

VDI-Gesellschaft Energietechnik

Energietechnische Arbeitsmappe

15., bearbeitete
und erweiterte Auflage



Springer

VDI

Erläuterung zu 2.1.1.1

Das Arbeitsblatt 2.1.1.1 zeigt ein rechtwinkliges h, s -Diagramm für Wasser und Wasserdampf. Dargestellt ist der Zustandsbereich, der insbesondere für die Berechnung von Dampfturbinen benötigt wird.

Die Berechnung des Diagramms erfolgte mit dem internationalen Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ (IAPWS-IF97) [1, 2].

Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 insgesamt erstreckt sich von 0 °C bis 800 °C für Drücke bis 100 MPa und bis 2000 °C für Drücke bis 10 MPa. Für die Berechnung von Zustandsgrößen für höhere Drücke muss der wissenschaftliche Standard „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“ (IAPWS-95) [3] verwendet werden.

Die Werte der spezifischen Enthalpie h und Entropie s stellen Differenzen zu Bezugswerten dar, die für den Tripelzustand – siedende Flüssigkeit – bei

$$\vartheta_t = 0,01 \text{ °C}, \quad p_t = 0,6117 \text{ kPa}, \quad \rho_t = 999,79 \text{ kg/m}^3$$

festgelegt wurden. Da die innere Energie im Bezugszustand $u'_t = 0$ gesetzt wurde, ergibt sich als Wert für die spezifische Bezugsenthalpie

$$h'_t = 0,6118 \text{ J/kg.}$$

Der Wert der spezifischen Bezugsentropie wurde zu

$$s'_t = 0$$

vereinbart. Somit korrespondieren die Diagramme mit der Wasserdampf tabel [1].

Die Werte des kritischen Punktes von Wasser betragen: $\vartheta_c = 373,946 \text{ °C}$, $p_c = 22,064 \text{ MPa}$, $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$.

Die Siedetemperatur bei Normdruck $p_b = 0,101325 \text{ MPa}$ hat den Wert $\vartheta_b = 99,97 \text{ °C}$.

Schrifttum

- [1] Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97/Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf – Der Industrie-Standard IAPWS-IF97*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [2] Wagner, W. et al.: The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122 (2000) Nr. 1, S. 150–182
- [3] Wagner, W.; Pruß, A.: The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, *Journal Physical Chemical Reference Data*, Vol. 29 (2000) – eingereicht

Erläuterung zu 2.1.1.2

Das Arbeitsblatt 2.1.1.2 zeigt ein h, s -Diagramm für Wasser und Wasserdampf in der von Bošnjaković vorgeschlagenen schiefwinkligen Darstellung. Der Neigungswinkel der Enthalpie-Linien wurde so gewählt, dass die Isotherme $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ im Nassdampfgebiet eine Waagerechte darstellt.

Die Berechnung des Diagramms erfolgte mit dem internationalen Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ (IAPWS-IF97) [1, 2].

Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 insgesamt erstreckt sich von 0°C bis 800°C für Drücke bis 100 MPa und bis 2000°C für Drücke bis 10 MPa. Für die Berechnung von Zustandsgrößen für höhere Drücke muss der wissenschaftliche Standard „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“ (IAPWS-95) [3] verwendet werden.

Die Werte der spezifischen Enthalpie h und Entropie s stellen Differenzen zu Bezugswerten dar, die für den Tripelzustand – siedende Flüssigkeit – bei

$$\vartheta_t = 0,01^\circ\text{C}, \quad p_t = 0,6117 \text{ kPa}, \quad \rho_t = 999,79 \text{ kg/m}^3$$

festgelegt wurden. Da die innere Energie im Bezugszustand $u'_t = 0$ gesetzt wurde, ergibt sich als Wert für die spezifische Bezugsenthalpie

$$h'_t = 0,6118 \text{ J/kg.}$$

Der Wert der spezifischen Bezugsentropie wurde zu

$$s'_t = 0$$

vereinbart. Somit korrespondieren die Diagramme mit der Wasserdampf tafel [1].

