

Dr.-Ing. Peter Nowak,  
Dr.-Ing. Reiner Kleinrahm,  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wagner, Bochum

# **Präzisionsmessungen der thermischen Zustands- größen von Ethylen, Stickstoff und Kohlendioxid**

Reihe **3**: Verfahrenstechnik

Nr. **456**

## Inhaltsverzeichnis

| Formelzeichen  | -VIII-    |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Beschreibung der Dichtemeßanlage</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1 Dichtemessung  | 3         |
| 2.1.1 Das Zwei-Senkkörper Prinzip  | 3         |
| 2.1.2 Unsicherheit der Dichtemessung   | 5         |
| 2.2 Druckmessung   | 7         |
| 2.2.1 Zusammensetzung der Druckmeßkette  | 7         |
| 2.2.2 Unsicherheit der Druckmessung  | 7         |
| 2.3 Temperaturmessung  | 9         |
| 2.3.1 Messung von Temperaturen unterhalb von 83 K  | 9         |
| 2.3.2 Verbesserung der Temperaturregelung  | 10        |
| 2.3.3 Unsicherheit der Temperaturmessung   | 11        |
| 2.4 Kurzbeschreibung der Versuchsdurchführung  | 12        |
| 2.4.1 Messung von $p\rho T$ -Daten im homogenen Zustandsgebiet   | 12        |
| 2.4.2 Messung von Flüssigkeitsdichten  | 13        |
| 2.4.3 Messung von Dampfdrücken und Siededichten  | 14        |
| 2.4.4 Messung von Taudichten   | 15        |
| 2.5 Übersicht über die Gesamtanlage  | 16        |
| <b>3 Messungen der thermischen Zustandsgrößen von Ethylen</b>  | <b>19</b> |
| 3.1 Ergebnisse der Messungen im homogenen Zustandsgebiet   | 22        |
| 3.1.1 Unsicherheit der Messungen im homogenen Zustandsgebiet   | 23        |
| 3.1.2 Bestimmung der Virialkoeffizienten   | 26        |
| 3.1.3 Vergleich der neuen $p\rho T$ -Meßwerte im homogenen Zustandsgebiet mit ausgewählten Literaturwerten | 33        |
| 3.2 Ergebnisse der Messungen auf der Phasengrenzkurve flüssig-gasförmig                                    | 41        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2.1    | Meßergebnisse für den Temperaturbereich von 104 K bis 280 K  | 41        |
| 3.2.2    | Bestimmung der Taudichten unterhalb von 160 K  | 43        |
| 3.2.3    | Ergebnisse der Messungen im kritischen Gebiet oberhalb von 280 K   | 45        |
| 3.2.4    | Ermittlung der kritischen Parameter $T_c$ , $\rho_c$ und $p_c$   | 49        |
| 3.2.5    | Die neuen Korrelationsgleichungen für die thermischen Zustandsgrößen auf der Phasengrenzkurve von Ethylen    | 54        |
| 3.2.6    | Vergleich der Ergebnisse auf der Phasengrenzkurve mit ausgewählten Literaturwerten                           | 56        |
| 3.3      | Messung der Tripelpunktstemperatur   | 60        |
| 3.4      | Spezielle Probleme bei der Messung der thermischen Zustandsgrößen von Ethylen                                | 61        |
| <b>4</b> | <b>Messungen der thermischen Zustandsgrößen von Stickstoff</b>   | <b>64</b> |
| 4.1      | Ergebnisse der Messungen im homogenen Zustandsgebiet   | 67        |
| 4.1.1    | Unsicherheit der Messungen im homogenen Zustandsgebiet   | 67        |
| 4.1.2    | Bestimmung der Virialkoeffizienten   | 70        |
| 4.1.3    | Vergleich der neuen $p\rho T$ -Meßwerte im homogenen Zustandsgebiet mit ausgewählten Literaturwerten         | 77        |
| 4.2      | Ergebnisse der Messungen auf der Phasengrenzkurve flüssig-gasförmig  | 86        |
| 4.2.1    | Meßergebnisse für den Temperaturbereich von 64 K bis 125 K   | 86        |
| 4.2.2    | Bestimmung der Taudichten unterhalb von 86 K   | 87        |
| 4.2.3    | Ergebnisse der Messungen im kritischen Gebiet oberhalb von 125 K   | 88        |
| 4.2.4    | Ermittlung der kritischen Parameter $T_c$ , $\rho_c$ und $p_c$   | 90        |
| 4.2.5    | Die neuen Korrelationsgleichungen für die thermischen Zustandsgrößen auf der Phasengrenzkurve von Stickstoff | 94        |
| 4.2.6    | Vergleich der Ergebnisse auf der Phasengrenzkurve mit ausgewählten Literaturwerten                           | 94        |
| 4.3      | Messung der Tripelpunktstemperatur   | 99        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>5</b>   | <b>Messungen der thermischen Zustandsgrößen von Kohlendioxid</b>                                     | <b>101</b> |
| <b>6</b>   | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>104</b> |
|            | <b>Anhang</b>  | <b>106</b> |
| Tabelle A1 | $p\rho T$ -Referenzmeßwerte von hochreinem Ethylen (Meßgasprobe 1) im homogenen Zustandsgebiet       | 106        |
| Tabelle A2 | $p\rho T$ -Reproduzierbarkeitsmeßwerte von Ethylen (Meßgasprobe 2) außerhalb des kritischen Gebietes | 112        |
| Tabelle A3 | $p\rho T$ -Reproduzierbarkeitsmeßwerte von Ethylen (Meßgasprobe 2) im kritischen Gebiet              | 114        |
| Tabelle A4 | Meßergebnisse auf der Phasengrenzkurve von Ethylen im unterkritischen Gebiet bis 280 K               | 115        |
| Tabelle A5 | Meßergebnisse auf der Phasengrenzkurve von Ethylen im kritischen Gebiet oberhalb von 280 K           | 117        |
| Tabelle A6 | $p\rho T$ -Referenzmeßwerte von Stickstoff im homogenen Zustandsgebiet                               | 121        |
| Tabelle A7 | Meßergebnisse auf der Phasengrenzkurve von Stickstoff im unterkritischen Gebiet bis 125 K            | 130        |
| Tabelle A8 | Meßergebnisse auf der Phasengrenzkurve von Stickstoff im kritischen Gebiet oberhalb von 125 K        | 132        |
|            | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>136</b> |