



*Hans-Joachim Kretzschmar
„25 Jahre Technische Thermodynamik
an der Hochschule Zittau/Görlitz“*



Abschlussvorlesung

**25 Jahre Technische Thermodynamik an der
Hochschule Zittau/Görlitz (1993 – 2018)**

Hans- Joachim Kretzschmar

Inhalt

- 1 Lehre
- 2 Forschung und Technologietransfer
- 3 Akademische Selbstverwaltung
- 4 Schlussfolgerungen

Grußwort des Rektors
Magnifizienz Prof. Dr. phil. Friedrich Albrecht

Lehre am Fachgebiet Technische Thermodynamik

Lehrfächer

Stunden pro Woche in einem Semester

Technische Thermodynamik I – Energielehre	4 SWS
Technische Thermodynamik II – Wärmeübertragung	4 SWS
Technische Thermodynamik III – Prozessthermodynamik und Stoffübertragung	6 SWS
Stoffdatenermittlung in der Energietechnik	4 SWS
Technische Thermodynamik für die Studiengänge	
- Versorgungs- und Entsorgungstechnik	8 SWS
- Ökologie und Umweltschutz	3 SWS
- Wirtschaftsingenieurwesen	3 SWS
- Chemie	3 SWS
Kältetechnik und Wärmepumpen	4 SWS

Lehre

Lehrlabor Technische Thermodynamik

Laborleiter: Dr.-Ing. S. Herrmann (Fr. Dr.-Ing. I. Stöcker bis 2015)

Versuchsstände:

- I. Hauptsatz der Thermodynamik
- II. Hauptsatz der Thermodynamik
- Prozesse mit feuchter Luft
- Zustandsverhalten am kritischen Punkt (SF_6)
- Konvektiver Wärmeübergang
- Wärmeübertrager
- Kreisprozessberechnung mit EBSILON



Organisation der Lehrveranstaltungen in der Sächsischen Lernplattform OPAL

The screenshot shows the OPAL interface with a navigation menu on the left and a course overview on the right. The course title is 'Thermodynamik I für ME17 und MM17'. The navigation menu includes items like 'Aktuelle Termine', 'Selbstorganisiert Lernen', 'Tabellenvorlagen', 'Anmeldung', 'Einteilig Übungsgruppen', 'Lehrunterlagen', 'Vorlesungsskript', 'Übungsaufgaben', 'Übungsfragen', 'Online-Übungen', 'Leistungskontrollen', 'ThermoLive', 'Thermopr@ctice', 'Praktika', 'Belege', 'Property Calculator', 'Software', 'Klausurankündigung', 'Klausurvorbereitung', 'Noten', 'Literatur', 'Gliederung', 'Modulbeschreibung', 'Befragung zur LV', 'E-Mail an Lehrende', 'E-Mail an Teilnehmer', 'Foren', and 'Verwandte Webseiten'. The main content area features a Mollier h-s diagram for water and steam, with the following text:

**Mollier h-s Diagramm
für
Water and Steam**

**Modul Technische Thermodynamik I
für ME17 und MM17**

Vorlesender: Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Kretzschmar
 Laborleiter: Dr.-Ing. S. Herrmann
 Übungsbetreuerin: Dipl.-Ing. (FH) M. Schneider
 Thermopr@ctice-Betreuerin: Dipl.-Ing. (FH) M. Schneider
 ONYX-Betreuer: M.A. Dipl.-Ing. (FH) R. Freudenreich
 OPAL-Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) B. Salomo

Erarbeitete Lehrunterlagen

Stoffwertsammlung

The cover features the Hochschule Zittau/Görlitz logo at the top left. A blue box in the center contains the text: 'Stoffwertsammlung', 'Technische Thermodynamik', and 'Wärmeübertragung'. Below this, it lists 'Fakultät Maschinenwesen' and 'Fakultäten-Service für Thermodynamik'. At the bottom, it says 'STUDIERT OHNE GRENZEN'.

Formelsammlung

The cover features the Hochschule Zittau/Görlitz logo at the top left. A blue box in the center contains the text: 'Formelsammlung', 'Technische Thermodynamik', and 'Wärmeübertragung'. Below this, it lists 'Fakultät Maschinenwesen' and 'Fakultäten-Service für Thermodynamik'. At the bottom, it says 'STUDIERT OHNE GRENZEN'.

Aufgabensammlung

The cover features the Hochschule Zittau/Görlitz logo at the top left. A blue box in the center contains the text: 'Aufgabensammlung', 'Technische Thermodynamik', and 'Wärmeübertragung'. Below this, it lists 'Fakultät Maschinenwesen' and 'Fakultäten-Service für Thermodynamik'. At the bottom, it says 'STUDIERT OHNE GRENZEN'.

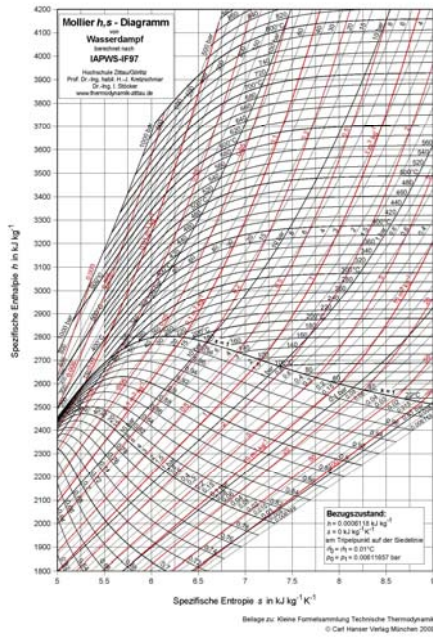
Fragensammlung

The cover features the Hochschule Zittau/Görlitz logo at the top left. A blue box in the center contains the text: 'Übungsfragen', 'Technische Thermodynamik', and 'Wärmeübertragung'. Below this, it lists 'Fakultät Maschinenwesen' and 'Fakultäten-Service für Thermodynamik'. At the bottom, it says 'STUDIERT OHNE GRENZEN'.

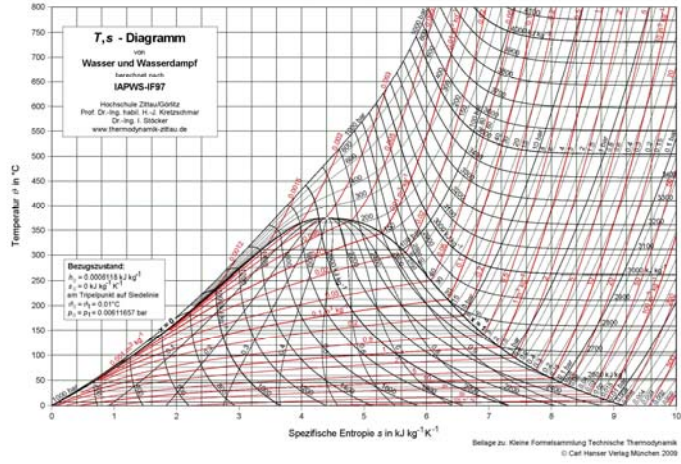
Lehre

Ausgewählte, am Fachgebiet Technische Thermodynamik erarbeitete Zustandsdiagramme für Studierende

Mollier h,s -Diagramm für Wasserdampf



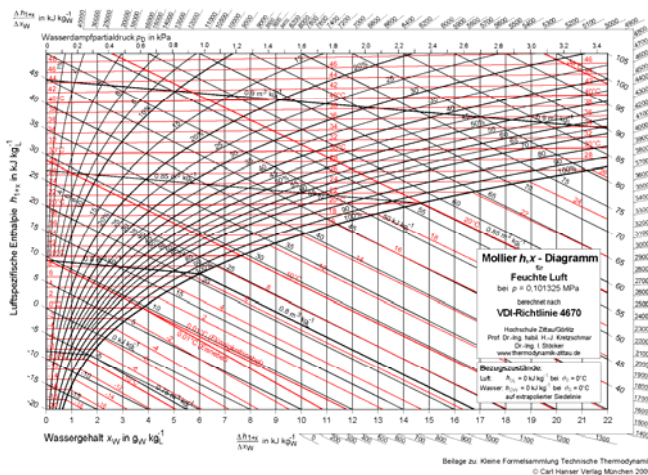
T,s -Diagramm für Wasser und Wasserdampf



Lehre

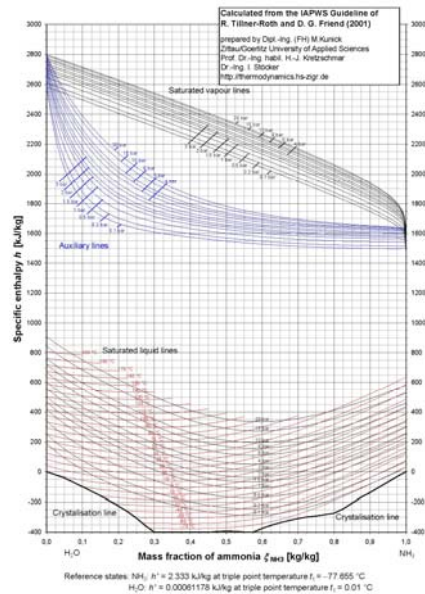
Ausgewählte Zustandsdiagramme für Studierende

Mollier h,x -Diagramm für feuchte Luft



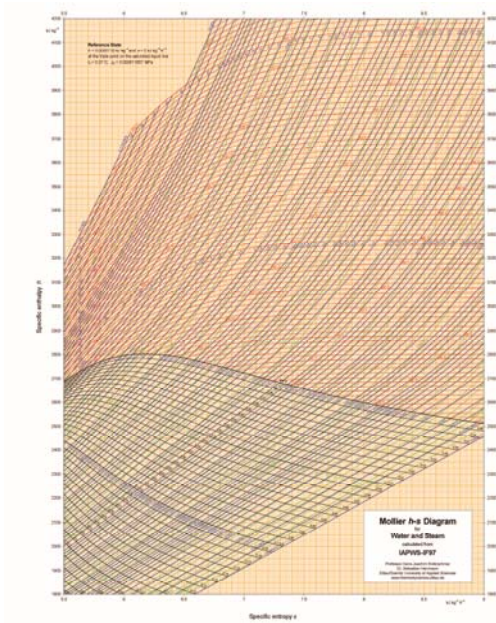
h,ξ -Diagramm für Ammoniak/Wasser-Gemische

$h-\xi$ Diagram for Ammonia / Water Mixtures

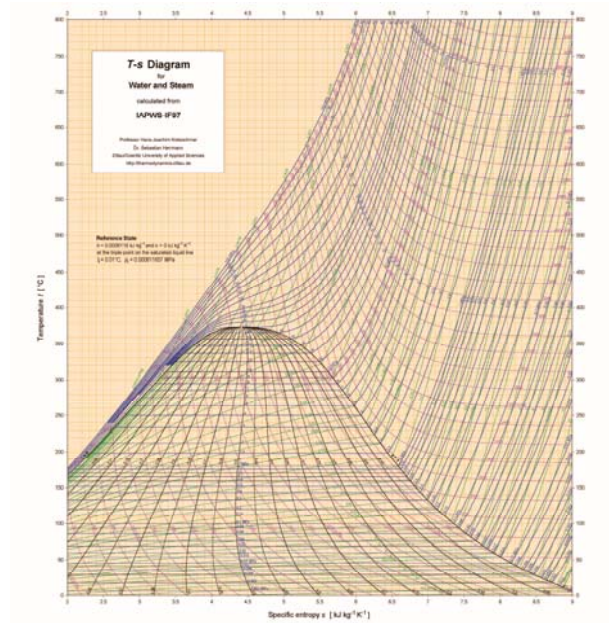


Ausgewählte Zustandsdiagramme für Studierende

Mollier h,s -Diagramm für Wasserdampf im A2-Format



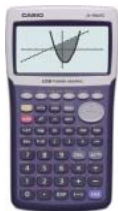
T,s -Diagramm für Wasser und Wasserdampf im A2-Format



Entwickelte Stoffwert-Berechnungssoftware für Studierende

Stoffwert-Berechnung auf Taschenrechnern

FluidCasio



FX 9750
CFX 9850
CFX 9860
ALGEBRA FX 2.0

FluidHP



HP 48
HP 49

FluidTI



TI 83, TI 84, TI 98
TI Voyage 200
TI 92
TI Nspire

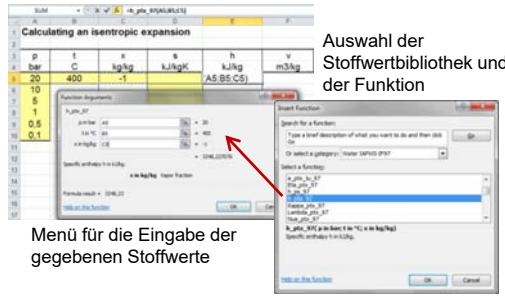
Stoffwert-Berechnung auf iPhone, iPad, Android Phones und Tablets



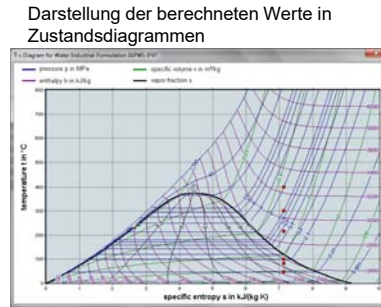
Ca. 3.500 Downloads pro Jahr weltweit, da Verwies auf Webseite der International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)

Entwickelte Stoffwert-Berechnungssoftware für Studierende

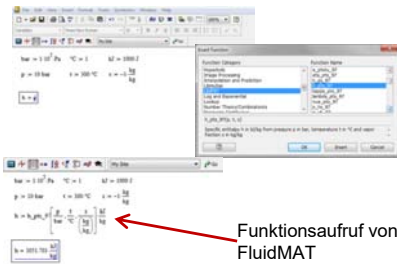
Stoffwert-Berechnung in Excel®



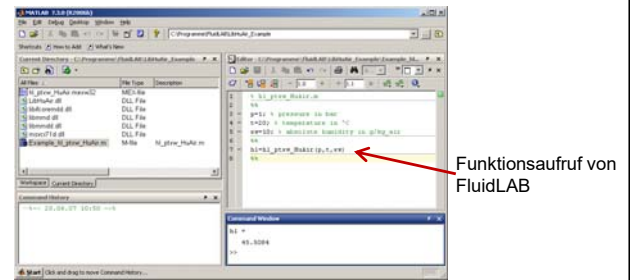
Menü für die Eingabe der gegebenen Stoffwerte



Stoffwert-Berechnung in Mathcad®



Stoffwert-Berechnung in MATLAB®



Ca. 1.500 Downloads pro Jahr weltweit, da Verweis auf Webseite der IAPWS

Fluid Property Calculator

Online Stoffwert-Berechnung auf www.thermodynamik-zittau.de

Zittau's Fluid Property Calculator

Fluid:

Function:

Unit System:

Enter given values: [Range of validity](#)

Pressure p: bar

Temperature t: °C

Vapor fraction x: [Details on the vapor fraction x](#)

Result:

Specific enthalpy h = 3097.38 kJ/kg

For further information on property libraries available for Excel®, MATLAB®, Mathcad®, Engineering Equation Solver® EES, DYMOLA® (Modelica), SimulationX® and LabView® click [here](#).

Apps for calculating steam properties for iPhone, iPad, and iPod touch can be found [here](#) ([description](#)) and for Android phones and tablets [here](#) ([description](#)).

© Zittau/Goerlitz University of Applied Sciences
 Faculty of Mechanical Engineering
 Department of Technical Thermodynamics
 Prof. Hans-Joachim Kretzschmar
 Dr. Sebastian Herrmann
 Matthias Kunick
 Programmer: Joachim Posselt

Tel.: +49-3583-612-4846 or -4817
 Fax: +49-3583-612-54846
 E-mail: info@thermodynamik-zittau.de
www.thermodynamik-zittau.de
www.thermodynamic-property-libraries.com
www.international-steam-tables.com
www.thermodynamik-formelsammlung.de

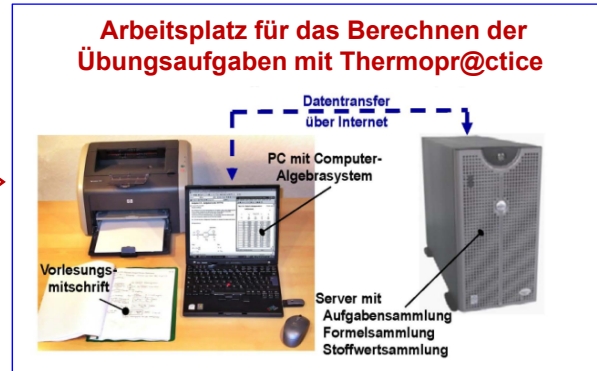
Stoffdaten der folgenden Stoffe sind abrufbar:

- Wasser und Wasserdampf
- Feuchte Luft
- Verbrennungsgasgemische
- Meerwasser
- Ammoniak
- Isobutan
- n-Butan
- Ethanol
- Kältemittel R134a
- Ammoniak/Wasser-Gemische
- Wasser/Lithiumbromid-Gemische

Im vergangenen Jahr: **56.000 Besucher weltweit**

E-Learning als Ergänzung

E-Learning-System Thermopr@ctice zur internetgestützten Berechnung von Übungsaufgaben der Thermodynamik mit Mathcad

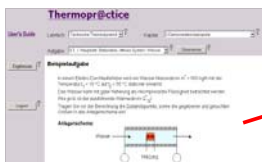


13

E-Learning als Ergänzung

Nutzung des eLearning-Systems Thermopr@ctice

Auswählen der Aufgabe im Internet



Thermopr@ctice beinhaltet 140 Aufgaben.

Absenden der Ergebnisse über Internet



Lösen der Aufgabe mit Mathcad

Wasser

Heizung

1 2

geg: $\dot{m} = \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
 $t_1 = 10^\circ\text{C}$
 $t_2 = 60^\circ\text{C}$

ges.: \dot{Q}_{12}

Lösung:

$$\dot{Q}_{12} + P_{L_{st,12}} + W_{diss12} = \dot{m} \cdot \left(h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right)$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$h_1 = 42.021 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$T_2 = \left(\frac{t_2}{C} + 273.15 \right) \text{K}$$

$$h_2 = \left(h_{\text{ptx}} \cdot 9 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) + 0 \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 1546.74 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{12} = 33.694 \text{ W}$$

Formelsammlung im Internet

Stationäre Energiebilanz beim offenen System

$$\dot{W}_{st} + \sum \dot{W}_{st,zu} - \sum \dot{W}_{st,ab} = \frac{dE}{dt}$$

Stationäre Energiebilanz von Enthalpie (Basis Ausström):

$$\dot{Q}_{12} + P_{L_{st,12}} + W_{diss12} = \dot{m} \cdot \sum h_{st,zu} - \sum h_{st,ab}$$

Sonderfall: Ein-Einstrom-Ausström $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$ - stationärer Fließprozess

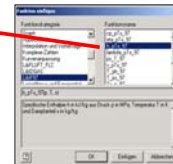
$$\dot{Q}_{12} + P_{L_{st,12}} + W_{diss12} = \dot{m} \cdot \left(h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right)$$

Stoffwertsammlung im Internet

Tab. 4 Stoffwerte von Wasserflüssigkeit (inkompressibel)

t	ρ	c_p	h	s_f
$^\circ\text{C}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
0	999.79	4.2189	0	0
2	999.89	4.2134	8.3916	0.030606
4	999.93	4.2078	16.813	0.061101
6	999.99	4.2031	25.224	0.09134
8	999.8	4.1992	33.636	0.12133
10	999.65	4.1959	42.021	0.15109
12	999.45	4.193	50.41	0.18061

Stoffwertprogramme



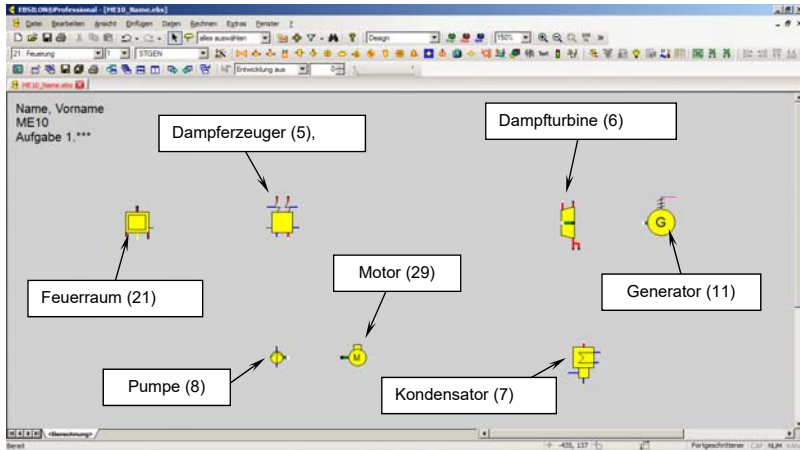
**Umfang: 230 Aufgaben der Lehrfächer Technische Thermodynamik I, II, III
und Kältetechnik und Wärmepumpen**

14

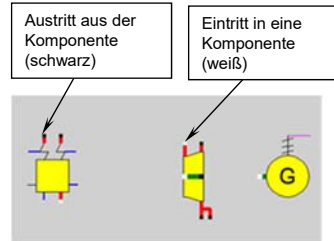
E-Learning als Ergänzung

Nutzung des Programms EBSILON von STEAG bei der Berechnung von Kreisprozessen im Fach Technische Thermodynamik III

Elemente des Kreisprozesses zum Aufbau auf dem Bildschirm

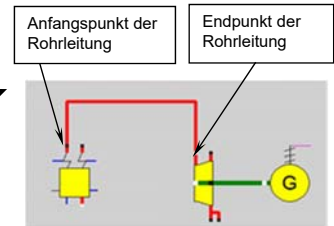


Leistungsanschlüsse ausgewählter Bauteile



Aufbau des Kreisprozesses auf dem Bildschirm

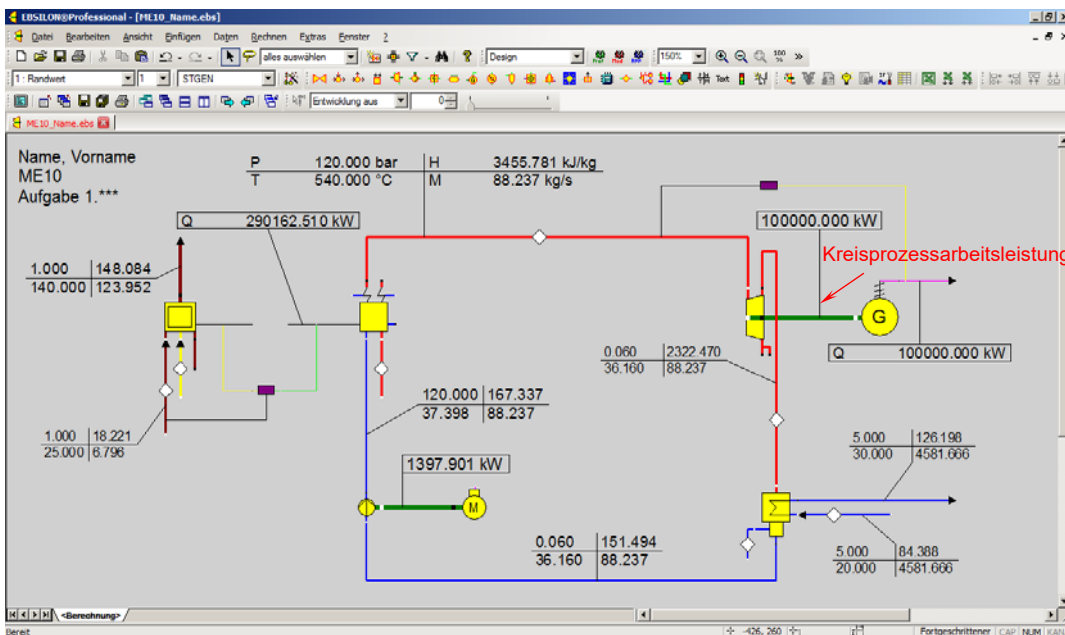
Verbindungsleitungen



15

E-Learning als Ergänzung

Im Praktikum erarbeiteter einfacher Kraftwerks-Kreisprozess mit EBSILON



Überführung erfolgte an:

- BTU Cottbus
- HS Düsseldorf
- HS Krefeld
- TH Nürnberg

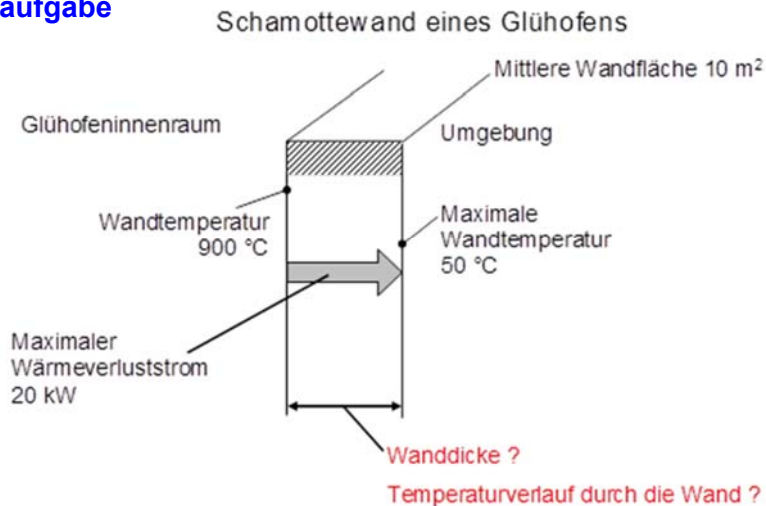
Vorbereitung für das spätere Lehrfach „Simulation energietechnischer Anlagen“

16

thermoE und thermoACTIVE E-Selbstlernsysteme und E-Leistungskontrollen für das Fach Technische Thermodynamik

Gemeinschaftsprojekte mit den Lehrstühlen für Technische Thermodynamik
der TU Dresden, Fr. Prof. Breitkopf und
der Bergakademie Freiberg, Hr. Prof. Fieback

