

Luftgekühlte Wärmetauscher für CO₂-Anwendungen

Neu konzipierter Testring bei LU-VE

*S. Filippini und U. Merlo,
LU-VE Group,
I-Uboldo,*

*M. Romano,
Politecnico di Milano, Dipartimento di
Energia,
I-Mailand*

Mit einem neu konzipierten Testring konnte LU-VE bedeutende Fortschritte beim Testen der Leistung von CO₂-Lamellenrohrwärmetauschern sowohl in luftgekühlten als auch in gasgekühlten Kühlgeräten erzielen. Dank der neuen Testanlage war es möglich, ein spezifisches Projekt für einen CO₂-Lamellenrohrwärmetauscher in Angriff zu nehmen, bei dem neue Erkenntnisse über Wärmetauscheffekte bei der Verdunstung, Kondensation und transkritischen Gaskühlung gewonnen werden sollen. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wird auch die Auswirkung des Öls auf den internen Wärmetauschkoeffizienten berücksichtigt. Im vorliegenden Artikel werden die Testvorgänge, die Kalibrierung, die in der Software zur Berechnung der Produktleistung vorgenommen wurde, und potenzielle Produktverbesserungen beschrieben.

CO₂ wurde seit Mitte des 19. Jahrhunderts als Kühlmedium in landbasierten Systemen und an Bord von Schiffen verwendet. Es bot mehrere Vorteile:

- > geringere Kosten
- > gute Wärmeübertragungseigenschaften
- > Ungiftigkeit im Falle von Leckagen im Maschinenraum
- > Da die Kühlflüssigkeit des Kondensators auf Schiffen Meerwasser geringer Tem-

peratur war, erwies sich der Kreislauf bei unterkritischen Bedingungen als funktionsfähig.

Das Aufkommen synthetischer Kühlmittel (FCKW, H-FCKW) und die Entwicklung der Kompressortechnologie in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts führten dazu, dass CO₂ als Kühlmedium aufgegeben wurde. Die Neuentdeckung von Kohlendioxid beruhte auf den Umweltproblemen, die die

Verwendung von FCKWs und H-FCKWs in Kühlsystemen in Verruf brachten. Die Artikel von Gustav Lorentzen in den neunziger Jahren sind aus diesem Grund berühmt geworden. Daraufhin wurden zahlreiche Studien über Kohlendioxid als sekundäres Kühlmedium veröffentlicht, vor allem im Hinblick auf kommerzielle Kühlsysteme für den Einzelhandel.

LU-VE begann Anfang des neuen Jahrtausends luftgekühlte Wärmetauscher für CO₂ zu untersuchen und verfügt seit 2012 über ein hochentwickeltes Labor für das Testen von gas- und luftgekühlten Kühlgeräten. In diesem Artikel werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und die Kalibrierung des bei LU-VE verwendeten Kalkulationsmodells zur Auslegung von Gaskühlern zusammengefasst.

Testanlage

Die CO₂-Anlage wurde für das Testen von Kondensatoren sowie gas- und luftgekühlten Kühlgeräten entwickelt. Der maximale Betriebsdruck beträgt 120 bar, und die Höchsttemperatur 120 °C.

Auf Basis von LabView wurde betriebsintern ein dediziertes Softwareprogramm für die Überwachung und Erfassung von Daten entwickelt. Für die Tests wurde ein thermischer Ausgleich zwischen dem Testobjekt und einer Vergleichsgruppe geschaffen, um die Zuverlässigkeit der experimentellen Daten zu gewährleisten. Dies erforderte einen



Abbildung 1: Seitenansicht der Anlage

hohen Zeitaufwand für die Kalibrierung der Messinstrumente und insbesondere für die Festlegung der Dispersion innerhalb der Klimakammer.

EIGENSCHAFTEN DER TESTOBJEKTE

Im Labor wurden drei Geräte getestet. Die Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeführt. Das verwendete Rohr besteht aus einer K65-Legierung mit einem geringen Eisenanteil, der die mechanische Festigkeit signifikant erhöht. Die Kreisläufe wurden unter Beachtung der Gesetzmäßigkeiten für die Gegenströmung und den Ablauf etwaigen ruhenden Öls identisch konzipiert. Letzteres ist, wie weiter unten ausgeführt wird, die Hauptursache für unzureichende Gaskühlerleistung.

Am Ende der Untersuchung wurde eine Reihe von Vergleichen zwischen theoretischen und experimentellen Daten angestellt.

