
Aufgabensammlung Technische Thermodynamik

Martin Dehli

Aufgabensammlung Technische Thermodynamik

Mit vollständigen Lösungen

3. Auflage

 Springer Vieweg

Martin Dehli
Fakultät Angewandte Naturwissenschaften,
Energie- und Gebäudetechnik
Hochschule Esslingen
Esslingen, Deutschland

ISBN 978-3-658-44241-5 ISBN 978-3-658-44242-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-44242-2>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2015, 2018, 2024

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Eric Blaschke

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort zur 3. Auflage

Die Technische Thermodynamik zählt zu den grundlegenden Wissensbereichen des Maschinenbaus, der Energietechnik, der Kraftfahrzeugtechnik, der Versorgungstechnik, der Gebäudetechnik, der Umwelttechnik sowie weiterer Fachgebiete der Ingenieurwissenschaften. Für Studierende erscheint die Thermodynamik in Teilbereichen als eher schwieriges Fach, weil beim Wissenserwerb – etwa bei der Erarbeitung und Nutzung des Energieerhaltungssatzes oder der Entropie als grundlegender Zustandsgröße – erhöhte Anforderungen an die Abstraktionsfähigkeit gestellt werden.

Deshalb erweist es sich als nützlich, die erworbenen Kenntnisse anhand von zahlreichen praktischen Übungsbeispielen zu festigen und zu vertiefen. Damit lassen sich Vorlesungsinhalte selbstständig nacharbeiten. Daneben kann die Aufgabensammlung auch zur Vorbereitung auf Prüfungen dienen. Durch eine schrittweise Aufgabenstellung werden die Lösungswege vorbereitet, um auf diese Weise auf die ausführlichen Lösungen hinzuführen. Zahlreiche im Buch enthaltene Aufgaben und deren Lösungen sind für Lehrveranstaltungen an Hochschulen mit technischer Ausrichtung geeignet. Die Aufgaben sind so konzipiert, dass sie insbesondere auch Ingenieuren, die sich bei der beruflichen Arbeit mit Fragen der Technischen Thermodynamik auseinandersetzen, geeignete Lösungswege aufzeigen können.

Die vorliegende Aufgabensammlung ist als Ergänzung und Vertiefung zum Lehrbuch 'Dehli/Doering/Schedwill: Grundlagen der Technischen Thermodynamik' (Verlag Springer Vieweg, 10. Auflage 2023, ISBN 978-3-658-41250-0) konzipiert und weist dieselbe inhaltliche Gliederung wie das Lehrbuch auf. Unabhängig von diesem Lehrbuch eignet es sich auch für die Leser anderer Lehrbücher der Thermodynamik. Inhaltliche Schwerpunkte sind dabei die thermodynamischen Grundbegriffe, der erste Hauptsatz der Thermodynamik, der zweite Hauptsatz der Thermodynamik, ideale Gase, reale Gase und Dämpfe, thermische Maschinen, Kreisprozesse, Exergie, Wärmeübertragung, feuchte Luft, Verbrennung und chemische Thermodynamik. Anhand von grafischen Darstellungen – insbesondere auch von Zustandsdiagrammen - - werden die thermodynamischen Sachverhalte veranschaulicht.

Der Verfasser ist seinem verstorbenen Kollegen Prof. Dr.-Ing. Herbert Schedwill zu großem Dank verpflichtet, der durch die Bereitstellung von Aufgaben sowie im Rahmen von Fachgesprächen wesentlich zu diesem Buch beigetragen hat. Ein weiterer Dank gilt Dipl.-Ing. Thomas Zipsner und Dipl.-Ing. Eric Blaschke vom Lehrstuhl Maschinenbau des Verlags Springer Vieweg, die den Arbeitsfortgang am Buch kompetent und anregend begleitet haben.

Zu Orientierung sind die Aufgaben mit Angaben zum jeweiligen Schwierigkeitsgrad gekennzeichnet:

Schwierigkeitsgrad: leicht

Schwierigkeitsgrad: mittel

Schwierigkeitsgrad: erheblich

Hinweis zu den Lösungen der Aufgaben in den Abschnitten 5, 6, 7 und 8:

Die Stoffwerte wurden mit dem Rechenprogramm 'ThermoFluids' berechnet, einer Software für die Berechnung thermodynamischer Eigenschaften für mehr als 60 reine Stoffe auf der Basis der Software Fluidcal. Diese Software wurde vom Lehrstuhl für Thermodynamik der Ruhr-Universität Bochum (Prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang Wagner) entwickelt. Weiter wurde dort speziell für Wasser und Wasserdampf eine Software für die Industrie-Formulation IAPWS-IF97 sowie eine Software für die Wissenschafts-Formulation IAPWS-95 für Wasser und Wasserdampf erarbeitet. Diese Software auf der Basis der IAPWS-95 ist für Hochschulen kostenlos, wenn die Software ausschließlich in Lehre und Forschung eingesetzt wird. An demselben Lehrstuhl ist auch die Software zur Referenz-Zustandsgleichung GERG-2008 für Erdgase und andere Gemische entstanden. Vertiefende Arbeiten mit der Industrie-Formulation IAPWS-IF97 für Wasser und Wasserdampf finden sich an der Fakultät Maschinenwesen der Hochschule Zittau/Görlitz (Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar).

Das National Institute of Standards and Technology NIST, eine Bundesbehörde der Vereinigten Staaten von Nordamerika, stellt mit REFPROP eine Software für die Berechnung thermodynamischer Zustandsgrößen von reinen Stoffen und von Stoffgemischen für wissenschaftliche Zwecke bereit. Als kostenlose Software ist ein sogenanntes Mini-REFPROP-Programm als Probeversion der vollständigen REFPROP-Software0 verfügbar, das eine begrenzte Anzahl von reinen Stoffen berücksichtigt und als Hilfsmittel in der Lehre konzipiert ist, um Studierende mit den thermodynamischen Eigenschaften von Stoffen vertraut zu machen.

Thermodynamische Stoffwerte können auch geeigneten Tabellenwerken entnommen werden. Z. B. enthält der VDI-Wärmeatlas (Verlag Springer Vieweg, 12. Auflage 2019) u. a. eine umfassende Sammlung von Stoffwerten. Als ältere Quelle stehen u. a. auch die VDI-Wasserdampfatafel zur Verfügung.

Eine Ermittlung thermodynamischer Stoffwerte ist auch mithilfe von Zustandsdiagrammen möglich, wie sie beispielsweise im Anhang der vorliegenden Aufgabensammlung enthalten sind. Diagramme können Zustände und Zustandsänderungen sowie thermodynamische Prozesse sehr gut veranschaulichen, ermöglichen jedoch nur eine eingeschränkte Ablesegenauigkeit.

Der $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ -Satz für das vorliegende Buch wurde vom Verfasser selbst erstellt. Die 3. Auflage wurde gegenüber der 2. Auflage um Aufgaben aus dem Gebiet der Strömungstechnik, der Dynamik idealer Gase, der Kreisprozesse, der thermischen Maschinen, der Exergie und der chemischen Thermodynamik erweitert. Daneben haben weitere Diagramme wichtiger Kältemittel Eingang in das Lehrbuch gefunden. Weiter wurden Erweiterungen und Ergänzungen zum besseren Verständnis der Lösungswege vorgenommen; auch wurden Satzfehler berichtigt.

Esslingen 2024

Prof. Dr.-Ing. Martin Dehli

Inhaltsverzeichnis

(Das Inhaltsverzeichnis bezieht sich auf die Abschnitte des Lehrbuchs "Grundlagen der Technischen Thermodynamik")

1 Aufgaben zu Abschnitt 1: Thermodynamische Grundbegriffe	1
2 Aufgaben zu Abschnitt 2: Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ..	5
3 Aufgaben zu Abschnitt 3: Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	21
4 Aufgaben zu Abschnitt 4: Ideale Gase	29
5 Aufgaben zu Abschnitt 5: Reale Gase und Dämpfe	83
6 Aufgaben zu Abschnitt 6: Thermische Maschinen	115
7 Aufgaben zu Abschnitt 7: Kreisprozesse	129
8 Aufgaben zu Abschnitt 8: Exergie	195
9 Aufgaben zu Abschnitt 9: Wärmeübertragung	213
10 Aufgaben zu Abschnitt 10: Feuchte Luft	253
11 Aufgaben zu Abschnitt 11: Verbrennung	291
12 Aufgaben zu Abschnitt 12: Chemische Thermodynamik	317
Ankreuz- und Einsetzaufgaben	335
Anhang: Zustandsdiagramme und Tabellen mit Stoffwerten	385

Zur Orientierung ist im Folgenden das vollständige Inhaltsverzeichnis des Lehrbuchs 'Grundlagen der Technischen Thermodynamik' wiedergegeben, auf das sich die vorliegende Aufgabensammlung bezieht.

Vollständiges Inhaltsverzeichnis des Lehrbuchs

1	Thermodynamische Grundbegriffe	1
1.1	Anwendungsgebiete der Thermodynamik	1
1.2	System	4
1.3	Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen	5
1.4	Prozess, Prozessgrößen	8
2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	9
2.1	Das Prinzip von der Erhaltung der Energie	9
2.2	Potentielle Energie	10
2.3	Kinetische Energie	13
2.4	Arbeit	14
2.4.1	Volumenänderungsarbeit	14
2.4.2	Kupplungsarbeit	16
2.4.3	Verschiebearbeit	16
2.4.4	Druckänderungsarbeit	17
2.4.5	Reibungsarbeit	19
2.5	Thermische Energie	20
2.5.1	Innere Energie	21
2.5.2	Wärme	22
2.5.3	Enthalpie	23
2.6	Energiebilanzen	24
2.6.1	Energiebilanz für das geschlossene System	24
2.6.2	Energiebilanz für das offene System	26
2.7	Wärmekapazität	30
2.7.1	Spezifische Wärmekapazität	31
2.7.2	Die spezifische Wärmekapazität der Gase	34
2.8	Strömungstechnische Grundlagen	35
2.8.1	Allgemeines	35
2.8.2	Strömungsformen	36
2.8.3	Reibung und Rauigkeit	36
2.8.4	Einzelwiderstände	38
2.8.5	Äquivalente Rohrlänge	39
2.8.6	Druckverlust bzw. Druckgewinn infolge des Dichteunterschieds zwischen strömendem Fluid und Umgebungsfluid	39
2.8.7	Gesamtdruckdifferenz bei der Fluidfortleitung	39
3	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	43
3.1	Die Aussage des zweiten Hauptsatzes	43
3.1.1	Reversible und irreversible Prozesse	44
3.1.2	Quasistatische Zustandsänderungen	45
3.2	Irreversible Vorgänge	46
3.2.1	Reibung	46
3.2.2	Temperatenausgleich	47
3.2.3	Druckausgleich	47
3.2.4	Drosselung	48

3.3	Entropie	49
3.3.1	Reversible Ersatzprozesse adiabater Prozesse	50
3.3.2	Die Berechnung der Entropieänderung	52
3.3.3	Die Entropie als Zustandsgröße, totales Differential	52
3.4	Die Entropieänderung der irreversiblen Vorgänge	55
3.4.1	Reibung	55
3.4.2	Temperaturlausgleich	56
3.4.3	Druckausgleich	58
3.4.4	Drosselung	59
3.5	Nichtadiabater Prozess und reversibler Ersatzprozess	59
3.5.1	Isentrope; Deutungen des Entropiebegriffs	61
3.5.2	Entropiediagramme	62
3.5.3	Kreisintegral, thermodynamische Temperatur	64
3.5.4	Dissipative Energie	66
4	Ideale Gase	69
4.1	Thermische Zustandsgleichung	69
4.1.1	Gesetz von <i>Boyle</i> und <i>Mariotte</i>	69
4.1.2	Gesetz von <i>Gay-Lussac</i>	69
4.1.3	Physikalischer Normzustand	70
4.1.4	Gasthermometer	71
4.1.5	Spezielle Gaskonstante	72
4.1.6	Allgemeine Gaskonstante	74
4.2	Kalorische Zustandsgrößen der idealen Gase	74
4.2.1	Innere Energie	75
4.2.2	Enthalpie	75
4.2.3	Entropie	76
4.3	Zustandsänderungen	77
4.3.1	Isochore	77
4.3.2	Isobare	79
4.3.3	Isotherme	82
4.3.4	Isentrope	84
4.3.5	Polytrope	89
4.3.6	Zustandsänderungen mit veränderlicher Masse	96
4.4	Thermische Energie und Arbeit im T, s -Diagramm	97
4.5	Mischungen idealer Gase	99
4.5.1	Der Mischungsvorgang im abgeschlossenen System	102
4.5.2	Mischung bei unverändertem Gesamtvolumen	105
4.5.3	Mischung ohne Temperatur- und Druckänderung bei unverändertem Gesamtvolumen	106
4.5.4	Der Mischungsvorgang im offenen System	108
4.6	Dynamik idealer Gase: Kompressible stationäre Gasströmung	111
4.6.1	Einführung	111
4.6.2	Schallgeschwindigkeit und Schallausbreitung	112
4.6.3	Energiegleichung und <i>Bernoulli</i> -Gleichung der kompressiblen eindimensionalen Strömung idealer Gase	115
4.6.4	Ruhegrößen und kritischer Zustand	118
4.6.5	Das Geschwindigkeitsdiagramm der spezifischen Energiegleichung ...	121

4.6.6	Die Durchflussfunktion	122
4.6.7	Isentrope Gasströmung in Düsen und Blenden	125
4.6.8	Beschleunigte kompressible Strömung	126
4.6.9	Verdichtungsstoß	142
5	Reale Gase und Dämpfe	151
5.1	Eigenschaften der Dämpfe	151
5.1.1	Phasenübergänge	151
5.1.2	Zweiphasengebiete	152
5.1.3	Sieden und Kondensieren	153
5.1.4	Verdunsten und Tauen	155
5.1.5	Flüssigkeit	157
5.1.6	Nassdampf	160
5.1.7	Überhitzter Dampf	163
5.2	Zustandsdiagramme	164
5.2.1	Die p, v, T -Fläche	164
5.2.2	Das T, s -Diagramm	167
5.2.3	Das h, s -Diagramm	170
5.3	Thermische Zustandsgleichungen	172
5.3.1	Die <i>van der Waalssche</i> Gleichung	172
5.3.2	Die Grenzkurve und die <i>Maxwell</i> -Beziehung	174
5.3.3	Die reduzierte <i>van der Waalssche</i> Gleichung	176
5.3.4	Verschiedene Ansätze	177
5.3.5	Virialkoeffizienten	181
5.4	Berechnung von Zustandsgrößen; Dampf tafeln	183
5.4.1	Die kalorischen Zustandsgrößen	184
5.4.2	Die spezifischen Wärmekapazitäten c_p und c_v	189
5.4.3	Der Isentropenexponent und der Isothermenexponent	191
5.4.4	Die <i>Clausius-Clapeyronsche</i> Gleichung	193
5.4.5	Freie Energie und freie Enthalpie	197
5.4.5.1	Allgemeines	197
5.4.5.2	Ein g, s -Zustandsdiagramm für Wasser und Wasserdampf ...	203
5.4.6	Der <i>Joule-Thomson</i> -Effekt	207
6	Thermische Maschinen	213
6.1	Einteilung und Arten der Maschinen	213
6.1.1	Unterteilung nach der Richtung der Energieumwandlung	213
6.1.2	Unterteilung nach der Bauart der Maschinen	214
6.1.3	Unterteilung nach der Art des ablaufenden Prozesses	214
6.2	Ideale Maschinen	214
6.2.1	Verdichtung und Entspannung in idealen Maschinen	215
6.2.2	Mehrstufige Verdichtung und Entspannung	216
6.2.3	Die Energiebilanz für Strömungsmaschinen	218
6.2.4	Die Energiebilanz für Verdrängermaschinen	220
6.3	Energiebilanzen für wirkliche Maschinen	221
6.3.1	Innere oder indizierte Arbeit	224
6.3.2	Totalarbeit	225
6.3.3	Totalenthalpie	226

6.4 Wirkliche Maschinen	226
6.4.1 Der ungekühlte Verdichter	226
6.4.2 Der gekühlte Verdichter	229
6.4.3 Kolbenverdichter	231
6.4.4 Turboverdichter	231
6.4.5 Gas- und Dampfturbinen	231
6.5 Wirkungsgrade	235
6.5.1 Vergleichsprozesse	236
6.5.2 Der innere Wirkungsgrad	236
6.5.3 Der mechanische Wirkungsgrad	238
6.5.4 Der Gesamtwirkungsgrad	238
6.5.5 Der isentrope Wirkungsgrad	238
6.5.6 Der isotherme Wirkungsgrad	239
6.5.7 Der polytrope Wirkungsgrad	239
7 Kreisprozesse	245
7.1 Kreisprozessarbeit, Wärmezufuhr und Wärmeabgabe	245
7.2 Rechts- und linkslaufende Kreisprozesse	251
7.3 Die Theorie der rechtslaufenden Kreisprozesse	252
7.3.1 Umwandlung von thermischer in mechanische Energie	253
7.3.2 Der thermische Wirkungsgrad	254
7.3.3 Der rechtslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	255
7.3.4 Die Auswirkung irreversibler Vorgänge	256
7.3.5 Der <i>Carnot</i> -Faktor	258
7.4 Technisch genutzte rechtslaufende Kreisprozesse	260
7.4.1 <i>Seiliger</i> -Prozess, <i>Otto</i> -Prozess, <i>Diesel</i> -Prozess, verallgemeinerter <i>Diesel</i> -Prozess	261
7.4.2 <i>Joule</i> -Prozess	265
7.4.3 <i>Ericsson</i> -Prozess	268
7.4.4 <i>Stirling</i> -Prozess	270
7.4.5 Einfach-polytropischer <i>Carnot</i> -Prozess	272
7.4.6 Gasexpansions-Prozess	273
7.4.7 <i>Clausius-Rankine</i> -Prozess	274
7.5 Vergleichende Bewertung von rechtslaufenden Kreisprozessen	277
7.5.1 Prozessgrößen und Kreisprozesse	278
7.5.2 Mechanische Anstrengungsverhältnisse und thermische Anstrengungsverhältnisse	279
7.5.3 Bewertungskriterien für wichtige thermodynamische Kreisprozesse ...	283
7.5.3.1 Allgemeine thermodynamische Beziehungen	283
7.5.3.2 Beispiele	285
7.5.3.3 Graphische Darstellung der thermodynamischen Beziehungen	299
7.5.3.4 Kreisprozessberechnungen für reale Fluide	311
7.6 Linkslaufende Kreisprozesse	317
7.6.1 Leistungszahl	318
7.6.2 Der linkslaufende <i>Carnot</i> -Prozess	319
7.6.3 Der linkslaufende <i>Joule</i> -Prozess	320
7.6.4 Der Gasexpansions-Prozess als Kälteprozess	321
7.6.5 Der Kompressions-Kaltdampfprozess	325

8 Exergie	333
8.1 Energie und Exergie	333
8.1.1 Die Exergie der Wärme	335
8.1.2 Die Exergie der gebundenen Energie	335
8.1.3 Die Exergie der Temperaturänderungswärme	338
8.1.4 Die Exergie der Volumenänderungsarbeit	340
8.1.5 Die Exergie der Verschiebearbeit	341
8.1.6 Die Exergie der Druckänderungsarbeit	342
8.1.7 Die Exergie der inneren Energie	343
8.1.8 Die Exergie der Enthalpie	347
8.1.9 Die Exergie der freien Energie	351
8.1.10 Die Exergie der freien Enthalpie	351
8.1.11 Unterschied zwischen EU und EF	354
8.1.12 Unterschied zwischen EH und EG	355
8.1.13 Freie Energie und freie Enthalpie als thermodynamische Potentiale	355
8.2 Exergie und Anergie	358
8.2.1 Die Anergie im p, V -Diagramm und im T, S -Diagramm	360
8.2.2 Anergiefreie Energien	361
8.3 Exergieverlust	363
8.3.1 Irreversibilität und Exergieverlust	363
8.3.2 Exergieverlust und Anergiegewinn	367
8.3.3 Exergetische Wirkungsgrade	370
9 Wärmeübertragung	375
9.1 Wärmestrahlung	375
9.1.1 <i>Stefan-Boltzmannsches</i> Gesetz	375
9.1.2 <i>Kirchhoffsches</i> Gesetz	375
9.1.3 <i>Plancksches</i> Strahlungsgesetz	376
9.1.4 <i>Wiensches</i> Verschiebungsgesetz	377
9.1.5 <i>Lambertsches</i> Kosinusgesetz	378
9.1.6 Einstrahlzahl	378
9.2 Strahlungsaustausch	383
9.2.1 Hohlraummethode	384
9.2.2 Umhüllung einer Fläche durch eine andere	385
9.2.3 Zwei große parallele Flächen	386
9.2.4 Matrizendarstellung	386
9.3 Stationäre eindimensionale Wärmeleitung	389
9.3.1 Ebene Wand	389
9.3.2 Rohrwand	390
9.4 Instationäre eindimensionale Wärmeleitung	391
9.4.1 Ebene einschichtige Wand	392
9.4.2 Halbbunendlicher Körper	394
9.4.3 Kontakttemperatur	395
9.5 Konvektion	396
9.5.1 Wärmeübergangskoeffizient	397
9.5.2 Ähnlichkeitstheorie	398
9.5.3 <i>Reynolds</i> -Analogie	401
9.5.4 <i>Prandtl</i> -Analogie	402

9.5.5	Potenzansätze für die laminare und die turbulente Strömung	405
9.5.6	Ansätze für Phasenübergänge	411
9.6	Wärmedurchgang	414
9.6.1	Wärmedurchgangskoeffizient	415
9.6.2	Rippenwirkungsgrad und Flächenwirkungsgrad	416
9.6.3	Mittlere Temperaturdifferenz	417
9.6.4	Betriebscharakteristik	417
9.7	Berippte Wärmeübertragungsflächen	418
9.7.1	Gerade Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.7.2	Kreisförmige Rippe mit Rechteckquerschnitt	419
9.8	Trennwandwärmeübertrager	421
9.8.1	Gleichstrom	421
9.8.2	Gegenstrom	422
9.8.3	Kreuzstrom	424
9.8.4	Wärmeübertragung mit Phasenübergang	428
9.9	Auswertung und Auslegung	429
9.9.1	Korrekturfaktor für Kreuzstrom	430
9.9.2	Darstellung der Betriebscharakteristik	432
9.9.3	Wärmelängsleitung in der ebenen Trennwand	434
9.9.4	Auslegungsdiagramm	437
10	Feuchte Luft	453
10.1	Zustandseigenschaften feuchter Luft	453
10.1.1	Relative Feuchte	453
10.1.2	Feuchtegrad und Sättigungsgrad	453
10.1.3	Spezifische Enthalpie	455
10.1.4	Spezifisches Volumen und Dichte	456
10.2	Zustandsänderungen feuchter Luft	456
10.2.1	Temperaturänderung	457
10.2.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	457
10.2.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	458
10.3	Das h,x -Diagramm von <i>Mollier</i>	459
10.3.1	Temperaturänderung	461
10.3.2	Befeuchtung und Entfeuchtung	462
10.3.3	Mischung zweier Feuchtluftmengen	462
10.4	Verdunstungsmodell	462
10.4.1	Verdunstungskoeffizient	462
10.4.2	Energiebilanzen	463
10.4.3	<i>Lewissche</i> Beziehung	464
10.5	Kühlgrenze	413
10.6	Verdunstung und Tauniederschlag	467
10.7	Wasserdampfdiffusion durch Wände	468
11	Verbrennung	475
11.1	Brennstoffe	476
11.1.1	Gasförmige Brennstoffe	476
11.1.2	Feste und flüssige Brennstoffe	480
11.1.3	Zusammensetzung des Verbrennungsgases, Verbrennungsdreiecke,	

Verbrennungskontrolle	483
11.2 Technische Gesichtspunkte der Verbrennung	491
11.2.1 Einleitung und Ablauf der Verbrennung	491
11.2.2 Vollkommene und unvollkommene Verbrennung	491
11.2.3 Taupunkt der Verbrennungsgase	494
11.2.4 Schornsteinzug	494
11.3 Brennwert und Heizwert	495
11.4 Theoretische Verbrennungstemperatur	497
12 Chemische Thermodynamik	507
12.1 Systeme mit chemischen Reaktionen	507
12.2 Reaktionsumsatz und Umsatzgrad	509
12.3 Molare Reaktionsenthalpien und molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i>	512
12.3.1 Molare Reaktionsenthalpien	512
12.3.2 Molare Standard-Bildungsenthalpien; Satz von <i>Hess</i>	516
12.4 Absolute molare Entropien; dritter Hauptsatz der Thermodynamik	522
12.5 Die Bedeutung des zweiten Hauptsatzes für chemische Reaktionen	526
12.6 Chemische Exergien	533
12.7 Brennstoffexergien	536
12.8 Chemische Potentiale	541
12.9 Das Massenwirkungsgesetz	543
12.10 Druck- und Temperaturabhängigkeit der Konstanten des Massenwirkungsgesetzes; Gesetz von <i>LeChatelier</i> und <i>Braun</i>	548
12.11 Modell isotherm-isobarer reversibler chemischer Reaktionen	553
12.11.1 Modell der reversiblen Oxidation von Wasserstoff	553
12.11.2 Modell beliebiger homogener reversibler chemischer Reaktionen idealer Gase	557
12.11.3 Verlustlose Speicherung von Wärme und Arbeit in Form chemischer Energie	558
12.12 Brennstoffzellen	560
Anhang	567
Literaturverzeichnis	604
Sachwortverzeichnis	612

Wichtige Formelzeichen

A	Auftrieb, Fläche, Querschnitt, 1. Virialkoeffizient, Anergie	$\Delta^R G_m$	molare Reaktions- <i>Gibbs</i> -Funktion
a	spezifische Anergie, Temperaturleitfähigkeit, Absorptionsverhältnis, Konstante, Parameter, Massenanteil Asche, Schallgeschwindigkeit	Ga	<i>Galilei</i> -Zahl
a_{qs}	thermisches Anstrengungsverhältnis	Gr	<i>Grashof</i> -Zahl
a_{qT}	thermisches Anstrengungsverhältnis	g	Fallbeschleunigung, spezifische freie Enthalpie
a_{wp}	mechanisches Anstrengungsverhältnis	H	Enthalpie, Höhe, einfallende flächenbezogene Strahlung
a_{wv}	mechanisches Anstrengungsverhältnis	\dot{H}	Enthalpiestrom
a_g	Gesamtanstrengungsverhältnis	H_{Amax}	maximale Verbrennungsgasenthalpie (maximale Abgasenthalpie)
B	2. Virialkoeffizient, abgegebene flächenbezogene Strahlung, Breite	$H_{m,0i}^f \square$	molare Standard-Bildungsenthalpie
b	Wärmeeindringkoeffizient, Konstante, Parameter	H_i	spezifischer Heizwert
C	Wärmekapazität, normvolumenbezogene Wärmekapazität, 3. Virialkoeffizient, Strahlungskoeffizient, <i>Eulersche</i> Konstante, Wasserdampfkonzentration	$H_{i,0}$	normvolumenbezogener Heizwert
\dot{C}	zeitbezogene Wärmekapazität eines Fluidstroms (Wärmekapazitätsstrom)	$H_{m,0i}$	molare Enthalpie
C_m	molare Wärmekapazität	H_s	spezifischer Brennwert
c	Geschwindigkeit, spezifische Wärmekapazität, Strahlungskonstante, Lichtgeschwindigkeit, Massenanteil Kohlenstoff	$H_{s,0}$	normvolumenbezogener Brennwert
D	4. Virialkoeffizient, Diffusionskoeffizient	H_t	Totalenthalpie
d	Differential	$\Delta^A H_m$	molare Aktivierungsenthalpie
d	Durchmesser, Durchlassverhältnis	$\Delta^R H_m$	molare Reaktionsenthalpie
E	Energie, Energieinhalt eines Stoffstroms, Exergie, Emission, Elastizitätsmodul	ΔH_T	Minderarbeit
\dot{E}	Energiestrom	ΔH_V	Mehrarbeit
E_k	kinetische Energie	h	spezifische Enthalpie, Höhe, <i>Plancksches</i> Wirkungsquantum, Massenanteil Wasserstoff, normvolumenbezogene Enthalpie
$E_{m,0i}$	molare Energie	I	Intensität
E_p	potentielle Energie	i	Stufenzahl, Laufvariable
ΔE_T	Energierückgewinn	j	Laufvariable
ΔE_V	Erhitzungsverlust	K	Konstante, Gleichgewichtskonstante, Funktion
$E_{x_{m,0i}}$	molare Exergie	k	Wärmedurchgangskoeffizient, <i>Boltzmannsche</i> Konstante, Proportionalitätsfaktor
$E_{x_{m,0i}}^{\square}$	molare Standard-Exergie	L	Luftzustand
$E_{x_{m,B}}$	molare Brennstoff-Exergie	l	Länge, normvolumenbezogener Luftbedarf
e	spezifische Exergie, Basis der natürlichen Logarithmen, Einheitsmatrix	l^*	spezifischer Luftbedarf
F	Kraft, Gewichtsüberschuss, freie Energie, Flüssigkeit, Funktion	l'	äquivalente Rohrlänge
F_R	Reibungskraft	l_a	Luftgehalt
F_T	Tangentalkraft	\ln	natürlicher Logarithmus
f	spezifische freie Energie, Funktion	\lg	Logarithmus zur Basis 10
G	Gewicht, freie Enthalpie	M	Molmasse, Drehmoment, <i>Mach</i> zahl
$G_{m,0i}$	molare freie Enthalpie, molare <i>Gibbs</i> -Funktion	m	Masse
$G_{m,0i}^{\square}$	molare Standard- <i>Gibbs</i> -Funktion	\dot{m}	Massenstrom
		N_A	<i>Avogadro</i> -Zahl
		Nu	<i>Nußelt</i> -Zahl
		n	Molmenge, Polytropenexponent, Drehzahl, Massenanteil Stickstoff
		\dot{n}	Molmengenstrom
		n_s	Isentropenexponent

n_T	Isothermenexponent	V	Volumen
o	normvolumenbezogener Sauerstoffbedarf, Massenanteil Sauerstoff	\dot{V}	Volumenstrom
o^*	spezifischer Sauerstoffbedarf	V_0	Normvolumen
P	Leistung	$\Delta^R V_m$	molares Reaktionsvolumen
Pe	<i>Peclet</i> -Zahl	v	spezifisches Volumen
Pr	<i>Prandtl</i> -Zahl	v_0	normvolumenbezogene Verbrennungsgasmenge (normvolumenbezogene Abgasmenge)
p	Druck	v_0^*	spezifische Verbrennungsgasmenge (spezifische Abgasmenge)
Δp	Druckdifferenz	W	Arbeit, Verschiebearbeit, zeitbezogene Wärmekapazität eines Fluidstroms, (Wärmekapazitätsstrom, Wasserwert)
Q	Wärme	Wa	<i>van der Waals</i> -Zahl
\dot{Q}	Wärmestrom (Wärmeleistung)	W_e	Kupplungsarbeit (Wellenarbeit, technische Arbeit)
Q_{rev}	reversible Wärme (reversible Ersatzwärme)	W_i	innere Arbeit (indizierte Arbeit)
q	spezifische Wärme	W_{Kreis}	Kreisprozessarbeit
q_{rev}	spezifische reversible Wärme (spezifische reversible Ersatzwärme)	$(W_m)_{rev}$	reversible molare Reaktionsarbeit
q_s	spezifische Entropieänderungswärme (spezifische reversible Wärme, spezifische reversible Ersatzwärme)	W_p	Druckänderungsarbeit
q_T	spezifische Temperaturänderungswärme	W_R	Reibungsarbeit
R	spezielle Gaskonstante, Radius	W_{RA}	äußere Reibungsarbeit
R_a	Wärmeübergangswiderstand außen	W_{RI}	innere Reibungsarbeit
R_D	Wärmedurchgangswiderstand	W_t	Totalarbeit
R_i	Wärmeübergangswiderstand innen	W_V	Volumenänderungsarbeit
R_L	Wärmeleitwiderstand	w	spezifische Arbeit, Geschwindigkeit, Massenanteil Wasser
Ra	<i>Raleigh</i> -Zahl	w_{Kreis}	spezifische Kreisprozessarbeit
Re	<i>Reynolds</i> -Zahl	w_p	spezifische Druckänderungsarbeit
R_m	allgemeine Gaskonstante	w_R	spezifische Reibungsarbeit
r	Volumenanteil (Raumanteil), spezifische Verdampfungsenthalpie (spezifische Verdampfungswärme), Reflexionsverhältnis, Radius, Matrix	w_{RA}	spezifische äußere Reibungsarbeit
S	Entropie, Dampfdurchlasswiderstand	w_{RI}	spezifische innere Reibungsarbeit
\dot{S}	Entropiestrom	w_V	spezifische Volumenänderungsarbeit
$S_{m,0i}$	molare Entropie	x	Dampfgehalt, Feuchtegrad (Feuchtigkeitsgehalt, Wassergehalt), Koordinate
$S_{m,0i}^\square$	molare Standard-Entropie	y	Koordinate
$\Delta^R S_m$	molare Reaktionsentropie	z	Koordinate, Realgasfaktor, Anteil, Reaktionsumsatz
St	<i>Stanton</i> -Zahl	\dot{z}	Umsatzrate
s	spezifische Entropie, Weg, Länge, Dicke, Massenanteil Schwefel	α	Wärmeübergangskoeffizient, Winkel
T	absolute Temperatur (thermodynamische Temperatur, Kelvin-Temperatur), Tiefe	β	Volumenausdehnungskoeffizient, Winkel
t	Celsiustemperatur	γ	spezifisches Gewicht, Winkel
t_{Amax}	theoretische Verbrennungstemperatur (adiabate Verbrennungstemperatur)	Δ	Differenz
U	innere Energie, Umfang	δ	reduzierte Dichte (normierte Dichte), isenthalper Drosselkoeffizient (Joule-Thomson-Koeffizient), Wanddicke
\dot{U}	zeitbezogene innere Energie	ϵ	Leistungszahl, Verdichtungsverhältnis, Emissionsverhältnis, Umsatzgrad
u	spezifische innere Energie, dimensionslose Kennzahl		

ζ	exergetischer Wirkungsgrad, Widerstandsahl (Widerstandsbeiwert)	g	gesamt
η	Wirkungsgrad, dynamische Viskosität	gl	gleichwertig
ϑ	Temperatur, reduzierte Temperatur (normierte Temperatur)	H	Hub, Heizung
κ	Isentropenexponent, c_p/c_v	h	isenthalp, hydraulisch
λ	Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitkoeffizient), Wellenlänge, Luftverhältnis, Rohrreibungszahl	i	innen, Stufenzahl, Komponente, Laufvariable
μ	Massenanteil, Diffusionswiderstandsfaktor	id	ideal
ν	kinematische Viskosität, Stickstoffcharakteristik	is	innen isentrop
Π	Produkt	it	innen isotherm
π	reduzierter Druck (normierter Druck), Kreisumfangszahl	j	Laufvariable
ρ	Dichte	K	Kolben, Kompression, Kälteanlage, kritischer Punkt, Kontakt
Σ	Summe	k	kritisch, kritischer Punkt
σ	Verdunstungskoeffizient, spezifische Schmelzenthalpie (spezifische Schmelzwärme), Sauerstoffbedarfscharakteristik, Normalspannung	L	Luft
τ	Zeitdauer, Schubspannung	M	Mischungszustand
Φ	Betriebscharakteristik, Matrix der Einstrahlzahlen	m	Mittelwert, molar, mechanisch
φ	Einspritzverhältnis, Einstrahlzahl, relative Feuchte, Winkel	max	Höchstwert
ψ	Durchflussfunktion (Ausflussfunktion), Drucksteigerungsverhältnis, Sättigungsgrad	min	Mindestwert
Ψ	Verhältnis	$mint$	Mindestwert trocken
Ω	Raumwinkel	N	Nassdampf
ω	Winkelgeschwindigkeit, azentrischer Faktor, Hilfsgröße	n	polytrop
Indizes (tiefgestellt)		p	Druck, isobar, polytrop, Partialdruck
A	Abgas	Qu	Quelle
a	außen, Austritt	R	Reibung, Rippe
ab	Abgabe	RA	äußere Reibung
af	Abgas feucht (Verbrennungsgas feucht)	RI	innere Reibung
amb	Umgebung	r	reduziert
at	Abgas trocken (Verbrennungsgas trocken)	rev	reversibel
B	Brennstoff, Brenngas	S	Sättigung, Siedezustand, Siedepunkt, schwarzer Körper, Stirnfläche, Schlacke bzw. Asche
C	<i>Carnot</i>	Se	Senke
D	Drosselung, Dampf, Wasserdampf	s	isentrop
E	Energie, Eis, Wassereis	T	Turbine, Tripelpunkt
e	effektiv, Welle, Eintritt	Tr	Tripelpunkt
el	elektrisch	t	isotherm, total
F	Flüssigkeit	th	thermisch
G	gesamt, Grundfläche	U	Umgebung
		\ddot{u}	über
		V	Volumen, Verdichter, Verlust, Verdunstung
		v	isochor
		W	Wasser, Wärmepumpe, Wärmeübertragung
		Wd	Wand
		Z	Zwischenzustand
		zu	Zufuhr
		0	Normzustand, Bezugszustand, Umgebungszustand, Anfangsgröße
		1	Anfang, Eintritt
		2	Ende, Austritt

Indizes (hochgestellt)

af Abgas feucht (Verbrennungsgas
feucht)
at Abgas trocken (Verbrennungsgas
trocken)

' siedende Flüssigkeit
" Sattdampf
* strömungstechnisch kritischer
Zustand

Einleitung

Ordnung hat ihren naturgesetzlichen Preis: Zum Wesen der Entropie

Mit dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik haben *Robert Mayer*, *James Prescott Joule* und *Hermann von Helmholtz* um die Mitte des 19. Jahrhunderts gezeigt, dass sich die Idee von der Gewinnung unerschöpflicher Energie – dem 'Perpetuum mobile erster Art' – nicht verwirklichen lässt: Energie wird weder geschaffen noch vernichtet – sie wird lediglich umgewandelt.

Rudolf Clausius hat rund zwei Jahrzehnte danach den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik formuliert: Nichts geht an Energie verloren – aber ein Teil der Energie lässt sich bei Energieumwandlungsvorgängen für mechanische, thermische, chemische und biologische Zwecke nicht mehr nutzen, und am Ende von Energieumwandlungsvorgängen ist die – zuvor geordnete und damit wertvolle – Energie für eine weitere Verwendung unbrauchbar geworden, weil sie in einen ungeordneten Zustand übergegangen ist. Demgemäß ist auch ein 'Perpetuum mobile zweiter Art' unmöglich. *Clausius* gelang es, die Zunahme der Unordnung mithilfe einer Zustandsgröße zu quantifizieren, die er als Entropie (Verwandlungsgröße, Entwicklungsgröße) bezeichnete.

Fortlaufende Entwertung der Energie

Gemäß dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gilt: Obwohl der Umfang der Energie in einem abgeschlossenen System vollständig erhalten bleibt, sagt dies noch nichts über ihre Verfügbarkeit aus. Die zur Überwindung von Reibung notwendige Arbeit lässt sich in aller Regel nicht mehr bzw. in Einzelfällen nur zum Teil zurückgewinnen; sie wirkt wie Wärme und erhöht nur die innere Energie von Stoffen – meist auf einem Temperaturniveau, das in der Nähe der Umgebungstemperatur liegt und damit unbrauchbar ist. Wärme fließt von selbst immer nur in eine Richtung: vom Stoff mit der höheren Temperatur zum Stoff mit der niedrigeren Temperatur – nie in umgekehrter Richtung. Deshalb werden in fernster Zukunft alle Vorgänge im abgeschlossenen System Weltall beim so genannten 'Wärmetod' auf Niedrigtemperaturniveau zum Stillstand kommen.

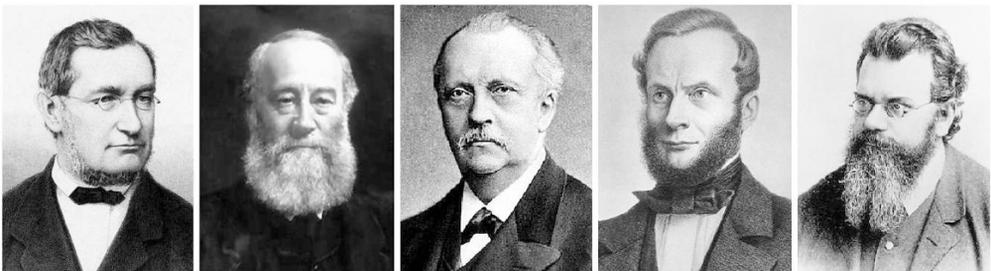


Bild E.1 Robert Mayer, James Prescott Joule, Hermann von Helmholtz, Rudolf Clausius, Ludwig Boltzmann (von links nach rechts)

Der Physiker *Ludwig Boltzmann* stellte im Jahr 1877 die Verbindung zwischen dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung her. Er kam zu dem Schluss, dass der Übergang zum thermischen Gleichgewicht und die damit verbundene Erhöhung der Entropie einem Übergang von einem unwahrscheinlicheren zu einem wahrscheinlicheren Zustand entspricht:

”Der Anfangszustand wird in den meisten Fällen ein sehr unwahrscheinlicher sein, von ihm wird das System immer wahrscheinlicheren Zuständen zueilen, bis es endlich den wahrscheinlichsten, d. h. den des Wärmeleichgewichts, erreicht hat. Wenden wir dies auf den Zweiten Hauptsatz an, so können wir diejenige Größe, welche man gewöhnlich als die Entropie zu bezeichnen pflegt, mit der Wahrscheinlichkeit des betreffenden Zustandes identifizieren.”

Von der Ordnung zur Unordnung

Es gibt also eine unumkehrbare Richtung bei allen Vorgängen in der Natur und in der Technik: Sie führt aus unwahrscheinlichen Zuständen und Strukturen einer aus Ungleichverteilung bestehenden Ordnung in wahrscheinliche Zustände der Gleichverteilung – also der Unordnung. Waren Stoffe und Potenziale zuvor hoch aggregativ verdichtet, münden sie schließlich in einen Zustand des allgemeinen Ausgleichs und von aufgelösten Unterschieden: Alles ist mit allem unumkehrbar vermischt und damit gleichförmig geworden.

Deshalb gibt es ein ’Vorher’ und ein ’Nachher’; deshalb gibt es Zeit und Geschichte; darum ist ein Niedergang – trotz aller Erfolge – letztlich nicht zu vermeiden. Die Entwicklung zielt auf allgemeinen Ausgleich und damit auf Erstarrung und schließlich Stillstand des ununterscheidbar Gleichen. Der Umfang an Energien und Stoffen ist begrenzt. Zwar bleibt die Summe aus Energie und Materie konstant, doch verringert sich mit jedem natürlichen und technischen Prozess der Umfang der arbeitsfähigen Energie und der nutzbaren Materie.

Dies wird an einem Beispiel sichtbar: Fährt ein Kraftfahrzeug in der Stadt auf eine rote Ampel zu, muss es abgebremst werden. Im einfachsten Fall wird die kinetische Energie des Fahrzeugs auf null gebracht, wobei daraus gleich viel Reibungsarbeit entsteht, die die innere Energie der Bremsscheiben, der Reifen, der Straße und – nach Abkühlen der Bremsscheiben – der Umgebungsluft erhöht. Die Hoffnung, dass diese Vorgänge umkehrbar seien, ist vergeblich: Das Fahrzeug wird sich nicht wieder von selbst auf seine Anfangsgeschwindigkeit bringen können.

Die Zunahme der inneren Energie der Luft, der Reifen und der Straße ist mit einer so geringen Temperaturerhöhung gegenüber der vorherigen Umgebungstemperatur verbunden, dass sie sich praktisch nicht mehr nutzen lässt. In der Thermodynamik lässt sich dieser Vorgang als Verlust an Exergie (d. h. an technischer Arbeitsfähigkeit von Energie) und ihre Umwandlung in Anergie (d. h. in nicht weiter nutzbare Energie im Gleichgewichtszustand mit der Umgebung) beschreiben; dabei ist die Änderung der Entropie von Belang. Dasselbe gilt vom Reifen- und Asphalt-Abrieb, der beim Bremsvorgang entstanden ist: Es gehen zwar keine Partikel ’verloren’, doch sind sie zerstreut und mit der Umgebung so vermischt, dass sie von selbst nicht wieder zusammenfinden. Auch hier ist Unordnung entstanden, in die Teilbereiche von Stoffen bei ihrer Nutzung übergegangen sind. Man hat es bei dieser Zunahme an Entropie mit einem irreversiblen Verlust an Verfügbarkeit über Energien und Stoffe zu tun.

Immerhin lässt sich jedoch mit einer verbesserten Technik ein Teil der anfangs vorhandenen hochwertigen kinetischen Energie ’zurückgewinnen’ – mithilfe eines elektrischen Generators, der beim Abbremsen hilft, indem er über die Antriebswellen der Räder elektrische Energie erzeugt, die in einer elektrochemischen Speicherbatterie zwischengespeichert werden kann. Wird der Generator danach im Vier-Quadrantenbetrieb als Elektromotor genutzt, kann er beim Wieder-Anfahren mit der in der Batterie gespei-

cherten Energie die Räder antreiben. Doch auch bei diesen Vorgängen muss eine Entwertung der Energien in Kauf genommen werden: Die ursprüngliche kinetische Energie – und damit die ursprüngliche Geschwindigkeit – des Fahrzeugs kann nicht wieder vollständig erreicht werden.

Bei seinem Bestreben, nützliche Ordnung zu schaffen, verhält sich der Mensch ähnlich wie die Natur: Er nimmt dabei die Vermehrung von Unordnung in der Umgebung in Kauf. In der Summe entsteht dabei in dem zur Nutzung geschaffenen Teilsystem zwar die gewünschte Ordnung – aber eben auf Kosten einer Erhöhung von Unordnung in der Umgebung. Zieht man Bilanz, ist insgesamt mehr Unordnung als Ordnung entstanden: Die Entropie des Gesamtsystems hat zugenommen.

Die Unordnung in der Umwelt wächst

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik zeigt den unvermeidlichen Preis der Ordnungslösungen auf, die der Mensch mit seinen technischen Systemen und die die Gesellschaft mit ihren staatlichen Strukturen verwirklicht: Jedes Schaffen von Ordnung ist mit einer größeren Zunahme an Unordnung in der Umgebung verbunden.

Damit stellt sich nicht zuletzt auch die Vorstellung von Geschichte als einem eindeutigen Fortschrittsgeschehen als Irrtum heraus: Zwar können Wissenschaft und Technik sowie die Staatskunst hoch geordnete Teilsysteme schaffen und erhalten, doch das Gesamtsystem gerät in immer größere Unordnung. Die Idee Georg Wilhelm Friedrich Hegels, dass die Geschichte ein Ziel habe, sich dabei Höherentwicklung ereigne und bestehende Gegensätze auf immer höheren Ebenen aufgehoben werden könnten, erscheint unter diesem Blickwinkel als irrig. Dies gilt auch von der materialistischen Auffassung der Weltläufe, wie sie Karl Marx formulierte und in den Ideologien des Sozialismus, Kommunismus und Neoliberalismus des zwanzigsten Jahrhunderts fortlebte.

Der Mensch beschleunigt die Entropievermehrung

Der Mensch vermehrt – wie die Natur – die Entropie, er vernichtet Ordnung und vergrößert die Unordnung; er schöpft aus den Potenzialen der Ungleichverteilung (der Ordnung), indem er die vorhandenen Energiegefälle nutzt und die Stoffe aus dem Zustand ihrer hochgradigen Konzentration in die nicht mehr nutzbare Form weit gehender Verdünnung und allmählicher Gleichverteilung (der Unordnung) überführt.

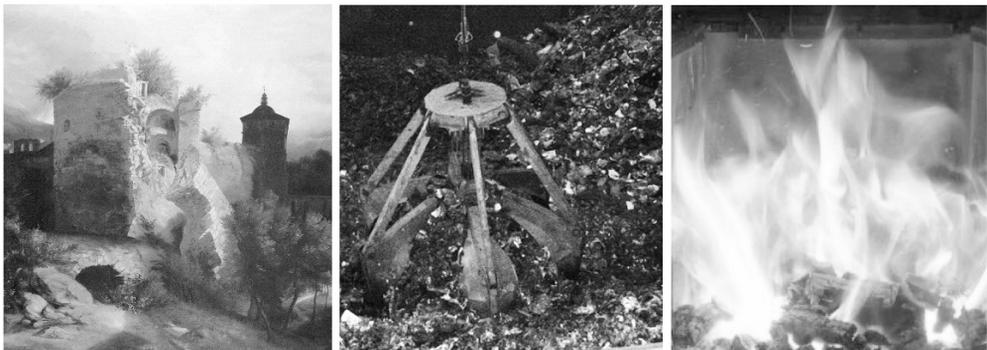


Bild E.2 Zunahme der Unordnung - Zunahme der Entropie: Ruine des Heidelberger Schlosses (Bild von Carl Blechen); Müll; Verbrennungsvorgang (von links nach rechts)

Die Gesamtheit der pflanzlichen und tierischen Naturvorgänge in ihren vielfältigen Wechselbeziehungen hat die Tendenz, Strukturen immer höherer Ordnung hervorzu-

bringen, doch wird dabei auch Unordnung in der Umgebung hinterlassen – in einem größeren Maße, als Ordnung entstanden ist. Freilich ist dort die unvermeidliche Zunahme der Unordnung relativ begrenzt, vergleicht man sie mit der Unordnung, die der Mensch bei Aufbau und Erhalt seiner hochkomplexen Ordnungsstrukturen hinterlässt:

Im Rahmen seines Bestrebens, mit immer mehr technischen Hilfsmitteln das äußere Leben erträglicher zu gestalten, beschleunigt er zugleich das Anwachsen der Entropie in seiner Umgebung durch die vielen Transformationsvorgänge, bei denen aus wertvollen natürlichen Stoffen und konzentrierten Energien wie Mineralöl, Erdgas und Kohle fortlaufend wertloser Abfall und "Wärmemüll" wird. Dieses Tun stellt eine Beschleunigung der Entwertungsvorgänge dar, an deren Beginn die Nutzung des Feuers stand.

Gemessen an den extrem großen irreversiblen Vorgängen im Weltall nimmt sich diese menschenverursachte Zunahme an Unordnung äußerst bescheiden aus – doch kann dies dem Menschen nicht als Entschuldigungsgrund zugerechnet werden, da er an die Erde als seine Umgebung gebunden ist: Hier ist ihm die Aufgabe gestellt, bei den vielfältigen technischen und gesellschaftlichen Vorgängen das Anwachsen der Unordnung in Grenzen zu halten.



Bild E.3 Die Entwicklung hoher Ordnungszustände (der Fortschritt) verursacht zugleich ein Anwachsen der Entropie – nicht mitbedacht von Georg Wilhelm Friedrich Hegel; Zweifelnder Mensch (Bild von Rembrandt van Rijn); Lebewesen sind hochkomplexe Ordnungsstrukturen (von links nach rechts)

Eindeutigkeit, Struktur und Ordnung erscheinen dabei als Ressourcen, die endlich sind und die nicht beliebig vermehrt werden können. Der Mensch handelt also nicht mehr in einem vermeintlich unerschöpfbaren Zeithorizont, er ist nicht nur in seinem Einzelschicksal durch den Tod mit der Endlichkeit seines Daseins konfrontiert, sondern auch als Gattungswesen. Doch kann er kraft seiner Vernunft die Zeitspanne beeinflussen, die der Spezies Mensch vergönnt ist.

Wie die Anfänge menschlichen Lebens, so ist auch das Ende grundsätzlich unverfügbar: Weitsicht, Klugheit und lebensschonendes Wohlverhalten der jetzigen und künftigen Generationen vorausgesetzt, existiert trotzdem eine äußerste Grenze des Lebens und ein eindeutiger Abschluss in der Zeit. Das vorzeitige Ende der Spezies Mensch und der ihn umgebenden belebten Natur kann selbstverursacht sein; das Ende selbst erscheint freilich unaufhebbar.

Wächst das Rettende auch?

Der Mensch hat sich durch seine technischen Hilfsmittel die Möglichkeit geschaffen, seinem Handeln eine hohe Veränderungsgeschwindigkeit zu verleihen. Die Veränderungen

in der Natur verlaufen demgegenüber meist wesentlich langsamer. So besteht die Gefahr, dass die Natur rascher zerstört wird, als sie nachzuwachsen vermag: Wenn Tier- und Pflanzenarten innerhalb weniger Jahrhunderte aussterben, dann sind für die Natur Jahrhunderttausende nötig, dies wieder auszugleichen.

Der Staat, der lebenswerte Rahmenbedingungen für seine Bürger schafft, verursacht durch seinen zugleich erhöhten Energiebedarf umso mehr Unordnung in seiner Umwelt. Wo immer eine geordnete Struktur geschaffen wird, ist dieser Ordnungszuwachs nur die eine Seite der Medaille: Zugleich wächst die weniger leicht sichtbare Unordnung in der jeweiligen Umgebung an.

Der Mensch setzt also ungewollt Handlungsketten in Gang, die in ihren Folgen auf das Gesamtsystem schwerwiegender sind als das absichtsvoll Veranlasste. Der Mensch sieht die miterzeugte Unordnung oft nicht; er bringt sie mit seinen Ordnungserfolgen häufig nicht in den notwendigen Zusammenhang von Ursache und Wirkung.

Wenn in der Industriegesellschaft ein Bereich unkontrolliert schnell wächst, wächst auch die Gefahr, dass die damit zugleich mitwachsende Entropie nicht mehr planmäßig entsorgt werden kann. Viele Umweltprobleme – etwa auch die Müll-, Abfall- und Abwärmeprobleme – lassen sich als Probleme einer Materie- und Energie-Entropie deuten. Dabei gilt keineswegs der Satz von Friedrich Hölderlin: "Wo aber Gefahr ist, wächst das Rettende auch." Denn es gibt kein Mittel, die mitwachsende Unordnung zu vermeiden. Was zur Verfügung steht, sind allerdings Werkzeuge, mit denen das Unvermeidliche immerhin stark verzögert werden kann:

- Der erste Weg ist ein Leben in Selbstbescheidung, Vermehrungsbegrenzung, Askese, Langsamkeit, Achtsamkeit, Gemächlichkeit und Sparsamkeit.
- Ein zweiter Ansatz ist die stoffliche Wiederverwertung, ein Material-Recycling.
- Das dritte Mittel ist die wirksame Verbesserung der Energieeffizienz mit weiterentwickelten Techniken, die bei gleichem Nutzen ein geringeres Anwachsen an Unordnung bewirken.
- Die vierte Möglichkeit ist das 'Sich-Einklinken' in natürliche energetische Vorgänge im Sinne der Nutzbarkeit: etwa in den Weg der Strahlungsenergie von der Sonne zur Erde, des Pflanzenwachstums oder in die Wege des Windes und des Wassers.



Bild E.4 Nicht rückholbar: Idylle der Biedermeierzeit; Beschleunigtes Leben in der Gegenwart; Wissensvermittlung und Wissensweitergabe (von links nach rechts)

Dabei wird zwar das Gesetz vom unaufhaltsamen Niedergang, das der Zweite Hauptsatz formuliert, nicht außer Kraft gesetzt, die genannten Hilfen schaffen aber einen erwünschten Aufschub.

Der erste Weg – der Weg der Askese – hat in vielen Kulturen Tradition: Er fordert ein einfaches, mönchisches oder mönch-ähnliches Leben, das der Betrachtung immaterieller Zusammenhänge gewidmet ist und bewusst auf Üppigkeit und Luxus verzichtet. Vielfach gehört dazu auch ein Verzicht auf die Selbstreproduktion. Blickt man zurück in die Geschichte, so hat dieser Weg z. B. in Zeiten einer starken Bevölkerungszunahme eine nützliche Wirkung entfaltet. Freilich lässt sich dieser Weg nicht einfach verordnen. Doch gewinnen Vorstellungen von Achtsamkeit, Behutsamkeit und Entschleunigung gerade auch im abendländischen Kulturbereich wieder an Bedeutung. Aus thermodynamischer Sicht sind schnell ablaufende Vorgänge in der Regel stärker irreversibel als langsamer ablaufende Vorgänge; der ideale Grenzfall ist die reversible Zustandsänderung, bei der der jeweilige Vorgang unendlich langsam abläuft und im Gesamtsystem keine Unordnung entsteht.

Energieeffizienz als Aufgabe

Dem Denken und Handeln des Ingenieurs stehen vor allem der zweite, der dritte und der vierte Weg zur Gestaltung offen. Wollte man Prioritäten festlegen, ob beispielsweise verstärkt auf mehr Energieeffizienz gesetzt oder ob der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien forciert werden sollte, so sprechen viele Argumente für eine gleichrangige Behandlung.

So spricht für eine Verbesserung der Energieeffizienz, dass man dabei unmittelbar an den Ursachen ansetzen kann: Häufig passen nämlich Ort, Zeit und Umfang der energetischen Vorgänge gut zusammen, so dass die zusätzlichen technischen Aufwendungen für mehr Energieeffizienz in Grenzen gehalten werden können. Meist kommt man deshalb beispielsweise mit wenig oder ganz ohne aufwendige Speicher- und Transportsysteme aus. Dieser Vorteil ist bei der energetischen Nutzung erneuerbarer Energien häufig nicht vorhanden – etwa bei der Stromerzeugung aus Sonne und Wind oder bei der Nutzung der Sonnenenergie zur Nutzwärmebereitstellung. In Deutschland wird auf die Grünstromerzeugung ein besonderer Schwerpunkt gelegt; ihr weiterer Ausbau wird wohl in den nächsten Jahrzehnten zu wesentlichen Zusatzkosten für Speicher- und Transportsysteme führen, weil Erzeugung und Verbrauch oft nicht synchron gesehen werden können. Im Sinne einer technischen Optimierung kann mit der Verbesserung der Energieeffizienz ein einfacher und wirksamer weiterer Weg beschritten werden, der parallel zur Nutzung erneuerbarer Energien begangen werden sollte.

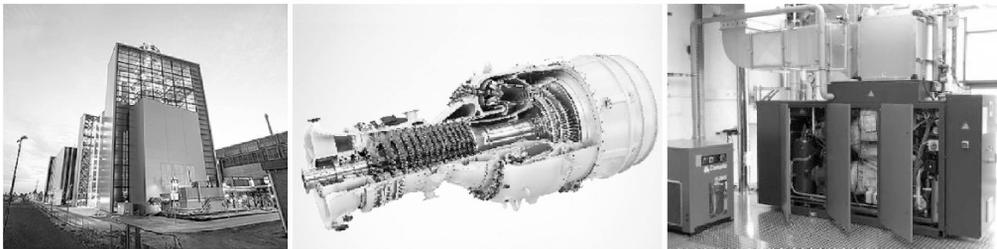


Bild E.6 Energieeffiziente Techniken: Gas- und Dampfturbinen-Heizkraftwerk; Gasturbine; Anlage zur kombinierten Druckluft- und Wärmerezeugung (von links nach rechts)

Die Energieeffizienz kann auf vielen technischen Gebieten noch weiter erhöht werden. Ein Hilfsmittel zur Beurteilung, wie sich die Energieeffizienz einer Technik verbessern lässt, sind Entropiebilanzen: Mit ihnen kann die Entropiezunahme (die Zunahme von Unordnung) quantifiziert werden. Je geringer die Zunahme der Entropie des Gesamtsystems – der technischen Anlage sowie ihrer Umgebung – ist, desto effizienter ist der jeweilige Prozess, bezogen auf den angestrebten Nutzen.

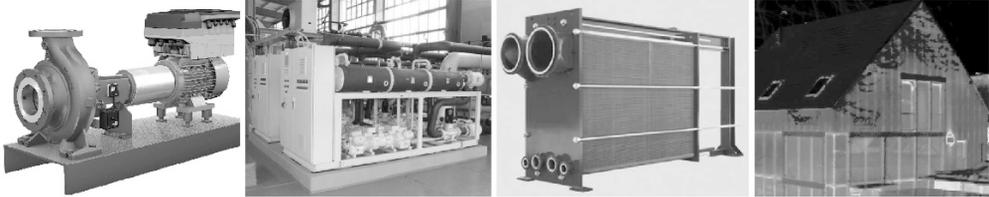


Bild E.7 Energieeffiziente Techniken: Pumpe mit effizientem Elektroantrieb; Industrie-Wärmepumpe; Platten-Wärmeübertrager; Wärmebild eines wärmetechnisch sanierten Gebäudes (von links nach rechts)

Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben, lässt sich benennen:

- eine verbesserte Wärmedämmung bei Gebäuden und technischen Anlagen
- die Modernisierung von Wärmeversorgungssystemen
- die Nutzung von zentralen und dezentralen Anlagen zur gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme
- der effiziente Einsatz von Kältemaschinen und Wärmepumpen
- die Anwendung von Techniken der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung in Industrie, Gewerbe und Haushalten
- die Verwendung verbrauchsgünstiger Pumpen und Ventilatoren
- die Steigerung der Energieeffizienz bei Druckluftsystemen
- die Nutzung energieeffizienter Lufttechnik
- der Einsatz verbesserter Lüftungs- und Klimatisierungssysteme
- der Einsatz energieeffizienter Elektromotoren
- die Entwicklung und Anwendung effizienter Speichersysteme
- der Einsatz sparsamerer Geräte in Haushalten sowie in Büros und Verwaltungen
- die Nutzung energieeffizienter Beleuchtungstechniken
- der Einsatz energieeffizienter Informationstechniken und Rechenzentren
- die stärkere Nutzung von Regelungs- und Automatisierungstechniken
- die Anwendung von Energiemanagementsystemen und von energiebezogenen Monitoring-Konzepten
- die Verbesserung der Energieeffizienz im Verkehrswesen – etwa durch weiterentwickelte Fahrzeugtechniken

Ingenieure haben sich in Deutschland – wohl intensiver als in vielen anderen Staaten – den hier sichtbaren Aufgabenstellungen bereits in der Vergangenheit mit schöpferischer Intelligenz zugewandt. Das vorliegende Buch soll u. a. dazu beitragen, dass mithilfe der Grundlagen der Thermodynamik wärmetechnische Fragen gelöst sowie wärmetechnische Anlagen und Prozesse fachgerecht dimensioniert werden können, um dem Ziel einer Begrenzung des erforderlichen Stoff- und Energieeinsatzes zu entsprechen und in Teilen der hier aufgeführten Technikfelder die Energieeffizienz weiter zu erhöhen.

Abbildungsnachweis:

Einleitung: E.1: Julius Robert Mayer. Abbildung von Friedrich Berrer, 1868. Copyright frei.

E.1: James Prescott Joule. Gemälde von John Collier, 1882. Copyright frei.

E.1: Hermann von Helmholtz. Gemälde: www.helmholtz-fonds.de.

E.1: Rudolf Clausius. Abbildung aus: Energie-Wissen udo.leuschner.de.

E.1: Ludwig Boltzmann. Abbildung aus: Physik in Wien im 19. Jahrhundert. geschichte.univie.ac.at.

E.2: Carl Blechen: Schloss Heidelberg, der zerstörte Turm. Gemälde aus: Carl Blechen. Verlag C.H. Beck, München 1989.

E.2: Bunker einer Müllverbrennungsanlage. Bild: M. Dehli.

E.2: Feuer. Bild: M. Dehli.

E.3: Georg Wilhelm Friedrich Hegel. Gemälde aus: Hegel-Haus Stuttgart.

E.3: Rembrandt van Rijn: Paulus im Gefängnis. Gemälde aus: Rembrandt-Museum Amsterdam.

E.3: Farn. Bild: M. Dehli.

E.3: Murmeltier. Bild: M. Dehli.

E.4: Carl Spitzweg: Der Besuch des Landesvaters. Gemälde aus: Carl Spitzweg, DuMont Buchverlag Köln 1980.

E.4: Hauptverkehrszeit. Bild: M. Dehli.

E.4: Wärmetechnisches Labor der Hochschule Esslingen. Bild: M. Dehli. Keine Persönlichkeitseinschränkungen.

E.5: Drei-Schluchten-Wasserkraftwerk. Bild: www.news.cn.

E.5: Photovoltaik-Anlage. Bild: E.on SE. www.E.on.de.

E.5: Seegestützter Windkraftpark. Bild: E.on SE. www.E.on.de.

E.5: Biogasanlage. Bild: Fachverband Biogas e.V., Freising.

E.6: GuD-Heizkraftwerk Düsseldorf-Lausward. Bild: Stadtwerke Düsseldorf AG.

E.6: Stationäre Gasturbine. Bild: General Electric Gas Power.

E.6: Druckluft-Heizkraftwerk. Bild: Bosch-KWK-Systeme GmbH.

E.7: Einstufige Standardpumpe. Bild: Grundfos A/S, Bjerringbro.

E.7: Industrie-Wärmepumpe. Bild: Combitherm Apparate- und Anlagenbau GmbH, Fellbach.

E.7: Plattenwärmeübertrager. Bild: Kelvion GmbH, Bochum.

E.7: Wärmedämmung eines Wohngebäudes. Infrarot-Bild: eza! Energie- und Umweltzentrum Allgäu, Kempten.

Kapitel 1 bis 12 und Anhang: Alle Bilder vom Autor.

Anhang: Diagramm 23: Grundlage des $\lg p, h$ -Diagramms durch Hochschule Zittau/Görlitz,

KCE. ThermoFluidProperties UG Co. KG, Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Joachim Kretzschmar.