

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

Frühere Ausgabe: 02/03  
Former edition: 02/03

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

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

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung . . . . .	2	Preliminary note . . . . .	2
Einleitung . . . . .	2	Introduction . . . . .	2
<b>1 Anwendungsbereich . . . . .</b>	<b>3</b>	<b>1 Scope . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2 Formelzeichen . . . . .</b>	<b>3</b>	<b>2 Symbols . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>3 Gültigkeit der Gleichungen . . . . .</b>	<b>4</b>	<b>3 Validity of equations . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>4 Thermodynamische Eigenschaften feuchter Luft und nicht dissoziierter Verbrennungsgase . . . . .</b>	<b>6</b>	<b>4 Thermodynamic properties of humid air and non-dissociated combustion gases . . . . .</b>	<b>6</b>
4.1 Definitionen und Umrechnungsvorschriften . . . . .	6	4.1 Definitions and conversion rules . . . . .	6
4.2 Berechnung der Dichte . . . . .	7	4.2 Calculation of density . . . . .	7
4.3 Berechnung der isobaren Wärmekapazität . . . . .	8	4.3 Calculation of isobaric heat capacity . . . . .	8
4.4 Berechnung der Enthalpie . . . . .	9	4.4 Calculation of enthalpy . . . . .	9
4.5 Berechnung der Entropie . . . . .	11	4.5 Calculation of entropy . . . . .	11
4.6 Beschleunigte Berechnungsmethoden . . . . .	12	4.6 Accelerated methods of calculation . . . . .	12
4.7 Überprüfung von Anwenderprogrammen . . . . .	13	4.7 Verification of user programs . . . . .	13
<b>5 Vereinfachte Berücksichtigung von Dissoziation . . . . .</b>	<b>14</b>	<b>5 Simplified inclusion of dissociation . . . . .</b>	<b>14</b>
5.1 Gültigkeitsbereich . . . . .	14	5.1 Scope of validity . . . . .	14
5.2 Berechnung der Reaktionsgrößen . . . . .	15	5.2 Calculation of reaction variables . . . . .	15
5.3 Berechnung der isobaren Wärmekapazität . . . . .	16	5.3 Calculation of isobaric heat capacity . . . . .	16
5.4 Berechnung der Enthalpie . . . . .	16	5.4 Calculation of enthalpy . . . . .	16
5.5 Berechnung der Entropie . . . . .	16	5.5 Calculation of entropy . . . . .	16
5.6 Überprüfung von Anwenderprogrammen . . . . .	17	5.6 Verification of user programs . . . . .	17
<b>Anhang A Einfluss von Dissoziationseffekten und Grenzen der vereinfachten Berücksichtigung . . . . .</b>	<b>18</b>	<b>Annex A Influence of dissociation effects and the limits of simplified consideration of dissociation . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>Anhang B Einfluss des Realgasverhaltens von feuchter Luft und nicht dissoziierten Verbrennungsgasen . . . . .</b>	<b>22</b>	<b>Annex B Influence of the real-gas behaviour of humid air and non-dissociated combustion gases . . . . .</b>	<b>22</b>
B1 Thermodynamische Zustandsgrößen . . . . .	22	B1 Thermodynamic properties . . . . .	22
B2 Verdichter- und Turbinenwirkungsgrade . . . . .	24	B2 Compressor and turbine efficiencies . . . . .	24

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU)

Fachbereich Energiewandlung und -anwendung

VDI-Handbuch Energietechnik  
VDI/VDE-Handbuch Prozessmesstechnik und Strukturanalyse

	Seite
<b>Anhang C</b> Approximative Bestimmung des Schwefelsäure-Taupunkts. . . . .	27
<b>Anhang D</b> Berechnung von Enthalpie und Entropie im Umgebungszustand . . . . .	28
<b>Anhang E</b> Vergleiche mit anderen Stoffdatenmodellen . . . . .	30
<b>Anhang F</b> Anmerkungen zur Unsicherheit. . . . .	32
Schrifttum . . . . .	34

	Page
<b>Annex C</b> Approximate determination of the sulphuric acid dew-point . . . . .	27
<b>Annex D</b> Calculation of enthalpy and entropy in the ambient state. . . . .	28
<b>Annex E</b> Comparisons to other thermodynamic-property models . . . . .	30
<b>Annex F</b> Comments on uncertainty . . . . .	32
Bibliography . . . . .	34

### Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

### Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/4670](http://www.vdi.de/4670).

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/4670](http://www.vdi.de/4670).

### Einleitung

Die Kenntnis der thermodynamischen Stoffdaten des Arbeitsfluids 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 Be-

### Introduction

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 standard 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 increas-

deutung von Gasturbinen für die Energiewirtschaft sind solche Unsicherheiten nicht zu tolerieren.

ing importance of gas turbines to the power-supply industry such uncertainties should no longer be tolerated.

**1 Anwendungsbereich**

Die Richtlinie gilt für die thermodynamische Auslegung von Komponenten energietechnischer und verfahrenstechnischer Anlagen mit feuchter Luft und Verbrennungsgasen wie Dampferzeuger, Gasturbinen, Industrieöfen und Trockner.

**1 Scope**

This standard applies to the thermodynamic design of components in energy and process installations with humid air and combustion gases, such as steam generators, gas turbines, industrial furnaces and driers.

Diese Richtlinie ermöglicht:

This standard makes possible:

- 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.

- 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

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.

Purpose of this standard 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 Part 3.

**2 Formelzeichen**

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Formelzeichen verwendet:

**2 Symbols**

The following symbols are used throughout this standard:

Formelzeichen / Symbol	Bezeichnung / Designation	Einheit / Unit
A	empirischer Parameter zur Bestimmung von Reaktionsgrößen / empirical parameter for determining reaction variables	–
a	Temperaturkoeffizient der molaren isobaren Wärmekapazität / temperature coefficient of the molar isobaric heat capacity	J/(mol·K)
B	empirischer Parameter zur Bestimmung von Reaktionsgrößen / empirical parameter for determining reaction variables	K
b	Exponent / exponent	–
C	empirischer Parameter zur Bestimmung von Reaktionsgrößen / empirical parameter for determining reaction variables	J/(mol·K)
c	Parameter zur Berechnung der molaren Enthalpie / parameter for calculating the molar enthalpy	J/mol