1-2 12
Januar / Februar 2012
D 7438
ISSN 1865-5432
www.ki-portal.de
unverbindliche
Preisempfehlung
22,50 €

KI Kälte · Luft · Klimatechnik

DIE BRÜCKE ZWISCHEN WISSENSCHAFT UND PRAXIS

WISSENSCHAFT
Schalldämpferkonstruktionen zur Schallbeeinflussung
Seite 29

FORUM
Füllmengen in Kälteanlagen
Seite 34

PRAXIS
Ventilatoren: Auf Herz und Nieren geprüft
Seite 40

TITELTHEMA

IT-FREUNDLICHES KLIMA GESICHERT

Mietkälte holt Daten aus der Gefahrenzone
Seite 14

Hüthig
erfolgsmedien für experten

Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft

Schlüsselwörter: Feuchte Luft · Stoffdaten · Thermodynamische Zustandsgrößen · Virialgleichung · Reales Gasgemisch

Vorgestellt wird ein verbessertes Modell zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft als reales Gasgemisch mit einer Virialgleichung. Alle aktuellen IAPWS-Standards und Referenzgleichungen für trockene Luft, Wasserdampf, Wasser und Eis wurden in die Arbeit einbezogen. Der Zustandsbereich des neuen Modells beträgt 0,1 mbar bis 100 bar, –143,15 bis 350 °C und 0 bis 10 kg_w/kg_a Wassergehalt. Die Genauigkeit der bisherigen Virialmodelle konnte bei hohen Drücken, Temperaturen und Feuchten deutlich verbessert werden. Mit dem entwickelten Modell wurden im „2009 ASHRAE Handbook Fundamentals" die Tabellen für feuchte Luft neu berechnet.

Thermodynamic Properties of Real Moist Air

Keywords: moist air · thermodynamic properties · virial equation of state · real mixture

This research updates the modeling of moist air as a real gas mixture using a virial equation of state. All new reference equations and the latest standards of the IAPWS have been incorporated. The range of validity of the new model is from 0.1 mbar up to 100 bar, from –143.15 up to 350 °C, and from 0 up to 10 kg_w/kg_a in humidity ratio. The accuracy of the proposed model in comparison with the former virial models was improved at higher pressures, temperatures, and humidity ratios. This model was used to produce moist air property tables for the psychrometric chapter in the "2009 ASHRAE Handbook Fundamentals".

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Herrmann (links), **Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar** (Mitte), Hochschule Zittau/Görlitz, Fakultät Maschinenwesen, Fachgebiet Technische Thermodynamik

P.E. Donald P. Gatley (rechts)
Gatley & Associates, Inc., 30305, Atlanta, GA, USA

1 Einleitung

Ein Arbeitsgebiet der „American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE) sind die Eigenschaften und das Verhalten von feuchter Luft. Die im „2005 ASHRAE Handbook Fundamentals" [1] abgedruckten Tabellen mit den Eigenschaften der feuchten Luft waren seit nunmehr 25 Jahren unverändert und basierten auf den Ergebnissen der Forschungsprojekte von Hyland-Wexler [2], [3] und Stewart und Mitarbeitern [4] von 1983.

Die in den letzten Jahren erreichten Forschungsergebnisse verschiedener Gruppen mündeten in ein neues Modell zur Berechnung der psychrometrischen Eigenschaften der feuchten Luft, das in dieser Arbeit beschrieben wird. Mit diesem Modell wurden die Tabellen mit Eigenschaften von feuchter Luft im „2009 ASHRAE Handbook Fundamentals" [5] neu berechnet. Diese Neuberechnung stellt die erste Aktualisierung der Tabellen seit 1985 dar. Die Änderungen sind für die Berechnungen der Klimatechnik von geringer Bedeutung, sollten aber bei höheren Drücken und Temperaturen, z. B. in der Verdichtungsstufe von Gasturbinen oder in CAES (Compressed Air Energy Storage)-Anwendungen, berücksichtigt werden. Das in dieser Arbeit beschriebene ASHRAE-Forschungsprojekt RP-1485 war das vierte große Projekt der ASHRAE im Bereich Eigenschaften von feuchter Luft.

2 Eigenschaften von trockener Luft, Wasserdampf, Wasser und Eis

Dieser Abschnitt enthält die grundlegenden Gleichungen für die Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen der Komponenten des Gemisches Feuchte Luft. Eine detaillierte Beschreibung aller Algorithmen und deren numerische Informationen sind im ASHRAE-Report RP-1485 [6] von Herrmann et al. enthalten.

2.1 Thermodynamische Eigenschaften von trockener Luft

Die thermodynamischen Eigenschaften der in der feuchten Luft enthaltenen trockenen Luft werden mit der NIST-Referenzgleichung von Lemmon et al. [7] berechnet, wobei die Luft als ein reiner Stoff mit fester Zusammensetzung angenommen wird. Es handelt sich um eine Fundamentalgleichung für die molare freie Energie $\bar{a}$, auch als Helmholtz-Energie bezeichnet, als eine Funktion von Dichte ρ und Temperatur T. Die dimensionslose Form der Fundamentalgleichung lautet:

$$\frac{\bar{a}(\rho,T)}{\bar{R}\,T} = \alpha^{o}(\delta,\tau) + \alpha^{r}(\delta,\tau), \qquad (1)$$

worin α^{o} den Idealgasanteil und α^{r} den Residualanteil darstellen. Die Größe δ ist die reduzierte Dichte und τ ist die reduzierte inverse Temperatur. Die Größe $\bar{R}$ ist die universelle (molare) Gaskonstante. Alle thermodynamischen Eigenschaften der trockenen Luft können aus Gl. (1) und deren erste und zweite Ableitungen nach δ und τ berechnet werden.

2.2 Thermodynamische Eigenschaften von Wasserdampf, Wasser und Eis

Überblick: Das Druck-Temperatur-Diagramm in Abb. 1 zeigt die verschiedenen Zustandsbereiche mit den jeweils verwendeten Formulationen für Wasserdampf, Wasser und Eis zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften der feuchten Luft.

Für Temperaturen $T \geq 273{,}15$ K wurde die Industrieformulation IAPWS-IF97 [8], [9] zur Berechnung der Zustandsgrößen für überhitzten Dampf einschließlich gesättigtem Dampf (Region 2) und für flüssiges Wasser einschließlich siedender Flüssigkeit (Region 1) verwendet. Der Sättigungsdampfdruck $p_s^{97}(T)$ wird mit der Dampfdruckgleichung der IAPWS-IF97 berechnet. Als praktische Näherung wurde dazu die Tripelpunktstemperatur von Wasser, $T_t = 273{,}16$ K $= 0{,}01$ °C, auf 273,15 K = 0 °C gerundet. Daraus ergibt sich auch ein veränderter zugehöriger Tripeldruck, der statt $p_t = 0{,}6117$ kPa nun $p = p_s^{97}(273{,}15\ \text{K}) = 0{,}6112$ kPa beträgt.

Für die Berechnung der Zustandsgrößen von überhitztem Dampf und gesättigtem Dampf bei Temperaturen $T < 273{,}15$ K wird die wissenschaftliche Formulation IAPWS-95 [10] verwendet.

Die Zustandsgrößen von Eis einschließlich des Sättigungszustandes werden mit der