

**Das transiente Heißdraht-Verfahren und seine
Anwendung zur Messung der Wärmeleitfähigkeit
bis nahe an den kritischen Punkt**

Von der Fakultät Energietechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs(Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Youwang Song
aus Wuhan/VR China

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Stephan
Tag der mündlichen Prüfung: 28. 7. 1992

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

Kurzfassung

Song, You Wang

"Das transiente Heißdraht-Verfahren und seine Anwendung zur Messung der Wärmeleitfähigkeit bis nahe an den kritischen Punkt".

Die Wärmeleitfähigkeit λ des Kältemittels R115 wurde in Abhängigkeit von Temperatur (16 - 95 °C), Druck (2 - 80 bar) und Dichte (13 - 1400 kg/m³) mit dem transienten Heißdraht-Verfahren gemessen. Dies ist ein Verfahren, das bei transientem Temperaturverlauf arbeitet. Eine Apparatur wurde speziell dafür angefertigt.

Bei Vorversuchen mit Toluol und R11 weit entfernt vom kritischen Zustand waren die Abweichungen zwischen den hier gemessenen Werten und den von Literatur vorgeschlagenen Werten weniger als 1,6 % für den flüssigen Zustand und 2 % für den gasförmigen. Die Temperaturabhängigkeit des dissipierten Wärmestroms und der unterschiedlichen Wärmekapazitäten des Drahtes und des Versuchsstoffs werden in der Auswertung berücksichtigt. Wenn die Werte von a oder c_p unbekannt sind, wird bei der Korrektur der Wärmekapazität ein besonderes Iterationsverfahren verwendet. Die Anwendbarkeit des Meßverfahrens im kritischen Gebiet wird theoretisch und experimentell untersucht.

Im flüssigen Zustand hat die Wärmeleitfähigkeit relativ große Werte. Sie wächst mit steigendem Druck und steigender Dichte; im gasförmigen Zustand ist λ klein und nimmt mit steigendem Druck, steigender Temperatur und Dichte zu. Aufgrund der gemessenen Werte wurden Gleichungen für die Wärmeleitfähigkeit von R115 aufgestellt: eine für den gesamten experimentell untersuchten Zustandsbereich, eine zweite für R115 im Sättigungszustand.

Bei Temperaturen nahe der kritischen zeigt die Wärmeleitfähigkeit von R115 in einem weiten Dichtebereich eine deutliche Vergrößerung. Der Maximalwert von λ wird bei der kritischen Dichte erreicht und läßt sich durch ein einfaches Potenzgesetz $\Delta\lambda_k(\rho_k, T) = \lambda(\Delta T^*)^{-\varphi}$ beschreiben. Die nach einem Ansatz mit einer skalierten Zustandsgleichung ermittelten Werte stimmen befriedigend mit der gemessenen Wärmeleitfähigkeit von R115 überein.

Abstract

Song, You Wang

"The transient hot-wire method and its application to measuring of thermal conductivity up to near the critical point".

The thermal conductivity λ of refrigerant R115 has been measured as a function of temperature (16 - 95 °C), pressure (2 - 80 bar) and density (13 - 1400 kg/m³) by using of the transient hot-wire method. This is a method which operates in the transient temperature regime. An apparatus was specially made for the purpose of measurement.

Experiment results with toluene and R11 in the range far from the critical state by the present apparatus have shown that the derivation between the measurements and the data from literature is less than 1.6% for liquids and 2% for gases. The dependence of the dissipated heat flux on the temperature and the different heat capacity between the wire and the measured material are corrected by the evaluation in order to ensure almost exactly like a line source in instrument performances. If values of thermal diffusivity or heat capacity are not known, an especial iterative method will be used to correct the heat capacity of the wire. The availability of the method in the critical range was studied theoretically and experimentally.

In liquid state the thermal conductivity has a relative large value. It increases with the pressure and density. However in gaseous state the thermal conductivity is small and increases with the pressure, density and temperature. Based on the measurement data some correlations are presented for refrigerant R115. One of them is for the all experiment range, the others are for R115 in saturation state in both liquid and vapour. Near to the critical temperature the thermal conductivity of R115 shows a distinct increase in a wide density range. The maximum of λ has arrived at the critical density and it could be written by a simple power law, $\Delta\lambda_k(\rho_k, T) = K(\Delta T^*)^{-\varphi}$. The experiment thermal conductivity data were compared with the calculated data from the scales state equations presented by Sengers and his cooperators and their agreement can be accepted.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	1
inhaltsverzeichnis	2
Formelzeichen	5
<u>1 Einleitung</u>	8
<u>2 Beschreibung des transienten Heißdraht-Verfahrens</u>	11
2.1 Meßprinzip und theoretische Grundlagen	11
2.2 Literaturübersicht	14
2.2.1 Entwicklung des Verfahrens	14
2.2.2 Probleme bei der Anwendung	16
<u>3 Versuche</u>	17
3.1 Versuchsanlage	17
3.1.1 Meßdraht	18
.1 Wahl des Drahtdurchmessers	18
.2 Wahl der Drahtlänge und der Drahtanordnung	21
.3 Kalibrierung des Drahtes	22
3.1.2 Meßzelle	23
3.1.3 Betriebs- und Hilfseinrichtungen	25
3.2 Meßgrößen	25
3.2.1 Druck	25
3.2.2 Temperatur	25
3.3 Versuchsstoff: Kältemittel R115	27
3.4 Versuchsdurchführung	28
3.4.1 Einstellen des thermodynamischen Zustands vor Beginn der Messung	28
3.4.2 Ausführung der Messung	30
3.5 Standardverfahren zur Versuchsauswertung	31
<u>4 Analyse der Meßgenauigkeit</u>	32
4.1 Systematische Fehler durch Vereinfachungen bei der mathematischen Herleitung	32
4.1.1 Abbruchfehler bei der Näherungslösung	32
4.1.2 Fehler durch ungleiche volumetrische Wärmekapazitäten von Draht und Versuchsstoff	33
4.1.3 Fehler durch unterschiedliche Durchmesser der Heißdrähte	34

4.1.5 Fehler aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Heizstromes	38
4.1.6 Fehler bei endlicher elektrischer Leitfähigkeit des Versuchsstoffs	40
4.1.7 Fehler bei stark temperaturabhängigen Stoffeigenschaften nahe dem kritischen Zustand	41
4.1.8 Fehler durch Einsetzen von freier Konvektion im Versuchsstoff	44
4.1.9 Dichteschichtung nahe am kritischen Punkt	45
4.2 Zufällige Fehler	48
4.2.1 Fehler bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit	48
4.2.2 Fehler bei der Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit	50
4.3 Zusammenfassung der Fehlerbetrachtung	51
<u>5 Versuchsergebnisse</u>	52
5.1 Vorversuche	52
5.1.1 Vorversuche mit Toluol	52
5.1.3 Vorversuche mit dem Kältemittel R11 (CCl_3F)	56
5.2 Versuche mit dem Kältemittel R115 (C_2ClF_5)	58
5.2.1 Zeitlicher Temperaturanstieg des Heizdrahtes	58
5.2.2 Wärmeleitfähigkeit von R115	63
.1 Darstellung der Ergebnisse	64
.2 Korrelation der Ergebnisse für große und kleine Dichte	69
.3 Vergleich der Ergebnisse mit solchen aus der Literatur	75
<u>6. Kritische Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit</u>	78
6.1 Theoretische Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im kritischen Gebiet	78
6.2 Anwendung der Theorie auf R115	83
6.2.1 Bestimmung der kritischen Exponenten ($\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k, \nu_k$)	84
6.2.2 Bestimmung der restlichen Parameter	85
6.2.3 Zusammenstellung der Beziehungen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit	86

<u>7 Zusammenfassung</u>	91
<u>8 Schrifttum</u>	92
<u>9 Anhang</u>	100
A1 Zustandsgleichungen von R115	100
A1.1 Zustandsgleichung für Dampf	100
A1.2 Zustandsgleichung für Flüssigkeit	101
A2 Analytische und numerische Lösung der grundlegenden Differentialgleichung für temperaturabhängige Stoffeigenschaften	102
A2.1 Analytische Lösung für temperaturabhängige Stoffeigenschaften	102
A2.2 Numerische Berechnung für temperaturabhängige Stoffeigenschaften	106
A3 Meßergebnisse	112
A4 Kurze Einführung in die kritischen Potenzgleichungen und Skalengesetze	117
A4.1 Skalengesetze	117
A4.2 Skalierte Zustandsgleichung	118
A4.3 Parameter für R115	121
A5 Programm	122