

Berechnung der thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft

Sebastian Herrmann

Hans-Joachim Kretzschmar

Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau

Donald P. Gatley, ASHRAE-Fellow

Gatley & Associates, Inc., Atlanta, GA

Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2011, 18. November 2011, Aachen

Gliederung

- ▶ **Einleitung**
 - ASHRAE-Forschungsprojekte zu feuchter Luft
 - Forschungsprojekte zu feuchter Luft am Fachgebiet Technische Thermodynamik der HS Zittau/Görlitz
 - Forschungsprojekt RP-1485
- ▶ **Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft**
 - Trockene Luft
 - Wasserdampf, Wasserflüssigkeit und Wassereis
- ▶ **Zustandsgrößen des Gemisches Feuchte Luft**
- ▶ **Nutzung der entwickelten Stoffwert-Algorithmen**
- ▶ **Zusammenfassung und Ausblick**

ASHRAE-Forschungsprojekte zu den thermodynamischen Eigenschaften von feuchter Luft

- Goff und Gratch (1943-1949):
 - Einführung des Enhancement(Erhöungs)-Faktors für Sättigungspartialdruck von Wasserdampf
 - Grundlage für ASHRAE-Diagramme und -Tabellen bis 1981
- Hyland und Wexler (1978-1983):
 - Umfassende Aktualisierung des ersten Modells
 - Neue, leicht korrigierte physikalische Konstanten
 - Eisgleichung wurde bis 2006 weltweit genutzt
 - Aktualisierung der ASHRAE-Handbuch-Tabellen für feuchte Luft (1985)
- Nelson und Sauer (1999-2001):
 - Erweiterung in der Temperatur bis zu 320 °C
 - Aktualisierungen nur oberhalb 0 °C; Wechsel zur ITS-90-Temperaturskala
 - Keine Neuberechnung der Tabellen für feuchte Luft im ASHRAE-Handbuch!

3

Forschungsprojekte an der Hochschule Zittau/Görlitz mit Bezug auf feuchte Luft, Wasserdampf und Wasser

- "Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage" (AA-CAES) Projekt der Europäischen Union (2003-2006)
 - PTB-Bericht PTB-CP-3 "Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen und Transporteigenschaften von feuchter Luft für energietechnische Prozessmodellierungen" (2009)
 - Artikel in der ASME-Zeitschrift "Journal of Engineering for Gas Turbines and Power" (2010)
- "Industrial Formulation IAPWS-IF97" und "Supplementary Releases on Backward Equations for IAPWS-IF97": Projekte der "International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)" (1991-1998 und 2000-2006)
- Vorsitz der IAPWS-Arbeitsgruppe "Thermophysikalische Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf (TPWS)" (2005-2011)



**Zwei Jahrzehnte Erfahrungen auf dem Gebiet
"Eigenschaften von feuchter Luft, Wasserdampf und Wasser"**

4

ASHRAE-Forschungsprojekt RP-1485

Ziele

- Aktualisierung der Tabellen mit Eigenschaften von feuchter Luft und gesättigtem Wasser im "2009 ASHRAE Handbook of Fundamentals"
- Vollständige Überarbeitung des Hyland-Wexler-Modells (ASHRAE 1983)
- Erweiterung des Gültigkeitsbereichs zu:

$$-143.15\text{ °C} \leq t \leq 350\text{ °C}$$

$$0.01\text{ kPa} \leq p \leq 10\text{ MPa}$$

$$0 \leq W \leq 10\text{ kg}_w/\text{kg}_a$$

Hyland-Wexler / Nelson-Sauer

$$-100\text{ °C} \leq t \leq 320\text{ °C}$$

$$70\text{ kPa} \leq p \leq 5\text{ MPa}$$

$$0 \leq W \leq 1\text{ kg}_w/\text{kg}_a$$

Bearbeitung

- TC 1.1 genehmigte ASHRAE-Forschungsprojekt 1485 (Oktober 2007)
- RP-1485 wurde von Dezember 2007 bis März 2009 (Abgabe Abschlussbericht) bearbeitet
- Veröffentlichung in der Zeitschrift HVAC&R Research erschien im September 2009

5

Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft

Trockene Luft

- Molare Masse von trockener Luft von Gatley et al. (2008)
- NIST-Referenzgleichung von Lemmon et al. (2000)
 - Fundamentalgleichung für die molare Helmholtz-Energie

$$\frac{\bar{a}(\rho, T)}{\bar{R}^{Lem} T} = \alpha(\delta, \tau) = \alpha^0(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau)$$

Idealgas-Anteil

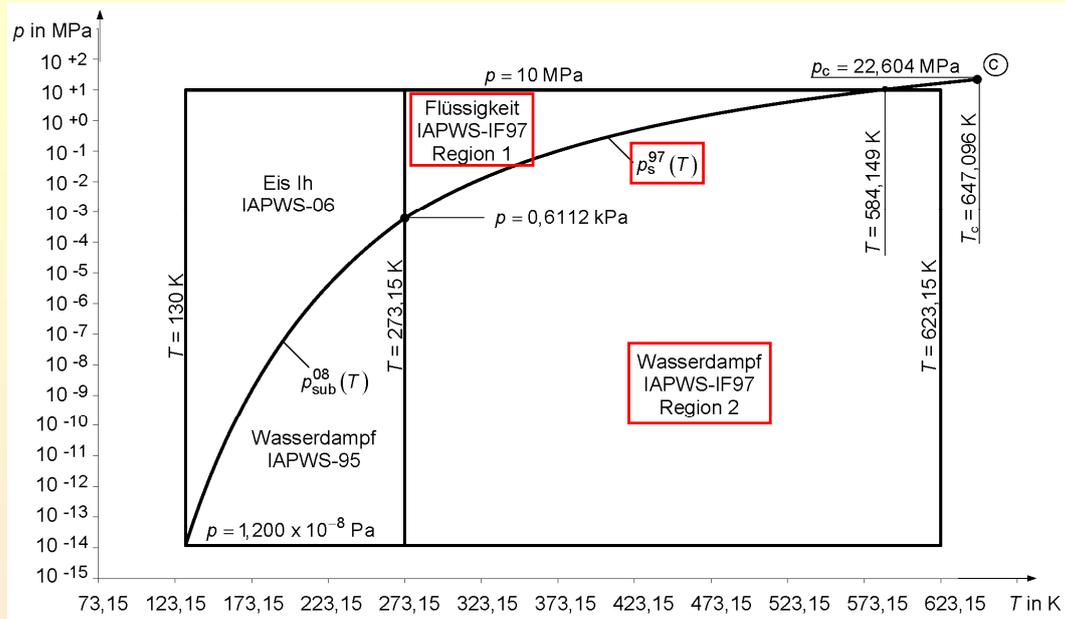
Residualanteil



Hohe Genauigkeit in der Berechnung des Anteils trockener Luft in der Mischung feuchte Luft

6

Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft Wasser, Wasserdampf und Wassereis

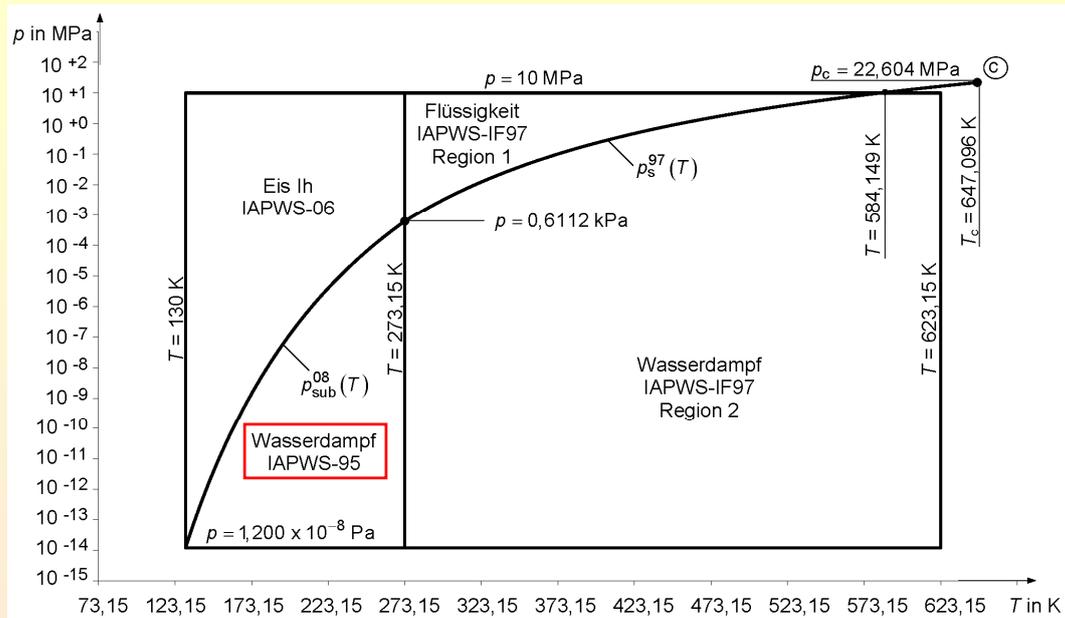


- **Verwendete IAPWS-Standards**

- "Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam" (IAPWS-IF97)

7

Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft Wasser, Wasserdampf und Wassereis

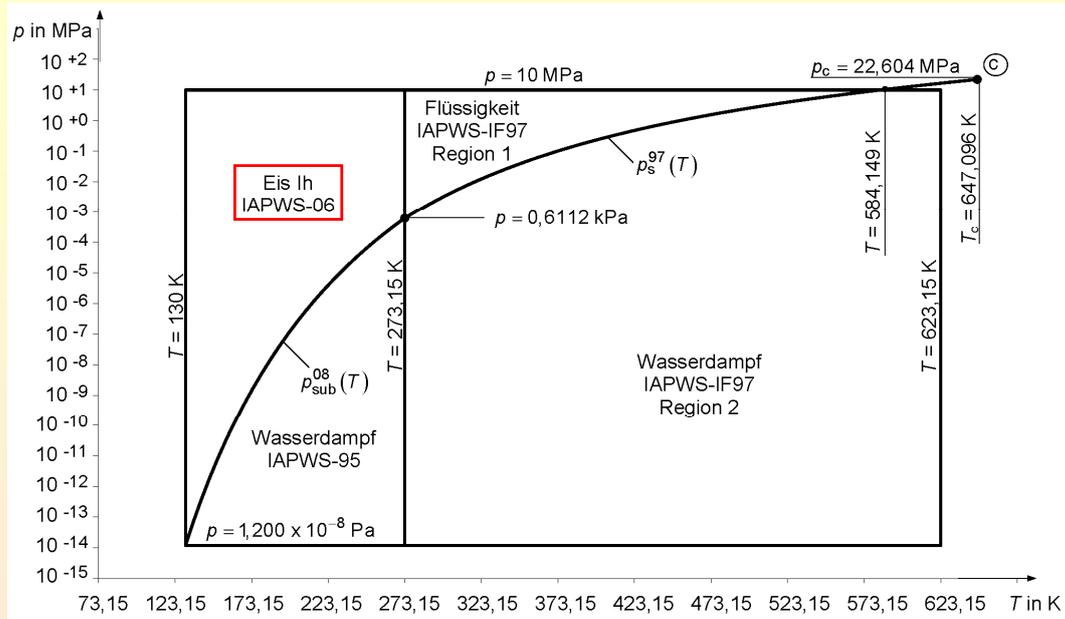


- **Verwendete IAPWS-Standards**

- "Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use" (IAPWS-95)

8

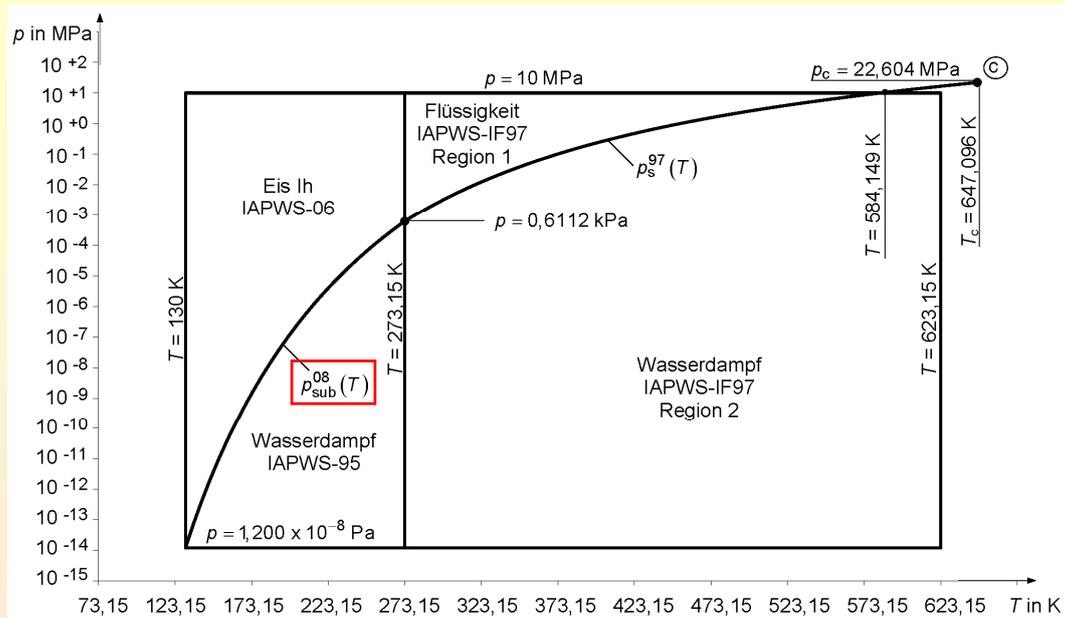
Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft Wasser, Wasserdampf und Wassereis



- Verwendete IAPWS-Standards
 - "Revised Release on an Equation of State 2006 for H₂O Ice Ih" (IAPWS-06)

9

Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft Wasser, Wasserdampf und Wassereis

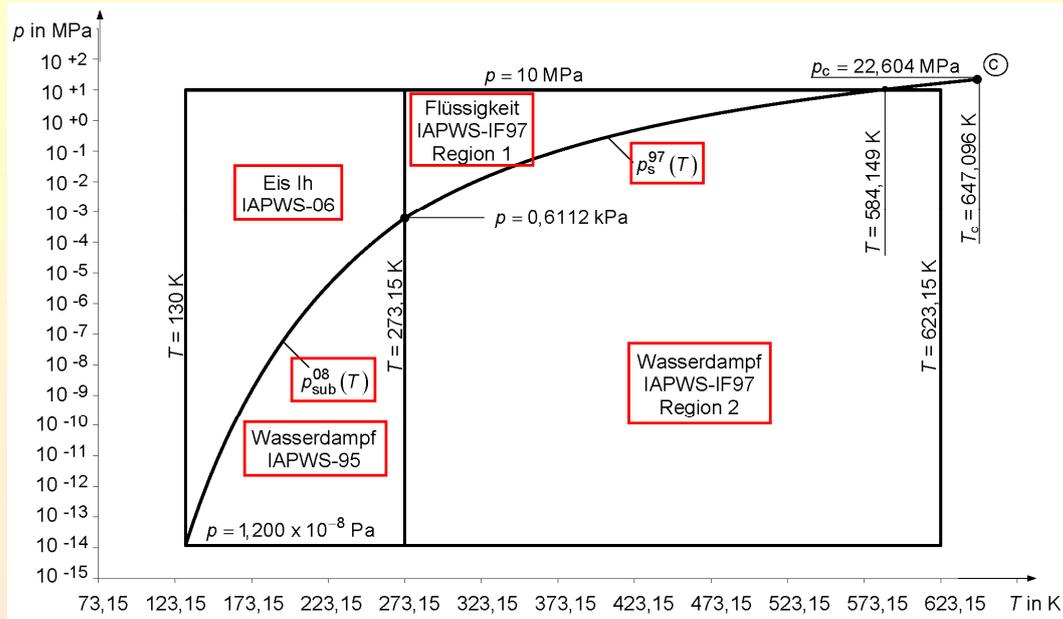


- Verwendete IAPWS-Standards
 - "Revised Release 2008 on the Pressure along the Melting and Sublimation Curves of Ordinary Water Substance" (IAPWS-08)

10

Zustandsgrößen der Komponenten von feuchter Luft

Wasser, Wasserdampf und Wassereis



Die Standards der IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam) haben ISO-Status.

Zustandsgrößen der feuchten Luft

- Virial-Zustandsgleichung für das Gemisch Feuchte Luft

$$\frac{p\bar{v}}{RT} = 1 + \frac{B_m}{\bar{v}} + \frac{C_m}{\bar{v}^2}$$

– Molare Mischungs-Virialkoeffizienten

$$B_m = (1 - \psi_w)^2 B_{aa} + 2(1 - \psi_w)\psi_w B_{aw} + \psi_w^2 B_{ww}$$

$$C_m = (1 - \psi_w)^3 C_{aaa} + 3(1 - \psi_w)^2 \psi_w C_{aaw} + 3(1 - \psi_w)\psi_w^2 C_{aww} + \psi_w^3 C_{www}$$

- Berechnung der zweiten und dritten molaren Virialkoeffizienten B_{aa} und C_{aaa} für trockene Luft aus der Fundamentalgleichung von Lemmon et al. (2000)
- Berechnung der zweiten und dritten molaren Virialkoeffizienten B_{ww} und C_{www} für Wasser und Wasserdampf nach IAPWS-95
- Berechnung des zweiten molaren Kreuzvirial-Koeffizienten B_{aw} für Luft-Wasser-Wechselwirkungen nach Harvey und Huang (2007)
- Berechnung der dritten molaren Kreuzvirial-Koeffizienten C_{aaw} und C_{aww} für Luft-Wasser-Wechselwirkungen nach Nelson und Sauer (2002)