Beispielaufgabe



17

Lösung der Aufgabe und Eingabe des Lösungsweges

Schritt 1:
Lösung der Aufgaben „von Hand“ bzw. mit
Thermopr@ctice

Schritt 2:
Abfrage von Lösungsschritten, Zwischen- und
Endergebnissen in ONYX

<p>Gesucht: δ</p> <p>Gesamt: $\vartheta_{i, \text{innen}} = 300 \text{ °C}$ $\vartheta_{e, \text{außen}} = 50 \text{ °C}$ $A = 10 \text{ m}^2$ $\dot{Q} = 20 \text{ kW}$</p>		<p>Frage a1 Welche der folgenden Darstellungen beschreibt den Temperaturverlauf in der Schamottewand? (Klicken Sie die richtige Antwort an)</p> <p>Antwort:</p>
<p>Lösung:</p> <p>a) </p> <p>b) $\dot{Q}_1 = \frac{\Delta \vartheta_1}{R_{th}}$</p> <p>$\dot{Q} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A_m}$</p> <p>$A_m = A = 10 \text{ m}^2$</p> <p>$\lambda = 0,71 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$</p>	<p>Frage b1 Welche Gleichung ist im hier beschriebenen Fall die Basis zur Berechnung des Wärmestroms? (Geben Sie die Nummer der Gleichung in der Formelsammlung an)</p> <p>Antwort: Formelnummer [...]</p> <p>Frage b2 Mit welcher der folgenden Gleichungen kann die Wanddicke direkt berechnet werden? (Klicken Sie die richtige Antwort an)</p> <p>Antwort: $R_{th1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot A_{m1}}$ $R_{th2} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_1}$ $R_{th3} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot A_2}$</p>	<p>Frage b3 Geben Sie den Wärmeleitkoeffizient (Zahlenwert) in der geforderten Maßeinheit an.</p> <p>Antwort: Der Wärmeleitkoeffizient beträgt [...] W m⁻¹ K⁻¹.</p>
<p>Umstellen der Formel</p> <p>$\delta = \frac{\lambda \cdot A_m \cdot \Delta \vartheta}{\dot{Q}}$</p> <p>$\delta = \frac{0,71 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ m}^2 \cdot 250 \text{ K}}{20 \text{ kW}}$</p> <p>$\delta = 0,89 \text{ m} \approx 89 \text{ cm}$</p>	<p>Frage b4 Geben Sie die Temperaturdifferenz (Zahlenwert) zwischen der Wandinnenseite und der Wandaußenseite in der geforderten Maßeinheit an.</p> <p>Antwort: Die Temperaturdifferenz beträgt [...] K.</p>	<p>Frage b5 Geben Sie die Dicke der Schamottewand (Zahlenwert) in der geforderten Maßeinheit an.</p> <p>Antwort: Die Dicke der Schamottewand sollte mindestens [...] cm betragen.</p>

18

Distance Learning

Vorlesungsaufzeichnungen ThermoLive mit MAGMA in OPAL



Lehrfächer

Thermodynamik I
Energielehre
Thermodynamik II
Wärmeübertragung
Thermodynamik III
Prozessthermodynamik
und Stoffübertragung
Kältetechnik und
Wärmepumpen

Umfang:

**60 Vorlesungen zum
Mitschreiben**

19

Effekte der E-Learning-Bestandteile für das Studium

- Selbständiges Abarbeiten von Übungsaufgaben und Übungsfragen in individuellen Varianten und mit individuellen Werten
→ Aktives und selbständiges Lernen
- Bearbeitung von Aufgaben über Internet am PC entspricht dem Interesse der Studierenden
→ Erhöhung der Attraktivität des Lernens
→ Nutzung der Kompetenzen für digitale Medien der Studierenden
- Bearbeitung in Übungen und zu Hause
→ Nutzung des heimischen PCs für Lernzwecke
- Kennenlernen eines Computer-Algebrasystems, z. B. Mathcad und Nutzung von modernen Hilfsmitteln, wie Stoffwert-Programmbibliotheken
→ Heranführung an moderne Arbeitsweisen des Ingenieurs

Ergebnisse der Lehre

8,2 % der Studierenden haben in den vergangenen 5 Jahren die 1. Prüfungsklausuren in den Fächern Technische Thermodynamik I, II, III nicht bestanden,

7,0 % der Frauen und

14,1 % der ausländischen Studierenden

Erwartete Effekte

20

Forschung und Technologietransfer

Arbeitsgebiet

Berechnung der thermodynamischen Stoffdaten von Arbeitsfluiden
der Energietechnik

2 Aufgabenstellungen

Entwicklung von Stoffwert-
Berechnungsalgorithmen



Forschung

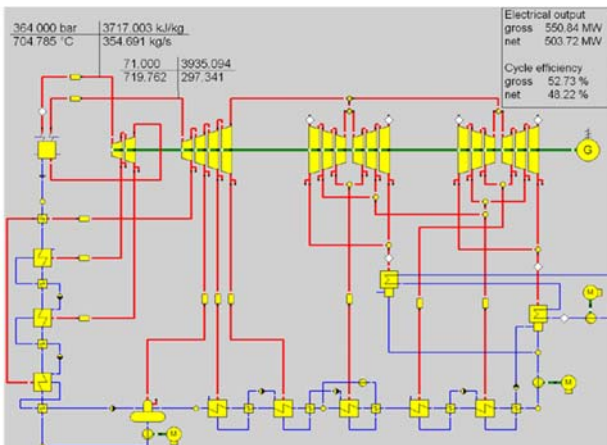
Bereitstellung von Stoffwert-
Berechnungsbibliotheken als
Software für die Industrie



Technologietransfer

Problemstellungen der Energietechnik

Wärmeschaltbild-Berechnungen



500 MW Kohlekraftwerk in EBSILON Professional

Auslegung, Optimierung und Prozessführung
von Anlagen der Energietechnik

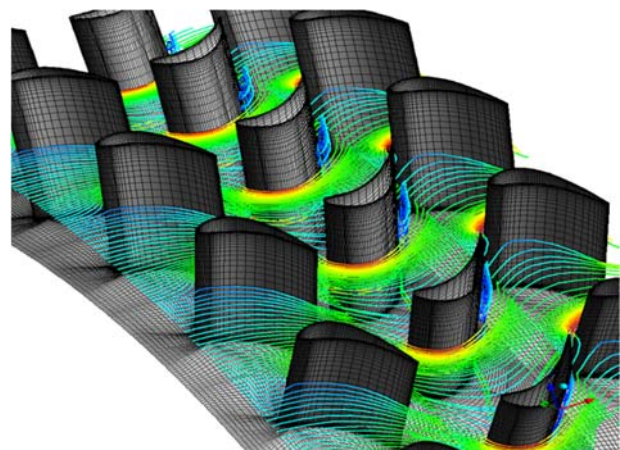


Masse-, Impuls-, Energie- und Entropiebilanzen werden als Gleichungssysteme formuliert



Prozesssimulationen

Numerische Strömungssimulationen (CFD)



Strömung durch eine TurbinenStufengruppe in ANSYS-CFX

Auslegung und Optimierung von durchströmten
Bauteilen, z. B. Turbinen





In diesen Prozesssimulationen müssen die thermodynamischen Stoffdaten der verwendeten Arbeitsfluide berechnet werden

- Arbeitsfluide:**
- Wasserdampf und Wasser
 - Verbrennungsgasgemische
 - Brenngase, Erdgas
 - Feuchte Luft
 - Kältemittel
 - Kohlendioxid
 - Wasserstoff
 -
 -
- Stoffdaten:** Thermodynamische Zustandsgrößen
- Temperatur, Druck, Dichte
 - Innere Energie, Enthalpie, Wärmekapazitäten, Isentropenexponent, ...
- Transportgrößen
- Viskosität
 - Wärmeleitfähigkeit, ...

Besondere Anforderungen an die Berechnung der Stoffdaten

- Stoffwert-Funktionen müssen sehr genau sein!
- Stoffwert-Funktionen müssen möglichst geringe Rechenzeiten benötigen!
- Die Umkehrfunktionen müssen eine hohe numerische Konsistenz besitzen!
z. B. Funktion $T(p,h)$ muss zur Funktion $h(p,T)$ passen.

23

Ermittlung und Aufbereitung von Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik

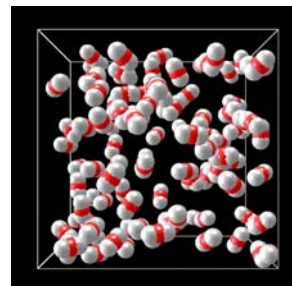
Experimentelle Ermittlung



Kombinierte Viskositäts- und Dichtemessapparatur, Universität Rostock

z. B. Messung der Dichte ρ
Wärmekapazität c_p ,
Schallgeschwindigkeit w
bei Druck p und Temperatur T

Ermittlung durch Simulation des Verhaltens der Moleküle



Quelle:
Prof. J. Vrabec,
Universität Paderborn

z. B. Monte-Carlo-Simulation der Wärmekapazität c_p als Funktion von Druck p und Temperatur T

Aufbereitung der Stoffwerte für Nutzung in Prozesssimulationen

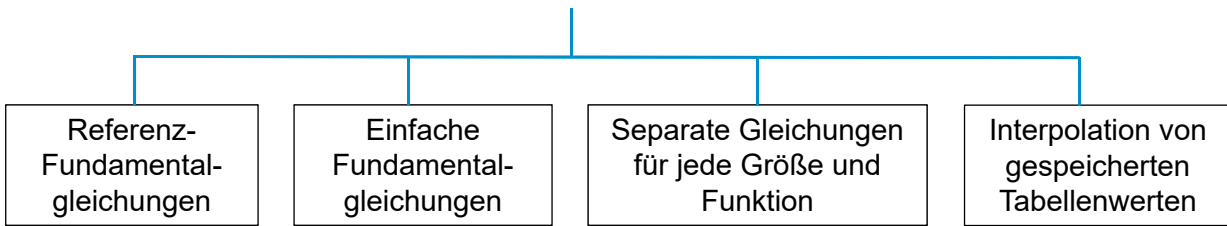
Tabellen mit Werten
z. B. International Steam Tables

Diagramme zum Ablesen
z. B. Mollier h,s -Diagramm

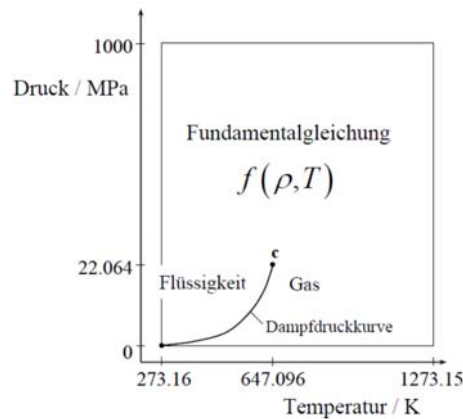
Berechnungsalgorithmen als Software

24

Lösungswege für die Berechnung der thermodynamischen Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik



Beschreibung des gesamten fluiden Zustandsbereiches mit einer Fundamentalgleichung
 → z. B. Wissenschaftlicher Standard IAPWS-95 für Wasser und Wasserdampf



25

Fundamentalgleichung für die freie Energie f als Funktion der Dichte δ und der Temperatur T

$$f(\rho, T) = RT \left[\phi(\delta, \tau) = \phi^o(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau) \right],$$

δ – dimensionslose Dichte ρ

τ – dimensionslose Temperatur T

$$\phi^o = \ln \delta + n_1^o + n_2^o \tau + n_3^o \ln \tau + \sum_{i=4}^8 n_i^o \ln \left[1 - e^{-\gamma_i^o \tau} \right],$$

$$\phi^r = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{51} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{c_i}} + \sum_{i=52}^{54} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i (\delta - \varepsilon_i)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=55}^{56} n_i \Delta^{b_i} \delta \psi$$

$$\Delta = \theta^2 + B_i \left[(\delta - 1)^2 \right]^{d_i}, \quad \theta = (1 - \tau) + A_i \left[(\delta - 1)^2 \right]^{2\beta_i}, \quad \psi = e^{-C_i (\delta - 1)^2 - D_i (\tau - 1)^2},$$

64 Koeffizienten und 220 Exponenten, davon 9 rational

Table 1. Numerical values of the coefficients and parameters of the ideal-gas part of the dimensionless Helmholtz free energy, Eq. (5)

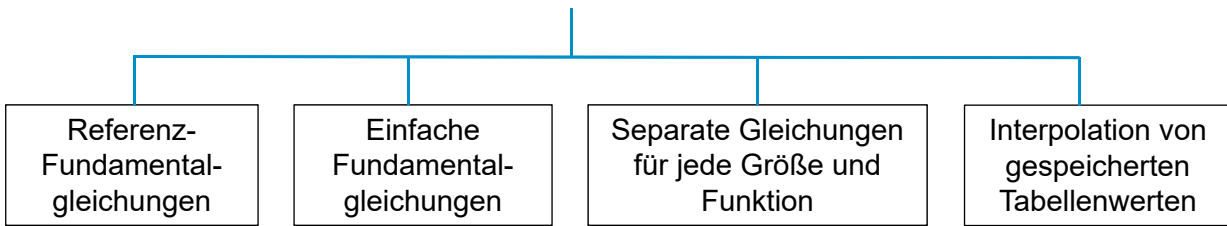
i	n_i^o	γ_i^o	i	n_i^o	γ_i^o
1	-8.320 446 483 749 7	-	5	0.973 15	3.537 342 22
2	6.683 210 527 593 2	-	6	1.279 50	7.740 737 08
3	3.006 32	-	7	0.969 56	9.244 377 96
4	0.012 436	1.287 289 67	8	0.248 73	27.507 510 5

Table 2. Numerical values of the coefficients and parameters of the residual part of the dimensionless Helmholtz free energy, Eq. (6)

i	c_i	d_i	t_i	n_i
1	-	1	-0.5	0.125 335 479 355 23 $\times 10^{-1}$
2	-	1	0.875	0.789 576 347 228 28 $\times 10^1$
3	-	1	1	-0.878 032 033 035 61 $\times 10^1$
4	-	2	0.5	0.318 025 093 454 18
5	-	2	0.75	-0.261 455 338 593 58
6	-	3	0.375	-0.781 997 516 879 81 $\times 10^{-2}$
7	-	4	1	0.880 894 931 021 34 $\times 10^{-2}$
8	1	1	4	-0.668 565 723 079 65
9	1	1	6	0.204 338 109 509 65
10	1	1	12	-0.662 126 050 396 87 $\times 10^{-4}$
11	1	2	1	-0.192 327 211 560 02
12	1	2	5	-0.257 090 430 034 38
13	1	3	4	0.160 748 684 862 51
14	1	4	2	-0.400 928 289 258 07 $\times 10^{-1}$
15	1	4	13	0.393 434 226 032 54 $\times 10^{-6}$
16	1	5	9	-0.759 413 770 881 44 $\times 10^{-5}$

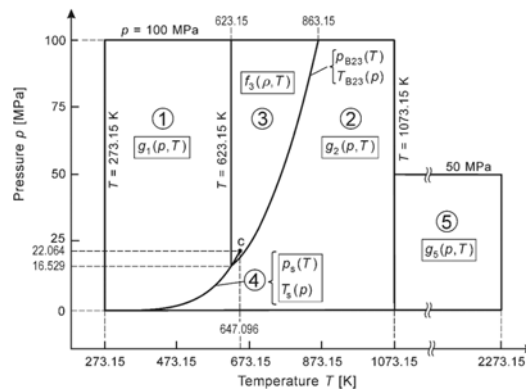
26

Lösungswege für die Berechnung der thermodynamischen Stoffdaten für Arbeitsfluide der Energietechnik



Beschreibung des fluiden Zustandsbereiches mit mehreren Fundamentalgleichungen
 → z. B. Industrie-Standard IAPWS-IF97 für Wasser und Wasserdampf

Unterteilung in die Bereiche 1, 2, 3, 4 und 5



Fundamentalgleichung für die freie Enthalpie g als Funktion des Druckes p und Temperatur T für den Gas-Bereich 2

$$g_2(p, T) = RT \left[\gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \right],$$

π – dimensionsloser Druck p

τ – dimensionslose Temperatur T

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i \tau^{J_i}$$

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0.5)^{J_i}$$

52 Koeffizienten und 95 Exponenten (ganzzahlig)

Table 2.6 Coefficients and exponents of the ideal-gas part γ^o , Eq. (2.7)

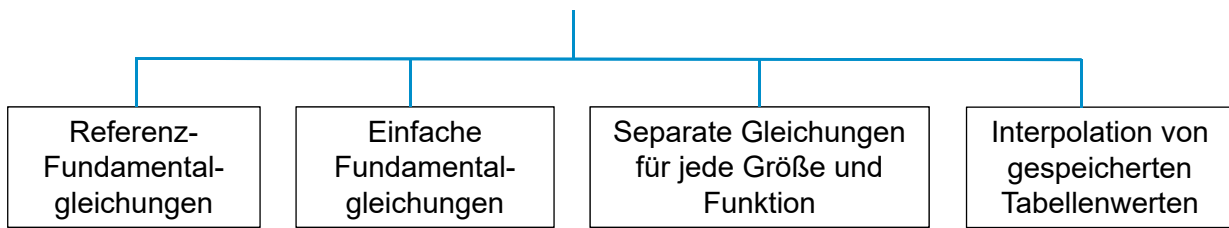
i	J_i	n_i	i	J_i	n_i
1	0	$-0.969\,276\,865\,002\,17 \times 10^{13}$	6	-2	$0.142\,408\,191\,714\,44 \times 10^1$
2	1	$0.100\,866\,559\,680\,18 \times 10^{23}$	7	-1	$-0.438\,395\,113\,194\,50 \times 10^1$
3	-5	$-0.560\,879\,112\,830\,20 \times 10^{-2}$	8	2	$-0.284\,086\,324\,607\,72$
4	-4	$0.714\,527\,380\,814\,55 \times 10^{-1}$	9	3	$0.212\,684\,637\,533\,07 \times 10^{-1}$
5	-3	$-0.407\,104\,982\,239\,28$			

^aIf Eq. (2.7) is incorporated into Eq. (2.9), instead of the values for n_1 and n_2 given above, the following values for these two coefficients must be used: $n_1 = -0.969\,372\,683\,930\,49 \times 10^{13}$, $n_2 = 0.100\,872\,759\,700\,06 \times 10^{23}$.

Table 2.7 Coefficients and exponents of the residual part γ^r , Eq. (2.8)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	1	0	$-0.177\,317\,424\,732\,13 \times 10^{-2}$	23	7	0	$-0.590\,595\,643\,242\,70 \times 10^{-17}$
2	1	1	$-0.178\,348\,622\,923\,58 \times 10^{-1}$	24	7	11	$-0.126\,218\,088\,991\,01 \times 10^{-5}$
3	1	2	$-0.459\,960\,136\,963\,65 \times 10^{-1}$	25	7	25	$-0.389\,468\,424\,357\,39 \times 10^{-1}$
4	1	3	$-0.575\,812\,590\,834\,32 \times 10^{-1}$	26	8	8	$0.112\,562\,113\,604\,59 \times 10^{-10}$
5	1	6	$-0.503\,252\,787\,279\,30 \times 10^{-1}$	27	8	36	$-0.823\,113\,408\,979\,98 \times 10^{-1}$
6	2	1	$-0.330\,326\,416\,702\,03 \times 10^{-4}$	28	9	13	$0.198\,097\,128\,020\,88 \times 10^{-7}$
7	2	2	$-0.189\,489\,875\,163\,15 \times 10^{-3}$	29	10	4	$0.104\,069\,652\,101\,74 \times 10^{-18}$
8	2	4	$-0.393\,927\,772\,433\,55 \times 10^{-2}$	30	10	10	$-0.102\,347\,470\,959\,29 \times 10^{-12}$
9	2	7	$-0.437\,972\,956\,505\,73 \times 10^{-4}$	31	10	14	$-0.100\,181\,793\,795\,11 \times 10^{-8}$
10	2	36	$-0.266\,745\,479\,140\,87 \times 10^{-4}$	32	16	29	$-0.808\,829\,086\,469\,85 \times 10^{-10}$
11	3	0	$0.204\,817\,376\,923\,09 \times 10^{-7}$	33	16	50	$0.106\,930\,318\,794\,09$
12	3	1	$0.438\,706\,672\,844\,35 \times 10^{-6}$	34	18	57	$-0.336\,622\,505\,741\,71$
13	3	3	$-0.322\,776\,772\,385\,70 \times 10^{-4}$	35	20	20	$0.891\,858\,453\,554\,21 \times 10^{-24}$
14	3	6	$-0.150\,339\,245\,421\,48 \times 10^{-2}$	36	20	35	$0.306\,293\,168\,762\,32 \times 10^{-12}$

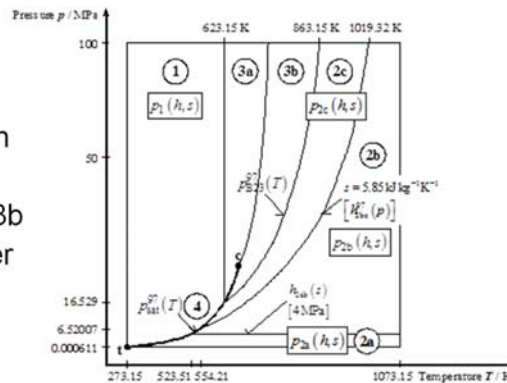
Lösungswege für die Berechnung von Stoffwerten für Arbeitsfluide der Energietechnik



Beschreibung des fluiden Zustandsbereiches mit separaten Gleichungen für alle Größen und insbesondere Umkehrfunktionen

→ z. B. IAPWS-IF97 und 4 ergänzende Standards für Wasser und Wasserdampf

Unterteilung des Gültigkeitsbereiches in die 6 Unterbereiche 1, 2a, 2b, 2c, 3a und 3b für die Berechnung der Funktion $p(h,s)$



Rückwärtsgleichung für die Temperatur T als Funktion des Druckes p und der spezifischen Enthalpie h im Unterbereich 2b

$$T_{2b}(p, h) = T^* \sum_{i=1}^{38} n_i (\pi - 2)^{I_i} (\eta - 2.6)^{J_i}$$

π – dimensionsloser Druck p

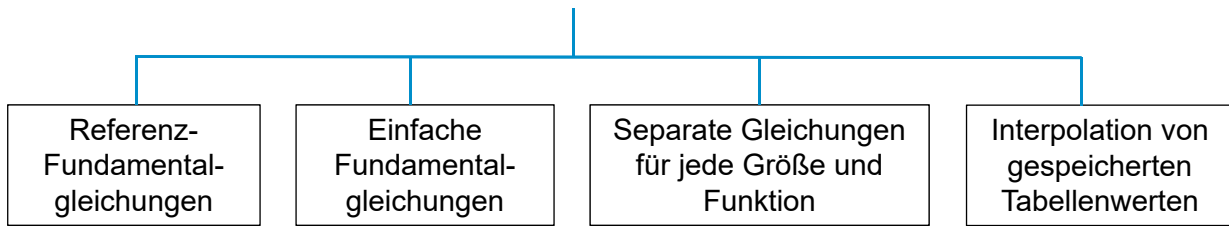
η – dimensionslose Enthalpie h

38 Koeffizienten und 76 Exponenten (ganzzahlig)

Table 2.36 Coefficients and exponents of the backward equation $T_{2b}(p, h)$ for subregion 2b in its dimensionless form, Eq. (2.23)

i	I_i	J_i	n_i	i	I_i	J_i	n_i
1	0	0	$0.148\ 950\ 410\ 795\ 16 \times 10^4$	20	2	40	$0.712\ 803\ 519\ 595\ 51 \times 10^{-4}$
2	0	1	$0.743\ 077\ 983\ 140\ 34 \times 10^3$	21	3	1	$0.110\ 328\ 317\ 899\ 99 \times 10^{-3}$
3	0	2	$-0.977\ 083\ 187\ 978\ 37 \times 10^2$	22	3	2	$0.189\ 552\ 483\ 879\ 02 \times 10^{-3}$
4	0	12	$0.247\ 424\ 647\ 056\ 74 \times 10^1$	23	3	12	$0.308\ 915\ 411\ 605\ 37 \times 10^{-2}$
5	0	18	$-0.632\ 813\ 200\ 160\ 26$	24	3	24	$0.135\ 555\ 045\ 549\ 49 \times 10^{-2}$
6	0	24	$0.113\ 859\ 521\ 296\ 58 \times 10^1$	25	4	2	$0.286\ 402\ 374\ 774\ 56 \times 10^{-6}$
7	0	28	$-0.478\ 118\ 636\ 486\ 25$	26	4	12	$-0.107\ 798\ 573\ 575\ 12 \times 10^{-4}$
8	0	40	$0.852\ 081\ 234\ 315\ 44 \times 10^{-2}$	27	4	18	$-0.764\ 627\ 124\ 548\ 14 \times 10^{-4}$
9	1	0	$0.937\ 471\ 473\ 779\ 32$	28	4	24	$0.140\ 523\ 928\ 183\ 16 \times 10^{-4}$
10	1	2	$0.335\ 931\ 186\ 049\ 16 \times 10^1$	29	4	28	$-0.310\ 838\ 143\ 314\ 34 \times 10^{-4}$
11	1	6	$0.338\ 093\ 556\ 014\ 54 \times 10^1$	30	4	40	$-0.103\ 027\ 382\ 121\ 03 \times 10^{-5}$
12	1	12	$0.168\ 445\ 396\ 719\ 04$	31	5	18	$0.282\ 172\ 816\ 350\ 40 \times 10^{-6}$
13	1	18	$0.738\ 757\ 452\ 366\ 95$	32	5	24	$0.127\ 049\ 022\ 719\ 45 \times 10^{-5}$
14	1	24	$-0.471\ 287\ 374\ 361\ 86$	33	5	40	$0.738\ 033\ 534\ 682\ 92 \times 10^{-7}$
15	1	28	$0.150\ 202\ 731\ 397\ 07$	34	6	28	$-0.110\ 301\ 392\ 389\ 09 \times 10^{-7}$

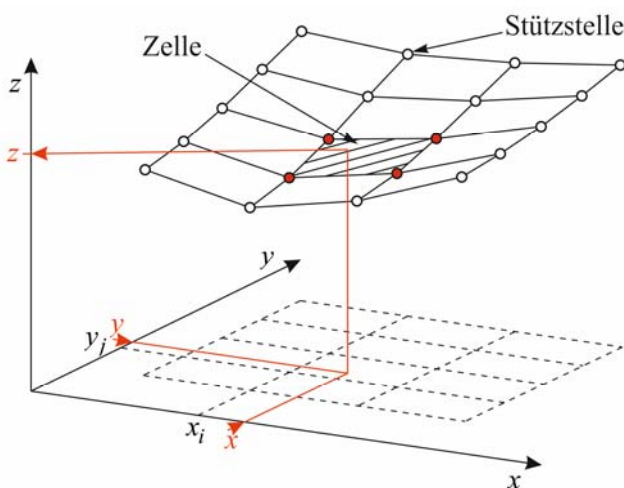
Lösungswege für die Berechnung von Stoffwerten für Arbeitsfluide der Energietechnik



Berechnung der Zustandsgrößen im gesamten Gültigkeitsbereich mit Spline-Interpolation
→ z. B. IAPWS Guideline 2015 mit dem SBTL-Verfahren für Wasserdampf und Wasser

31

Interpolation einer Zustandsgröße $z(x,y)$



- Aus einer Fundamentalgleichung werden die benötigten Werte für die Zustandsgrößen an den Stützstellen sowie die Koeffizienten der Spline-Polynome jeder Zelle berechnet und als Tabelle abgespeichert.
- Berechnung während der Prozesssimulation:
 - Zellsuche im Stützstellenraster
 - Berechnung des Spline-Polynoms der betreffenden Zelle – hier bi-quadratisch:

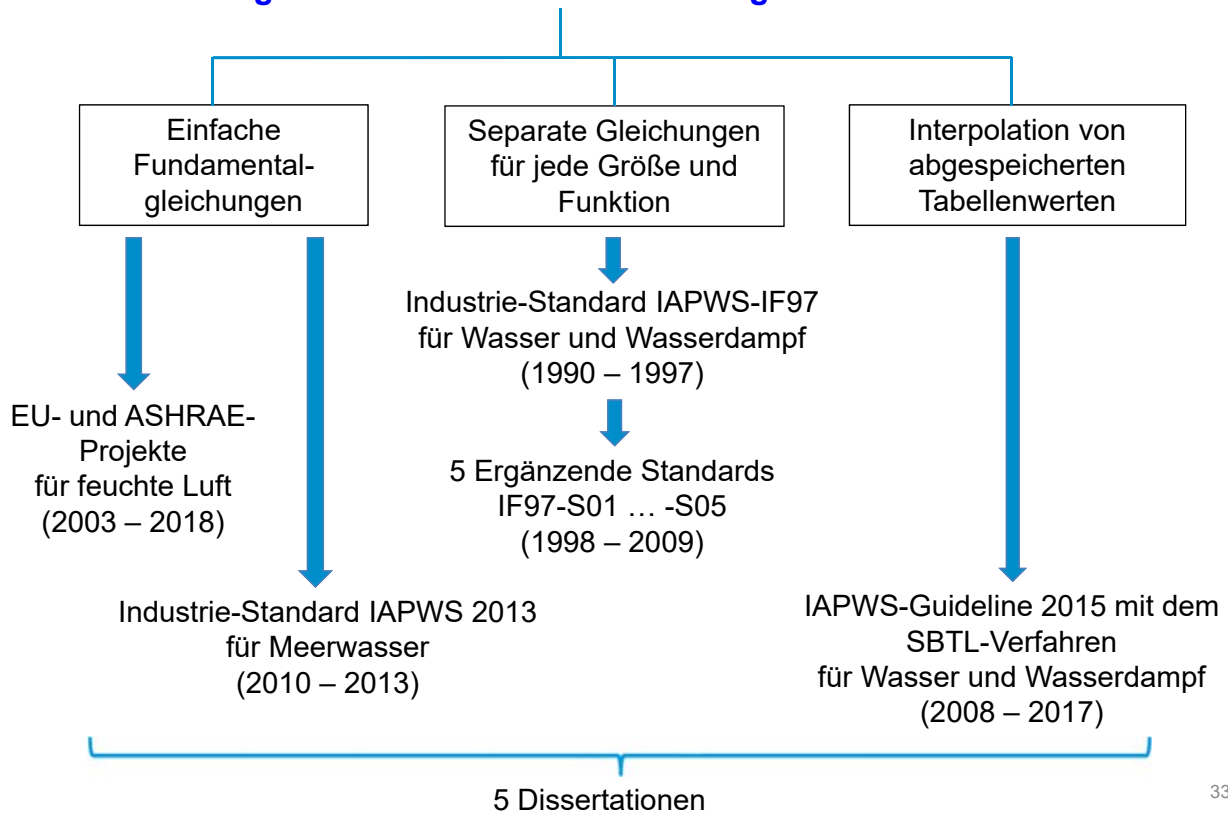
$$z(x, y) = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^3 a_{kl} (x - x_i)^{k-1} (y - y_j)^{l-1}$$



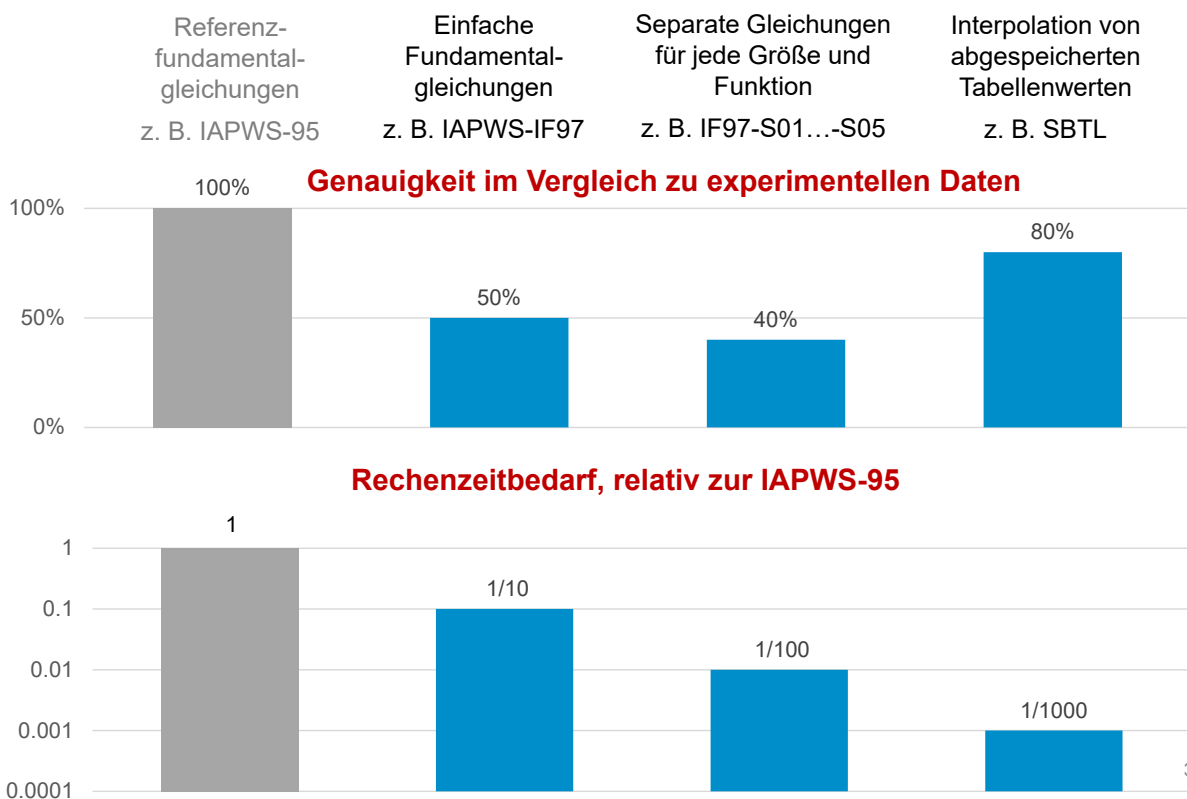
**Genauigkeit der Berechnungen ist durch Anzahl der Stützstellen bestimmbar
Geringster Rechenzeitbedarf aller 5 Lösungswege**

32

Entwicklung von Stoffwert-Berechnungsalgorithmen für ausgewählte Arbeitsfluide der Energietechnik in Zittau



Ergebnisse der entwickelten Berechnungsverfahren für Wasser und Wasserdampf



Bereitstellung von Stoffwert-Berechnungsbibliotheken als Software für die Industrie

Reine Stoffe:

- Wasserdampf, Wasser und Eis
- Luft, Stickstoff, Sauerstoff
- Kohlendioxid einschl. Trockeneis
- Ammoniak
- Wasserstoff, Helium
- Ethanol, Methanol, Kohlenwasserstoffe
- Silikonöle für ORC-Prozesse
- Kältemittel

Ideale Gasgemische:

- Brenngasgemische
- Verbrennungsgasgemische
- Feuchte Luft







Reale Stoffgemische:

- Feuchte Verbrennungsgasgemische einschl. Kohlendioxid/Wasser-Gemische
- Feuchte Luft
- Meerwasser
- Ammoniak/Wasser-Gemische
- Wasser/Lithiumbromid-Gemische

Berechenbare Größen:

- Thermodynamische Zustandsgrößen
- Transporteigenschaften
- Thermodynamische Differentialquotienten
- Umkehrfunktionen

Anschluss der Stoffwert-Bibliotheken

- FluidEXL für **Excel** 
- FluidLAB für **MATLAB** 
- FluidMAT für **Mathcad** 
- FluidEES für **Engineering Equation Solver EES** 
- FluidVIEW für **LabView** 
- FluidDYM für **Dymola** und **SimulationX** 

Interfaces für C++, Visual Basic, Fortran, Python, Modelica

Transfer in Industrie und Institutionen

**Erwerb von Lizenzen durch
mehr als 300 Unternehmen in 26 Ländern,**

u.a. Siemens (KRAWAL) , ALSTOM - General Electric (ALPRO), STEAG (EBSILON) ,
Fichtner (KPRO), LEAG, E.ON, RWE, VPC, KEMA, BASF, MAN, DLR, EnviCon, DREWAG, ...

und

über 120 Universitäten und Hochschulen in 13 Ländern,

u.a. MIT Cambridge, Univ. Maryland, Univ. Princeton (USA), Univ. Auckland (NZ), Univ. Lissabon,
RWTH Aachen, TU München, TU Dresden, TU Hamburg, TU Berlin, Univ. Stuttgart, Univ. Rostock
Ruhr-Univ. Bochum, BTU Cottbus, ...

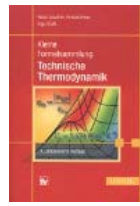
Publikationen



Wagner, W. and Kretzschmar, H.-J.:
**International Steam Tables
Properties of Water and Steam
Based on the Industrial Formulation
IAPWS-IF97, Second Edition.**

Springer-Verlag, Berlin (2008)

3. Auflage in Fertigstellung



Kretzschmar, H.-J. und Kraft, I.,
unter Mitarbeit von I. Stöcker:
**Kleine Formelsammlung Technische
Thermodynamik,**

1. bis 5. Auflage (2007 – 2016)
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser
Verlag München

Ausgabe in Russisch:

Foliant Verlag Astana (2013)



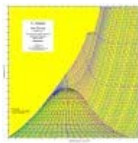
Kretzschmar, H.-J. und Stöcker, I.:
**Mollier h - s Diagram for Water and
Steam**

Springer-Verlag, Berlin (1998-2012)



Kretzschmar, H.-J.,
unter Mitarbeit von I. Stöcker:
**Kapitel 8: Thermodynamik
in: Grundwissen des Ingenieurs,**
13. und 14. Auflage (2002, 2007)

Hrsg: Hering, E. und Modler, K.-H.
Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag
München

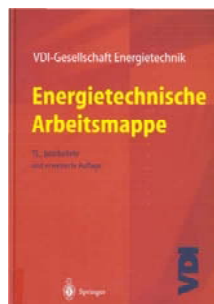


Kretzschmar, H.-J. und Stöcker, I.:
T- s Diagram for Water and Steam

Springer-Verlag, Berlin (2003)

37

Publikationen



Kretzschmar, H.-J., Stöcker, I.:
**Diagramme für Wasser und
Wasserdampf.**

In: Energietechnische Arbeitsmappe
des VDI, Springer-Verlag Berlin (2000)



Herrmann, S.; Kretzschmar, H.-J.; Gatley, D.P.:
In: **2009, 2013, 2017 ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS,**
SI and I-P Editions, Chapter 1 PSYCHROMETRICS,

Table 2: Thermodynamic Properties of Moist Air at Standard
Atmospheric Pressure.

Table 3: Thermodynamic Properties of Water at Saturation.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning
Engineers, Inc., Atlanta GA

38

Publikationen



Wagner, W., Kretzschmar, H.-J.:
Kapitel D2.1 Wasser.
 In: VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage,
 Springer-Verlag Berlin (2013)

Die 12. Auflage ist in Bearbeitung.




Wagner, W., Kretzschmar, H.-J.:
Chapter 2.1 Properties of Water and Steam.

In: VDI Heat Atlas, 2nd. ed.,
 Springer-Verlag Berlin (2010)



Mitarbeit in Wissenschaftsorganisationen

International Association for the Properties of Water and Steam (IAPWS)	Working Group Chairman 2006 - 2011
	Vorsitzender des Deutschen Nationalen Komitees 2011 - 2016
	Präsident der IAPWS 2016 - 2018
	
<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> Organisation der IAPWS-Konferenz 2016 in Dresden </div>	
American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)	Technical Committee Voting Member seit 2010
Verein Deutscher Ingenieure	Berufenes Mitglied des VDI-Fachauschusses Thermodynamik seit 2010

Schlussfolgerungen aus Forschungsarbeiten

- Hohe Lehrbelastung der Professoren
 - 18 SWS an Hochschulen für angewandte Wissenschaften
- Abminderung der Lehrbelastung für Forschungsarbeiten
- Einbeziehung der Laboringenieure in Forschung
- Gewinnung von Studierenden zur Mitarbeit
 - als Studentische Hilfskräfte
 - in Bachelor-, Diplom-, und Masterarbeiten
- Weiterführung in kooperativen Promotionsarbeiten gemeinsam mit einem Betreuer einer Universität
- Verfolgung möglichst einer Forschungslinie



Seit Gründung der Hochschule Zittau/Görlitz 1992

- Förderung von Forschungsarbeiten
- Forschung im Hauptamt bevorzugt

41

Mitarbeit in der akademischen Selbstverwaltung

Fakultät		Hochschule
Sprecher der Fachgruppe Energietechnik 1993 - 1997	Studiendekan 1994 - 2000	Mitglied des Senates 2001 - 2009 2012 - 2018
Fakultätsrat 1994 - 2008, 2012 - 2018	Forschungsbeauftragter 2002 - 2012	Vorsitzender der Studienreform- kommission 1994 - 1996
	Prodekan 2006 - 2012	Sprecher der Senatskommission „Hochschulentwicklung“ 2009 - 2012
	Dekan 2012 - 2018	Mitglied der Senatskommissionen „Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ „Strategische Entwicklungsplanung Forschung“
Organisation von zwei „Großen Absolvententreffen“ 2011 und 2015 mit je 300 Teilnehmern		Beauftragter für das Bildungsportal Sachsen der Hochschule 2003 - 2006
		Wiss. Betreuer des Zentrums für E-Learning der Hochschule am Standort Zittau 2006 - 2018









42

Auszeichnungen

Prof. Hans-Joachim-Hildebrand-Preis:	
Hr. Kleemann und Dr. Seibt	2002
Fr. Dr. Knobloch	2006
Dr. Nimitz	2009
Dr. Kunick	2017
ASHRAE Homer Addams Award, Dr. Herrmann	2011
IAPWS Honorary Fellow Award	2012
Poster Award der Turbo Expo in Seoul, Dr. Kunick	2016
Lehrpreis der Hochschule Zittau/Görlitz, gemeinsam mit Fr. Dr. Stöcker (postum)	2016
Nominierung für den Sächsischen Lehrpreis	2016
EBSILON-Power-User durch STEAG	2017

43

Zusammenfassung

Studium, TU Dresden 1974 - 1978	 Dr. Klinger	
Promotionsstudium, TU Dresden 1978 – 1981 - Promotion 1982	 Prof. Elsner	 Dr. Klinger
Assistenz, TU Dresden 1982 - 1984	 Prof. Dittmann	 Dr. Klinger
Externe Habilitation, TU Dresden 1990 Fachliche Betreuung der ersten Promotion	 Prof. Dittmann	 Prof. Zschunke
Zusammentreffen mit Prof. Wagner, Ruhr-Universität Bochum 1989	 Prof. Wagner	

44

Bearbeitung des IAPWS-Projektes
 Neue Industrie-Formulation für Wasser und
 Wasserdampf (IAPWS-IF97)
 1990 - 1997



Prof. Wagner



Dr. Willkommen



Dr. Trübenbach

Berufung an Hochschule Zittau/Görlitz
 1993
 - Frau Dr. Stöcker Laboringenieurin



Fr. Dr. Stöcker

Mein erster wiss. Mitarbeiter an der
 Hochschule Zittau/Görlitz



Hr. Schmaus

Erarbeitung von 4 ergänzenden Standards zur
 IAPWS-IF97
 1999 - 2004



Fr. Dr. Knobloch

Kompetenz auf dem Gebiet der Informatik



Fr. Jähne



Hr. Buchholz

Erarbeitung von EU- und ASHRAE-
 Projekten in Verbindung mit feuchter Luft
 und IAPWS-Projekte zu Meerwasser
 seit 2005



Dr. Herrmann

IAPWS-Projekt: Schnelle Berechnung
 von Stoffwerten mit Spline-Interpolation
 2008 – 2017



Dr. Kunick

Sprachkompetenz



Fr. Nicke



Hr. Cope

Wahl zum Dekan
 2012
 Zusammenarbeit mit Dekanatsrätin und
 Dekanatssekretärin



Fr. Pfitzner



Fr. Hörger

Hr. Freudenreich entlastet die Arbeit im
 Labor
 seit 2014



Hr. Freudenreich

Fr. Dr. Stöcker verstirbt nach kurzer schwerer Krankheit am 20.06.2015



Fr. Dr. Stöcker

Hr. Dr. Herrmann übernimmt das Labor und Lehre seit 2015



Dr. Herrmann

Fr. Schneider entlastet mich als Lehrkraft für besondere Aufgaben seit 2015



Fr. Schneider

Person, die alles mitgetragen hat:



47

Fachgebiet Technische Thermodynamik



Im Anschluss:
Erfahrungsaustausch mit Imbiss
im 1. Obergeschoss.

Herzlichen Dank für Ihr Kommen!

Diese Folien finden Sie auf
www.thermodynamik-zittau.de unter „Aktuelles“.