logistisch und wirtschaftlich durchdachtes Gesamtsystem Verbesserungen über den gesamten Betriebszyklus sowie die gesamte Prozesskette an.

Als neue Instandhaltungsstrategien werden in SMACS Condition-based und Predictive Maintenance unter Einsatz von Digital Twins und KI-basierten Prognosemodellen entwickelt. Dazu werden für eine aktuelle Bahn-HLK-Anlage sowohl sehr umfangreiche und detaillierte Datensätze vom Versuchsstand als auch Datensätze aus dem realen, flottenweiten Passagierbetrieb mit geringerem Detaillierungsgrad einbezogen.

Informationen aus der Condition-based und Predictive Maintenance sollen in weiterer Folge durch einen digitalen Assistenten zur Wartungsplanung aggregiert und anwendungsorientiert bewertet werden. Dieser soll dann über ein Expertensystem das ausführende Wartungspersonal unterstützen.

Dieses Manuskript beinhaltet eine allgemeine Systembeschreibung, Messergebnisse vom Versuchsstand sowie erste Ergebnisse der KI-basierten Methodiken bzw. Machine Learning Algorithmen und des Digital Twins.

„Smart Maintenance“ verspricht eine deutliche Verbesserung der Nachhaltigkeit, Senkung der Instandhaltungs- und Lagerkosten sowie eine Attraktivitätssteigerung für Passagiere. Zudem erhöht sich die Verfügbarkeit von Zuggarnituren.

Stichwörter:

Zustandsabhängige und prädiktive Wartung, Digital Twin, HLK

4.13

Elektrischer Kältemittelverdichter für R744 – der digitale Zwilling

Dr. Robert Scherzer¹

¹thyssenkrupp Dynamic Components, Thermal Management - Head of Simulation,
Heinrich-Lorenz-Strasse 57, 09120 Chemnitz, Deutschland
robert.scherzer@thyssenkrupp-automotive.com

Die heutige Automobilindustrie wird von synthetischen Kältemitteln beherrscht. Die mit deren Verwendung verbundenen, negativen Umweltauswirkungen sind weithin bekannt und führen derzeit zu einer Umstellung auf natürliche Kältemittel. Der Einsatz von R744 als Kältemittel bietet hierbei ein hohes Maß an Betriebssicherheit sowie eine hohe Leistungsdichte. Demgegenüber bedingen hohe Betriebsdrücke sowie der vergleichsweise niedrige COP von R744 bei sehr hohen Außentemperaturen zusätzliche Anforderungen an die Effizienz des verwendeten Kältemittelverdichters.

Um diese Herausforderungen zu meistern, hat thyssenkrupp Dynamic Components einen effizienten und robusten Kältemittelverdichter speziell für den Einsatz in Automobilanwendungen mit dem Kältemittel R744 entwickelt. In Begleitung der Entwicklung wurde ein digitaler Zwilling aufgebaut, der eine stetige Validierung zwischen Versuch und Simulation sowie konstruktive Optimierungen ermöglicht.

Der Beitrag gibt einen Überblick zu den Eigenschaften des Kältemittelverdichters sowie einen Einblick in die modellgestützte Entwicklung bis hin zum serienreifen Produkt.

Stichwörter:

R744, Kältemittelverdichter, automobile Anwendung, Simulation, digitaler Zwilling

4.14

Simulationsstudie von R-474A, R-1234yf und R-744 unter Verwendung von Digital Twins

Christian Macri, Felix Flohr, Álvaro de León

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

Der Transformation hin zu batterie-elektrischen Fahrzeugen (BEVs) hat die Rolle von Thermomanagementsystemen hinsichtlich der optimaler Energieeffizienz, Batterielebensdauer und Fahrgastkomfort immer stärker in den Vordergrund gerückt. Ein effektives Thermomanagement beeinflusst die Fahrzeugreichweite direkt, indem es den Kühl- und Heizbedarf abdeckt und gleichzeitig den Stromverbrauch minimiert. Kältemittel spielen in dieser Gleichung eine entscheidende Rolle, da ihre thermophysikalischen Eigenschaften die Wärmeübertragungseffizienz, die Systemdrücke und den Gesamtenergieverbrauch beeinflussen.

Die Automobilindustrie ist derzeit verstärkt auf der Suche nach Alternativen zu herkömmlichen Kältemitteln. Insbesondere für Wärmepumpenanwendungen müssen die niedrig-GWP Kältemittel (Global Warming Potential) der nächsten Generation, wie etwa R-474A, eine überlegene Leistung bei gleichzeitiger Wahrung der Sicherheit und Umweltverträglichkeit nachweisen.

In dieser Studie wird ein umfassendes Benchmarking des neuen Kältemittels R-474A im Vergleich zu R-1234yf und R-744 in einem repräsentativen BEV-Thermomanagementsystem vorgestellt. Es wurde ein mehrstufiger Simulationsansatz durchgeführt, der auf Systemebene begann, sich auf die Fahrzeugebene erstreckte und mit Bewertungen unter transienten Fahrbedingungen über verschiedene Fahrprofile und Umgebungstemperaturprofile abschloss. Ein digitaler Zwilling sowohl des Thermomanagements als auch des Fahrzeugs wird hierfür eingesetzt, um die Kältemittelleistung unter realen Betriebsbedingungen zu bewerten. Die Ergebnisse liefern

Erkenntnisse über das Potenzial von R-474A zur Steigerung der Energieeffizienz, insbesondere unter kalten und heißen Klimabedingungen, wo die Kältemiteleigenschaften den Wärmepumpenbetrieb erheblich beeinflussen.

Die Studie zielt darauf ab, eine datengestützte Bewertung in Bezug auf die Rolle von Kältemitteln der nächsten Generation als Lösung in zukünftigen Elektrofahrzeugplattformen im Hinblick auf Effizienz, Umweltverträglichkeit und Kabinenkomfort zu bieten.

Keywords:

Niedrig-GWP, A2L-Kältemittel, Alternative Kältemittel, Energieeffizienz, R-474A, Digitaler Zwilling, Benchmark, Simulation

4.15

Batterieelektrische Fernbusse mit Feststoffbatterie

Modellierung und Untersuchung der Anforderungen an das Thermomanagementsystem

**Jan Friedrich Hellmuth^{1*}, Markus Pollak², Andreas Schulte¹, Nicholas Lemke^{1,2},
Wilhelm Tegethoff^{1,2}, Jürgen Köhler¹**

¹Technische Universität Braunschweig, Institut für Thermodynamik,
Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Deutschland
Jan.hellmuth@tu-braunschweig.de

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

Feststoffbatterien sind eine vielversprechende Weiterentwicklung für die Elektromobilität, da sie potenziell eine höhere Energiedichte und damit Reichweite sowie höhere Langlebigkeit und Sicherheit bieten. Die im Vergleich zu herkömmlichen Batterien veränderten elektrischen und thermischen Eigenschaften haben Auswirkungen auf die Anforderungen an das Thermomanagement – beispielsweise durch höhere Betriebstemperaturen oder gesteigerte Abwärmemengen.

Zur Evaluierung dieser geänderten Anforderungen an das Thermomanagement wird ein Gesamtfahrzeugmodell eines Fernbusses um ein Feststoffbatteriesystem erweitert. Es werden verschiedene Auslegungen von Feststoffbatteriesystemen mit herkömmlichen Batteriesystemen verglichen. Die Sub-Modelle für das elektrische und thermische Verhalten der Feststoffbatteriezeile werden mit Mess- und Literaturdaten parametrisiert.

Mit Hilfe von Simulationsstudien für das Batteriesystem und im Gesamtfahrzeugkontext werden Anforderungen an das Thermomanagement abgeleitet. Es werden verschiedene Querkopplungen im Gesamtsystem berücksichtigt und Randbedingungen in Form von Wetterbedingungen und Fahrzyklen betrachtet. Für das Thermomanagement wird ein vorhandenes System einer umschaltbaren Wärmepumpe mit dem natürlichen Kältemittel R744 verwendet. Anhand der Ergebnisse der Simulationsstudien werden mögliche Anpassungen des Thermomanagement-Systems und Betriebsstrategien diskutiert.

Stichwörter:

BEV, Thermomanagement, Feststoffbatterie, Fahrzeugsimulation, natürliche Kältemittel

4.16

Thermal Management für PKW mit natürlichen Kältemitteln

Fokus auf elektrische und teilelektrische Fahrzeuge

Florian Wieschollek^{1*}, Dr. Roman Heckt²

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

In den letzten Jahren ist der Marktanteil elektrischer und teilelektrischer Fahrzeuge (EV, PHEV) kontinuierlich angestiegen. Damit einhergehend gewinnt das thermische Management dieser Fahrzeuge zunehmend an Bedeutung, insbesondere zur Sicherstellung der Effizienz und Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs.

Die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums erfolgt bei hohen Umgebungstemperaturen über einen klassischen Kältemittelkreislauf. Dieser wird häufig durch eine Wärmepumpenfunktion ergänzt, um eine effiziente Beheizung der Kabine auch bei geringer Abwärme aus den Antriebskomponenten zu ermöglichen. Darüber hinaus sollen auch die Antriebskomponenten wie elektrischer Motor, Wandler und der Hochvoltspeicher innerhalb definierter Temperaturbereiche betrieben werden, um eine optimale Leistungsfähigkeit und Lebensdauer zu gewährleisten.

Das aktuell großflächig eingesetzte Kältemittel R1234yf steht infolge der davon ausgehenden PFAS bzw. TFA Emissionen und der ausstehenden EU-Regulierung unter Substitutionsdruck. Als mögliche Alternativen bieten sich die natürlichen Kältemitteln R290 und R744 an. Beide Kältemittel können für EV und PHEV eingesetzt werden, erfordern Anpassungen in der Systemarchitektur und auf Komponentenebene.

Hanon Systems hat hierfür spezifische Komponenten sowie angepasste Kreislaufarchitekturen entwickelt, die seit 2020 im Serieneinsatz sind. Die Systemlösungen unterliegen einem kontinuierlichen Optimierungsprozess hinsichtlich Effizienz, Robustheit und Kompatibilität mit bestehenden Plattformen. Diese werden im Rahmen dieses Vortrags vorgestellt.

Stichwörter:

Automobil, Klimatisierung, natürliche Kältemittel, R290, R744

4.17

Niedrig GWP Kältemittel für stationäre AC/WP-Anwendungen

Felix Flohr, Christian Macri, Álvaro de León

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

In Europa treibt die EU-F-Gas-Verordnung den Bedarf an nachhaltigen und sicheren Kältemittelalternativen voran. [1] R-474A, ein Kältemittel mit extrem niedrigem GWP und A2 Klassifizierung, bietet eine praktikable Lösung für private und gewerbliche Anwendungen und vereint vorteilhaftes Umweltverhalten, Energieeffizienz und Sicherheit.

Kohlenwasserstoffe (KW) wie z. B. R-290 gewinnen aufgrund ihres niedrigen GWP und ihrer Eigenschaft als natürliches Kältemittel an Interesse. Jedoch wirft es wegen der erhöhten Brennbarkeit als A3 klassifiziertes Kältemittel Sicherheitsbedenken auf, sei es bei Anwendungen mit größeren Füllmengen oder wenn Bauvorschriften und Installationsbedingungen Kältemittel mit geringerer Brennbarkeit erfordern. R-474A bietet eine sicherere A2L-Alternative mit deutlich geringerem Brennbarkeitsrisiko und dennoch einer erheblichen Reduzierung des GWP im Vergleich zu anderen modernen Kältemitteln wie R-454C oder R455A, die im RACHP-Sektor verwendet werden. R-474A kann gemäß Sicherheitsnormen wie EN 378 oder ISO 5149 in vielen

Anwendungen mit höheren Füllmengen im Vergleich zur A3 Kältemitteln oftmals ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen eingesetzt werden. [2]

Die regulatorischen Entwicklungen rund um PFAS spielen eine wichtige Rolle für die Zukunft synthetischer Kältemittel. Da R-474A R-1234yf enthält, könnten die laufenden Diskussionen über eine mögliche Beschränkung die zukünftige Markteinführung beeinflussen. [3]

Unter Berücksichtigung einer ausgewogenen wissenschaftlichen Risikobewertung, der Umweltvorteile und des regulatorischen Rahmens gibt der Vortrag Auskunft über R-474A, seine technischen und regulatorischen Herausforderungen sowie seine Rolle bei der Gestaltung der zukünftigen Kältemittellandschaft. Hierzu werden vergleichende Messergebnisse von AC-WP Systemen vorgestellt und das Potenzial als zukünftiges Kältemittel aufgezeigt.

Keywords:

Niedrig-GWP, A2L-Kältemittel, Alternative Kältemittel, Energieeffizienz, EU F-Gas VO, PFAS, R 474A, Benchmark, Simulation

[1] (EU) 2024/573: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj>

[2] DIN EN 378-1:2021-06 und ISO 5149-1:2014-04: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen

[3] European Chemicals Agency: <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

4.18

Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in Eissporthallen

Entwicklung und Validierung eines TRNSYS Modells zur Analyse von Effizienzmaßnahmen

R. Ebid*, F. Micus, D. Fleig, U. Jordan

Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kurt-Wolters-Straße 3, 34125 Kassel, Germany
solar@uni-kassel.de

Eissporthallen gehören zu den energieintensiven Gebäudetypen, da neben der Kühlung der Eisfläche ein temperatur- und feuchtekontrolliertes Raumklima sowie eine zuverlässige Luftentfeuchtung wünschenswert sind. Ziel dieser Arbeit ist die energetische Optimierung von Eissporthallen durch die Reduktion verschiedener Energiebedarfe – insbesondere Heiz-, Kühl- und Entfeuchtungsbedarfe – mithilfe ausgewählter Effizienzmaßnahmen.

Drei Eissporthallen in Deutschland wurden mittels thermischer Gebäudesimulation untersucht. Hierzu wurde in SketchUp das jeweilige 3D-Modell erstellt und anschließend die thermischen Zonen sowie die internen Lasten in TRNSYS aufgebaut und simuliert. Die Validierung der Modelle erfolgte anhand der durchgeführten Langzeitmessungen von Lufttemperaturen und relativen Feuchten im Halleninneren. Für alle drei Hallen wurde ein Index of Agreement von 80 bis 90 % sowohl bei der Temperatur als auch beim Wassergehalt erreicht.

