

J. Ahrendts · S. Kabelac

Das
Ingenieurwissen
Technische
Thermodynamik

 Springer Vieweg

Ingenieurwissen

J. Ahrendts · S. Kabelac

Das
Ingenieurwissen
Technische
Thermodynamik

Ingenieurwissen



Springer Vieweg

Das Ingenieurwissen: Technische Thermodynamik

Joachim Ahrendts · Stephan Kabelac

Das Ingenieurwissen: Technische Thermodynamik

 Springer Vieweg

Joachim Ahrendts
Bad Oldesloe, Deutschland

Stephan Kabelac
Helmut-Schmidt-Universität
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-642-41119-9
DOI 10.1007/978-3-642-41120-5

ISBN 978-3-642-41120-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Das vorliegende Buch ist Teil des ursprünglich erschienenen Werks „HÜTTE - Das Ingenieurwissen“, 34. Auflage.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Die HÜTTE Das Ingenieurwissen ist ein Kompendium und Nachschlagewerk für unterschiedliche Aufgabenstellungen und Verwendungen. Sie enthält in einem Band mit 17 Kapiteln alle Grundlagen des Ingenieurwissens:

- Mathematisch-naturwissenschaftliche Grundlagen
- Technologische Grundlagen
- Grundlagen für Produkte und Dienstleistungen
- Ökonomisch-rechtliche Grundlagen

Je nach ihrer Spezialisierung benötigen Ingenieure im Studium und für ihre beruflichen Aufgaben nicht alle Fachgebiete zur gleichen Zeit und in gleicher Tiefe. Beispielsweise werden Studierende der Eingangsemester, Wirtschaftsingenieure oder Mechatroniker in einer jeweils eigenen Auswahl von Kapiteln nachschlagen. Die elektronische Version der Hütte lässt das Herunterladen einzelner Kapitel bereits seit einiger Zeit zu und es wird davon in beträchtlichem Umfang Gebrauch gemacht.

Als Herausgeber begrüßen wir die Initiative des Verlages, nunmehr Einzelkapitel in Buchform anzubieten und so auf den Bedarf einzugehen. Das klassische Angebot der Gesamt-Hütte wird davon nicht betroffen sein und weiterhin bestehen bleiben. Wir wünschen uns, dass die Einzelbände als individuell wählbare Bestandteile des Ingenieurwissens ein eigenständiges, nützliches Angebot werden.

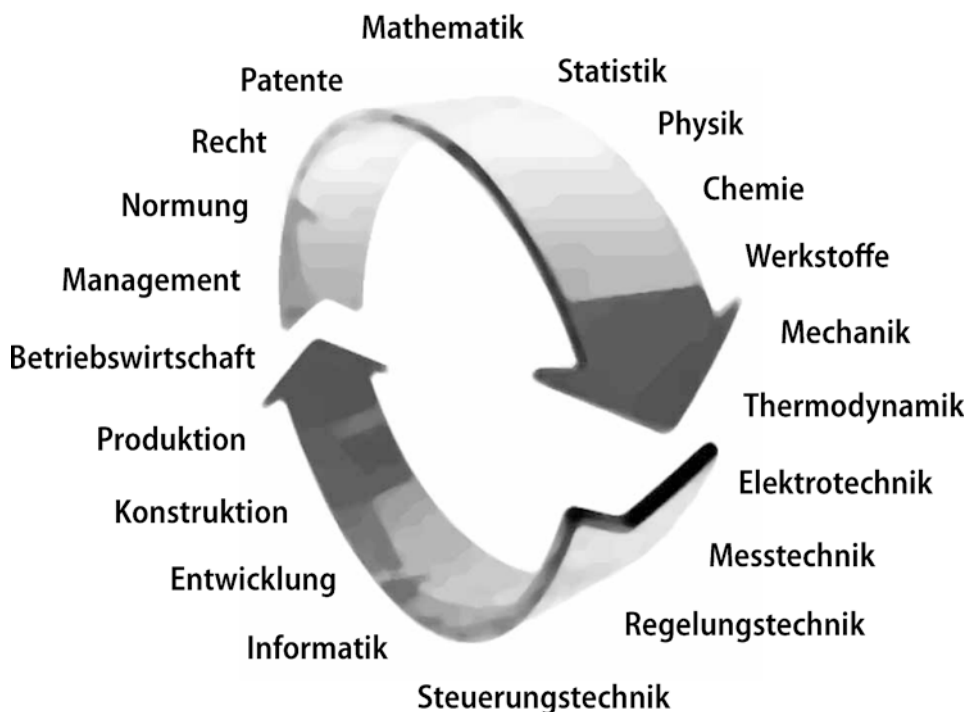
Unser herzlicher Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen für ihre Beiträge und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer-Verlages für die sachkundige redaktionelle Betreuung sowie dem Verlag für die vorzügliche Ausstattung der Bände.

