

Berechnung der thermophysikalischen Eigenschaften von trockener und feuchter Luft unter Druck

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar, Zittau

Dr.-Ing. Ines Stöcker, Zittau

Dipl.-Ing. (FH) Tom Hellriegel, Baden (Schweiz)

Dipl.-Ing. (FH) Lars Kleemann, Freising

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Seibt, Rostock

Kurzfassung

Vorgestellt werden Programmbibliotheken zur Ermittlung der thermodynamischen Zustandsgrößen einschl. Umkehrfunktionen und Transporteigenschaften von trockener und feuchter Luft. Sie sind für die Berechnung von Bauteilen und Anlagen mit Luft, wie beispielsweise Kompressoren, Turbinen, Lüfter, Behälter, Wärmeübertrager, Klimaanlage etc., vorgesehen. Zur komfortablen Nutzung in Microsoft Excel steht ein Add-In zur Verfügung.

Bei geringen Drücken erfolgt die Berechnung der Luft als ideales Gasgemisch nach der neuen VDI-Richtlinie 4670. Für höhere Drücke wird die Berechnung als ideale Mischung realer Fluide vorgenommen. In diesem Zusammenhang erfolgt ein Vergleich der genauen Berechnung von Luft über Fundamentalgleichungen mit der Berechnung nach VDI-4670. Es werden Grenzen aufgezeigt, ab welchen Parametern die Luft nicht mehr als ideales Gas berechnet werden kann.

1 Trockene Luft

Die Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen von Luft ist in der VDI-Richtlinie 4670 /1/, /2/ (VDI-4670) festgelegt. Dieser im Jahr 2000 erschienene Standard löst die zuvor benutzten Berechnungsgleichungen von *Baehr* und *Diederichsen* /3/ sowie die FDBR-Polynome /4/ ab. Die Anwendung der VDI-4670 ist jedoch daran gebunden, dass die Luft bei den vorliegenden Parametern Druck und Temperatur als ideales Gas angesehen werden kann. Ob dies der Fall ist, kann dem p, T -Diagramm in Bild 1 entnommen werden. Es zeigt die Ungenauigkeit, die bei der Berechnung der Dichte nach VDI-4670 im jeweiligen Druck- und Temperaturbereich entsteht. Davon ausgehend ist in Abhängigkeit von der geforderten Genauigkeit der betreffenden Prozessberechnung die Entscheidung zu treffen, ob die Dichte der Luft als ideales Gas oder reales Fluid berechnet werden muss.

Analog ist in Bild 2 die Abweichung der mit der VDI-4670 berechneten isobaren Wärmekapazität c_p von den tatsächlichen Werten dargestellt. Sie ist auf die Genauigkeit der Enthalpie übertragbar und ist zugleich ein Maß für die maximale Ungenauigkeit von berechneten Enthalpiedifferenzen, die in Prozessberechnungen benötigt werden.

Im Falle, dass die Genauigkeit der VDI-4670 nicht ausreicht, muss die Luft als reales Fluid berechnet werden. Die gegenwärtig genaueste Fundamentalgleichung zur Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von Luft als reales Fluid wurde von *Lemmon et al.* /5/ entwickelt.