Der LU-VE-Berechnungscode

Die Kalkulationssoftware nutzt Gnielinski- und Colburn-Korrelationen, die für den Wärmeaustausch mit ein- bzw. zweiphasigen Fluiden modifiziert wurden. Für die Berechnung des Druckabfalls wird eine modifizierte Lockhart-Martinelli-Korrelation herangezogen. Die Thermodynamik- und Transporteigenschaften von Kohlendioxid werden mit dem Programm Refprop 8.0 ermittelt. Das Ziel der Tests besteht in der Überprüfung der Validität dieser Korrelationen im Hinblick auf den Betrieb mit CO₂. Der Programmcode berechnet die Wärmeübertragung von Gaskühlern unter Berücksichtigung der Gegenströmungen. Allerdings korrigiert der Code Kreuzströme bei den Enthitzungskomponenten in Kondensatoren. Die Koeffizienten der Wärmetransportkorrelationen werden über Versuche in den LU-VE-Labors unter Standardbedingungen ermittelt. Angesichts der

Gerät	GASKÜHLER 1	GASKÜHLER 2	GASKÜHLER 3
Lamellenmaterial	Al	Al	Al
Rohrtyp	Glatt	Glatt	Glatt
Rohrmaterial	Cu K65	Cu K65	Cu K65
Lamellenabstand	2,1	2,1	2,1
Lamellendicke	0,12	0,12	0,12
Anzahl Rohre	40	40	40
Anzahl Reihen	4	4	3
Anzahl Kreisläufe	5	5	4
Rohrdurchmesser	5/16"	5/16"	5/16"
Registerlänge	1.215	1.215	1.215
Oberfläche	1,215	1,215	1,215
Lüftertyp/ U/min	8P/465	EC/807	EC/675
Durchsatz Luftvolumen	3.956	6.650	6.502

Tabelle 1: Eigenschaften der Testobjekte

Besonderheiten der Betriebsbedingungen von Gaskühlern im Vergleich zu den üblichen Berechnungsgrundlagen musste die Anpassbarkeit des Codes unter diesen speziellen Gegebenheiten überprüft werden. In einer ersten Analyse wurde die Qualität der Kreuzstrom-Approximation überprüft. Für die Bestimmung der Auswirkung der mittleren logarithmischen Transition (insbesondere DT_{ml}) wurde der bei LU-VE entwickelte alternative Code „X3FLOW“ für den Gaskühler verwendet. Dieser ermöglicht dreidimensionale Berechnungen, die dem realen Verlauf des Kreislaufs entsprechen, ihn in endliche Volumen unterteilen und bei Kreuzströmen den N-Elementtransport mithilfe der klassischen Gleichungen der ε-NTU-Methode auflösen. Trotz der rigiden Anwendung der X3FLOW-Berechnung (rechnerisch wesentlich aufwendiger) wurden beim Vergleich der mit dem LU-VE-Standard und dem X3FLOW-Code ermittelten Gesamtleistung keine nennenswerten Ab-

weichungen festgestellt. Aus diesem Grund wurde entschieden, die DT_{ml}-Kalkulationsmethode nicht zu modifizieren.

Mit einer zweiten Analyse wurde die Wirkung steiler Temperaturgradienten zwischen angrenzenden Rohren untersucht, die entlang der Lamelle zu leitungsbedingten thermischen Strömen führen können. Zur Bestimmung der Auswirkung der leitfähigen Wärmeübertragung zwischen zwei Reihen mit feststellbarer Temperaturschwankung des Fluids in den Rohren wurden einige Simulationen mithilfe von CFD durchgeführt. Als Bezugsbasis wurde eine glatte Lamelle mit zwei Temperaturdifferenzen zwischen dem Fluid in den Rohren simuliert:

- 70/70 °C DELTA 0 °C
- 110/30 °C DELTA 80 °C

Dieselben Temperaturunterschiede wurden bei der LUVE-Hitech-Lamellenkonfiguration näherungsweise identisch beibehalten. Die Ergebnisse der vier CFD-Simulationen zeigen, dass bei Temperaturunterschieden

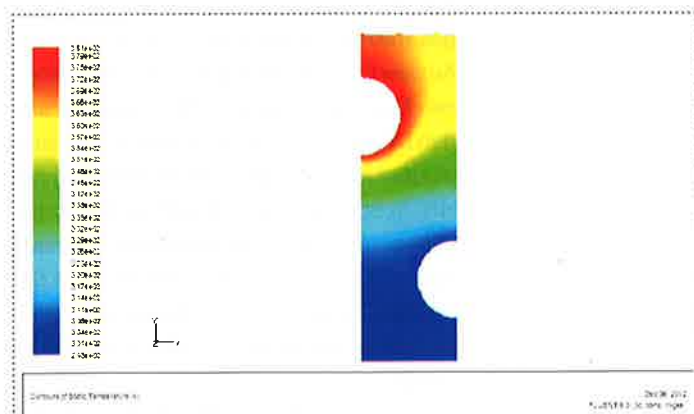


Abbildung 2a: CFD-Simulation einer glatten Lamelle

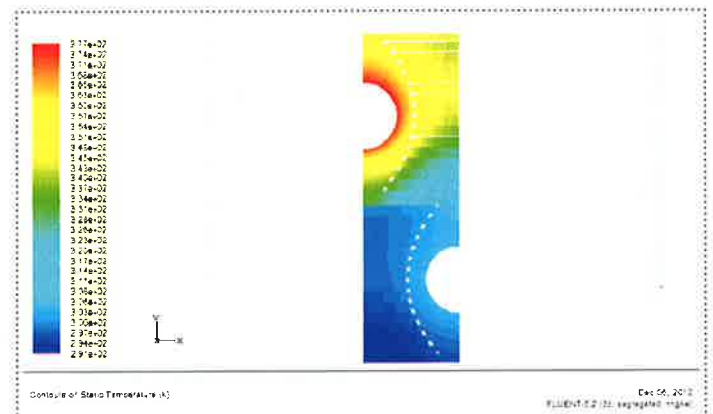


Abbildung 2b: CFD-Simulation einer LU-VE-Hitech-Lamelle

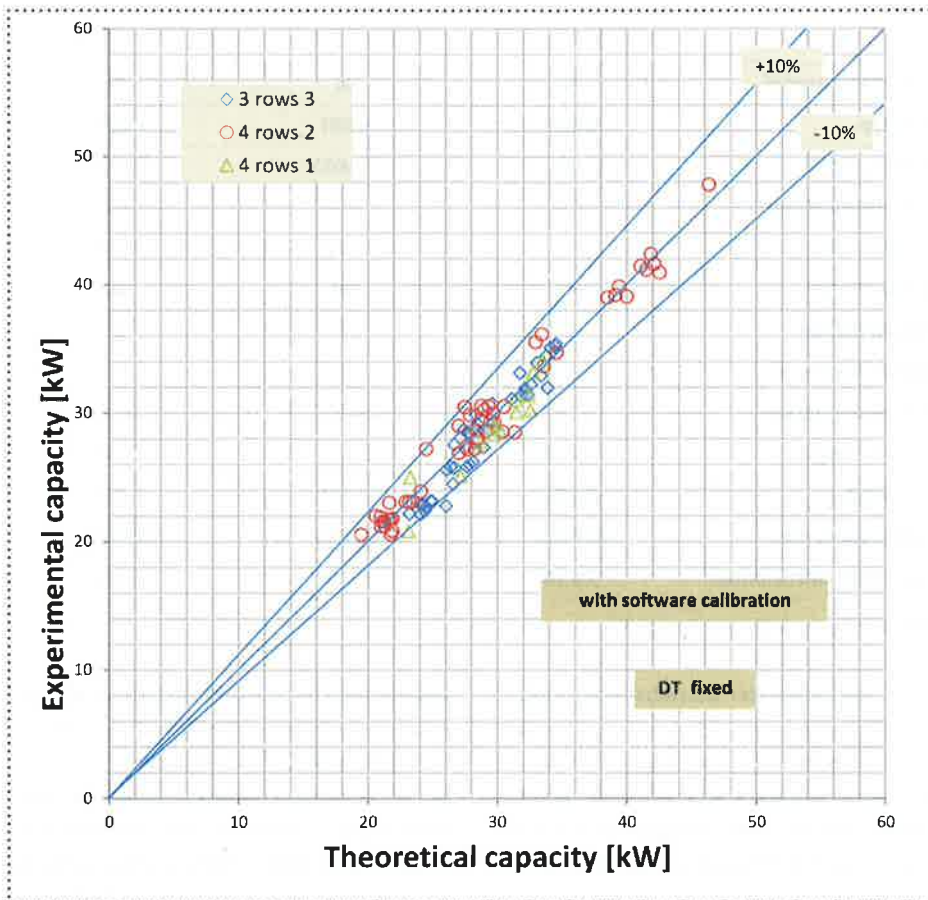


Abbildung 3: Verlauf der prognostizierten Kapazität

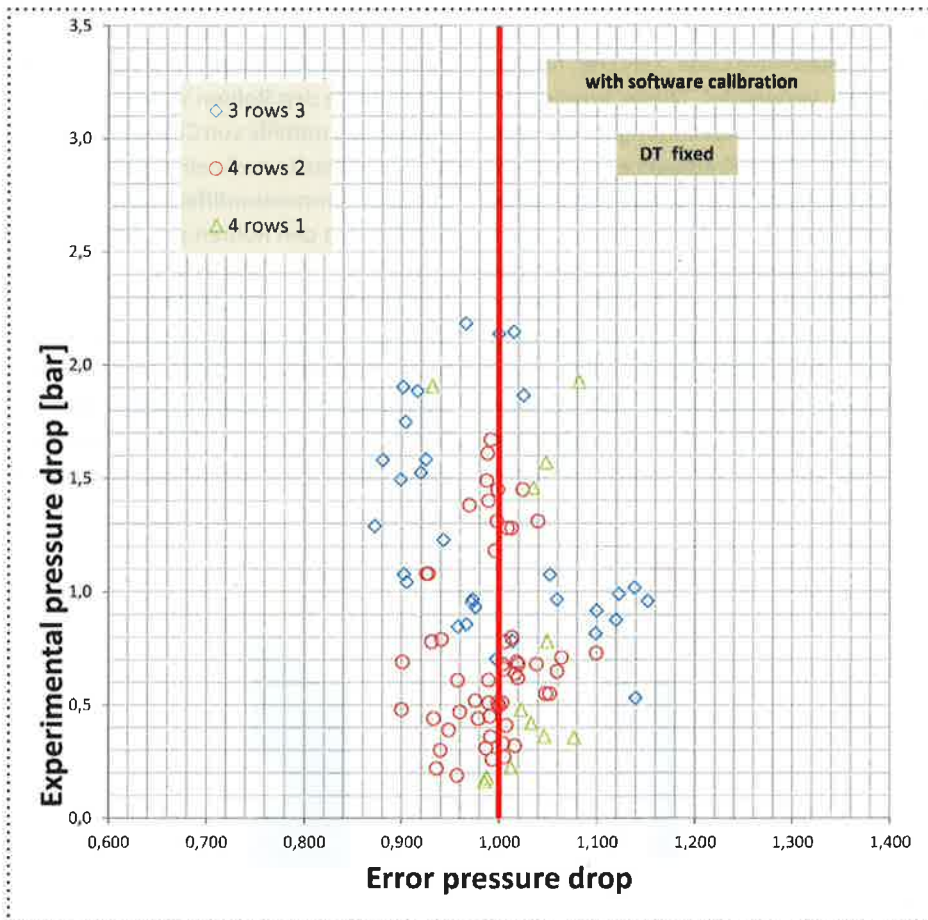


Abbildung 4: Abweichung des Druckabfalls

von null der leitfähige Wärmetransport in der Nähe des mittleren Bereichs zwischen den Reihen gleichermaßen null ist (adiabate Zone), während bei einer Erhöhung der Temperaturdifferenz der Fluide zwei unterschiedliche Verhaltensweisen für die beiden Lamellentypen zu beobachten sind: a) bei glatten Lamellen beträgt die leitfähige Übertragung (negativ im Hinblick auf den gesamten Wärmetransport der Lamelle) 37 % des Gesamtbetrags, ein signifikanter Wert; b) im Falle der LU-VE-Hitech-Lamellen sinkt der Wert auf circa 4 % des Gesamtbetrags, ein vernachlässigbarer Wert.

Abbildung 2 zeigt für die vier simulierten Konfigurationen den Verlauf der Lamellentemperatur im mittleren Bereich der Reihen, 0,1 mm vor und 0,1 mm nach der Mittellinie. (Diese Flächen werden für die Berechnung des leitfähigen Wärmestroms herangezogen.) Die farbigen Karten stellen darüber hinaus die Lamellentemperatur dar. Es lässt sich feststellen, dass die spezielle Gestaltung der Kerben eine hervorragende Wärmeübertragung radial zu den Rohren gestattet (hohe Lamelleneffizienz) und einen schädlichen Wärmetransport zwischen den Bereichen um die Rohre in angrenzenden Reihen verhindert (thermische Trennung).

Versuchsergebnisse und Vergleiche mit LU-VE-Code unter transkritischen Bedingungen

Eine umfangreiche Versuchsreihe wurde durchgeführt, die Drücke von 80 bis über 110 bar umfasste. Viele Parameter wurden untersucht. Außerdem wurde überprüft, ob Schmieröl im Kreislauf vorhanden war. Wie in der Fachliteratur ausgeführt [Dang, Wang], kann die Bildung eines Ölfilms innerhalb der Rohre des Kreislaufs zu einer erheblichen Verringerung des internen Tauschkoeffizienten von über 70 % [Dang] führen.

Aus diesem Grund wurde ein RHTC-Multiplikationskoeffizient gesucht, der bei der Auswertung der Versuchsdaten den internen Tauschkoeffizienten (HTC) reduziert und den Druckabfall erhöht. In der Fachliteratur wurden einige Studien zur Bestimmung des HTC in überkritischen Bereichen bei Vorliegen von Öl im Kreislauf gefunden. Folgende Variablen wurden untersucht und mit der Herabstufung des HTC in Bezug gesetzt: $RHTC = f(ID, p_v, \text{Strömung, Druck, } x_{oil}, TCO_2, \text{Öltyp})$

Eine Analyse der veröffentlichten Daten zeigt eine hervorragende Übereinstimmung

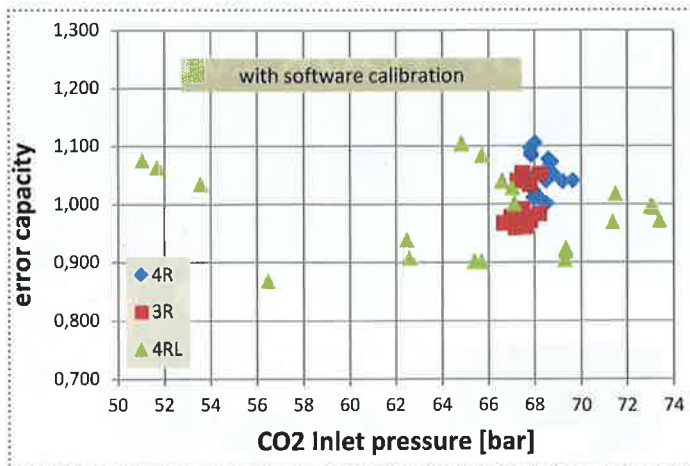


Abbildung 5: Verlauf der Kapazitätsabweichung als Funktion des CO₂-Einlassdrucks

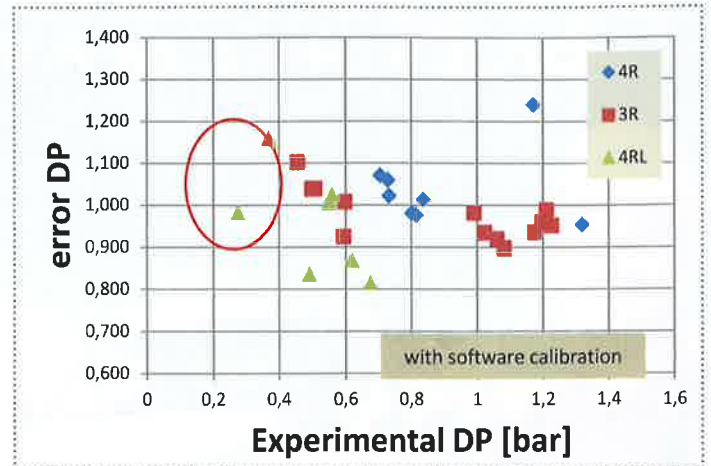


Abbildung 6: Verlauf der Druckabfallabweichungen

zwischen unseren Schlussfolgerungen und der Literatur, insbesondere bei Massenkonzentrationen von Öl von circa 3-5 %. Anschließend wurde eine bibliografische Recherche bezüglich der verfügbaren Korrelationen durchgeführt, wobei sich diejenige von Gnielinski am zutreffendsten erwies (zutreffend bei $2300 < \text{Reynolds} < 5\,000\,000$). Die ermittelten Korrekturkoeffizienten weisen eine geringe Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen auf. Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt den Verlauf der theoretischen/berechneten Kapazität im Vergleich zur experimentellen Kapazität nach Anwendung des Korrekturkoeffizienten. Im Diagramm sind zwei Begrenzungslinien des Prozentfehlers zwischen den beiden Werten von $\pm 10\%$ dargestellt. Abbildung 4 zeigt den Verlauf der Druckabfallabweichungen als Funktion der Werte in bar. Die Verteilung liegt innerhalb von $\pm 15\%$, ein substantieller Wert.