Berlin, August 2013

H. Czichos, M. Hennecke

Das vorliegende Buch ist dem Standardwerk *HÜTTE Das Ingenieurwissen 34. Auflage* entnommen. Es will einen erweiterten Leserkreis von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern ansprechen, der nur einen Teil des gesamten Werkes für seine tägliche Arbeit braucht. Das Gesamtwerk ist im sog. Wissenskreis dargestellt.

Das Ingenieurwissen Grundlagen



Inhaltsverzeichnis

Technische Thermodynamik

J. Ahrendts, S. Kabelac

1	Grundlagen	1
1.1	Energie und Energieformen	1
	1.1.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik – 1.1.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	
1.2	Fundamentalgleichungen	4
	1.2.1 Innere Energie – 1.2.2 Spezifische, molare und partielle molare Größen – 1.2.3 Legendre-Transformierte der inneren Energie	
1.3	Gleichgewichte	7
	1.3.1 Extremalbedingungen – 1.3.2 Notwendige Gleichgewichtsbedingungen – 1.3.3 Stabilitätsbedingungen und Phasenzerrfall	
1.4	Messung der thermodynamischen Temperatur	11
1.5	Bilanzgleichungen der Thermodynamik	13
	1.5.1 Stoffmengen- und Massenbilanzen – 1.5.2 Energiebilanzen – 1.5.3 Entropiebilanzen, Bernoulli'sche Gleichung	
1.6	Energieumwandlung	18
	1.6.1 Beispiele stationärer Energiewandler, Kreisprozesse – 1.6.2 Wertigkeit von Energieformen	
2	Stoffmodelle	22
2.1	Reine Stoffe	23
	2.1.1 Ideale Gase – 2.1.2 Inkompressible Fluide – 2.1.3 Reale Fluide – 2.1.4 Fundamentalgleichungen	
2.2	Gemische	33
	2.2.1 Ideale Gasgemische – 2.2.2 Gas-Dampf-Gemische, Feuchte Luft – 2.2.3 Reale Gemische	
3	Phasen- und Reaktionsgleichgewichte	46
3.1	Phasengleichgewichte reiner Stoffe	46
	3.1.1 p, v, T -Fläche – 3.1.2 Koexistenzkurven – 3.1.3 Sättigungsgrößen des Nassdampfgebietes – 3.1.4 Eigenschaften von nassem Dampf – 3.1.5 T_s - und h_s -Diagramm	
3.2	Phasengleichgewichte fluider Mehrstoffsysteme	51
	3.2.1 Phasendiagramme – 3.2.2 Differenzialgleichungen der Phasengrenzkurven – 3.2.3 Punktweise Berechnung von Phasengleichgewichten	
3.3	Gleichgewichte reagierender Gemische	59
	3.3.1 Thermochemische Daten – 3.3.2 Gleichgewichtsalgorithmus – 3.3.3 Empfindlichkeit gegenüber Parameteränderungen	
4	Energie- und Stofftransport in Temperatur- und Konzentrationsfeldern	65
4.1	Konstitutive Gleichungen	65
	4.1.1 Fourier'sches Gesetz – 4.1.2 Maxwell-Stefan'sche Gleichungen und Fick'sches Gesetz	
4.2	Bilanzgleichungen der Thermofluidodynamik	74
	4.2.1 Stoffbilanzen – 4.2.2 Impuls- und mechanische Energiebilanz – 4.2.3 Energiebilanz – 4.2.4 Entropiebilanz und konstitutive Gleichungen	
4.3	Feldgleichungen der intensiven Zustandsgrößen	78
	4.3.1 Kennzahlen bei erzwungener Konvektion – 4.3.2 Kennzahlen bei natürlicher Konvektion	
4.4	Turbulente Strömungen	81
	4.4.1 Reynolds'sche Gleichungen – 4.4.2 Wandgesetze – 4.4.3 Turbulenzmodelle	