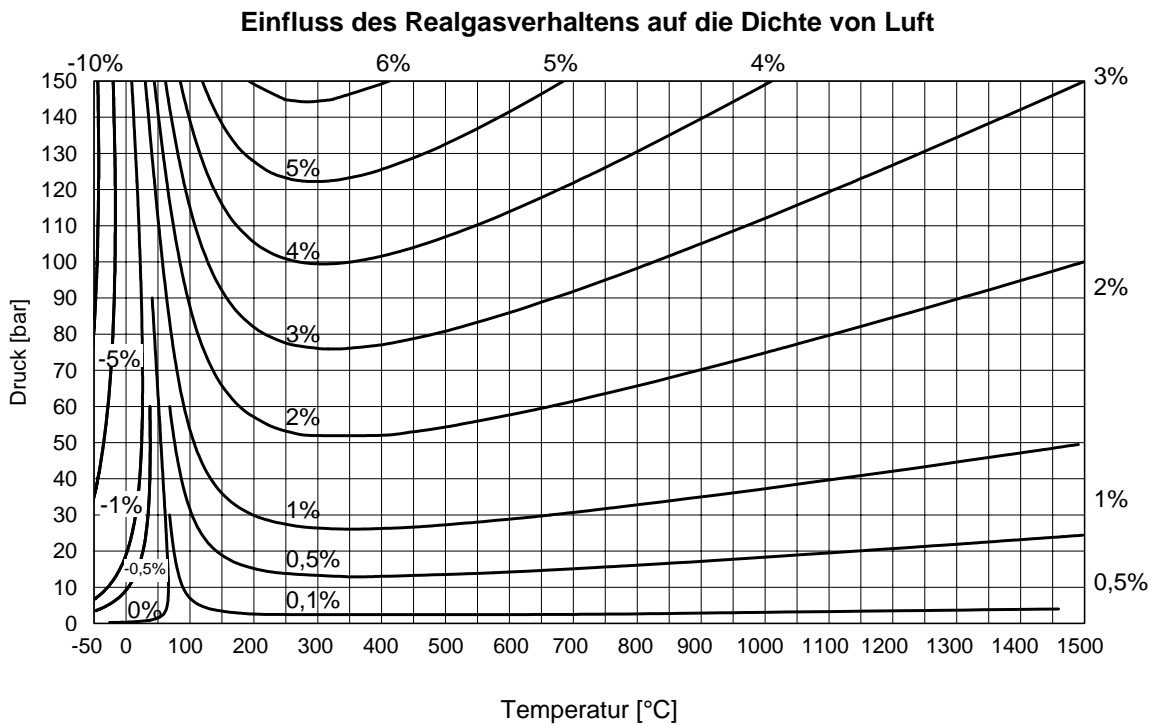


Bild 1: Relative Abweichung der nach VDI-4670 berechneten Dichte von Luft im Vergleich zur gegenwärtig genauesten Fundamentalgleichung von *Lemmon et al. /5/*

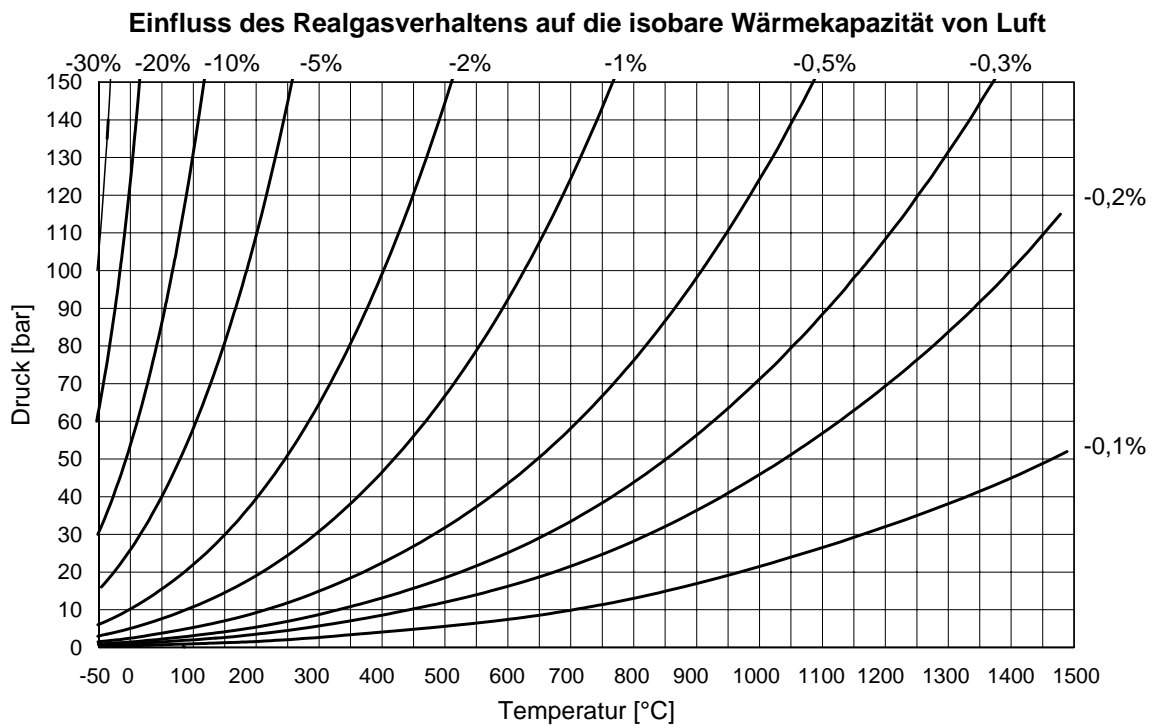


Bild 2: Relative Abweichung der nach VDI-4670 berechneten isobaren Wärmekapazität c_p von Luft im Vergleich zur gegenwärtig genauesten Fundamentalgleichung von *Lemmon et al. /5/*

Unbedingt berücksichtigt werden muss die Veränderung der thermodynamischen Zustandsgrößen bei hohen Temperaturen infolge Dissoziation der Luft. Die VDI-4670 beinhaltet hierfür eine vereinfachte Berechnung. Bild 3 zeigt die Abweichungen der ohne Dissoziation berechneten isobaren Wärmekapazität im Vergleich zu den tatsächlichen Werten mit Dissoziation. Es ist ersichtlich, dass der Einfluss der Dissoziation mit steigendem Druck leicht abnimmt.

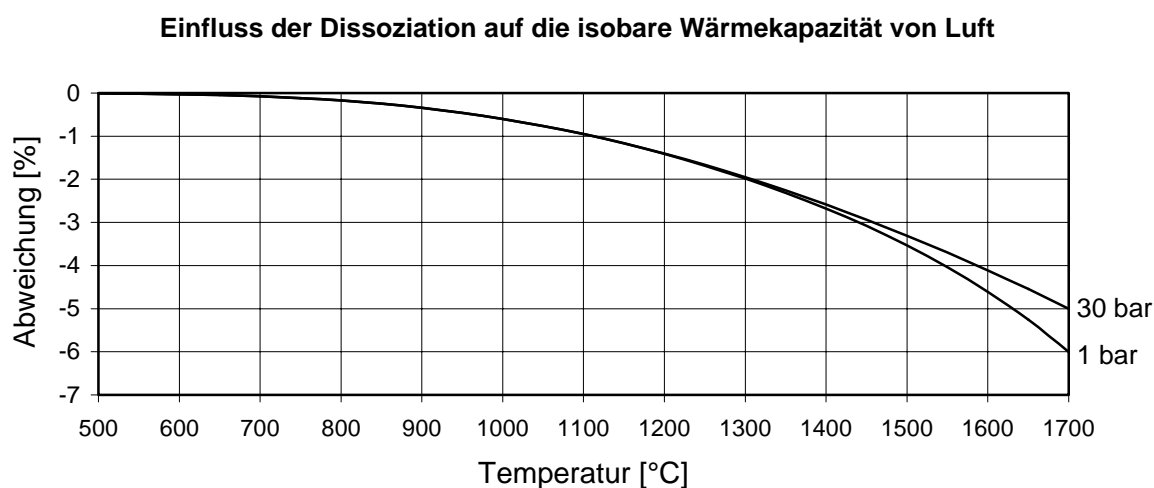


Bild 3: Relative Abweichung der ohne Berücksichtigung der Dissoziation berechneten isobaren Wärmekapazität c_p von Luft im Vergleich zu den Werten mit Dissoziation, berechnet nach VDI-4670

2 Feuchte Luft

Die Berechnung der feuchten Luft nach VDI-4670 erfolgt als ideales Gasgemisch. Dies ist jedoch daran gebunden, dass die enthaltene trockene Luft als ideales Gas angesehen werden kann (vgl. Bilder 1 und 2) und der Partialdruck des Wasserdampfes es erlaubt, ihn als ideales Gas zu berechnen.

Insbesondere bei höheren Drücken in Verbindung mit niedrigen Temperaturen ist dies nicht mehr der Fall. Hier kann die feuchte Luft mit hoher Genauigkeit als ideale Mischung der realen Fluide trockene Luft und Wasserdampf berechnet werden. Für die trockene Luft wird die Fundamentalgleichung von *Lemmon et al.* /5/ und für Wasserdampf der internationale Industrie-Standard IAPWS-IF97 /6/, /7/ verwendet.