Zustandsgrößen der feuchten Luft

- Virial-Zustandsgleichung für das Gemisch Feuchte Luft

$$\frac{p\bar{v}}{RT} = 1 + \frac{B_m}{\bar{v}} + \frac{C_m}{\bar{v}^2}$$

- Molare Mischungs-Virialkoeffizienten

$$B_m = (1 - \psi_w)^2 B_{aa} + 2(1 - \psi_w) \psi_w B_{aw} + \psi_w^2 B_{ww}$$

$$C_m = (1 - \psi_w)^3 C_{aaa} + 3(1 - \psi_w)^2 \psi_w C_{aaw} + 3(1 - \psi_w) \psi_w^2 C_{aww} + \psi_w^3 C_{www}$$

- Molare Enthalpie

$$\bar{h}(T, \bar{v}, \psi_w) = \bar{h}_0 + (1 - \psi_w) \bar{h}_a^0 + \psi_w \bar{h}_w^0 +$$

$$\bar{R} T \left[\left(B_m - T \frac{dB_m}{dT} \right) \frac{1}{\bar{v}} + \left(C_m - \frac{T}{2} \frac{dC_m}{dT} \right) \frac{1}{\bar{v}^2} \right]$$

- Molare Entropie

$$\bar{s}(p, T, \psi_w) = \bar{s}_0 + (1 - \psi_w) \bar{s}_a^0 + \psi_w \bar{s}_w^0 -$$

$$\bar{R} \left[\left(B_m + T \frac{dB_m}{dT} \right) \frac{1}{\bar{v}} + \left(C_m + T \frac{dC_m}{dT} \right) \frac{1}{2\bar{v}^2} + \right. \\ \left. (1 - \psi_w) \ln(1 - \psi_w) + \psi_w \ln(\psi_w) \right]$$

13

Psychrometrische Gleichungen

- Gleichung zur Berechnung des Enhancement-Faktors f

$$\ln(f) = (\bar{R}T)^{-1} \left[(1 + \kappa_T p_{w,s}) (p - p_{w,s}) - 0.5 \kappa_T (p^2 - p_{w,s}^2) \right] \bar{v}_{w,s} + \ln[1 - \beta_H (1 - \psi_{w,s}) p] + \\ (\bar{R}T)^{-1} \left\{ (1 - \psi_{w,s})^2 p B_{aa} - 2(1 - \psi_{w,s})^2 p B_{aw} - \left[p - p_{w,s} - (1 - \psi_{w,s})^2 \right] p B_{ww} \right\} + \\ (\bar{R}T)^{-2} \left\{ (1 - \psi_{w,s})^3 p^2 C_{aaa} + 3[0.5 - (1 - \psi_{w,s})] (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 C_{aaw} - \right. \\ \left. 3\psi_{w,s} (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 C_{aww} - 0.5 \left[(3 - 2\psi_{w,s}) \psi_{w,s}^2 p^2 - p_{w,s}^2 \right] C_{www} - \right. \\ \left. \psi_{w,s} (-2 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aa} B_{ww} - 2(-1 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^3 p^2 B_{aa} B_{aw} + \right. \\ \left. 6\psi_{w,s}^2 (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aw} B_{ww} - 1.5(1 - \psi_{w,s})^4 p^2 B_{aa}^2 - \right. \\ \left. 2\psi_{w,s} (-2 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aw}^2 - 0.5 \left[p_{w,s}^2 - (4 - 3\psi_{w,s}) \psi_{w,s}^3 p^2 \right] B_{ww}^2 \right\}$$

- Gleichung für den Sättigungspartialdruck von Wasser

$$p_s = f p_{w,s}$$

- Berechnung des Sättigungsdampfdrucks nach IAPWS-IF97 und des Sublimationsdrucks nach IAPWS-08

14

Psychrometrische Gleichungen

$$p_s = f p_{w,s}$$

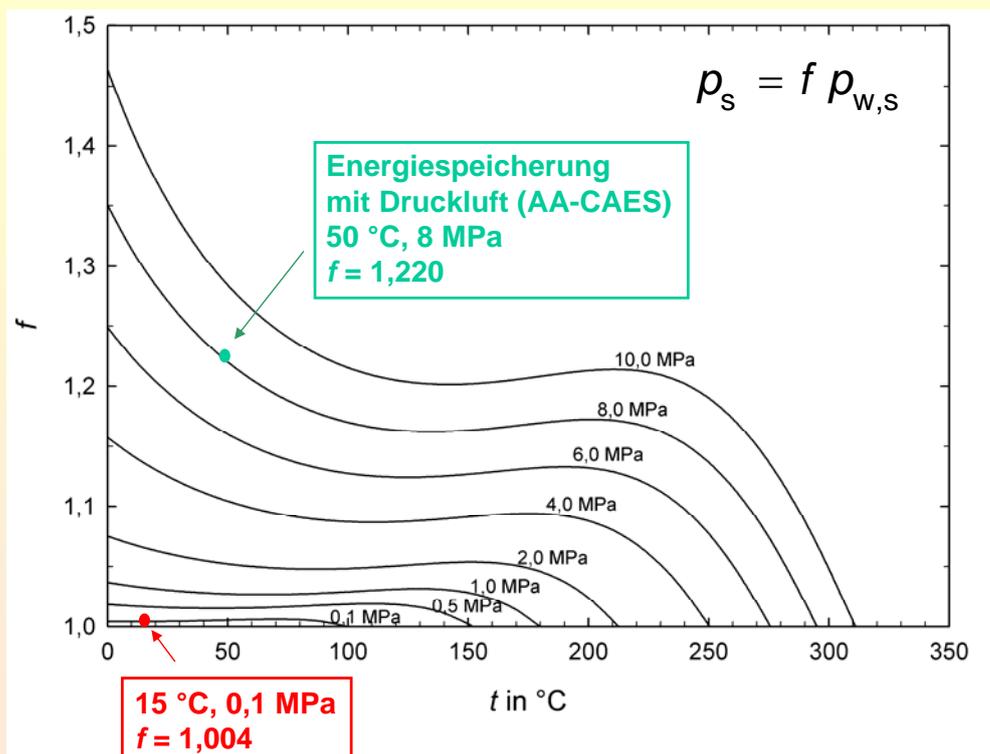
- Gleichung zur Berechnung des Enhancement-Faktors f

$$\begin{aligned} \ln(f) = & (\bar{R}T)^{-1} \left[(1 + \kappa_T p_{w,s}) (p - p_{w,s}) - 0.5 \kappa_T (p^2 - p_{w,s}^2) \right] \bar{v}_{w,s} + \ln [1 - \beta_H (1 - \psi_{w,s}) p] + \\ & (\bar{R}T)^{-1} \left\{ (1 - \psi_{w,s})^2 p B_{aa} - 2 (1 - \psi_{w,s})^2 p B_{aw} - \left[p - p_{w,s} - (1 - \psi_{w,s})^2 \right] p B_{ww} \right\} + \\ & (\bar{R}T)^{-2} \left\{ (1 - \psi_{w,s})^3 p^2 C_{aaa} + 3 [0.5 - (1 - \psi_{w,s})] (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 C_{aaw} - \right. \\ & 3 \psi_{w,s} (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 C_{aww} - 0.5 \left[(3 - 2\psi_{w,s}) \psi_{w,s}^2 p^2 - p_{w,s}^2 \right] C_{www} - \\ & \psi_{w,s} (-2 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aa} B_{ww} - 2 (-1 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^3 p^2 B_{aa} B_{aw} + \\ & 6 \psi_{w,s}^2 (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aw} B_{ww} - 1.5 (1 - \psi_{w,s})^4 p^2 B_{aa}^2 - \\ & \left. 2 \psi_{w,s} (-2 + 3\psi_{w,s}) (1 - \psi_{w,s})^2 p^2 B_{aw}^2 - 0.5 \left[p_{w,s}^2 - (4 - 3\psi_{w,s}) \psi_{w,s}^3 p^2 \right] B_{ww}^2 \right\} \end{aligned}$$

- Berechnung der isothermen Kompressibilität κ_T von flüssigem Wasser nach IAPWS-IF97 und der von Wassereis nach IAPWS-06 in der Berechnung des Erhöhungsfaktors
- Berechnung der Henry-Konstante β_H in der Berechnung des Erhöhungsfaktors nach der IAPWS-Richtlinie 2004

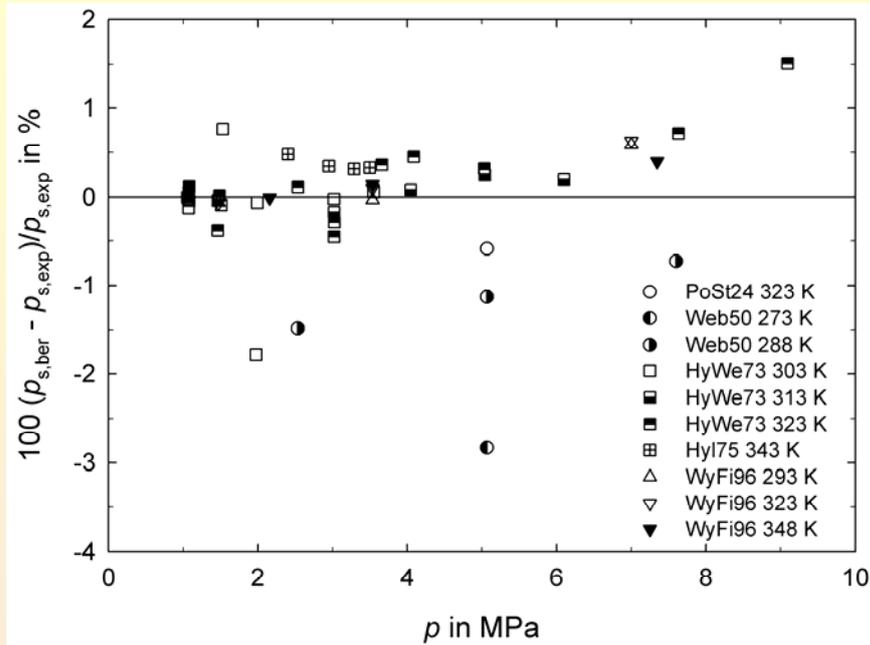
Psychrometrische Gleichungen

- Enhancement-Faktor, dargestellt über der Temperatur



Unsicherheit des entwickelten Modells

- Vergleich mit experimentellen Daten für den Sättigungsdampfdruck



PoSt24 – Pollitzer und Strebel (1924)

Web50 – Webster (1950)

HyWe73 – Hyland und Wexler (1973)

Hyl75 – Hyland (1975)

WyFi96 – Wylie und Fisher (1996)

17

Unsicherheit des entwickelten Modells

- Dichte

0,1 % (trockene Luft) $\leq \Delta\rho/\rho \leq 0,3$ % (feuchte Luft mit $W = 0,1 \text{ kg}_w/\text{kg}_a$)

- Isobare Wärmekapazität

1,0 % (trockene Luft) $\leq \Delta c_p/c_p \leq 3,0$ % (feuchte Luft mit $W = 0,1 \text{ kg}_w/\text{kg}_a$)

- Spezifische Enthalpie

2 kJ/kg (trockene Luft) $\leq \Delta h \leq 3$ kJ/kg (feuchte Luft mit $W = 0,1 \text{ kg}_w/\text{kg}_a$)

18

Dokumentation und Nutzung der Stoffwert-Algorithmen

Abschlussbericht ASHRAE RP-1485 Artikel in Zeitschrift *HVAC&R Research*

FINAL REPORT

ASHRAE RP-1485

Thermodynamic Properties of Real Moist Air,
Dry Air, Steam, Water, and Ice

By S. Herrmann^a, H.-J. Kretzschmar^a, and D.P. Gatley^b

^a Department of Technical Thermodynamics, Zittau/Goerlitz University of Applied Sciences,
02763 Zittau, Germany

^b Gatley & Associates, Inc., Atlanta GA 30305, USA

November 17, 2008 (Submitted to TC for review)

March 12, 2009 (Final with corrections)

December 11, 2009 (revised Table C.2)

VOLUME 15, NUMBER 5 HVAC&R RESEARCH SEPTEMBER 2009

Thermodynamic Properties of Real Moist Air, Dry Air, Steam, Water, and Ice (RP-1485)

Sebastian Herrmann
Student Member ASHRAE

Hans-Joachim Kretzschmar, PhD
Member ASHRAE

Donald P. Gatley, PE
Fellow/Life Member ASHRAE

Received February 14, 2009; accepted May 6, 2009

This paper is based on findings resulting from ASHRAE Research Project RP-1485.