4.5	Grenzschichten	85
	4.5.1 Grenzschichtgleichungen bei erzwungener Konvektion –	
	4.5.2 Grenzschichtgleichungen bei natürlicher Konvektion	
4.6	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	89
	Literatur	92

Technische Thermodynamik

J. Ahrendts
S. Kabelac

Die Thermodynamik ist eine Grundlagenwissenschaft, in welcher physikalische Objekte abstrahiert unter dem Gesichtspunkt der Energiewandlung betrachtet werden. Die Energie in ihren verschiedenen ineinander umwandelbaren Erscheinungsformen stellt ein verknüpfendes Band zwischen allen in der Natur wie auch in der Technik ablaufenden Vorgängen dar. Das Fundament der Thermodynamik sind die *Hauptsätze*, in denen die Existenz und Eigenschaften der Energie und der Entropie formuliert sind. Diese Größen werden auch bei der Physik im Kapitel B thematisiert. Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik begründen die Energie- und Entropiebilanzgleichungen, die eine zentrale Bedeutung in der Auslegung und Bewertung von technischen wie natürlichen Prozessen haben. Weder die Energie noch die Entropie sind einer direkten Messung zugänglich, sodass ein Geflecht aus Zustandsgleichungen die Verknüpfung zwischen den messbaren Zustandsgrößen wie Temperatur und Druck und den Zustandsgrößen in den Bilanzgleichungen herstellt. Aus den Hauptsätzen resultieren auch ordnende Beziehungen zwischen den Eigenschaften der Materie in ihren Gleichgewichtszuständen sowie Aussagen über die Möglichkeiten und Grenzen von Energieumwandlungen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Thermodynamik fluider Nichtelektrolyt-Phasen. Auch die statistische Thermodynamik bleibt ausgeklammert, Hinweise hierzu finden sich im Kapitel B 8.9.

Das vorliegende Kapitel zur *Technischen Thermodynamik* gliedert sich in die vier Teile

- 1 Grundlagen
- 2 Stoffmodelle und Zustandsgleichungen
- 3 Phasen- und Reaktionsgleichgewichte
- 4 Energie- und Stofftransport in Temperatur- und Konzentrationsfeldern

Der erste Teil führt die beiden Hauptsätze und, darauf aufbauend, die Energie- und die Entropie-

bilanzgleichung ein. Aus dem zweiten Hauptsatz werden Gleichgewichts- und Stabilitätsbedingungen abgeleitet, zudem werden grundlegende Energieumwandlungsprozesse vorgestellt. Der zweite Teil führt die zur Auswertung der Bilanzgleichungen notwendigen Zustandsgleichungen ein, verbunden mit den zugehörigen Stoffmodellen. Für vereinfachte Betrachtungen werden die beiden Modellstoffe *ideales Gas* sowie *inkompressibles Fluid* bereitgestellt. Im dritten Teil wird auf die in der Verfahrenstechnik und der Chemie wichtigen Berechnungsgleichungen für Phasengleichgewichte sowie Reaktionsgleichgewichte eingegangen. Die Zusammensetzung der im Gleichgewicht stehenden Phasen ist u. a. für die thermische Trenntechnik grundlegend. Im vierten Teil wird in die kinetischen Transportansätze für den Wärme- und Stofftransport eingeführt. Zusammen mit den Bilanzgleichungen und den Stoffmodellen ergeben sich hieraus die Differenzialgleichungen zur Berechnung von Temperatur- und Konzentrationsfeldern.

1 Grundlagen

Ein physikalisches Objekt heißt in der Thermodynamik ein System und die Grenze, die es von seiner Umgebung trennt, Systemgrenze. Jedes System ist Träger physikalischer Eigenschaften, die als Variablen oder Zustandsgrößen bezeichnet werden. In einem bestimmten Zustand haben diese Variablen feste Werte.

1.1 Energie und Energieformen

1.1.1 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Die Energie als zentrale Zustandsgröße der Thermodynamik wird im ersten Hauptsatz durch folgende Postulate eingeführt: