

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Thermodynamische Stoffwerte von  
feuchter Luft und Verbrennungsgasen

VDI 4670

Blatt 1 / Part 1

Thermodynamic properties of  
humid air and combustion gases

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The German version of this guideline shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

Inhalt	Seite	Contents	Page
<b>1 Zweck und Geltungsbereich</b> . . . . .	2	<b>1 Purpose and scope of application</b> . . . . .	2
1.1 Zweck der Richtlinie . . . . .	2	1.1 Purpose of the guideline . . . . .	2
1.2 Geltungsbereich . . . . .	2	1.2 Scope of application . . . . .	2
1.3 Verwendete Formelzeichen . . . . .	4	1.3 Symbols used . . . . .	4
<b>2 Thermodynamische Eigenschaften feuchter Luft und nicht dissoziierter Verbrennungsgase</b> . . . . .	5	<b>2 Thermodynamic properties of humid air and non-dissociated combustion gases</b> . . . . .	5
2.1 Definitionen und Umrechnungsvorschriften	5	2.1 Definitions and conversion rules . . . . .	5
2.2 Berechnung der Dichte . . . . .	7	2.2 Calculation of density . . . . .	7
2.3 Berechnung der isobaren Wärmekapazität . . . . .	7	2.3 Calculation of isobaric heat capacity . . . . .	7
2.4 Berechnung der Enthalpie . . . . .	9	2.4 Calculation of enthalpy . . . . .	9
2.5 Berechnung der Entropie . . . . .	10	2.5 Calculation of entropy . . . . .	10
2.6 Beschleunigte Berechnungsmethoden . . . . .	12	2.6 Accelerated methods of calculation . . . . .	12
2.7 Überprüfung von Anwenderprogrammen . . . . .	14	2.7 Verification of user programs . . . . .	14
<b>3 Vereinfachte Berücksichtigung von Dissoziation</b> . . . . .	14	<b>3 Simplified inclusion of dissociation</b> . . . . .	14
3.1 Gültigkeitsbereich . . . . .	14	3.1 Scope of validity . . . . .	14
3.2 Berechnung der Reaktionsgrößen . . . . .	14	3.2 Calculation of reaction variables . . . . .	14
3.3 Berechnung der isobaren Wärmekapazität . . . . .	16	3.3 Calculation of isobaric heat capacity . . . . .	16
3.4 Berechnung der Enthalpie . . . . .	16	3.4 Calculation of enthalpy . . . . .	16
3.5 Berechnung der Entropie . . . . .	16	3.5 Calculation of entropy . . . . .	16
3.6 Überprüfung von Anwenderprogrammen . . . . .	17	3.6 Verification of user programs . . . . .	17
Schrifttum . . . . .	18	Bibliography . . . . .	18
<b>Anhang A</b> Der Einfluss von Dissoziationseffekten und Grenzen der vereinfachten Berücksichtigung . . . . .	19	<b>Annex A</b> The influence of dissociation effects and the limits of simplified consideration of dissociation . . . . .	19
<b>Anhang B</b> Der Einfluss des Realgasverhaltens von feuchter Luft und nicht dissoziierten Verbrennungsgasen . . . . .	22	<b>Annex B</b> The influence of the real-gas behaviour of humid air and non-dissociated combustion gases . . . . .	22
B1 Thermodynamische Zustandsgrößen . . . . .	22	B1 Thermodynamic properties . . . . .	22
B2 Verdichter- und Turbinenwirkungsgrade . . . . .	24	B2 Compressor and turbine efficiencies . . . . .	24
<b>Anhang C</b> Die näherungsweise Bestimmung des Schwefelsäure-Taupunktes . . . . .	27	<b>Annex C</b> The approximate determination of the sulphuric acid dew-point . . . . .	27
<b>Anhang D</b> Die Berechnung von Enthalpie und Entropie im Umgebungszustand . . . . .	28	<b>Annex D</b> Calculation of enthalpy and entropy in the ambient state . . . . .	28
<b>Anhang E</b> Vergleiche mit anderen Stoffdatenmodellen . . . . .	30	<b>Annex E</b> Comparisons to other thermodynamic property models . . . . .	30
<b>Anhang F</b> Anmerkungen zur Unsicherheit . . . . .	31	<b>Annex F</b> Comments on uncertainty . . . . .	31

VDI-Gesellschaft Energietechnik

Fachausschuss Thermodynamische Stoffwerte von feuchter Luft und Verbrennungsgasen

## 1 Zweck und Geltungsbereich

### 1.1 Zweck der Richtlinie

Die Kenntnis der thermodynamischen Stoffdaten des Arbeitsfluides in thermischen Arbeitsmaschinen oder Apparaten ist Voraussetzung für alle Berechnungen, die bei der Auslegung, bei der Justierung, bei Gewährleistungsnachweisen und für die Überwachung der zu untersuchenden Maschinen oder Apparate erforderlich sind. Beim Ausarbeiten der Richtlinie für die Stoffwerte von feuchter Luft (im Verdichter) und Verbrennungsgasen (in der Turbine) wurde von Berechnungen für Gasturbinen ausgegangen; die Stoffwerte können aber auch für andere Komponenten und Prozesse mit den entsprechenden Gasen verwendet werden, sofern die Grenzen der Geltungsbereiche beachtet werden.

In der Praxis wurden bisher mindestens sieben zum Teil erheblich voneinander abweichende mathematische Formulierungen für Zustandsgrößen von Luft und Verbrennungsgasen angewendet, die immer wieder zu Diskussionen und Fehlinterpretationen führten, vgl. Anhang E und [4]. Bei der steigenden Bedeutung von Gasturbinen für die Energiewirtschaft sind solche Unsicherheiten nicht zu tolerieren.

Ziel dieser neuen VDI-Richtlinie ist daher,

- das thermodynamische Verhalten der Arbeitsgase unter Berücksichtigung zu erwartender technischer Entwicklungen im gesamten relevanten Zustandsbereich möglichst genau wiederzugeben
- die Einflüsse von Dissoziation, von Realgasverhalten und von Kondensation, die einfache Modelle in ihrer Genauigkeit eingrenzen, aufzuzeigen und, so nötig, mit zu erfassen
- die Formulierung der Gleichungen hinsichtlich Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit zu optimieren
- durch Vergleiche Unzulänglichkeiten weit verbreiteter Stoffdatenmodelle aufzuzeigen, um so Anwendern die Notwendigkeit einer gemeinsamen und ausreichend genauen Datenbasis bewusst zu machen.

Ziel der vorliegenden Richtlinie ist nicht die Bestimmung der Zusammensetzung von Gasgemischen. Ein Beispiel für die Berechnung der Zusammensetzung von feuchter Luft und Rauchgasen findet sich in VDI 2048 Blatt 3 [19].

### 1.2 Geltungsbereich

In Abschnitt 2 der vorliegenden VDI-Richtlinie werden *feuchte Luft* und *Verbrennungsgase* zunächst unter Vernachlässigung von Dissoziationseffekten als

## 1 Purpose and scope of application

### 1.1 Purpose of the guideline

The knowledge of the thermodynamic properties of working fluids in thermal machines or apparatus is a precondition of all calculations required in the design and adjustment of, in guarantee certification for, and in monitoring the machines or apparatus in question. Preparation of the guideline for the thermodynamic properties of humid air (in the compressor) and combustion gases (in the turbine) was based on calculations for gas turbines; the corresponding properties can, however, also be used for other components and processes and their associated gases provided the limits of the scopes of application are observed.

In practice, at least seven mathematical formulations, sometimes differing considerably from each other, have been used to date for the thermodynamic properties of air and combustion gases and persistently give reason for discussions and incorrect interpretations, cf. Annex E and [4]. In the light of the increasing importance of gas turbines to the power-supply industry such uncertainties should no longer be tolerated.

The aim of this new guideline will therefore be

- to reproduce as accurately as possible the thermodynamic behaviour of the process gases within the entire region of interest when taking into consideration the technological developments to be expected
- to demonstrate the influences of dissociation, of real-gas behaviour and of condensation which limit the accuracy of the simple models, and, where necessary, to include such influences
- to optimize the formulation of the equations with regard to accuracy and calculating speed
- by means of comparisons to demonstrate the shortcomings of popular physical property models so as to make users aware of the necessity for a common database of sufficient accuracy

Purpose of this guideline is not the estimation of the composition of gas mixtures. For the calculation of the composition of humid air and combustion gases an example may be found in VDI 2048-3 [19].