This research updates the modeling of moist air as a real gas mixture using the virial equation of state. It includes the Hyland and Wexler model (1983a, 1983b) and considers the Nelson-Sauer model (2002). All new National Institute of Standards and Technology reference equations and the latest International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS) standards, as well as the current values for the molar masses and gas constants, have

Neue Tabellen für feuchte Luft im "2009 ASHRAE Handbook of Fundamentals"

Psychrometrics 1.3

Table 2 Thermodynamic Properties of Moist Air at Standard Atmospheric Pressure, 101.325 kPa

Temp., °C <i>t</i>	Humidity Ratio <i>W_s</i> , kg _w /kg _{da}	Specific Volume, m ³ /kg _{da}			Specific Enthalpy, kJ/kg _{da}			Specific Entropy, kJ/(kg _{da} ·K)		Temp., °C <i>t</i>
		<i>v_{da}</i>	<i>v_{as}</i>	<i>v_s</i>	<i>h_{da}</i>	<i>h_{as}</i>	<i>h_s</i>	<i>s_{da}</i>	<i>s_s</i>	
-60	0.0000067	0.6027	0.0000	0.6027	-60.341	0.016	-60.325	-0.2494	-0.2494	-60
-59	0.0000076	0.6055	0.0000	0.6055	-59.335	0.018	-59.317	-0.2447	-0.2446	-59
-58	0.0000087	0.6084	0.0000	0.6084	-58.329	0.021	-58.308	-0.2400	-0.2399	-58
-57	0.0000100	0.6112	0.0000	0.6112	-57.323	0.024	-57.299	-0.2354	-0.2353	-57
-56	0.0000114	0.6141	0.0000	0.6141	-56.317	0.027	-56.289	-0.2307	-0.2306	-56
-55	0.0000129	0.6169	0.0000	0.6169	-55.311	0.031	-55.280	-0.2261	-0.2260	-55
-54	0.0000147	0.6198	0.0000	0.6198	-54.305	0.035	-54.269	-0.2215	-0.2213	-54
-53	0.0000167	0.6226	0.0000	0.6226	-53.299	0.040	-53.258	-0.2169	-0.2167	-53
-52	0.0000190	0.6255	0.0000	0.6255	-52.293	0.046	-52.247	-0.2124	-0.2121	-52
-51	0.0000215	0.6283	0.0000	0.6283	-51.287	0.052	-51.235	-0.2078	-0.2076	-51

19

Nutzung der Stoffwert-Algorithmen

Stoffwert-Programmbibliothek ASHRAE-LibHuAirProp

- Entwicklung der Stoffwert-Programmbibliothek LibHuAirProp für feuchte Luft auf Grundlage der Ergebnisse des ASHRAE-Forschungsprojektes RP-1485
- Berechenbar sind: Eigenschaften der ungesättigten, gesättigten und übersättigten (Nebel und Eisnebel) feuchten Luft
- Transporteigenschaften Wärmeleitfähigkeit und Zähigkeit berechenbar
- Add-Ons für Excel®, MATLAB®, Mathcad® und EES®
- LibHuAirProp berechnet exakt die Werte in den Tabellen 2 und 3 des "2009 ASHRAE Handbook of Fundamentals"

Nutzer der Programmbibliothek:
Ingenieure der Wärme-, Kälte- und Klimatechnik in der täglichen Arbeit

Nähere Informationen unter:
www.ashrae.org/publications/page/libhuairprop

- Für Berechnungen oberhalb 350 °C bietet die Hochschule Zittau/Görlitz die Stoffwert-Programmbibliothek LibHuAir an, die das Modell "Ideale Mischung der realen Fluide Trockene Luft und Wasser, Wasserdampf und Eis" verwendet.

Nähere Informationen unter:
www.thermodynamik-zittau.de

20

Zusammenfassung

- ASHRAE-Forschungsprojekt RP-1485 erfolgreich abgeschlossen
- Tabellen 2 und 3 des "2009 *ASHRAE Handbook of Fundamentals*" aktualisiert (erste Aktualisierung seit 1985)
- Detaillierte Dokumentation aller benutzten Algorithmen im Abschlussbericht des Projektes RP-1485 (2009)
- Veröffentlichung in der ASHRAE-Zeitschrift "*HVAC&R Research*" (2009)
- Stoffwert-Programmbibliothek ASHRAE-LibHuAirProp mit 60 Stoffwert-Funktionen auf Grundlage des Projektes RP-1485 entwickelt

Ausblick

- Neue Algorithmen für die dritten molaren Kreuzvirial-Koeffizienten notwendig
- Neue experimentelle Ergebnisse werden benötigt
- Berücksichtigung der GERG-2008-Gleichung für Erdgasgemische in zukünftigen Forschungsprojekten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!