Die Berechnung des Sättigungsdruckes des Wasserdampfes erfolgt mit der Dampfdruckgleichung der IAPWS-IF97 und der Sublimationsdruckgleichung IAPWS-92 /8/. Zusätzlich muss bei höheren Gesamtdrücken der Poynting-Effekt Berücksichtigung finden. Er beinhaltet die Erhöhung des Sättigungsdruckes von Wasserdampf in einer Gasatmosphäre, hier Luft, unter Druck. In Bild 4 ist die prozentuale Sättigungsdruckerhöhung als Funktion der Temperatur und des herrschenden Gesamtdrucks dargestellt.

In der Berechnung von übersättigter feuchter Luft (Nebel) werden die Wassertröpfchen nach IAPWS-IF97 und bei Temperaturen unter 0 °C die Eiskristalle mit dem NIST-Standard von *Hyland und Wexler* /9/ ermittelt.

Erhöhung des Sättigungsdrucks von Wasserdampf in Luftatmosphäre unter Druck

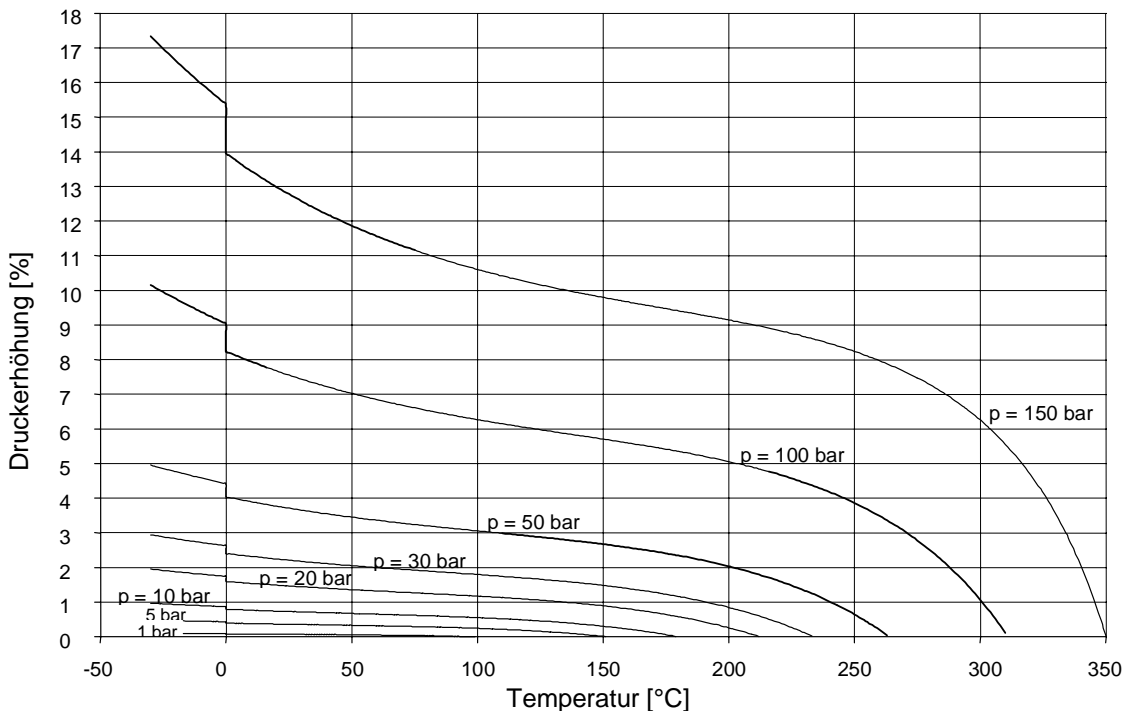


Bild 4: Relative Erhöhung des Sättigungsdrucks von Wasserdampf in Luftatmosphäre als Funktion der Temperatur bei vorliegenden Gesamtdrücken (Poynting-Effekt)

3 Stoffwert-Programmbibliotheken für Excel®

Zur Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen einschl. Umkehrfunktionen und Transporteigenschaften von trockener und feuchter Luft wurden zwei Programmbibliotheken entwickelt:

LibHuAir

- Stoffwertprogrammbibliothek für feuchte Luft, berechnet als ideale Mischung der realen Fluide trockene Luft nach Lemmon et al. /5/ und Wasserdampf nach IAPWS-IF97 /6/, /7/
- Gültigkeitsbereich: Temperaturbereich von - 70 °C bis 1700 °C, Druck bis 165 bar
- Berücksichtigung des Poynting-Effekts
- Berücksichtigung der Dissoziation bei hohen Temperaturen nach VDI-4670

LibHuAir-4670

- Stoffwertprogrammbibliothek für feuchte Luft, berechnet als ideales Gasgemisch nach VDI-4670 /1/
- Gültigkeitsbereich: Temperaturbereich von - 70 °C bis 1700 °C, Druckbereich, in dem Luft je nach geforderter Genauigkeit als ideales Gas berechenbar ist (vgl. Bilder 1, 2)
- Berücksichtigung der Dissoziation bei hohen Temperaturen .

Die folgenden thermodynamischen und Transporteigenschaften sind u. a. berechenbar:

- Dichte und spezifisches Volumen
- Enthalpie und innere Energie
- isobare und isochore Wärmekapazität

- Entropie
- Isentropenexponent und Schallgeschwindigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- dynamische und kinematische Zähigkeit .

Des Weiteren können die in Prozessmodellierungen benötigten Umkehrfunktionen mit den gegebenen Variablen (p,h), (p,s), (T,s) und (h,s) berechnet werden.

Zur komfortablen Nutzung beider Bibliotheken in Excel[®] steht das Add-In **FluidEXL** zur Verfügung. Die zugehörigen Dynamic Link Libraries können außerdem von Anwenderprogrammen unter Windows[®] aufgerufen werden. Zusätzlich ist die Darstellung von großformatigen h,x-Diagrammen für gewünschte Gesamtdrucke in Publikationsqualität möglich. Detaillierte Informationen sind dem Internet unter <http://thermodynamik.hs-zigr.de> entnehmbar.

Literaturverzeichnis

- /1/ VDI-Richtlinie 4670
Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen.
VDI-Handbuch Energietechnik, VDI-Gesellschaft Energietechnik, Düsseldorf (2000)
- /2/ Bückner, D.; Span, R.; Wagner, W.:
Thermodynamic Property Models of Moist Air Flue Gases.
J. Phys. Chem. Ref. Data 29 (2002) - eingereicht
- /3/ Baehr, H. D.; Diederichsen, Ch.:
Berechnungsgleichungen für Enthalpie und Entropie der Komponenten von Luft und Verbrennungsgasen.
BWK 40 (1988) Nr. 1/2, S. 30-33
- /4/ Brandt, F.:
Wärmeübertragung in Dampferzeugern und Wärmetauschern.
FDBR-Fachbuchreihe, Bd. 2, Vulkan Verlag Essen (1985)
- /5/ Lemmon, E. W.; Jacobsen, R. T.; Penoncello, S. G.; Friend, D. G.:
Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa.
J. Phys. Chem. Ref. Data 29 (2000) Nr. 2, S. 331-385
- /6/ Wagner, W.; Kruse, A.:
Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf.
Springer-Verlag, Berlin (1998)
- /7/ Wagner, W.; Cooper, J.R.; Dittmann, A.; Kijima, J.; Kretzschmar, H.-J.; Kruse, A.; Mares, R.; Oguchi, K.; Sato, H.; Stöcker, I.; Sifner, O.; Takaishi, Y.; Tanishita, I.; Trübenbach, J.; Willkommen, Th.:
The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam.
ASME Journal of Eng. for Gas Turbines and Power 122 (2000) Nr. 1, S. 150-182
- /8/ Wagner, W.; Saul, A.; Pruss, A.:
International Equations for the Pressure along the Melting and along the Sublimation Curve of Ordinary Water Substance.
J. Phys. Chem. Ref. Data 23 (1994) Nr. 3, S. 515-527
- /9/ Hyland, R. W.; Wexler, A.:
Formulations for the Thermodynamic Properties of Saturated Phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K.
Report No. 2793 (RP-216), National Bureau of Standards, Washington, D.C. (1983)