### 1.2 Scope of application

In Section 2 of the present guideline *humid air* and *combustion gases* are first considered as *mixtures of ideal gases in equilibrium*, but without taking disso-

im Gleichgewicht befindliche Gemische idealer Gase mit den Komponenten

- Stickstoff
- Sauerstoff
- Argon
- Neon
- Wasser
- Kohlendioxid
- Kohlenmonoxid
- Schwefeldioxid

betrachtet. Unter diesen Annahmen gelten in dem Temperaturbereich

$$200 \text{ K} \leq T \leq 3300 \text{ K}$$

die zur Berechnung kalorischer Zustandsgrößen verwendeten empirischen Gleichungen, Gl. (10) bis Gl. (21), ohne Beschränkung des Druckbereichs. Allerdings führen die zu Grunde liegenden Annahmen in der Praxis zu einer wesentlichen Eingrenzung des Gültigkeitsbereichs.

Bei Temperaturen über 1200 K werden kalorische Zustandsgrößen von Verbrennungsgasen signifikant von *Dissoziationseffekten* beeinflusst. Eine exakte Berücksichtigung dieser Effekte erfordert eine numerisch und programmtechnisch aufwendige Berechnung von Simultangleichgewichten. In Abschnitt 3 der vorliegenden Richtlinie wird ein vereinfachtes Modell zur Berücksichtigung von Dissoziationseffekten vorgestellt, das in der Regel ausreichend genaue Ergebnisse liefert, numerisch und programmtechnisch aber sehr viel einfacher ist als exakte Modelle und höhere Rechengeschwindigkeiten zulässt. Details zum Gültigkeitsbereich des vereinfachten Dissoziationsmodells finden sich in Abschnitt 3.1; Details zum Einfluss von Dissoziationseffekten finden sich in Anhang A.

Insbesondere bei niedrigen Temperaturen und hohen Drücken gewinnt das *Realgasverhalten* von feuchter Luft und von Verbrennungsgasen an Bedeutung. Für Anwendungen im Rahmen von Gewährleistungsnachweisen an Gasturbinenanlagen kann dieser Effekt in der Regel vernachlässigt werden. Sollen die in Abschnitt 2 beschriebenen Berechnungsvorschriften für die Bestimmung von  $c_p^o$ ,  $h^o$  und  $s^o$  aber für andere Anwendungen verwendet werden, so kann die Vernachlässigung des Realgaseinflusses zu signifikanten Fehlern führen. Exemplarische Aussagen zum Einfluss von Realgaseffekten finden sich in Anhang B.

Aus anlagentechnischen Gründen wird in der Regel eine Unterschreitung der *Schwefelsäure-Taupunkttemperatur* vermieden. Obwohl die Lage des Schwefelsäure-Taupunktes für die Energiebilanzen und Wirkungsgradberechnungen von Gewährleistungs-

ciation effects into account. The following components are considered

- Nitrogen
- Oxygen
- Argon
- Neon
- Water
- Carbon dioxide
- Carbon monoxide
- Sulphur dioxide

With these assumptions, in the temperature range

$$200 \text{ K} \leq T \leq 3300 \text{ K}$$

Equations (10) to (21), empirical equations used for calculating caloric state variables, will apply without limitation of the pressure range. However, these basic assumptions will in practice lead to a considerable restriction in the scope of validity.

At temperatures above 1200 K, the caloric properties of combustion gases will be significantly affected by *dissociation effects*. These effects require the calculation of simultaneous equilibria which is both numerically complex and involves elaborate programming. In Section 3 of the present guideline a simplified model which takes dissociation effects into account is introduced; it delivers results of adequate accuracy but both numerically and from the programming point of view is a considerably simpler and permits higher computation speeds than exact models. Details of the scope of application of the simplified dissociation model will be found in Section 3.1 while details of the influence of dissociation effects can be found in Annex A.

It is particularly at low temperatures and high pressures that the *real-gas behaviour* of humid air and combustion gases is increasing in importance. These effects can usually be ignored in applications relating to guarantee data certification for gas-turbine installations. But if the calculation rules described in Section 2 for determining  $c_p^o$ ,  $h^o$  and  $s^o$  are to be used for other applications, ignoring the real-gas influence may result in significant errors occurring. Information on the influence of real-gas effects is provided in Annex B.

For reasons related to process technology, falling below the *dew-point of sulphuric acid* is usually avoided. Although the position of the sulphuric acid dew-point has no relevance to the energy balances and efficiency calculations in guarantee certification,