Die Werte des kritischen Punktes von Wasser betragen: $\vartheta_c = 373,946^\circ\text{C}$, $p_c = 22,064 \text{ MPa}$, $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$.

Die Siedetemperatur bei Normdruck $p_b = 0,101325 \text{ MPa}$ hat den Wert $\vartheta_b = 99,97^\circ\text{C}$.

Schrifttum

- [1] Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97/Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf – Der Industrie-Standard IAPWS-IF97*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [2] Wagner, W. et al.: The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122 (2000) Nr. 1, S. 150–182
- [3] Wagner, W.; Pruß, A.: The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, *Journal Physical Chemical Reference Data*, Vol. 29 (2000) – eingereicht

Erläuterung zu 2.1.2

Das Arbeitsblatt 2.1.2 zeigt ein T,s -Diagramm für Wasser und Wasserdampf.

Die Berechnung des Diagramms erfolgte mit dem internationalen Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ (IAPWS-IF97) [1, 2].

Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 insgesamt erstreckt sich von 0°C bis 800°C für Drücke bis 100 MPa und bis 2000°C für Drücke bis 10 MPa . Für die Berechnung von Zustandsgrößen für höhere Drücke muss der wissenschaftliche Standard „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“ (IAPWS-95) [3] verwendet werden.

Die Werte der spezifischen Enthalpie h und Entropie s stellen Differenzen zu Bezugswerten dar, die für den Tripelzustand – siedende Flüssigkeit – bei

$$t_t = 0,01^{\circ}\text{C}, \quad p_t = 0,6117\text{ kPa}, \quad \rho_t = 999,79\text{ kg/m}^3$$

festgelegt wurden. Da die innere Energie im Bezugszustand $u_t' = 0$ gesetzt wurde, ergibt sich als Wert für die spezifische Bezugsenthalpie

$$h_t' = 0,6118\text{ J/kg.}$$

Der Wert der spezifischen Bezugsentropie wurde zu

$$s_t' = 0$$

vereinbart. Somit korrespondieren die Diagramme mit der Wasserdampf tabel [1].

Die Werte des kritischen Punktes von Wasser betragen: $t_c = 373,946^{\circ}\text{C}$, $p_c = 22,064\text{ MPa}$, $\rho_c = 322\text{ kg/m}^3$.

Die Siedetemperatur bei Normdruck $p_b = 0,101325\text{ MPa}$ hat den Wert $t_b = 99,97^{\circ}\text{C}$.

Schrifttum

- [1] Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97/Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf – Der Industrie-Standard IAPWS-IF97*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [2] Wagner, W. et al.: The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122 (2000) Nr. 1, S. 150–182
- [3] Wagner, W.; Pruß, A.: The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, *Journal Physical Chemical Reference Data*, Vol. 29 (2000) – eingereicht

Erläuterung zu 2.1.3

Das Arbeitsblatt 2.1.3 zeigt ein $h, \log p$ -Diagramm für Wasser und Wasserdampf.

Die Berechnung des Diagramms erfolgte mit dem internationalen Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ (IAPWS-IF97) [1, 2].

Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 insgesamt erstreckt sich von 0 °C bis 800 °C für Drücke bis 100 MPa und bis 2000 °C für Drücke bis 10 MPa. Für die Berechnung von Zustandsgrößen für höhere Drücke muss der wissenschaftliche Standard „The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use“ (IAPWS-95) [3] verwendet werden.

Die Werte der spezifischen Enthalpie h und Entropie s stellen Differenzen zu Bezugswerten dar, die für den Tripelzustand – siedende Flüssigkeit – bei

$$t_1 = 0,01 \text{ °C}, \quad p_1 = 0,6117 \text{ kPa}, \quad \rho_1 = 999,79 \text{ kg/m}^3$$

festgelegt wurden. Da die innere Energie im Bezugszustand $u_1' = 0$ gesetzt wurde, ergibt sich als Wert für die spezifische Bezugsenthalpie

$$h_1' = 0,6118 \text{ J/kg.}$$

Der Wert der spezifischen Bezugsentropie wurde zu

$$s_1' = 0$$

vereinbart. Somit korrespondieren die Diagramme mit der Wasserdampf tabel [1].

Die Werte des kritischen Punktes von Wasser betragen: $t_c = 373,946 \text{ °C}$, $p_c = 22,064 \text{ MPa}$, $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$.

Die Siedetemperatur bei Normdruck $p_b = 0,101325 \text{ MPa}$ hat den Wert $t_b = 99,97 \text{ °C}$.

Schrifttum

- [1] Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97/Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf – Der Industrie-Standard IAPWS-IF97*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [2] Wagner, W. et al.: The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122 (2000) Nr. 1, S. 150–182
- [3] Wagner, W.; Pruß, A.: The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use, *Journal Physical Chemical Reference Data*, Vol. 29 (2000) – eingereicht

Erläuterung zu 2.1.4.1

Das Arbeitsblatt 2.1.4.1 zeigt ein $h, \log \rho$ -Diagramm für Wasser und Wasserdampf mit *Rankine-Hugoniot*-Kurven zur Berechnung von Verdichtungsstößen.

Die Berechnung des Diagramms erfolgte mit dem internationalen Industrie-Standard für die thermodynamischen Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf „The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ (IAPWS-IF97) [1, 2].

Der Gültigkeitsbereich der IAPWS-IF97 insgesamt erstreckt sich von 0°C bis 800°C für Drücke bis 100 MPa und bis 2000°C für Drücke bis 10 MPa.

Die Werte der spezifischen Enthalpie h und Entropie s stellen Differenzen zu Bezugswerten dar, die für den Tripelzustand – siedende Flüssigkeit – bei

$$\vartheta_1 = 0,01^\circ\text{C}, \quad p_1 = 0,6117 \text{ kPa}, \quad \rho_1 = 999,79 \text{ kg/m}^3$$

festgelegt wurden. Da die innere Energie im Bezugszustand $u'_1 = 0$ gesetzt wurde, ergibt sich als Wert für die spezifische Bezugsenthalpie

$$h'_1 = 0,6118 \text{ J/kg.}$$

Der Wert der spezifischen Bezugsentropie wurde zu

$$s'_1 = 0$$

vereinbart. Somit korrespondieren die Diagramme mit der Wasserdampf-tafel [1].

Im $h, \log \rho$ -Diagramm ist die Steigung der Isentropen

$$\left[\frac{\partial h}{\partial \log \rho} \right]_s = \left[\frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s = c_s^2 \quad (1)$$

gleich dem Quadrat der isentropen Schallgeschwindigkeit c_s .

Die im Arbeitsblatt 2.1.4.1 eingezeichneten roten Kurven geben die *Rankine-Hugoniot*-Beziehung

$$h - h_1 = \frac{1}{2} (p - p_1) \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho} \right) \quad (2)$$

wieder [3], welche bei einem Verdichtungsstoß alle möglichen Zustände (h, ρ, p) hinter dem Stoß mit dem Anfangszustand (h_1, ρ_1, p_1) vor dem Stoß verknüpft. Im Diagramm wurden die mit roten Kreisen gekennzeichneten Zustandspunkte als Anfangszustände (1) bei Dichten $\rho_1 = 0,01; 0,1; 1; 10; 100 \text{ kg/m}^3$ und Enthalpien $h_1 = 500, 1000 \dots 4000 \text{ kJ/kg}$ gewählt [3].

Schrifttum

- [1] Wagner, W.; Kruse, A.: *Properties of Water and Steam – The Industrial Standard IAPWS-IF97/Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf – Der Industrie-Standard IAPWS-IF97*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1998
- [2] Wagner, W. et al.: *The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122 (2000) Nr. 1, S. 150–182
- [3] Knoche, K.-F.: *Enthalpie-Dichte-Diagramm für Hochtemperaturplasmen und Anwendungsbeispiele. VDI-Forschungsheft 526*, Düsseldorf: VDI-Verlag 1968