Das validierte TRNSYS-Modell wurde anschließend verwendet, um verschiedene Effizienzmaßnahmen zu simulieren. Der Einsatz von Low-Emissivity-Membranen an der Hallendecke kann den Kühlbedarf deutlich reduzieren – insbesondere bei ganzjährigem Betrieb, da die Einsparungen in den Sommermonaten am höchsten sind. Eine verbesserte Dämmung der Gebäudehülle oder eine temporäre Erhöhung der Eistemperatur – beispielsweise nachts – können maßgeblich zur Senkung des Heiz- und Kühlbedarfs beitragen. Eine erhöhte Luftdichtheit führt zu einer signifikanten Reduzierung des Heiz- und Entfeuchtungsbedarfs.

Stichwörter:

Eissporthallen, Energieeffizienz, Gebäudesimulation, TRNSYS, Dämmung, Entfeuchtung, Luftdichtheit, Effizienzmaßnahmen

Fernkälteversorgung Linz

Sensitivitätsanalyse des Kältebedarf-Lastgangs sowie Dimensionierung der Kältemaschinen und des Kältespeichers

Christoph Zainer^{1*}, Christoph Astl¹, Julia Fabris¹, Bernhard Thek¹

Christian Scheinecker², Christoph Greitner², Peter Mühlsteiner²

¹ ENERTEC Naftz & Partner GmbH & Co KG, Asperngasse 2-4, 8020 Graz, Österreich
c.zainer@enertec.at, c.astl@enertec.at, j.fabris@enertec.at, b.thek@enertec.at

² Linz AG, LINZ STROM GAS WÄRME GmbH, Wiener Straße 151, 4021 Linz, Österreich
c.scheinecker@linzag.at, c.greitner@linzag.at, p.muehlsteiner@linzag.at

Aufgrund der durch den Klimawandel weiter steigenden Außentemperaturen wird das Thema der energieeffizienten Kühlung immer bedeutender. Zusätzlich ist durch die weitere Zunahme der Weltbevölkerung in Kombination mit dem steigenden Wohlstand und den damit verbundenen Komfortbedürfnissen eine weitere Erhöhung des Kältebedarfs zu erwarten. Dies stellt vor allem in Ballungszentren wie Großstädten ein infrastrukturelles Problem dar, weshalb die Aus- oder Nachrüstung von Klima- oder Kälteanlagen eine immer größer werdende Bedeutung erlangt.

Die Aus- und Nachrüstung von Gebäuden mit einer Vielzahl kompakter Kälteanlagen resultiert jedoch meist in einem ineffizienten Betrieb, was mit einem gesamtheitlich hohen Stromverbrauch verbunden ist. Gründe dafür sind unter anderem der kleine Bauraum und die damit einhergehende Komponentenskalierung, die Verwendung der Außenluft als Wärmesenke oder auch die bedarfsorientierte anstatt der wirtschaftlichen (durch beispielsweise beladen eines Kältespeichers bei günstigen Umgebungsbedingungen) Betriebsweise der Kälteanlage.

In der vorliegenden Veröffentlichung werden bezugnehmend auf die aktuell in Errichtung befindende Fernkältezentrale der Stadt Linz, die im Jahr 2028 in Betrieb genommen werden soll, die Vorteile einer zentralen Fernkälteversorgung vorgestellt. Da der aus einer Vorstudie vorliegende Kältebedarf-Lastgang der Stadt zukünftig aufgrund teilweise noch nicht eindeutig prognostizierbarer Kundennutzungsprofile oder Außentemperaturveränderungen vom Auslegungsfall abweichen kann, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und dargestellt, welche klima- und verbraucherbezogene Änderungen berücksichtigt. Nachdem die entscheidenden Fälle aus dieser Analyse bekannt sind, wird für diese die technische und wirtschaftliche Sinnhaftigkeit der Errichtung eines Kältespeichers sowie dessen optimale Speicherkapazität und die daraus resultierende Dimensionierung der Kältemaschinen der Fernkältezentrale diskutiert.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die relevanten Schwer- und Teillastfälle, die für die Auslegung sowie für ein gegen Störungen robustes Gesamtsystem ausschlaggebend sind. Weiters ist ersichtlich, dass die Errichtung eines Kältespeichers sowohl technisch als auch wirtschaftlich bereits zu einem frühen Zeitpunkt eines solchen Projekts sinnvoll ist. Diese Untersuchungen sind für Kühlkonzepte anderer Städte, aber auch für die Kühlung von Rechenzentren oder anderen Großabnehmern relevant.

Stichwörter:

Fernkälte, Kältespeicher, Fernkältezentrale, Kälteprozess, Sensitivitätsanalyse

4.20

NH₃-Kälteanlage einer Molkerei mit integrierter Wärmepumpe

Analyse des Anlagenbetriebs unter Berücksichtigung des Cleaning-In-Place Systems

Manuel Verdnik*, Philipp Eliskases, René Rieberer

Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25B, 8010 Graz, Österreich
manuel.verdnik@tugraz.at

Industrielle Wärmepumpen ermöglichen die Bereitstellung von Prozesswärme durch Anheben von Abwärme auf ein nutzbares Temperaturniveau. Bei der Untersuchung von in Betrieb befindlichen Anlagen, vor allem wenn diese einen laufenden Produktionsprozess bedienen, ermöglichen Simulationsmodelle in Verbindung mit Messdaten des Betriebes eine Analyse des aktuellen Anlagenbetriebes und Simulation weiterer Szenarien.

Die vorliegende Anlage besteht aus einer NH₃-Kälteanlage (max. Kälteleistung ca. 900 kW), die Teile des Kältebedarfes einer Molkerei bei einer Kaltwasseraustrittstemperatur von ca. 1 °C deckt. Die direkt in den Kältemittelkreis der Kälteanlage integrierte Wärmepumpe (max. Heizleistung ca. 550 kW) nutzt die Abwärme der Kälteanlage und deckt damit Teile des Wärmebedarfes des Cleaning-In-Place Systems und der Käserei durch die Bereitstellung von Heißwasser bei Temperaturen von bis zu 90 °C. Der verbleibende Wärmebedarf wird mittels Dampf gedeckt. Die Wärmepumpe bedient einen Heißwasserspeicher mit einem Volumen von 12 m³. Mit diesem Speicher werden sowohl Abnehmer der Käserei als auch Wärmeübertrager zum Vorwärmen von Säure und Lauge des Cleaning-In-Place Systems versorgt.

Im Zuge dieser Arbeit wird nach Vorstellung des Anlagenaufbaus auf die Betriebscharakteristik der Anlage im stationären und transienten Betrieb eingegangen, vereinfachte Simulationsmodelle der Anlage sowie des Cleaning-In-Place Systems vorgestellt und daraus abgeleitet Simulationsstudien zur Reduktion des Dampfverbrauches präsentiert. Die untersuchten Maßnahmen umfassen unter anderem die Änderung der Heißwassertemperatur (Wärmesenkenaustrittstemperatur der Wärmepumpe) und eine geänderte Prozessführung der Reinigungsflüssigkeiten (Nutzung der Säure- und Laugespeicher während der Reinigungsvorgänge).

Stichwörter:

R717, modellbasierte Analyse, Abwärmenutzung, Speicher

4.21

Nichtinvasive Bestimmung des Wärmeeintrags in Kühlgeräten

Jan Kummer*, Kevin Wimmer, Michael Lang, Raimund Almbauer

Technische Universität Graz
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme
Inffeldgasse 19, 8010 Graz, Austria
jan.kummer@ivt.tugraz.at, kevin.wimmer@ivt.tugraz.at, lang@ivt.tugraz.at, almbauer@ivt.tugraz.at

Der Wärmeeintrag in Kühl- und Gefriergeräte ist maßgeblich für den elektrischen Energieverbrauch, der der Energieeffizienz-Zertifizierung zugrunde liegt. Die verbesserten Isolierungen, die durch die Verwendung von Vakuumpaneelen ein bisher nicht erreichtes Niveau erzielen, führen zu Wärmeeintragswerten von nur 20 bis 35 Watt für typische freistehende Kombigeräte (60 x 60 x 200 cm) der Effizienzklasse A bzw. B. Für die Bewertung von Fertigungsprozessen und Isoliertechnologien sind die realen Wärmeeintragsdaten von großem Interesse.

Der Wärmedurchgangswert kann überschlagsmäßig mit einer umgekehrten Wärmestromrichtung (Innenraumtemperatur höher als Umgebungstemperatur) gemessen werden. Dazu wird mit einer elektrischen Heizung im Innenraum eine gleichbleibende Temperaturdifferenz zur Umgebung eingeregelt und die Leistung gemessen. Dabei werden jedoch zahlreiche Ungenauigkeiten in Kauf genommen. Auf Grund der veränderten Temperaturen weichen die Stoffwerte der Isolierung und der festen Bauteile im Kühlgerät ebenso wie Stoffwerte der feuchten

Luft im Vergleich zum Realbetrieb ab. Zusätzlich treten unterschiedliche Verformungen des Gehäuses im Vergleich zum regulären Betrieb aufgrund von veränderten thermischen Verspannungen auf.

Grundsätzlich sollte die Messung idealerweise bei realen Bedingungen erfolgen. Die hier vorgeschlagene Methode basiert auf einem transienten Abkühlen des Kühlgeräts bis zu einer 2K tieferen Temperatur im Vergleich zur vorgegebenen Solltemperatur. Dabei werden Metallstäbe, die mit genauen Temperatursensoren ausgestattet sind, mitgekühlt. Danach wird der Kälteprozess abgeschaltet und die transiente Erwärmung der Metallstäbe gemessen. Aufgrund der geringen Biot-Zahl ist die Temperatur innerhalb der einzelnen Stäbe kaum unterschiedlich, sie erhöht sich jedoch durch den eintretenden Wärmestrom. Die Auswertung von mehreren Messungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmekapazitäten lässt auf den Wärmeeintrag schließen.

Die auftretenden Ungenauigkeiten durch den fehlenden Betrieb des Kälteprozesses und die transiente Messung werden diskutiert. Die Messung ist aufgrund der Einfachheit des Prinzips und des nicht-invasiven Ansatzes auch für stichprobenartige Untersuchungen der Kühlgeräte aus der Fertigung geeignet.

Stichwörter:

Wärmeeintragsmessung, Haushaltskühlschrank, Haushaltsgefrierschrank, nicht invasive Methode, Wärmedurchgang

4.22

Kombinierte Adsorptions- und PCM-Kälte-Speicher:

Einfluss auf die Kühlraumtemperatur von netzautarken Kühlschränken in Zeiten ohne Antriebsenergie

Roland Kühn^{1*}, Charlotte Fischer¹, Kai König¹, Ufuk Nezir¹, Benjamin Witt¹

¹ Coolar UG, Wolfener Str. 32-34/Haus C, 12681 Berlin, Deutschland

roland@coolar.de

Auch in netzfernen Regionen müssen wichtige Waren wie Impfstoffe sicher gekühlt werden, um nutzbar zu bleiben. In diesen Regionen werden Kühlschränke eingesetzt, die tagsüber Solarenergie nutzen, um Kälte bereitzustellen. Damit dauerhaft ausreichende Kühlraumtemperaturen von 2-8°C sichergestellt sind, wird zusätzlich ein Kältespeicher verwendet. Solche Kühlschränke sollen nach WHO-PQS-Standard bei 43°C Umgebungstemperatur auch ohne Energiezufuhr (Kühlhaltedauer) mindestens 3 Tage lang eine ausreichende Kühlraumtemperatur gewährleisten.

In dieser Arbeit wird ein Impfstoffkühlschrank betrachtet, welcher Kälte mithilfe von Solarthermie und einem Adsorptionskältekreislauf auf Wasser-Silikagel-Basis bereitstellt. Im „Latentkältespeicher“ wird ein organisches Phasenwechselmaterial (PCM) verwendet. Es wird das Aufwärmverhalten des Kühlraums in der Zeit untersucht, in welcher keine externe Energiezufuhr für das Kühlsystem zur Verfügung steht. Dabei werden zwei unterschiedliche PCM betrachtet, die beide eine angegebene Schmelztemperatur von 5°C besitzen, sich aber im Schmelzverhalten sowie der spezifischen Schmelzenthalpie unterscheiden. Zusätzlich wird untersucht, wie groß der Anteil des Adsorptionsspeichers an der Kühlhaltedauer ist, indem einmal eine Adsorption während des Aufwärmens zugelassen und einmal unterbunden wird.

Für die Einhaltung der Kühlraumtemperatur von 2-8°C ist nicht ausschließlich die (gesamte) spezifische Schmelzenthalpie (Speicherdichte) entscheidend, sondern auch bei welcher Temperatur der Schmelz- (und Einfrier-)Vorgang stattfindet. Der Adsorptionskreislauf kann die Kühlhaltedauer ohne weitere Energiezufuhr deutlich verlängern. Dabei ist zu erwarten, dass dieser Effekt durch die Adsorption von Wasser im realen Betrieb noch deutlich stärker ausgeprägt ist als unter den vorgegebenen Testbedingungen der WHO.

Stichwörter:

Kältespeicher, PCM, Adsorptionsspeicher, autarke Kühlung, Adsorptionskühlschrank

Wechselwirkungen – Klima, Lärm, Beleuchtung

Dr. Kersten Bux^{1*}

¹ Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Gruppe 2.6a Arbeitsstätten
Fabricestraße 8, D-01099 Dresden
bux.kersten@baua.bund.de

Klima, Lärm und Beleuchtung spielen eine wesentliche Rolle als Störfaktor bzw. Stressor insbesondere in Großraumbüros und modernen Arbeitssystemen wie „Open-Space-Büros“ und „Co-Working“. Bisher wurden diese Umgebungsfaktoren einzeln betrachtet, z. B. energetische Bewertung von Gebäuden bzgl. Temperatur, Licht und Akustik (DIN-EN-16798-1, 2022). Für Effekte, die durch Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren hervorgerufen werden, liegen bisher nur wenige gesicherte Erkenntnisse vor.

In einer umfassenden Literaturstudie (19 Primär- und 6 Sekundärstudien) wurden die Wechselwirkungen zwischen Klima, Lärm und Beleuchtung in Räumen von Arbeitsstätten hinsichtlich ihres Einflusses auf Empfinden, Behaglichkeit/Wohlbefinden und kognitive Leistungsfähigkeit von Beschäftigten untersucht und bewertet.

In den meisten Studien wurden Klima und Lärm bezogen auf Behaglichkeit und Empfinden, z. T. auch bezogen auf kognitive Leistung im Kontext von Büroarbeit betrachtet, Effekte bzgl. Beleuchtung wurden weniger abgebildet. Limitierungen in der Aussagekraft bestehen aktuell durch die mehr jugendlich geprägten Probandenpopulationen und der relativ geringen Versuchsdauer im Vergleich zur realen täglichen Arbeitszeit. Frauen und Männer wurden meist gleichverteilt einbezogen (n von 20 bis 130).

In den Primärstudien konnten teilweise signifikante Effekte vor allem bei Wechselwirkungen zwischen Klima und Lärm in Bezug auf das Empfinden (z. B. thermisch, akustisch) und Wohlbefinden (Komfort, Behaglichkeit) ermittelt werden.

Insgesamt ist der Einfluss akustischer Faktoren auf die Behaglichkeit in Innenräumen am größten, gefolgt von Raumtemperatur und Beleuchtungsstärke. Es deuten sich Wechselwirkungen zwischen Lärm und Temperatur beim subjektiven Empfinden und bei der Bewertung der Behaglichkeit an, so sinkt z. B. die thermische Behaglichkeit mit steigendem Lärmpegel.

Im Ergebnis der vorliegenden Untersuchung wurden zudem Modellansätze für Wechselwirkungen, Zielwerte für optimale Umgebungsbedingungen, geschlechtsspezifische Effekte und der Ansatz der „wahrgenommenen Kontrolle“ erfasst.

Diese Ergebnisse und Modellansätze bilden eine wichtige Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen sowie für die Bewertung und Regelung von Umgebungsfaktoren in Arbeitsstätten. Darüber hinaus stellen die Ergebnisse einen wertvollen Beitrag für weitere Forschungsansätze und zukünftige Entwicklungen im Bereich der Arbeitsplatzgestaltung in Bezug auf Klima, Lärm und Beleuchtung dar.

Stichwörter:

Wechselwirkung, Klima, Lärm, Beleuchtung, Behaglichkeit, kognitive Leistung

Regelbare Dämmelemente für Fassadensysteme

Von der Potentialstudie zur experimentellen Untersuchung

Michael Müller*, Maurizio Calandri, Tobias Henzler, Konstantinos Stergiaropoulos

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
michael.mueller@igte.uni-stuttgart.de

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

Das IGTE führt im Rahmen des Projekts ReVaD (Industrielle Gemeinschaftsforschung, FKZ: 01IF22617N) eine Simulationsstudie durch, um das Energieeinsparpotential von Fassadensystemen mit regelbaren Dämmelementen zu untersuchen. Da Simulationsprogramme nach Stand der Technik, mit denen Jahressimulationen nach VDI 6020 durchgeführt werden können, Materialeigenschaften des Wandaufbaus explizit als zeitunabhängige Größe definieren, wird für die Abbildung regelbarer Dämmelemente ein in MATLAB entwickeltes Modell mit der Möglichkeit zur Berücksichtigung der zeitlich veränderlichen Wärmeleitfähigkeit erstellt. Eine veränderliche Wärmeleitfähigkeit und die Abbildung unterschiedlicher Schalfaktoren bei Einhaltung bauphysikalischer Kriterien ermöglichen die Berechnung der idealen Wärmeleitfähigkeit des Dämmelements für den jeweiligen Zeitschritt. Die so ermittelten theoretischen Einsparpotentiale des Kühlenergiebedarfs liegen je nach Randbedingungen und angenommenem Schalfaktor der Dämmelemente bei bis zu 70 %.

Eine Möglichkeit der technischen Realisierbarkeit adaptiver Gebäudehüllen stellen regelbare Vakuumdämmelemente dar, die im Projekt ReVaD untersucht werden. Die Projektpartner Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) und die Deutschen Institute für Textil und Fasertechnik (DITF) nutzt thermochemische Reaktionen in einem Metallhydridreaktor (DLR) zur präzisen Einstellung des Gasdrucks in den daran angeschlossenen Dämmelementen mit textilem Füllkern (DITF). In diesen porösen, textilen Strukturen korreliert der Gasdruck direkt mit der Wärmeleitfähigkeit. Um diese als thermisch adaptive Fassadenelemente nutzbar zu machen, wird im Forschungsvorhaben ein Demonstrator entwickelt und im Raumluftrömungslabor des IGTE experimentell untersucht. Dabei können die thermischen Eigenschaften charakterisiert und der Einfluss einer variierenden Wärmeleitfähigkeit der Dämmelemente auf die Raumzustände untersucht werden.

Stichwörter:

Gebäudehülle, regelbare Dämmelemente, Kühlenergiebedarf, Aktivierung von Speichermassen, Flexibilisierung, Regelstrategien

5.03

Dezentrale Ventilation für die Lüftung in Wohngebäuden

**Mostafa Barghash^{1*}, Tim Jourdan², Lukas Siebler², Tobias Henzler²,
Konstantinos Stergiaropoulos²**

¹ Forschungsgesellschaft Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH (FG HLK), Pfaffenwaldring 6A,
70569 Stuttgart, Deutschland

² Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE),
Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Deutschland
mostafa.barghash@hlk-stuttgart.de

Ein vielversprechender Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz zentraler Wohnungslüftungsgeräte (WLG) in Wohngebäuden besteht in der bedarfsgerechten, zonenweisen Luftverteilung. Diese ermöglicht nicht nur Energieeinsparungen, sondern kann auch die thermische und lufthygienische Behaglichkeit verbessern. Für Untersuchungen zum energetischen Aufwand der Luftleistung wird ein Prüfstand konzeptioniert und in Betrieb genommen, mit dem zwei Varianten variabler Volumenstromsysteme (VVS) miteinander verglichen werden, um deren Potenziale im Hinblick auf Energieeffizienz zu bewerten.

Das erste untersuchte System entspricht dem aus Nichtwohngebäuden bekannten Standard für VVS: Die Luftförderung erfolgt zentral über Ventilatoren, während Volumenstromregelklappen in den einzelnen Strängen zur bedarfsgerechten Anpassung der Luftströme eingesetzt werden. Im zweiten Konzept werden die Regelklappen durch dezentral angeordnete Ventilatoren ersetzt und die zentralen Ventilatoren im WLG entfernt. Weitere zentrale Komponenten des WLG, wie das Wärmerückgewinnungssystem und die Filter, bleiben dabei erhalten.

Die Bewertung dieser Konzepte erfolgt mittels eines Luftverteil-Hardware-in-the-Loop (HiL)-Prüfstands. In einem Versuchsaufbau werden exemplarische Belüftungssituationen einer Wohnung mit drei Zulufräumen und zwei Ablufträumen untersucht. Die Luftströme werden bedarfsgeführt geregelt, wobei verschiedene Strategien der Luftverteilung zur Anwendung kommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die dezentrale Ventilation im Vergleich zu einem zentralen VVS Energieeinsparungen ermöglicht. Diese Einsparungen resultieren aus der Verringerung der Druckverluste aufgrund entfallener Drosselklappen. Die Erkenntnisse bilden eine wertvolle Grundlage zur Weiterentwicklung bedarfsgeregelter, energieeffizienter Wohnungslüftungssysteme.

Stichwörter:

Wohnungslüftungssystem, zonenweise Luftverteilung, VVS, dezentrale Ventilation, HiL-Prüfstand, Energieeffizienz

5.04

Single Pair Ethernet als Nachfolger für Modbus RTU in RACHP?

Dr.-Ing. Christian Ellwein

Kriwan Industrie-Elektronik GmbH, Allmand 11, DE - 74670 Forchtenberg
christian.ellwein@kriwan.de

Viele Komponenten in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik haben den Modbus RTU (RS485) als digitale Schnittstelle. Diese Technologie wurde 1979 entwickelt und es zeigt sich heute, dass sie technologisch an Grenzen kommt. Sowohl die völlig fehlenden Fähigkeiten für Cyber-Security, aber auch die begrenzte Bandbreite für die Datenübertragung oder die limitierte Zahl an Teilnehmern am Bus sind einschränkende Faktoren. Der

Vorteil des Modbus RTU liegt darin, dass er von fast allen Unternehmen der RACHP-Branche unterstützt wird. Es ist also nicht nötig, eine große Zahl unterschiedlicher Bussysteme zu unterstützen und dafür hohe Entwicklungsbudgets bereit zu stellen. Um diesen Vorteil auch in der Zukunft zu nutzen, ist es wichtig, gemeinsam als Branche über einen Nachfolger als Alternative nachzudenken. Beim ASERCOM wurde in der Arbeitsgruppe *Electronics and Control-Systems for RACHP* das neu entstandene Single-Pair Ethernet (SPE) Bussystem untersucht und mit der Single Pair Ethernet Systems Alliance eine Partnerschaft geschlossen. In diesem Vortrag werden Vor- und Nachteile von SPE dargestellt und ein Ausblick auf seine Eignung für die RACHP Branche gegeben.

5.05

Passive Daytime Radiative Cooling PDRC

Die Zukunft der Kühltechnik?

Johannes Keppner*

YKK Europe Limited Germany Branch, YKK AP R&D Center Germany,
Kirchhofstraße 52, 42327 Wuppertal, Deutschland
johannes_keppner@ykk.com

Die Klimakrise ist da und die Welt erwärmt sich. Kühlanwendungen werden immer wichtiger und zum Teil lebensnotwendig. Dies führt jedoch weltweit zu einem Anstieg des Energieverbrauchs [1] und die Probleme mit den emittierten Treibhausgasen verstärken sich. *Passive Daytime Radiative Cooling* PDRC ist ein neuartiges Konzept, das Oberflächen im Außenbereich in passive Kühleinheiten verwandelt.

Seit dem ersten Wirkungsnachweis im Jahr 2014 wird die Technologie intensiv erforscht [2,3]. Objekte können durch eine spezielle Oberflächenbehandlung unter die Umgebungstemperatur abgekühlt werden, ohne dafür zu Energie aufbringen zu müssen. Es werden hochreflektierende Schichten mit Wärme-emittierenden Eigenschaften kombiniert. Hierdurch wird verhindert, dass die Oberflächen sich in der Sonne erwärmen und gleichzeitig kann Wärme ins Weltall abgegeben werden, wodurch der Kühleffekt ausgelöst wird. Die Technik kann zu 100 % passiv zum Schutz von Infrastruktur und Gebäuden verwendet werden oder gekoppelt mit Kühlaggregaten deren Energieverbrauch deutlich minimieren. Hier erklären wir den aktuellen Stand der Forschung, zeigen Anwendungsbeispiele sowie eigene Messungen der Wirksamkeit.

- [1] IEA (2025), Global Energy Review 2025, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>, Licence: CC BY 4.0.
- [2] Raman, A. P., et. al. „Passive Radiative Cooling below Ambient Air Temperature under Direct Sunlight“. *Nature* 515, Nr. 7528 (2014): 540–44. <https://doi.org/10.1038/nature13883>.
- [3] Feng, K. et al. „Passive Daytime Radiative Cooling: From Mechanism to Materials and Applications“. *Materials Today Energy* 43 (2024): 101575. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2024.101575>.

5.06

Bewertung der Energieeffizienz kältetechnischer Anlagensysteme nach VDMA 24247-7 – ausgewählte Ergebnisse einer Feldstudie

Stefan Hudjetz*, Sebastian Haußer, Daniel Pfeiffer, Martin Becker

Hochschule Biberach, Karlstraße 11, 88400 Biberach an der Riß, Deutschland
hudjetz@hochschule-bc.de

Im September 2021 erschien die aktualisierte Fassung des Einheitsblattes VDMA 24247-7 in deutscher Ausgabe, im Dezember 2023 folgte die englische Übersetzung. Darin enthalten sind Vorschläge für Messkonzepte,

Messverfahren sowie Kennzahlen zur Bewertung der Energieeffizienz von kältetechnischen Anlagen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens GOKAS (FKZ: 03EN6003A) hat die Hochschule Biberach mehrere Feldanlagen messtechnisch untersucht und die Empfehlungen von VDMA 24247-7 praktisch in einer Feldstudie erprobt. Die hier gezeigten Ergebnisse beinhalten sowohl direkte als auch indirekte kältetechnische Anlagensysteme aus den Bereichen Gewerbe-, Industrie- und Klimakälte und belegen somit die Anwendbarkeit der ganzheitlichen Betrachtungsweise von VDMA 24247-7. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse auch die Bandbreite an erzielten energetischen Kennzahlen und die Notwendigkeit für entsprechende Referenzwerte, um die Energieeffizienz schlussendlich bewerten zu können. Darüber hinaus werden Hinweise für die praktische Umsetzung einer Effizienzbewertung nach VDMA 24247-7 gegeben.

Stichwörter:

VDMA 24247-7, Effizienzbewertung, Monitoring, Feldanlagen, Key Performance Indicators

5.07

VDI BTGA 6044 – Vorgaben für geschlossene Kühlwassersysteme

Das müssen Planer, Errichter und Betreiber beachten!

Hartwig Gohr

Schweitzer-Chemie GmbH, Benzstraße 12, 71691 Freiberg/N.

H.gohr@schweitzer-chemie.de

In dem Vortrag werden die wichtigsten Aspekte erläutert sowie die Vorgaben für Planung, Installation und Inbetriebnahme aufgezeigt.

Dazu gehören der Anwendungsbereich und die Ziele der Richtlinie. Dabei wird unterschieden zwischen Neuanlagen und Bestandsanlagen.

Wichtige Bereiche sind die Planung und Umsetzung unter Berücksichtigung wassertechnischer Vorgaben, sowie die Dokumentation im Betriebstagnbuch.

Zusätzlich werden Maßnahmen vorgestellt, wie man Störungen beseitigt, korrodierte Systeme saniert und welche Parameter einzuhalten sind.

Diese Richtlinie setzt Maßstäbe, die jeder Kälteanlagenbauer kennen sollte.

5.08

Energiespeicherung

Möglichkeiten und Perspektiven für die Branche

Thorsten Urbaneck¹

¹Technische Universität Chemnitz, Professur für Technische Thermodynamik

Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz

thorsten.urbaneck@mb.tu-chemnitz.de

Die Energiespeicherung ist ein sehr interessantes Teilgebiet der Energietechnik, welches man aus akademischer Sicht mit der Vielfältigkeit und Komplexität begründen kann. Um die zahlreichen Lösungen beurteilen zu können, verwenden Experten technische, wirtschaftliche, ökologische und sonstige Kriterien. Diese Kriterien beziehen sich oft auf Speicher oder auf Versorgungslösungen mit Speichern. Weiterhin gibt es bei der Energiespeicherung

einen chemischen, elektrischen, mechanischen und thermischen Pfad. In Abhängigkeit der Randbedingungen (z. B. Rohstoffvorkommen, Ausbauniveaus der Infrastruktur) kommen unterschiedliche Akteure (z. B. Unternehmen, Regierungen, Akademiker) auf verschiedene Lösungsansätze (z.B. Geschäftsmodelle) in den Regionen. In Deutschland existieren verschiedene Lösungsansätze.

Dieser Beitrag zeigt die unterschiedlichen Versorgungskonzepte mit Speicherlösungen im Überblick und bewertet diese qualitativ. Eine besondere Rolle spielen Kältemaschinen und Wärmepumpen sowie thermische Energiespeicher. Damit soll das Potential der Kälte- und Energietechnik noch stärker herausgearbeitet und der Fachöffentlichkeit vorgestellt werden. Diese allgemeinen Betrachtungen sind notwendig, um insbesondere die klein- und mittelständigen Unternehmen auf mögliche Szenarien vorzubereiten und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Branche zu stärken.

Stichwörter:

Energie, Speicher, Versorgung, Vergleich, Bewertung

5.09

Energiebewertung von RLT-Anlagen bezüglich EPBD und GEG

Dipl.-Ing. Claus Händel

Fachverband Gebäude-Klima e.V., Fachverband Gebäude-Klima e. V., Hoferstraße 5, 71636 Ludwigsburg
haendel@fgk.de

Für den energetischen Nachweis zur Nutzung von 65% erneuerbarer Energie werden meist die pauschalen Erfüllungsoptionen nach GEG §71 ff verwendet. Für alle Varianten von RLT-Anlagen mit integrierten Ab-/Fortluft-Zuluftwärmepumpen stehen derzeit keine pauschalierten oder tabellierten Werte zur Verfügung. Erschwerend kommt hinzu, dass nach derzeitiger Sichtweise, bei Kombinationen von Wärmerückgewinnungssystemen (Platte, Rotor, Kreislaufverbundsystem) mit Wärmepumpen, nur der Anteil der Wärmepumpe gemäß GEG als Erfüllungsoption angerechnet werden kann. Der Anteil der WRG dagegen nicht.

Es gibt derzeit kein einheitliches Prüfverfahren für RLT-Geräte mit den oben genannten Kombinationen und auch keine einfachen Standardwerte, mit denen diese Kombinationen auf eine GEG taugliche Weise bewertet werden können. Man ist auf komplexe Simulationen angewiesen, die sehr individuell aufgebaut sein können und nicht immer mit den anderen Randbedingungen der GEG-Bewertung und der DIN TS 18599 zusammenpassen.

Es wird auf Basis von gemessenen Kennwerten und nachfolgenden Simulationen ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem Tabellenwerte für derartige Systeme erarbeitet werden können, die eine einfache Bewertung erlauben und zum Beispiel in die DIN TS 18599 aufgenommen werden können. Berücksichtigt werden Heiz- und Kühlenergien in der Luftaufbereitung selbst sowie auch die Optionen einen Teil der erzeugten oder rückgewonnen Wärme und Kälte über einen Wasserkreis aus dem RLT-Gerät auszukoppeln und für andere Prozesse im Gebäude zu verwenden.

5.10

Fernwärmeangetriebene Single Effect Double Lift LiBr-Wasser Absorptionskältemaschine

Dmitrij Gorlovsky

Johnson Controls Systems und Service GmbH, Gottlieb-Daimler-Str. 8, 68165 Mannheim

dmitrij.gorlovsky@jci.com

Absorptionskältemaschinen arbeiten mit thermischer Energie und liefern in der Regel Kaltwasser für gewerbliche und industrielle Klimatisierung. Diese Anlagen erregen in letzter Zeit zunehmend Aufmerksamkeit, da sie durch den Betrieb mit wiederverwendbarer Wärme den Verbrauch fossiler Brennstoffe und des Stromverbrauchs senken. Um den Einsatz von Absorptionskältemaschinen zu verbessern, wurden Single Effect Double Lift Absorptionskältemaschinen (SE/DL) eingeführt und in einem Fernwärmenetz betrieben. In dieser Präsentation werden die Ergebnisse der COP-Optimierung und Zyklussimulation der ausgeführten Anlage erläutert. Erläuterungen zur Funktionsweise Vorstellung von Anwendungsgebieten Fallstudie zu ausgeführten Anlagen.

5.11

Entwicklungs-Aspekte einer gasgelagerten 20kW Ammoniak- Wärmepumpe zum thermischen Management in Satelliten

Fabain Dietmann^{1*}, Urban Hofstetter¹, Christof Zwysig¹

¹ Celeroton AG, Industriestrasse 22, 8604 Volketswil, Schweiz

info@celeroton.com

In unserer vernetzten Welt wird eine robuste und leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur immer wichtiger. Die Bereitstellung von Kühlleistung im Space-Bereich ist dabei ein zentrales Element bei der Konzipierung von Satelliten. Wärme kann im Weltall nur durch Wärmestrahlung mittels Radiatoren an die Umgebung abgegeben werden. Während heute meist mechanisch gepumpte Fluidkreisläufe Verwendung finden, ist die Leistungsdichte der Radiatoren mit dieser Technologie begrenzt. Gerade in leistungsstärkeren Satelliten könnten Wärmepumpen das Temperaturniveau in den Radiatoren erhöhen und die benötigte Radiatorfläche so klein halten.

Kompakte, leichtgewichtige und zudem hoch-effiziente Kältemaschinen für Space-Anwendungen stellen hohe Anforderungen an die technologische Entwicklung der Komponenten des Kältesystems. Klassische Verdränger oder Scroll-Kompressoren sind aufgrund ihrer Vibrationen und damit ihrer Beeinflussung z. B. optischer Systeme auf Satelliten unerwünscht. Die limitierten Platz- und Gewichtsverhältnisse schränken zudem die Wahl des Kältemittels stark ein und erfordern eine erhebliche Temperaturniveau-Anhebung zur Verkleinerung der Radiatorfläche. Vibrationsfreie Turbokompressoren bieten hier eine Alternative.

In diesem Paper wird das Kernstück einer Ammoniak-Wärmepumpe vorgestellt - die gasgelagerte Turbokompressor-Kaskade. Dabei wird zu Beginn auf die speziellen technischen Anforderungen einer Wärmepumpe für den Space-Bereich eingegangen. Anschließend wird die Kompressor-Entwicklung in einigen relevanten Teilaspekten beleuchtet. In einem nächsten Schritt wird die aufgebaute Testumgebung beschrieben. Messergebnisse einer Stufe des Kompressor-Systems werden dargestellt und es wird ein Ausblick auf weitere Anwendungsfelder der Technologie gegeben.

Stichwörter:

Satelliten, Thermisches Management, Wärmepumpe, Turbo Kompressor, Gaslagerung, Ammoniak

5.12

Performance assessment of a R290 oil-free chiller

Ahmet Çokşen^{1*}, Tatvakumar Bhanderi¹, Luis Eric Olmedo¹, Christopher Weinert¹
Lukas Joos², Clemens Dankwerth²

¹ ebm-papst Mulfingen GmbH & Co. KGaA & Co. KG, Business Incubator HighSpeed Solutions,
Bachmühle 2, 74673 Mulfingen, Germany

Ahmet.Coksen@de.ebmpapst.com; Tatvakumar.Bhanderi@de.ebmpapst.com;
LuisEric.Olmedo@de.ebmpapst.com; christopher.weinert@de.ebmpapst.com

² Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Division Heat and Buildings,
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg im Breisgau, Germany

clemens.dankwerth@ise.fraunhofer.de; lukas.joos@ise.fraunhofer.de

The rapid expansion of industrial and commercial infrastructure is driving a significant increase in cooling demand. Oil-free operation of a chiller unit based on a natural refrigerant can be proven as promising technology from the perspective of energy efficiency, sustainability and environment friendliness. In this study, the performance of an air-cooled chiller unit operating with the natural refrigerant R290 (propane) is assessed by simulations and experiments. The system is equipped with ebm-papst's oil-free two-stage propane turbo compressor, CompaNamic, from the P3 Mid-Lift platform. With a maximum drive power of 10 kWel., this compressor delivers high efficiency as well as dynamic capacity modulation to match with varying application loads—ensuring optimized energy use across different operating conditions. The absence of oil enhances system efficiency, reliability, reduces maintenance needs, and eliminates lubricant-related environmental concerns. A demonstrator unit with a high focus on control strategies for safe operation, has been built at Fraunhofer ISE and a test campaign has been carried out at ebm-papst test facility to evaluate its performance under normative conditions. The results of the measurement campaign and simulation indicate that such innovative compressor technology can be the promising solution for future-ready, sustainable chiller systems.

Keywords:

Refrigeration system; HVAC; Chillers; Air-Cooled Chillers; Data Center Cooling; CRAC; Heat pump; Turbo Compressor; Oil-free; System performance; R290; Propane

5.13

Adsorptionseffizienzbooster für Split-Klimaanlagen:

Erste experimentelle Ergebnisse einer hybriden Split-Klimaanlage

Roland Kühn*, Kai König, Ufuk Nezir

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 15% gezeigt werden.

Stichwörter:

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

5.14

CO₂ Systems Add-Ons: Calculations and Field Measurements

Giacomo Pisano - MSc. Eng.

DORIN, Officine Mario Dorin S.p.A.
Via Aretina 388 -50061 Loc. Compibbi, Fiesole - Firenze (Italia)
g.pisano@dorin.eu

The typical flash gas bypass (FGB) solution represents the simplest trans-critical carbon dioxide (CO₂) system configuration and suffers energy efficiency penalties with higher heat sink temperatures, leading to unfavorable yearly energy efficiencies at warmer latitudes.

This paper provides a detailed description of various CO₂ systems: starting from FGB configuration, in-depth energy efficiency analysis is provided, including job site field experience. Then, several FGB add-ons are described, including parallel compression, adiabatic cooling and ejector technology: each add-on contribution is analyzed with calculation and field measurements.

Furthermore, CO₂ system integration is described, showing how heat recovery and air-conditioning can be integrated into the same refrigeration unit, thus making any specific building completely self-sufficient from an energy standpoint: in fact, the same CO₂ system is able to provide low temperature and medium temperature duties, together with sanitary hot water, comfort cooling during summer and heating during winter. Again, this integration is analyzed from a theoretical standpoint and then concrete examples with field measurements are shown.

As a result, this paper shows that enhanced and integrated carbon dioxide systems are able to significantly improve yearly energy figures when compared to FGB solution, making CO₂ an interesting option in various industrial refrigeration domains.

5.15

Digitalisierung von Ventilatorsystemen:

EC-Motoren und Smart Services zur Verbesserung von Effizienz und Zuverlässigkeit

Moritz Schmitt

ZIEHL-ABEGG SE, Heinz-Ziehl-Straße, 74653 Künzelsau
Moritz.schmitt@ziehl-abegg.de

Die Digitalisierung von Ventilatoren stellt einen bedeutenden Fortschritt in der modernen Technologie dar. Ein zentraler Bestandteil dieser Entwicklung sind EC-Motoren (elektronisch kommutierte Motoren), die für ihre hohe

Energieeffizienz und präzisen Steuerungsmöglichkeiten bekannt sind. Diese Motoren liefern wichtige Betriebsdaten wie Drehzahl, Temperatur und Schwingungsdaten, die für die Überwachung und Optimierung des Ventilatorbetriebs unerlässlich sind.

In dem Vortrag wird detailliert auf die verschiedenen Lösungen eingegangen, die die Digitalisierung von Ventilatoren ermöglicht. Der Nutzen der Technologien wird kurz und prägnant dargestellt. Neben der Datenauslese per Bluetooth oder MODBUS liegt der Hauptfokus auf der Speicherung, Verarbeitung und Auswertung der Daten anhand von Praxisbeispielen. Diese Ansätze bieten wertvolle Einblicke in die Effizienzsteigerung und Zuverlässigkeit moderner Ventilatorsysteme.

Durch die Integration dieser Technologien können Unternehmen ihre Betriebsabläufe optimieren und die Lebensdauer ihrer Systeme verlängern. Zudem wird die kontinuierliche Überwachung und Analyse der Betriebsdaten eine optimierte Wartung und Fehlererkennung ermöglichen, was zu einer erhöhten Betriebssicherheit führt.

5.16

KI-basierte Regelung von industriellen Kältesystemen

Ergebnisvorstellung des Forschungsprojekts EISKIG

Philipp Schraml^{1*}, Emil Elbæk¹, Lars Petruschke², Thomas Weber², Tobias Lademann³

¹ ETA-Solutions GmbH, Darmstädter Str. 239, 64625 Bensheim, Deutschland
mail@eta-solutions.de

² etalytics GmbH, Gräfenhäuser Straße 26, 64293 Darmstadt, Deutschland
lars.petruschke@etalytics.com, thomas.weber@etalytics.com

³ Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Eugen-Kogon-Straße 4, 64287 Darmstadt, Deutschland
t.lademann@ptw.tu-darmstadt.de

Kältesysteme gehören weltweit zu den zentralen Querschnittstechnologien für die Klimatisierung von Gebäuden sowie für industrielle Prozesse und verzeichnen einen stetig wachsenden Energiebedarf. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Energieeffizienz und Nachhaltigkeit wird die Optimierung des Betriebs dieser Systeme immer bedeutender. Im anwendungsorientierten Forschungsprojekt „Energy Intelligence System für smarte Kältesysteme in Industriegebäuden“ (EISKIG), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK, Förderkennzeichen 03EN6012A), wurde untersucht, inwieweit KI-basierte Verfahren zur Betriebsstrategieoptimierung in der Gebäudetechnik eingesetzt werden können.

Hierzu kamen zwei unterschiedliche daten- und modellbasierte Verfahren auf Basis von mathematischen Optimierungsmethoden und Deep Reinforcement Learning zum Einsatz, mit dem Ziel, durch eine adaptive Regelung von Kältemaschinen, Pumpen, Ventilen und Kühltürmen einen energieeffizienten und bedarfsgerechten Anlagenbetrieb sicherzustellen. Die entwickelten Ansätze werden bei drei industriellen Anwendungspartnern im Realbetrieb validiert. Hierzu erfolgte ein umfassendes Monitoring sowie eine systematische Bewertung des Ausgangs- und des optimierten Zustands unter Anwendung der Bewertungsmethodik gemäß VDMA 24247-7.

Die Validierungsergebnisse zeigen deutliche Einsparpotenziale: Durch den Einsatz der KI-basierten Betriebsoptimierung konnten durchschnittliche Energieeinsparungen von bis zu 32 % realisiert werden. Das Projekt belegt damit das große Potenzial intelligenter, selbstlernender Systeme für die energetische Optimierung von Kältesystemen in der Gebäudetechnik und leistet einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Betriebskosten in diesem Bereich.

Integration von KI-Anwendungen in der Gebäudeautomation

Wege und Hürden der praktischen Umsetzung von maschinellem Lernen zur Anlagenoptimierung

R. David, Ch. Berger, O. Jainta

BUILD.ING Consultants + Innovators GmbH, Mögeldorfer Hauptstraße 49, 90482 Nürnberg
david@b-ci.de

Im Rahmen des Verbundvorhabens „GOKAS - Gesamtsystemoptimierung von kältetechnischen Anlagensystemen für Energiewende und Klimaschutz“ hat die BUILD.ING Consultants + Innovators GmbH verschiedene maschinelle Lernverfahren getestet, um den Energieverbrauch und die Behaglichkeit in Gebäuden zu optimieren. Die Zielrichtung war die Entwicklung hin zu einem breit einsetzbaren und leicht nachrüstbaren System.

Trotz zahlreicher Erfolgsmeldungen zu KI-Anwendungen im Gebäudebereich gibt es in der Praxis noch viele Herausforderungen, die eine Integration in Bestandsgebäude erschweren. Besonders für komplexe Systeme, die Heizung, Kühlung und Lüftung kombinieren, fehlen bislang universelle Lösungen. Unser Vortrag beleuchtet die Voraussetzungen und Herausforderungen für den Einsatz von KI-Systemen im Anwendungsfeld Einzelraum- und Gebäudesteuerung. Zu den zentralen Hürden zählen nach wie vor die oft unzureichende Datenqualität sowie die Zuordnung von Gebäudeautomationsdaten. Neben den Chancen und Grenzen verschiedener Lernverfahren werden auch technologische Aspekte wie Architektur und Modularität des Systems thematisiert. Schließlich wird der Aufwand für die Implementierung KI-basierter Systeme im Verhältnis zu den möglichen Energieeinsparungen betrachtet, um praktische Hemmnisse und Lösungsansätze aufzuzeigen.

6.01

Im Minusbereich auf Hochtouren

COP, Heizleistung und Betriebsbereich: Bewertung von Wärmepumpen-Kreisläufen in kalten Klimazonen

Cedric Kötting*, Christian Vering, Dirk Müller

RWTH Aachen University, E.ON Energieforschungszentrum, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik,
Mathieustr. 10, 52074 Aachen, Deutschland
cedric.koetting@eonerc.rwth-aachen.de

In kalten Klimazonen mit Außentemperaturen bis -20 °C stoßen Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP) mit einstufigem Standardkreislauf an technische Grenzen. Insbesondere verringern niedrige Quellentemperaturen den Verdampfungsdruck und damit die Sauggasdichte, was den Massenstrom und somit die Heizleistung reduziert. Gleichzeitig führen hohe Druckverhältnisse im Verdichter zu niedrigen isentropen Wirkungsgraden und somit zu erhöhten Verdichteraustrittstemperaturen, die den Betriebsbereich einschränken. Beide Effekte senken die Effizienz, gemessen am COP.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Potentials zur gleichzeitigen Steigerung der Heizleistung, Erweiterung des Betriebsbereichs und Effizienzsteigerung von LWWP in kalten Klimazonen. Untersucht werden vier Kreislaufschemata: zwei quasi-zweistufige Kreisläufe mit Dampfeinspritzung (Economizer, Phasentrenner), ein einstufiger Kreislauf mit internem Wärmeübertrager (IHX) und ein Standardkreislauf als Referenz. Die Quellentemperatur variiert zwischen -20 °C und 0 °C , die Senktemperatur zwischen 35 °C und 75 °C . Verwendet werden die Kältemittel R290 und R1270, deren thermodynamischen Zustände mit REFPROP berechnet werden. Der isentrope Wirkungsgrad und Liefergrad des Verdichters werden in dem quasi-stationären Modell als konstant angenommen.

Die Kreisläufe mit Dampfeinspritzung weisen einen um bis zu 10 % erhöhten COP auf, während der IHX-Kreislauf eine Erhöhung bis zu 5 % erreicht. Des Weiteren erzielen die Kreisläufe mit Dampfeinspritzung eine Reduktion der Verdichteraustrittstemperatur bis zu 5 K und der IHX-Kreislauf bis zu 2 K. Bei Dampfeinspritzung ist die Kondensatorleistung bis zu 30 % höher und beim IHX-Kreislauf bis zu 10 %. Die experimentelle Validierung der Dampfeinspritzkreisläufe bildet den nächsten Schritt.

Stichwörter:

Kreislaufschema, Dampfeinspritzung, Interner Wärmeübertrager, Simulation, Luft-Wasser-Wärmepumpe

6.02

Akustisches Verhalten einer CO₂-Wärmepumpenanlage

Dr.-Ing. Arne Heinrich, Dr. Matteo Luzzi*, Thomas Mikah

Gamma Technologies GmbH, Danneckerstr. 37, 70182 Stuttgart, Deutschland
m.luzzi@gtisoft.com

Das Interesse am Einsatz von Wärmepumpensystemen in Wohngebäuden hat in den letzten Jahren aufgrund von Energieeffizienzzielen und Klimavorschriften rasch zugenommen. Während die Hersteller an der Verbesserung der Leistung und der Senkung des Energieverbrauchs arbeiten, verlagert sich das Augenmerk dieser Arbeit auf die Geräuschemissionen, die den Benutzerkomfort in häuslichen Umgebungen erheblich beeinträchtigen können. Ein wichtiger Verursacher unerwünschter Geräusche ist der Kompressor, der akustische Strömungsgeräusche über angeschlossene Komponenten wie Rohrleitungen und Wärmetauscher übertragen kann. Dieses Problem wird mit der Verwendung von Kältemitteln wie CO₂, die bei höheren Drücken arbeiten und stärkere akustische Phänomene verursachen, noch deutlicher. In dieser Arbeit wird die Ausbreitung von verdichter-

induzierten Strömungsgeräuschen in einem Wärmepumpensystem für Wohngebäude und deren Einfluss auf einzelne Komponenten untersucht. Mit Hilfe der kommerziellen Software GT-SUITE werden verschiedene Modellierungsstrategien angewandt sowie Analysen auf Komponentenebene bis hin zu Systemsimulationen durchgeführt. Die Ergebnisse werden verglichen, um ihre Vorhersagefähigkeit und praktische Anwendung zu bewerten.

Stichwörter:

Akustik, Simulation, Kompressor, Wärmepumpe

6.03

Impact of modelling depth on performance prediction

A study of building energy systems with modulating heat pumps

Sahil Vadadkar^{1*}, Michael Kropp¹, Andreas Velte-Schäfer^{1,2}

¹ University of Freiburg, Institute for Sustainable Systems Engineering (INATECH),
Emmy-Noether-Str. 2, 79110 Freiburg, Germany
sahil.vadadkar@inatech.uni-freiburg.de

² Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg, Germany

Residential heat pumps are expected to play a very significant role in the efforts toward climate action, particularly in single- and two-family houses with nearly 84%⁽¹⁾ of newly approved buildings in 2024 being equipped with heat pumps. In this context, accurate simulation models of building energy systems (BES) are essential for predicting the energetic performance of these buildings, and their contribution toward climate action. Therein, simulation models of the building and heat pump significantly influence the predicted system performance. Building models are designed in depth based on the ISO 52016 standards or simplified building physics may be used to model its performance. The InnoWP project aims to achieve efficiency gains in the power electronics of the inverter, which also increases heat pump performance (COP). In case of modulating heat pumps, COP also depends on compressor speed. This paper focuses on the performance prediction of such residential building energy systems with modulating heat pumps. The influence of different modelling depths for heat pumps (static, dynamic, physical) and buildings on the performance of building energy systems is studied. To this end, BES models in Modelica language are developed with an exchangeable sub-model of the heat pump. The results in terms of integral key performance indicators, e. g. seasonal performance factor, and transient behaviour are evaluated.

Keywords:

Modulating heat pumps, building energy system simulation, residential buildings, numerical modelling, power electronics

(1) <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/81-der-neuen-wohngebaeude-setzen-auf-waermepumpen/>

6.04

Model Predictive Control in der Praxis

Erfahrungen aus 3 Jahren modellprädiktiver Regelung von realen Wärmepumpen

Markus Male*, Lukas Kaupenjohann

iDM Energiesysteme GmbH, Seblas 16-18, 9971 Matrei in Osttirol

markus.male@idm-energie.at

Die Integration regenerativer Energien erfordert zur Stabilisierung des Stromnetzes flexible Verbraucher. Wärmepumpensysteme bieten zusammen mit den thermischen Speichern des Gebäudes eine solche Flexibilität. Modellprädiktive Regelungsverfahren machen diese Flexibilität nutzbar und bieten dabei ein vielversprechendes Instrument zur vorausschauenden und kostenoptimierten Betriebsführung von Wärmepumpen.

In einem mehrjährigen Forschungsprojekt gemeinsam mit Elektrizitätsversorgern wurde MPC praxisnah in einem industriellen Kontext implementiert und weiterentwickelt. Im Gegensatz zu den meisten Ansätzen aus der Forschung wurde hier früh auf die Anwendung in realen Wärmepumpensystemen gesetzt. Ausgehend von einem umfangreichen digitalen Wärmepumpenbestand eines Herstellers - mit bestehender Cloud-Infrastruktur für Fernwartung, Datenanalyse und Systemupdates - wurde ein Pool von Demonstrationsanlagen (n=40) aufgebaut und sukzessive auf unterschiedliche Wärmepumpentypen und Systemkonfigurationen erweitert. Dieser ermöglichte das Testen von optimierten Wärmepumpenfahrplänen unter realen Bedingungen, einschließlich stochastischem Nutzerverhalten und Unsicherheiten in den Modellen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die modellprädiktive Regelung insbesondere im aggregierten Betrieb vielversprechende Potenziale hinsichtlich Kosteneffizienz und Netzunterstützung bietet. Herausforderungen bestehen jedoch weiterhin in der Berücksichtigung individuellen Nutzerverhaltens, solarer Wärmegewinne und des variablen Warmwasserbedarfs.

Das Projekt verdeutlicht, dass ein iteratives Vorgehen sowie die enge Verzahnung von Entwicklung und Praxis zu robusten und marktfähigen Regelstrategien führen können. Perspektivisch wird eine Übertragung auf Mehrfamilienhäuser (MPC for MFH) angestrebt.

6.05

Neuronale Netze zur Identifikation relevanter Parameterwerte in Wärmepumpensystemen

**Jan Furtwengler^{1*}, Ana Constantin¹,
Janis Keuper²**

¹ Robert Bosch GmbH, Corporate Research, Robert-Bosch-Campus 1,
71272 Renningen, Deutschland

Jan.Furtwengler@de.bosch.com, Ana.Constantin@de.bosch.com

² Hochschule Offenburg, Institute for Machine Learning and Analytics,
Badstraße 24, 77652 Offenburg, Deutschland

janis.keuper@hs-offenburg.de

Die Güte der Regelung einer Wärmepumpe hängt von Parametern ab, die oft systemspezifisch, unbekannt oder nicht explizit erfasst sind – beispielsweise die Länge der Rohrleitungen zwischen Wärmepumpe und Wärmeübergabesystem. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zu entwickeln, die mithilfe neuronaler Netze und Zeitreihen von Systemzuständen relevante Parameter identifiziert, um die Regelung gezielt zu verbessern.

Hierfür werden verschiedene Netzarchitekturen untersucht, darunter Multi-Layer Perceptrons (MLP), Recurrent Neural Networks (RNN), Convolutional Neural Networks (CNN) sowie Generative Adversarial Networks (GAN).

Das untersuchte Gebäudeenergiesystem umfasst eine Wärmepumpe, einen Pufferspeicher, Rohrleitungen sowie einen Warmwasserspeicher. In Simulationen werden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Rohrleitungslängen durchgespielt. Die Zeitreihen der Vorlauftemperaturen aus der Wärmepumpe dienen dabei als Input für das neuronale Netz, während die Rohrleitungslänge als Output vorgegeben wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass CNNs die höchste Vorhersagegenauigkeit erreichen. Das Modell ist in der Lage, die Rohrleitungslänge mit einer Abweichung von lediglich 0,2 bis 1,5 % zu bestimmen.

Stichwörter:

Gebäudeenergiesystem, Wärmepumpe, Parameteridentifikation, Neuronale Netze, Zeitreihenanalyse

6.06

Experimentelle Optimierung des Teillastverhaltens einer HTWP

Jaromir Jeßberger*, Florian Heberle, Dieter Brüggemann

Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse
Zentrum für Energietechnik
Universität Bayreuth
jaromir.jessberger@uni-bayreuth.de

Zur Erreichung der Ziele der Dekarbonisierung ist die Integration von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) in industrielle Energiesysteme und Fernwärmenetze von zentraler Bedeutung. Diese technologische Transformation stellt einen wesentlichen Meilenstein auf dem Weg zu einem global kohlenstoffneutralen Energiesystem dar. Dabei sind insbesondere das Teillastverhalten, die Auslegung geeigneter Verdichterdesigns sowie die Auswahl geeigneter Arbeitsmedien zentrale Forschungsaufgaben. Im Rahmen früherer Arbeiten wurde eine HTWP mit einer thermischen Leitung von etwa 35 kW entwickelt und beschrieben. Dieser Prüfstand zeichnet sich durch eine umfangreiche messtechnische Ausstattung, einen internen Wärmeübertrager, wassergekühlte Zylinderköpfe sowie softwaregesteuerte Wasserkreisläufe aus.

Ziel der vorliegenden Studie ist die Optimierung des Teillastverhaltens der HTWP im Drehzahlbereich von 758 U/min bis 2100 U/min. Die Untersuchungen erfolgen unter Randbedingungen, die ein industrielles Abwärmenutzungsszenario abbilden: Die Temperatur der Wärmequelle beträgt 60 °C, die der Wärmesenke 120 °C. Die Temperaturspreizungen an Quelle und Senke wurden auf 10 K bzw. 60 K festgelegt. Zur Optimierung des Teillastbetriebs wird ein elektronisches Expansionsventil eingesetzt, das die Überhitzung des Kältemittels am Austritt des Verdampfers kontrolliert. Die Temperatur des Sauggases am Verdichtereintritt wird durch einen überdimensionierten internen Wärmeübertrager (IHX) in Kombination mit einem Bypass angepasst. Zusätzlich ermöglichen wassergekühlte Zylinderköpfe die Rückgewinnung von Verdichterabwärme zur Wärmebereitstellung.

Bei einer Netzfrequenz von 50 Hz, entsprechend einer Verdichterdrehzahl von 1514 U/min, wird eine Leistungszahl (*COP*) von 2,82 erzielt. Dieser Betriebszustand ist durch eine Überhitzung von 5 K am Verdampferaustritt und eine Bypass-Stellung von 50 % am IHX charakterisiert. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass durch eine Erhöhung der Überhitzung auf 8 K und eine Anpassung der Bypass-Stellung – und somit der effektiven Wärmeübertragerfläche des IHX – eine Steigerung des *COP* von bis zu 10 %, im Auslegungspunkt, möglich ist.

Dieser methodische Ansatz wurde auf sämtliche in dieser Studie betrachteten Betriebspunkte im Frequenzbereich von 25 Hz bis 70 Hz in 5-Hz-Schritten angewendet. Die resultierenden Verbesserungen des *COP* liegen je nach Betriebszustand und unter Berücksichtigung einer maximalen Sauggasttemperatur von 90 °C und einer maximalen Druckgastemperatur von 150 °C, zwischen 5 % und 21 %.

Stichwörter:

Hochtemperatur-Wärmepumpe, Experimentelle Optimierung, Teillast, Hubkolbenverdichter

Dampfverdichtung oder Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTHP)? Effizienz im Vergleich

Cordin Arpagaus^{*}, Frédéric Bless, Leon P.M. Brendel, Daniel Gstöhl, Stefan S. Bertsch

OST Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme IES, Werdenbergstrasse x, 9474 Buchs, Schweiz
cordin.arpagaus@ost.ch

Im industriellen Umfeld gewinnt die Frage an Bedeutung, ob Prozessdampf effizienter mittels Dampfverdichtung mit kleinen Turbokompressoren oder durch geschlossene Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTHP) bereitgestellt werden kann.

Diese Arbeit vergleicht die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beider Ansätze.

Analysiert werden verfügbare Verdichter Produkte, typische Leistungsbereiche (100 kW bis 2 MW), Effizienzkennzahlen sowie aktuelle Marktangebote.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Dampfverdichtung insbesondere in bestehenden Dampfnetzen mit hohem Druckniveau (bis 12 bar) und ausreichender Abwärme eine effiziente Option ist. HTHPs hingegen punkten in Heißwasser- oder Niederdrucknetzen mit moderatem Temperaturbedarf.

Die Effizienzanalyse verdeutlicht Unterschiede bei COP-Werten und Investitionskosten.

Darüber hinaus wird die Entwicklung der Dampfnachfrage vor und nach Betriebsoptimierungen betrachtet.

Der Beitrag liefert praxisorientierte Entscheidungshilfen zur Auswahl geeigneter Technologien und zeigt auf, welche Systeme bereits marktreif sind und in welchen Bereichen weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

Stichwörter:

Dampfverdichtung, Hochtemperatur-Wärmepumpen, Effizienzanalyse, Technologievergleich, Marktreife

HTHP implementation in the paper industry

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

Reuven Paitazoglou^{1*}, Anja Hanßke¹, Dr. Tim Hamacher², Sebastian Helmling³, Carsten Schmidt⁴

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@spheat.de

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 highlighted. 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

6.09

Vergleich von Hochtemperatur Wärmepumpenkreisläufen zur effizienten Frischdampfbereitstellung

Cerrigan Rose^{2*}, Christian Schlemminger², Hannes Trumpf¹,

1 TU Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik,
Münchner Platz 3, 01187 Dresden, Deutschland
Hannes.Trumpf@tu-dresden.de

2 ANEO Industry AS, Klæbuveien 118, 7031, Trondheim, Norwegen
christian.schlemminger@aneo.com

In der EU-28 werden jährlich 1952 TWh/a Prozesswärme benötigt. 37 % dieses Bedarfs sind unter 200 °C. Um in dem 1,5 °C Ziel des Pariser Abkommens zu bleiben sind Maßnahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in industriellen Prozessen notwendig. Hochtemperatur-Wärmepumpen stellen hierbei eine Möglichkeit da, Frischdampf für industrielle Prozesse CO₂-Emissionsarm bereitzustellen. In diesem Zusammenhang beschäftigt sich das vorliegende Paper mit dem Vergleich von 7 Wärmepumpenkreisläufen von 5 Herstellern, die bereits auf dem Markt erhältlich sind oder sich in der Erprobung befinden und eine Senktemperatur von min. 90 °C aufweisen. Die verglichenen Kreisläufe sind entweder einstufig oder zweistufig und verwenden natürliche Kältemittel (R600, R601, R717, R718). Die berechneten COPs reichen von 1.5 ($\eta_c=0,43$) (115 K Hub) bis 4.8 ($\eta_c=0,78$) (65 K Hub). Als besonders effizient erweisen sich zweistufige Kreisläufe mit dem Kältemittel R718 in der oberen Stufe. Bei einer Quelltemperatur von 25 °C und einer Senktemperatur von 120 °C können COPs von max. 2.9 ($\eta_c=0,69$) erreicht werden. Als das limitierende Kriterium zum Erreichen höherer COPs gilt bei dem Kältemittel R718 der erreichbare Druckhub jedes Verdichters. Für andere natürliche Kältemittel ist die Kompressionsendtemperatur von großer Bedeutung und schränkt somit die Effizienz ein.

Stichwörter:

Hochtemperatur-Wärmepumpen, Marktvergleich, Dampferzeugung, COP, Natürliche Kältemittel

6.10

Hochtemperaturwärmepumpe zur Wasserdampferzeugung in einer Zuckerfabrik als Demonstrationsanlage

Ole Fredrich

GEA Refrigeration Germany GmbH, Holzhauser Straße 165, 30509 Berlin

ole.fredrich@gea.com

Das SPIRIT Projekt der EU ist als ein Wegbereiter zur klimafreundlichen Energietransformation im industriellen Bereich gedacht. Dies ist Teil des „European Green Deal“ um die europäischen Klimaziele bis 2030 zu erreichen.

Hierzu arbeiten europäische Forschungseinrichtungen und Partner aus der Industrie zusammen, um in drei Anwendungsbereichen vollständige Wärmepumpen-Demonstrations-anlagen, sogenannte Demonstratoren mit Senken- bzw. Nutztemperaturen zwischen 135 °C- 160 °C zu entwickeln, zu bauen und im Feldeinsatz die Einsatzfähigkeit dieser Technologie nachzuweisen und deren Leistungsfähigkeit festzustellen.

GEA HRT (Heating & Refrigeration Technologies) als Teil dieses Projekts hat seit Anfang 2023 zusammen mit den Projektpartnern (DTI und „Tiense Suiker“) einen 4 MW Demonstrator entwickelt und gebaut. Im 3. Quartal 2024 wurde die Wärmepumpenanlage bei „Tiense Suiker“ in Belgien angeliefert, bis Ende 2024 vollständig montiert und in das Dampfnetz der Zuckerfabrik eingebunden.

Kältemittel: n-Pentan (R601)

Heizleistung: ca. 4 MW

Quelle: Vakuum-Wasserdampf: ca. 75 °C

Senke: Wasser/ Wasserdampf : ca. 143 °C

Anfang 2025 wurde die Anlage in Betrieb genommen und erste Tests durchgeführt. In zwei Phasen der Zuckerkampagne wurde die Wärmepumpe im Temperaturbereich 75 °C / 143 °C (Quelle/ Senke) und 80 °C / 110 °C betrieben und entsprechende Messdaten aufgezeichnet.

Im Vortrag werden der Aufbau des Demonstrators, Herausforderungen und erste Erfahrungen beim Betrieb der Anlage vorgestellt.

6.11

Von der Gas-Etagenheizung zur Propan-Wärmepumpe

Multikriterielle Bewertung unterschiedlicher Propan-Wärmepumpenlösungen für Raumheizung und Warmwasserbereitung in Wohnungen

Mu Huang*, Björn Nienborg, Sebastian Gamisch, Ritesh Pathak

Fraunhofer ISE, Heidenhofstraße 2, 79110, Freiburg, Deutschland

mu.huang@ise.fraunhofer.de

Mehr als die Hälfte der Wohnungen in Deutschland befinden sich derzeit in Mehrfamilienhäusern; rund 19 % davon werden dezentral mit Raumwärme und Brauchwarmwasser versorgt. Für diese Wohnungen ist der Umstieg auf klimafreundliches Heizen seit 2024 verpflichtend und wird schrittweise umgesetzt. Wärmepumpen sind eine etablierte Lösung zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, sowohl für die Raumheizung als auch für die Warmwasserbereitung im Gebäudesektor. Herausfordernd für den Einsatz von Wärmepumpen-Etagen-lösungen im Mehrfamilienhaus-Bestand sind neben der Wirtschaftlichkeit auch die begrenzte Wärmequellen-verfügbarkeit in dicht bebauten Stadtgebieten, die eingeschränkte Platzverfügbarkeit in den Wohnungen sowie die mögliche Überlastung des Stromnetzes. Die vorliegende Studie präsentiert eine vergleichende und multikriterielle Analyse der Potenziale unterschiedlicher Wärmepumpen-Etagenlösungen für Raumheizung und

Warmwasserbereitung unter Verwendung des natürlichen Kältemittels Propan (R-290), das ein geringes Treibhauspotenzial aufweist. Die Wärmepumpensysteme werden in der Simulationsumgebung Modelica/Dymola modelliert und für Gebäude mit unterschiedlichen Sanierungszuständen sowie Haushaltsgrößen simuliert. Auf dieser Basis wird der Einfluss der Speicherkapazität von Wasser- oder Latentwärmespeichern auf die Energieeffizienz, die Schaltzyklenzahl der Wärmepumpen sowie die elektrischen Leistungsspitzen untersucht. Zudem werden deren Optimierungspotenziale durch Anpassungen der Regelungstechnik anhand dynamischer Simulationen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen die technische Machbarkeit der Umrüstung von Gas-Etagenheizungen auf Propan-Wärmepumpenlösungen und liefern Erkenntnisse für die Planung und Installation von Wärmepumpen-Etagenheizung im Mehrfamilienhaus-Bestand.

Stichwörter:

Propan-Wärmepumpen, Mehrfamilienhäuser, Bestandsgebäude, Etagenheizung, PCM-Speicher

6.12

Wärmepumpensystem kleiner Leistung für Haushaltsanwendungen

Manuel Verdnik*, Gerhard Pertiller, René Rieberer

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

manuel.verdnik@tugraz.at

Durch den Einsatz von Wärmepumpen in Haushaltsanwendungen können signifikante Energieeinsparungen im Vergleich zur Verwendung elektrischer Heizstäbe erzielt werden. Liegt bei bestimmten Anwendungen ein Kühlbedarf vor, kann dieser als Wärmequelle der Wärmepumpe dienen.

In der Vorliegenden Arbeit wird ein System bestehend aus Niedertemperaturreservoir (z. B. Eisspeicher oder Kaltwasserreservoir), Hochtemperaturreservoir (z. B. Heißwasserspeicher) und Luft/Kältemittel-Wärmeübertrager mit thermischem Speicher auf dazwischenliegendem Temperaturniveau untersucht. Durch ein Wärmepumpensystem mit entsprechender Verschaltung kann Wärme zwischen diesen drei auf unterschiedlichen Temperaturniveaus befindlichen Speichern verschoben werden. Dabei wird ein Vollhermetischer Hubkolbenkompressor mit dem Kältemittel R600a verwendet. Zusätzlich dazu kann mit dem Luft/Kältemittel-Wärmeübertrager Wärme aus der Umgebungsluft entnommen oder an diese abgegeben werden.

Im Zuge der Arbeit wird eine mögliche Schaltungsvariante des Kältemittelkreises vorgestellt und simulationstechnisch untersucht. Dabei wird auf experimentelle Messdaten einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe mit einem vollhermetischen Hubkolbenkompressor zurückgegriffen und Parametervariationen des thermischen Speichers (Wärmekapazität und Wärmeübergang zur Umgebung) betrachtet.

Stichwörter:

Hermetikkompressor, R600a, Simulation, experimentelle Untersuchung

Direktkondensierendes Wärmepumpen-Speicherkonzept

Kevin Diewald^{1*}, Hannes Fugmann¹, Lena Schnabel¹, Christiane Thomas²

¹ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
kevin.diewald@ise.fraunhofer.de

² TU Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik,
01062 Dresden, Deutschland

Durch die Verordnung (EU) 2024/573 über fluorierte Treibhausgase (F-Gase Verordnung) und die ambitionierten Ziele der Bundesregierung hinsichtlich der Energiewende, rücken Wärmepumpen mit R-290 (Propan) als Kältemittel in den Fokus. Im Neubau ist die Wärmepumpe bereits der präferierte Wärmeerzeuger. Gleiches gilt es auch im Gebäudebestand bzw. in der Sanierung zu erreichen. Hierbei steht die Effizienz der Anlage sowohl bei der Heizwärme- als auch der Brauchwasserbereitstellung im Vordergrund.

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem kombinierten Wärmepumpen-Speicher-Konzept, bei dem der Kondensator in den thermischen Speicher integriert ist und damit eine Direktkondensation stattfindet. Dabei werden zwei unterschiedliche Integrationsoptionen betrachtet, die es ermöglichen, parallel Heizwärme- und Brauchwarmwasser bereitzustellen: (i) mit mehreren speicherintegrierten Rippenrohren oder (ii) mit einem mantelseitigen Wärmeübertrager. Da für die Effizienzbewertung der parallelen Bereitstellung von Heizwärme und Brauchwasser kein Testverfahren existiert, wurde ein Testzyklus auf Grundlage der EN 14825 (SCOP-Ermittlung für Heizungswärmepumpen) und der EN 16147 (Trinkwasserbereitstellung) entwickelt, um einen cSCOP (combined Seasonal Coefficient of Performance) zu erhalten. Um diese Systemeffizienz (cSCOP) und das neuartige Konzept zu verifizieren, wurde die Wärmepumpenanlage im Labor des Fraunhofer ISE aufgebaut und vermessen. Der Beitrag zeigt die Messergebnisse für den SCOP, die Brauchwarmwasser-Performance sowie den cSCOP und setzt diesen in den Kontext zu aktuell verfügbaren R-290 Wärmepumpen. Weiterhin erfolgt die Analyse des Kondensators hinsichtlich seiner Effizienz. Abschließend werden die Messergebnisse mit den theoretischen Ergebnissen aus einem eigens entwickelten Dymola-Simulationsmodell der Wärmepumpen-Speicher-Kombination verglichen.

Stichwörter:

Propan, Wärmepumpen, thermischer Speicher, Direktkondensation

Gebäudewärmepumpe aus automobilen Komponenten

Vorstellung eines kompakten Plug & Play Wärmepumpenmoduls unter Verwendung automobiler Komponenten

Andreas Schulte¹, Franziska Bockelmann², Zeinab Aghaziarati³,
Ann-Kathrin Dreier², Jonas Hielscher^{1*}, Fynn Linnenbrügger¹, Wilhelm Tegethoff¹, Nicholas Lemke¹

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

² Steinbeis-Innovationszentrum energieplus (siz), Hamburger Str. 277, 38106 Braunschweig, Deutschland
franziska.bokelmann@siz-energieplus.de

³ Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal, Deutschland
aghaziarati@isfh.de

Die Dekarbonisierung des Wärmesektors ist ein zentrales Ziel der Energiewende. Insbesondere im Bereich von Wohngebäuden stellt der Ersatz fossiler Wärmebereitstellungsanlagen, vor allem in Mehrfamilienhäusern, eine große Herausforderung dar. In diesem Transformationsprozess kommt der Wärmepumpentechnologie eine Schlüsselrolle zu.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „TEN.efzn“ werden innerhalb der Forschungsplattform „Wärme“ grundlegende Konzepte einer kompakten, modularen und aus Komponenten des automobilen Thermomanagements bestehenden Plug & Play-Wärmepumpe erforscht. Ein wesentliches Forschungsziel besteht neben der Entwicklung eines Prototyps darin, durch die standardisierte und modulare Bauweise sowie einfache Austauschbarkeit der Wärmepumpenmodule den unterschiedlichen Anforderungen von Wohngebäuden gerecht zu werden. Neben der Gebäudebeheizung soll das System die Trinkwassererwärmung und optional die Klimatisierung ermöglichen.

Sowohl die Verwendung automobil erprobter Komponenten als auch die standardisierte Bauweise versprechen Vorteile hinsichtlich der Fertigungs- und Beschaffungskosten. Aufgrund der dynamischen Leistungsanforderungen an automobile Verdichter werden Vorteile im Teillastbetrieb zur Reduktion der Takthäufigkeit erwartet. Gleichzeitig wird erforscht, inwieweit die automobilen Komponenten den Anforderungen des Gebäudesektors in Bezug auf Energieeffizienz, Langlebigkeit und Sicherheit erfüllen können. Zudem unterstützt die kompakte Bauweise den Einsatz natürlicher, klimaverträglicher – ggf. brennbarer – Kältemittel. Intelligente Regelungsalgorithmen und automatisierte Fehlerdiagnose sollen darüber hinaus einen effizienten Betrieb bei minimalem Wartungsaufwand für Installateur*Innen und Anlagenbetreiber*Innen gewährleisten.

Der Vortrag soll eine allgemeine Vorstellung der kompakten Plug & Play-Wärmepumpe bieten. Dabei soll auf die Motivation, das Vorgehen bei der Konzeptionierung und insbesondere auf die Verwendung automobiler Komponenten eingegangen werden.

Stichwörter:

Wärmepumpe, Bestandswohngebäude, Umsetzbarkeit, Automotive Komponenten, Wärmeerzeugertausch

6.15

Experimentelle Untersuchung zentraler Wärmepumpen

Optimierung für kalte Nahwärmenetze

Dominik Herden^{1*}, Yixia Xu¹, Christiane Thomas¹, Peer Huber², Harald Drück², Bernd Hafner³, Ralf Dott³

¹ Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
01062 Dresden, Deutschland

² Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Pfaffenwaldring 6, 70569 Stuttgart, Deutschland

³ Viessmann Holding International GmbH
Viessmannstraße 1, 35108 Allendorf (Eder)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SolKaN2.0 wird ein neuartiges Konzept kalter Nahwärmenetze untersucht, welches den Einsatz zentraler Wärmepumpen umfasst, die verschiedene Wärmequellen nutzen können und eine Netztemperatur auf einem Niveau oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser erzeugen, wodurch Wasser als Wärmeträgermedium im Netz genutzt werden kann.

Die benötigte zentrale Wärmepumpe zeichnet sich durch einen geringen Temperaturhub im Heizbetrieb von -15°C bis 0 °C auf 5 °C bis 10 °C aus. Der Temperaturbereich im Kühlbetrieb liegt bei 20 °C bis 25 °C auf der Verdampferseite und 30 °C bis 50 °C auf der Kondensatorseite. Dieses Temperaturniveau wird von den am Markt verfügbaren Wärmepumpentechnologien nicht abgedeckt, da die aktuellen Wärmepumpen eine Mindestdruckdifferenz zwischen Verflüssiger und Verdampfer benötigen, um einen sicheren und stabilen Betrieb zu gewährleisten.

In diesem Beitrag werden zwei Labormuster zur experimentellen Erprobung einer zentralen R-290-Wärmepumpe vorgestellt. Der Fokus liegt auf der Auslegung und den Besonderheiten der Labormuster, insbesondere auf der Auswahl des Verdichters und den Methoden zur Effizienzsteigerung. Erste Messergebnisse werden präsentiert, wobei die wichtigsten Exergieverlustquellen analysiert und Ansätze zur Optimierung in der zweiten Testanlage aufgezeigt werden.

Die Ergebnisse unterstreichen die Relevanz der Optimierung von Kältemittelkreisläufen mit natürlichen Kältemitteln, die speziell auf die Temperaturanforderungen kalter Nahwärmenetze abgestimmt sind. Durch die Identifizierung und Reduktion wesentlicher Exergieverluste wird so ein Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger und effizienterer Heizlösungen für urbane Anwendungen geleistet.

Stichwörter:

Wärmepumpen, natürliche Kältemittel, Kalte Nahwärmenetze, Ejektoren, Propan, Exergie, Effizienz, Eisspeicher

6.16

Konzepte und Betrieb der Raumheizung im Feldtest

Auslegung der Wärmepumpen, Schaltzyklen und Temperaturabfall im Heizungsvorlauf

Jeannette Wapler^{1*}, Danny Günther¹, Sebastian Helmling¹

¹ Fraunhofer Institut für Solare Energiesystems ISE, Freiburg
jeannette.wapler@ise.fhg.de

Im Rahmen des BMWK-geförderten Projektes „WP-QS im Bestand“ (FKZ: 03EN2029A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-qs-im-bestand.html>) wurde der Einsatz von Wärmepumpen im EFH-Bestand im Rahmen einer breit angelegten Feldstudie untersucht. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue

Aufzeichnung der Messdaten. Es erfolgt eine Erfassung sowohl der elektrischen Verbraucher als auch der thermischen Parameter. In den Hydraulikkreisläufen werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen vor und nach etwaigen Speichern aufgezeichnet. Die umfassende Datenerhebung ermöglicht eine differenzierte Analyse des Betriebsverhaltens der Wärmepumpenanlagen.

Der Zustand der gut 70 Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert; als Wärmeübergabesysteme werden Heizkörper, Flächenheizungen oder Kombinationen aus beiden eingesetzt. Die realisierten Hydraulikkonzepte zur Einbindung der Raumheizung zeigen eine große Vielfalt: Pufferspeicher in Paralleleinbindung, Reihenspeicher (im Vorlauf oder im Rücklauf) mit oder ohne Kombination von Doppelt-Differenzdruckloser Verteiler, hydraulischer Weiche, u.v.m.. Zudem werden die untersuchten Anlagen mit unterschiedlichen Regelungskonzepten und Parametrierungen betrieben. Ein dritter Einflussfaktor auf den Anlagenbetrieb – die Auslegung der Wärmepumpen – zeigt ebenfalls eine große Bandbreite: von knapp ausgelegten Systemen bis zu Wärmepumpen, die im Auslegungspunkt die doppelte Heizleistung bereitstellen könnten, als es erforderlich ist.

Der Konferenzbeitrag umfasst die Analyse der Temperaturen zur Raumheizung: welche Temperatur stellt die Wärmepumpe im Vorlauf bereit und welche Temperatur steht im Verbraucherkreis (nach Speicher, Weiche, o. a. hydraulischen Kopplungen zwischen Vor- und Rücklauf) zur Verfügung? Die Analyse blickt auf die Einflussfaktoren des Hydraulikkonzeptes, der Wärmepumpen-Auslegung und der Volumenströme. Analog wird der Verlauf der Rücklauftemperatur betrachtet. Als zweiter Aspekt wird die Varianz des Taktungsverhaltens der Wärmepumpensysteme vorgestellt. Bei welchen Randbedingungen laufen die Wärmepumpen auch bei Radiatorsystemen mit Betriebsphasen von mehreren Stunden; welche Randbedingungen verursachen Betriebsphasen von nur wenigen Minuten?

6.17

Effizienzanalyse von Wärmepumpen im EFH-Bestand

Detaillierte Analyse von Jahresarbeitszahlen und Gütegraden auf Basis einer breit angelegten Feldmessung

Danny Günther^{1*}, Jeannette Wapler¹, Robert Langner¹, Sebastian Helmling¹, Marek Miara¹

¹ Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
danny.guenther@ise.fhg.de

Mit dem Hauptziel der Effizienz- und Betriebsanalyse von Wärmepumpen im EFH-Bestand wurde von 2020 bis Ende 2024 das BMWK-geförderte Forschungsprojekt „WP-QS im Bestand“ (FKZ: 03EN2029A; <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/wp-qs-im-bestand.html>) durchgeführt. Im Rahmen dessen konnten über 70 Wärmepumpen detailliert messtechnisch untersucht werden. Die Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen wurden zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung eingesetzt und sind in Gebäuden der Baujahre 1926 bis 2001 installiert. Der Zustand der Gebäude reicht von unsaniert bis vollsaniert und als Wärmeübergabesysteme werden Heizkörper, Flächenheizungen oder Kombinationen aus beiden eingesetzt. Das Messkonzept umfasst die minutengenaue Aufzeichnung der Messdaten. Auf Seiten der elektrischen Verbraucher werden neben Verdichter, Steuerung und Heizstab auch die Antriebe in der Wärmequelle (Solepumpe oder Ventilator) sowie die Umwälzpumpen in der Wärmenutzungsanlage (vor und nach etwaigen Speichern) erfasst. In den Hydraulikkreisläufen der Wärmequelle und der Wärmenutzungsanlage werden die Energien, Leistungen, Volumenströme und Temperaturen aufgezeichnet.

Der Konferenzbeitrag umfasst die finalen Ergebnisse der Effizienzanalyse. Für unterschiedliche Zeiträume und Anlagengruppen werden die ermittelten Jahresarbeitszahlen gemeinsam mit den Haupteinflussfaktoren wie den Systemtemperaturen, den Hilfsenergien oder den Normleistungszahlen der Geräte statistisch aufbereitet. Die Jahresarbeitszahlen werden als Erzeuger- sowie Systemarbeitszahlen und getrennt nach den Betriebsmodi Raumheizung und Trinkwassererwärmung aufgeschlüsselt. Flankiert werden die Ergebnisse von Angaben zu den Baualter der Gebäude, deren energetischer Qualität sowie den vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen. Einen weiteren Schwerpunkt bildet die Vorstellung der für die Luft- und Erdreich-Wärmepumpen ermittelten Gütegrade.

6.18

Betriebsverhalten von überdimensionierten Wärmepumpen: Eine Analyse von Feldmessdaten

Silvan Bernal*, Leon Bredel, Stefan Bertsch

OST – Ostschweizer Fachhochschule, Institut für Energiesysteme,
Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs SG, Schweiz
silvan.bernal@ost.ch

Diese Studie untersucht das Betriebsverhalten von Haushaltswärmepumpen im Feld. Grundlage der Analyse sind hochaufgelöste, langjährige Messdaten von 30 Wärmepumpenanlagen unterschiedlicher Typen und Leistungsbereiche, die mit einer Abtastrate von 100 ms erfasst und als 10 s Mittelwerte gespeichert wurden. Vorangegangene Untersuchungen von Feldanlagen haben gezeigt, dass viele Wärmepumpen stark überdimensioniert sind. Der Fokus dieser Studie liegt auf der Analyse der Laufzeit und der Einschaltzyklen mit dem Ziel den Einfluss der Überdimensionierung zu ermitteln. Dazu wird die Verteilung der Anzahl Starts in Abhängigkeit der Laufzeit und weiteren Einflussgrößen wie Quellen- und Senkentemperatur ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass viele Wärmepumpen deutlich kürzere Laufzeiten aufweisen als erwartet, wobei zwischen den einzelnen Anlagen erhebliche Unterschiede bestehen: Die mittlere Laufzeit pro Start variiert zwischen 15 Minuten und 18 Stunden, wobei 70% der Anlagen unter 2 Stunden und 43% unter 1 Stunde liegen.

Für die weitere Beurteilung wurde die Dimensionierung der Anlagen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Hälfte der Anlagen um mehr als 35% überdimensioniert sind. Der Mittelwert liegt bei 45%. Bei Inverter geregelten Luft/Wasser-Wärmepumpen liegt die Überdimensionierung im Mittel sogar bei 56%. Es zeigt sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Überdimensionierung und Taktrate: Stark überdimensionierte Anlagen weisen die höchsten Taktraten auf.

Die Ergebnisse zeigen das Optimierungspotential bei der Auslegung von Wärmepumpenanlagen. Da hohe Taktraten die Lebensdauer von Wärmepumpen negativ beeinflussen, unterstreicht diese Studie die Bedeutung der bedarfsgerechten Dimensionierung für den effizienten und langlebigen Betrieb.

Stichwörter:

Feldmessungen, Wärmepumpen, Laufzeitanalyse, Überdimensionierung, Takten

6.19

„Füllmengenoptimierung einer 30kW Propan Wärmepumpe“

Thermische Vermessung und Regelungsstrategie für unterfüllten Zustand

Timo Methler¹, Marcus Heeg¹, Hannes Fugmann¹, Lena Schnabel¹

¹ Fraunhofer ISE, Wärme und Kältetechnik, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg, Deutschland
timo.methler@ise.fraunhofer.de

Im Rahmen des Projektes LCR290 werden Wärmepumpenlösungen für Mehrfamilienhäuser geplant, getestet und bewertet. Eine dieser Lösungen sind innenaufgestellte Sole-Wasser-Propan-Wärmepumpen als zentrale Heizungen, z. B. im Keller aufgestellt. Zur Bewertung wurden zwei Wärmepumpendemonstratoren ausgelegt, aufgebaut und thermisch vermessen. Bewertungskriterien sind u. a. Kältemittelfüllmenge, Marktverfügbarkeit der Komponenten und Förderfähigkeit des Endproduktes. Die Definition der Zielwerte und die Auswahl der Komponenten wurden von einem breiten Industriekonsortium aus Wärmepumpenherstellern und der Wohnungswirtschaft unterstützt.

Die Demonstratoren konnten eine Heizleistung von 30 kW bereitstellen bei Temperaturverhältnissen von B0/W55, Füllmengen von 625 g bzw. 750 g sowie SCOPs über den geforderten BAFA-Richtwerten. Der Beitrag

zeigt Messverfahren und Messergebnisse beider Demonstratoren sowie eine füllmengenoptimierte Überhitzungsregelung. Der vorgestellte Regelungsansatz kann zur Leistungs- oder Effizienzsteigerung im Falle einer leichten Kältemittelunterfüllung genutzt werden.

Stichwörter:

Propan, Wärmepumpe, Füllmengenreduktion, R290, Sole- Wärmepumpe

6.20

Efficient Waste Heat Utilisation in District Heating and Cooling Networks at CERN: A Data-Driven Pinch Point Approach

Jan Bengsch^{1*}, Lukas Köster¹, Armin Hafner¹

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

*jan.bensch@ntnu.no

The integration of surplus heat into District Heating and Cooling (DHC) systems is essential to reduce primary energy demand and to accelerate the heat transition. This work presents the first phase of a PhD project focused on improving the efficiency of thermal energy systems at CERN through data-driven assessment and pinch point analysis. A comprehensive mapping of heat sources and sinks within selected infrastructures was undertaken to identify untapped low-grade heat and assess its recovery potential. Initial efforts focused on identifying opportunities for direct heat recovery through heat exchanger networks, based on temperature compatibility and heat quality. Where direct recovery was not feasible, concepts for indirect integration using heat pumps and thermal energy storage were explored. These results form the basis for dynamic modelling and control strategies in later stages. The methodology supports a systematic approach to surplus heat utilisation in complex energy systems, contributing to the decarbonisation of DHC networks at CERN and beyond.

Keywords:

Surplus Heat Utilisation, District Heating and Cooling (DHC), Pinch Point Analysis, Heat Pump Technology, Thermal Energy Storage (TES)

6.21

Entwicklung Wärmepumpe für Netze mit großer Spreizung

Dr.-Ing. Karl Steinjan^{1*}

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

Karl.Steinjan@ilkdresden.de

In Wärmenetzen sind große Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf von Vorteil, um die geförderten Mengen an Wärmeträgermedium und damit die Rohrleitungsquerschnitte klein zu halten. Während die aktuellen Fernwärmenetze meist mit hohen Vorlauftemperaturen um die 100 °C betrieben werden, sollen zukünftige Netze mit deutlich niedrigeren Temperaturen arbeiten. Allerdings gibt es Anwendungen, die weiterhin hohe Vorlauftemperaturen erforderlich machen (Trinkwarmwasser, Prozesse, alte Heizungssysteme).

Für diese Anwendungen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Flex-WP ein Funktionsmuster einer Wärmepumpe mit einem natürlichen Kältemittelgemisch entwickelt und untersucht. Durch die Nutzung des zeotropen Kältemittelgemisches mit Temperaturgleit können theoretisch die Exergieverluste der Wärmepumpe reduziert werden.

Es werden die theoretischen Vorarbeiten, sowie erste Messungen und Ergebnisse des Forschungsprojektes vorgestellt.

Schlüsselwörter:

Wärmepumpe, natürliche Kältemittel, Kältemittelgemische, Wärmenetze, Spreizung

6.22

Eisspeicher als Wärmequelle für Wärmepumpen

Verbesserung der Wärmeübertrager im Eisspeicher

**Peer Huber^{1*}, Johannes Brunder¹, Harald Drück¹, Bernd Hafner², Ralf Dott², Dominik Herden³, Yixia Xu³,
Christiane Thomas³**

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

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

³ Technische Universität Dresden, Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentchnik
01062 Dresden, Deutschland

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

Um Wasser im kalten Nahwärmenetz als Wärmeträgermedium verwenden zu können, ist eine zentrale Wärmepumpe nötig, die das Temperaturniveau für das Wärmenetz auf über 0 °C anhebt. Als Wärmequellen für diese zentrale Wärmepumpe kommen zum einen Wärmegewinne durch Solarstrahlung und Umgebungswärme, die durch Luft-Sole-Kollektoren direkt bereitgestellt werden, zum Einsatz. Zum anderen werden überschüssige Wärmegewinne der Luft-Sole-Kollektoren und Wärmegewinne aus dem umgebenden Erdreich durch einen erdvergrabenen und als saisonalen thermischen Energiespeicher fungierenden Eisspeicher bereitgestellt.

Die Wärmeübertragung zwischen dem Speichermedium Wasser und dem als Wärmeträgermedium eingesetzten Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch erfolgt in einem solchen Eisspeicher üblicherweise durch im Speicher integrierte Wärmeübertrager. Im Forschungsprojekt „SolKaN2.0“ soll die Wärmeübertragung dieser Wärmeübertrager verbessert werden. Hierzu werden verschiedene Ansätze an einem Versuchs-Eisspeicher am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) experimentell untersucht und die Ergebnisse in diesem Beitrag vorgestellt.

Bisher werden für Wärmezufuhr und -entnahme separate Wärmeübertrager verwendet, wobei der Wärmeübertrager für die Wärmeentnahme signifikant größer dimensioniert wird. Erste durchgeführte Versuche zeigen, dass dieser größer dimensionierte Wärmeübertrager auch für die Wärmezufuhr verwendet werden kann und hierbei eine deutlich bessere Wärmeübertragung bietet. Ein weiterer Ansatz ist die Untersuchung einer mittels einer Pumpe eingebrachten Strömung in Bezug auf eine hierdurch verbesserte Wärmeübertragung.

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 Klimaschutz (BMWK) 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.

RZ 01

Randbedingungen des Rechenzentren-Standortes Deutschland

Dr.-Ing. Holger Neumann

Karlsruher Institut für Technologie | Institut für Technische Physik
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Holger.neumann@kit.edu

Der Bedarf an Rechenleistung in Rechenzentren steigt weltweit stark an. Steigenden Bedarf hierfür gibt es aufgrund zunehmender Automatisierung & Digitalisierung, Film & Gaming, Forschung & Wissenschaft und besonders aufgrund von künstlicher Intelligenz (KI). In den USA geht man davon aus, dass 2028 zwischen 60 und 80% des IT-Stromverbrauchs der Rechenzentren durch KI verursacht werden und auch in Europa werden KI-Anwendungen immer beliebter. In Europa ist Deutschland der größte Rechenzentren-Standort mit einer IT-Anschlussleistung von ca. 2.500 MW (Stand 2023). Deutschland wird als Rechenzentrumsstandort hinsichtlich vieler Kriterien, wie zuverlässige Stromversorgung, Datenschutz, Rechtssicherheit, etc. als sehr positiv bewertet. Negativ fallen hier aber hohe Strompreise, Bürokratie bei Genehmigungsprozessen und regulatorische Vorgaben auf, wobei das Energieeffizienzgesetz aktuell besondere Hürden aufbaut.

Der Beitrag listet hier die zunehmenden Anwendungsfelder für Rechenzentren, beschreibt den aktuellen Stand von Rechenzentren in Deutschland und geht auf das Energieeffizienzgesetz ein.

RZ 02

Abwärme-Nutzung im Rechenzentrum – Status Quo und wie wir ihn überwinden können

Andreas Hantsch^{1,*}, Bodo Burandt²

¹ Hantsch Sustainability Consulting, Bayrische Straße 8, 01069 Dresden
aha@ha-sc.com

² Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
bodo.burandt@ilkdresden.de

Der weltweite Bedarf an Rechenzentren (RZ) wächst rapide und stellt bereits heute eine erhebliche Herausforderung für viele Regionen dar. Im Jahr 2024 verbrauchten Rechenzentren in Deutschland etwa 20 TWh elektrische Energie, was 4,3 % des Stromverbrauchs in diesem Zeitraum entspricht. Dabei entsteht eine beträchtliche Menge an Abwärme mit einem hohen Anteil an Anergie – also nutzloser Wärme. Mit der jüngsten Novellierung des Energieeffizienzgesetzes wurden strenge Anforderungen an die Energieeffizienz und die Rückgewinnung von Abwärme in Rechenzentren gestellt.

Dieser Beitrag analysiert den aktuellen Stand der Abwärmenutzung in Deutschland und beleuchtet internationale Entwicklungen. Auf dieser Grundlage werden die wichtigsten Hemmnisse identifiziert und Ansätze zu deren Überwindung diskutiert. Diese betreffen insbesondere das Temperaturniveau der Abwärme, die Asynchronität der Wärmeerzeugungs- und -verbrauchsprofile, die Verfügbarkeit und Redundanz sowie rechtliche Fragestellungen. Anhand von Praxisbeispielen werden die jeweiligen Effekte veranschaulicht.

Stichwörter:

Rechenzentrum, Abwärmenutzung

Abwärmenutzung flüssigkeitsgekühlter Rechenzentren

Eine systematische Simulationsuntersuchung zur Wärmeversorgung von Wohnquartieren

Maximilian Stahlhut¹, Thorsten Urbaneck^{1*}

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

Der weltweite Energiebedarf von Rechenzentren nimmt kontinuierlich zu. Mit steigenden Leistungsdichten moderner Server stoßen konventionelle, luftbasierte Kühlsysteme zunehmend an ihre Grenzen. Die direkte Flüssigkeitskühlung ermöglicht eine effiziente Wärmeabfuhr auch bei leistungsintensiven Servern. Vergleichsweise hohe Kühlmittelaustrittstemperaturen bis zu 55 °C steigern darüber hinaus das Potenzial zur Wärmerückgewinnung. Eine Möglichkeit zur Nutzung der Abwärme stellt die Wärmeversorgung von Wohnquartieren über Nahwärmenetze dar. Der Anteil der rückgewonnenen Abwärme (Energy Reuse Factor, *ERF*) hängt dabei von verschiedenen Einflussgrößen ab, insbesondere von der Größe und dem Aufbau des Rechenzentrums, der Lastcharakteristik des Wärmeabnehmers sowie der eingesetzten Wärmeversorgungslösung. Ziel dieser Arbeit ist daher die detaillierte Analyse der Einflussfaktoren auf den *ERF* bei der Nutzung von Rechenzentrumsabwärme in Nahwärmenetzen. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell in der Softwareumgebung TRNSYS erstellt. Das Modell bildet die Informationstechnik, die Kälteversorgung im Rechenzentrum sowie das Wärmeversorgungssystem inklusive Wärmeabnehmer ab. Als Wärmeversorgungslösung kommt in dieser Betrachtung ein Wärmepumpen-Speicher-System zum Einsatz. Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass der Anteil der genutzten Abwärme und die Heizlastdeckung im Quartier gegenläufig miteinander verknüpft sind. Wird die Abwärme aus dem Rechenzentrum vorrangig zur Deckung der Grundlast verwendet, ist der *ERF* am größten. Ein hoher Anteil an rückgewonnener Wärme reduziert gleichzeitig den Energiebedarf für die Kältebereitstellung sowie die Grenzkosten für den Rechenzentrumsbetrieb. Weiterhin zeigt sich, dass bei ausgeprägten Lastspitzen im Wärmenetz die Integration eines thermischen Energiespeichers sich positiv auf die Heizlastdeckung und die Abwärmenutzung aus dem Rechenzentrum auswirkt. Die entwickelten Kennzahlen ermöglichen eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Quartiere und Anwendungsfälle.

Stichwörter:

Rechenzentrum, Abwärmenutzung, Flüssigkeitskühlung, Simulation

Lastabhängige Modellierung des Energiebedarfs am Beispiel eines 1 MW Rechenzentrums

Anne Weisemann

Cloud&Heat Technologies GmbH, Thermal Research&Development,
Königsbrücker Straße 96 (Halle 15), 01099 Dresden
anne.weisemann@cloudandheat.com

Das im Jahr 2023 verabschiedete Energieeffizienzgesetz gibt Rechenzentrumsneubauten in Zukunft eine Power Usage Effectiveness (PUE) von unter 1,2 vor. Dies bedeutet, dass beim Betrieb der IT-Hardware mit einem Leistungsbezug von einem kW im Schnitt nur maximal 200 W zusätzlich von der Infrastruktur verbraucht werden dürfen. Im Planungsprozess kann die Einhaltung des Zielwertes nur unter Berücksichtigung der späteren IT-Auslastung abgeschätzt werden. Diese beeinflusst den Betriebspunkt des Gesamtsystems; insbesondere in niedrigen Teillastzuständen sind die Verluste oft sehr hoch. Um die Effizienz für beliebige Teillastfälle besser vorhersagen zu können, wurde ein Rechenmodell entwickelt, welches das Teillastverhalten

der größten Verbraucher des Kühl- und des elektrischen Systems durch Polynomfunktionen approximiert. Dafür wird ein Kühlkreislauf mit einem gebäudeinternen Kaltwassernetz abgebildet, welches Umluftkühlgeräte und optional direktflüssigkeitsgekühlte Server versorgt. Die Abwärme wird, solange wie möglich, durch Trockenkühler direkt und sonst über Kompressionskältemaschinen an die Umgebung abgegeben; optional kann auch an ein Wärmenetz gespeist werden. Unter Variation der IT-Auslastung wurde die Energieeffizienz des Gesamtsystems mit Umgebungstemperaturprofilen von Standard- und Extremjahr sowie mit und ohne auskoppelbare Abwärme betrachtet. Die aus dem Modell generierten Ergebnisse werden vorgestellt.

Stichwörter:

Rechenzentren, Energieeffizienzgesetz

RZ 05

Thirsty Data Centres – Surging Water Demand for Cloud and AI Server Cooling

Andreas Hantsch^{1,*}, Bodo Burandt²

¹ Hantsch Sustainability Consulting, Bayrische Straße 8, 01069 Dresden
aha@ha-sc.com

² Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH, Bertolt-Brecht-Allee 20, 01309 Dresden
bodo.burandt@ilkdresden.de

The escalating demand for data centre services, driven by the widespread availability of artificial intelligence (AI) to the general public, presents significant challenges in terms of energy and water consumption. Globally, data centres consumed approximately 400 TWh of electricity in 2024, a figure slightly less than Germany's annual electricity production in the same year. Despite advancements in energy efficiency, roughly 40% of this electricity is utilised for server cooling.

However, these energy efficiency measures come with a notable drawback: to reduce heat rejection temperatures, particularly in hot climates, water is sprayed onto heat rejection devices, leading to evaporation. This process resulted in an estimated loss of approximately 500 million cubic metres of clean, potable water in 2023.

This study provides a comprehensive analysis of the energy and water demands of data centres, considering various factors such as cooling infrastructure design, server load characteristics, and climate zones. The findings are derived from annual simulations with hourly time steps and are presented in terms of Power Usage Effectiveness (ranging from 1.2 to 1.6 kWh/kWh) and Water Usage Effectiveness (ranging from 0 to 2 litres/kWh). The discussion thoroughly examines the impacts of these parameters, providing valuable insights into the sustainability challenges faced by the data centre industry.

Keywords:

Data centre, Power Usage Effectiveness, Water Usage Effectiveness