Versuchsergebnisse und Vergleiche mit LU-VE-Code bei unterkritischen Bedingungen

Die Leistungsniveaus bei unterkritischen Bedingungen sind sehr wichtig. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, muss die Anlage den meisten Teil des Jahres unter solchen Bedingungen betrieben werden, die dem besten Wirkungsgrad des gesamten CO₂-Zyklus entsprechen. Der Gaskühler ist die Komponente, bei der mehr Änderungen zwischen den transkritischen und unterkritischen Bedingungen auftreten, und er muss in beiden Fällen eine hohe Effizienz der Wärmeübertragung gewährleisten. Aus diesem Grund muss die Konstruktion einen optimalen Ausgleich zwischen den beiden Bedingungen sicherstellen.

Das Ziel der Versuchsreihe bestand deshalb in der Erfassung von Daten, damit dieser Vorgang auf bestmögliche Weise durchgeführt werden kann. Gleichzeitig sollte die Kalkulationssoftware im Sinne einer korrekten Prognose der Leistungsniveaus kalibriert werden. Die Versuche wurden in einem besonders großen Druckbereich durchgeführt, bis zu einer Verflüssigungstemperatur nahe 10 °C. Darüber hinaus wurde die Überhitzung des Gases am Einlass des Kondensators sowie die Unterkühlung des Fluids erheblich variiert.

Auf diese Weise war es möglich, die Software präzise für die drei unterschiedlichen Bereiche zu kalibrieren: anfängliche Enthitzung, Phasenübergang und Unterkühlung. Für den Enthitzungsbereich waren wegen der Wirkung des Öls, das zwischen das CO₂ und die Leitungselemente eindrang, die größten Anpassungen erforderlich.

Dieselben Geräte, die unter transkritischen Bedingungen getestet wurden, wurden anschließend in unterkritischen Bedingungen gemessen.

Das Diagramm in Abbildung 5 zeigt den Fehlerverlauf zwischen der theoretischen/berechneten Kapazität im Vergleich zur experimentellen Kapazität nach Anwendung des Korrekturkoeffizienten als Funktion des Einlassdrucks des Geräts. Aufgrund der Kalibrierung können alle Versuchsdaten innerhalb eines begrenzten Bereichs abgeglichen werden. Die Fehler sind unabhängig vom Druck. Das gilt insbesondere für den Bereich nahe dem kritischen Punkt.

Die Punkte für die drei getesteten Konfigurationen sind gleichmäßig um den Einheitswert verteilt, das heißt, dass eine ausschließliche Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten und des Druckabfalls

keine weitere Verbesserung bei der Verteilung der Fehler mit sich bringt.

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Druckabfallfehler auf der internen CO₂-Seite (berechnet/experimentell) als Funktion der gemessenen Werte in bar. Die Verteilung liegt innerhalb eines allgemein anerkannten Wertes. Die Fehler nehmen aufgrund der experimentellen Ungenauigkeit zu, wenn der Messwert abnimmt.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aufwendige Versuchsreihe in den LU-VE-Labors die Erkenntnisse über das Verhalten von CO₂ erweiterte und eine solide Grundlage für die Auslegung von Gaskühlern sowohl im transkritischen als auch unterkritischen Betrieb darstellt. Die Softwarekalibrierung erfolgte besonders sorgfältig, was zu wesentlich geringeren Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten führte.

Literatur

1. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2010, Heat Rejection from R744 near the critical point (Chieko Kondu und Pega Hrnjak, Universität Illinois bei Urbana-Champaign)
2. International Journal of Refrigeration, 2007, Effect of lubricant oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide, S. 724-731 (Dang, lino, Fukuoka, Hihara: Universität Tokio)
3. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2012, The effect of inner grooved tubes on the heat transfer performance of air-cooled heat exchangers for CO₂ heat pump system, Purdue
4. International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2010, Study on flow and heat transfer characteristics of supercritical carbon dioxide cooled with different types of lubricating oil, Purdue, Paper 1143, (Dang, Hoshika, Hihara, Kaneko: Universität Tokio)