

Heinz Herwig | Tammo Wenterodt

Entropie für Ingenieure

Erfolgreich das Entropie-Konzept
bei energietechnischen Fragestellungen anwenden

PRAXIS



**VIEWEG+
TEUBNER**

Heinz Herwig | Tammo Wenterodt

Entropie für Ingenieure

Handbuch Maschinenbau

herausgegeben von A. Böge

Elektrotechnik für Maschinenbauer

von R. Busch

Grundlagen der Technischen Thermodynamik

von E. Doering, H. Schedwill und M. Dehli

Technische Berichte

von H. Hering und L. Hering

Wärmeübertragung

von H. Herwig und A. Moschallski

Englisch für Maschinenbauer

von A. Jayendran

Thermodynamik für Ingenieure

von Klaus Langeheinecke (Hrsg.), Peter Jany und G. Thielecke

Lehrwerk Roloff/Matek Maschinenelemente

von H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek

Werkstoffkunde

von W. Weißbach

Heinz Herwig | Tammo Wenterodt

Entropie für Ingenieure

Erfolgreich das Entropie-Konzept
bei energietechnischen Fragestellungen anwenden

Mit 57 Abbildungen

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER

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

1. Auflage 2012

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2012

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, 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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-1714-3

Vorwort

„Entropie für Ingenieure“ ist sicherlich kein gewöhnliches Buch. Nach Ansicht der Autoren gibt es aber gute Gründe dafür, ein solches Buch mit dem zentralen Thema *Entropie* speziell für Ingenieure zu schreiben. Bei diesem Versuch, auch Ingenieure (und nicht nur Physiker oder Chemiker) für das Entropiekonzept zu „begeistern“ geht es darum, den praktischen Nutzen einer Berücksichtigung der Entropie bei ingenieurtechnischen Fragestellungen deutlich zu machen.

Wir möchten zeigen, dass bestimmte Bewertungen technischer Vorgänge bzw. eine Optimierung von bestimmten energietechnischen Prozessen mit Hilfe der Entropie auf elegante Weise möglich ist - und manchmal auf die Entropie als zu berücksichtigende Größe auch nicht verzichtet werden kann. Der Aussage „Es geht auch ohne Entropie“ können wir nur entgegensetzen „Aber mit Entropie geht es besser!“ Aber sehen Sie selbst, liebe Leser . . .

An diesem Buch haben viele mitgewirkt. Ein besonderer Dank geht an Bastian Schmandt, der uns mit einer Reihe von Beispielen unterstützt hat. Bei der Erstellung der druckfähigen Version haben Frau Hagemeyer, Frau Jaeger und Frau Moldenhauer tatkräftig mitgeholfen. Der Verlag hat uns bei der Erstellung des Manuskripts stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden, allen sei herzlich gedankt.

Hamburg, Oktober 2011

Heinz Herwig

Tammo Wenterodt

Inhaltsverzeichnis

1 Themenbegrenzung	1
2 Annäherung an einen Begriff: Was ist Entropie?	3
2.1 Die Bedeutung der Entropie in technischen Fragestellungen	4
2.2 Energie, Arbeit, Wärme und Entropie	5
2.3 Entropie: Eine Zustandsgröße in thermodynamischen Systemen . . .	7
2.4 Entropie: Ein Maß für den strukturellen Zustand eines Stoffes im System	8
2.5 Entropieänderungen: Transport und Produktion	11
2.6 Entropie und Umgebungszustand	12
2.7 Entropie und Exergieverluste	15
2.8 Entropieproduktion und Energieentwertung	15
2.9 Entropie und Wärme	16
2.10 Vermeintlich verwandte Begriffe zur Entropie	19
2.10.1 Negentropie	19
2.10.2 Entransie	19
2.10.3 Entrophie	20
3 Mathematische Beschreibung	21
3.1 Gleichgewichts- und Nicht-Gleichgewichtssituationen	21
3.2 Die Entropie-Bilanzgleichung	23
3.3 Die Energie-Bilanzgleichung	28
3.3.1 Weitere Überlegungen zur mechanischen Teilenergiegleichung	30
3.3.2 Weitere Überlegungen zur thermischen Teilenergiegleichung	31
Hauptteil	35
A Entropie und konzeptionelle Überlegungen	35
4 Verluste in technischen Prozessen allgemein	37
5 Verluste in Strömungsprozessen	39
5.1 Der Grenzfall verlustfreier Strömungen	39
5.2 Die Bewertung verlustbehafteter Strömungen	42
6 Verluste bei der Wärmeübertragung	45
6.1 Der Grenzfall verlustfreier Wärmeübertragung	45
6.2 Die Bewertung verlustbehafteter Wärmeübertragung	48

6.3	Auswirkungen irreversibler Wärmeübertragung	58
B	Entropie und die Bestimmung von Verlusten	63
7	Bestimmung von Verlusten in Strömungsprozessen	65
7.1	Verlust- und Widerstands-Beiwerte	65
7.1.1	Durchströmungen	66
7.1.2	Umströmungen	69
7.2	Bestimmung der Entropieproduktion in laminaren und turbulenten Strömungen	70
7.2.1	Laminare Strömungen	72
7.2.2	Turbulente Strömungen	84
8	Bestimmung von Verlusten bei der Wärmeübertragung	103
8.1	Wärmeübertragung durch reine Leitung	103
8.2	Konvektive Wärmeübertragung	105
8.2.1	Verluste bei der konvektiven Wärmeübertragung	107
8.2.2	Kopplung von Strömungs- und Temperaturfeldern	108
8.3	Wärmeübertragung mit Phasenwechsel	113
8.4	Wärmeübertragung durch Strahlung	121
8.4.1	Wärmestrahlung und Photonengas	123
8.4.2	Wärmestrahlung und Schwarzkörper-Strahlung	125
8.4.3	Die Exergie der Strahlung	130
8.4.4	Ausblick	135
C	Entropie und die Bewertung und Optimierung von Prozessen	137
9	Bewertung von komplexen Gesamtprozessen	139
10	Bewertung von Einzelprozessen	145
11	Optimierung von Prozessen	151
11.1	Definition und Erläuterungen	151
11.1.1	Prozess-Zielgröße(n)	151
11.1.2	Prozess-Bedingungen	152
11.1.3	Variation der freien Prozess-Parameter	152
11.2	Optimierungsstrategien	153
11.2.1	Optimierung mit bis zu zwei freien Prozess-Parametern	153
11.2.2	Optimierung mit mehreren freien Prozess-Parametern	158
	Literaturverzeichnis	163
	Allgemeine Literatur zum 2. Hauptsatz der Thermodynamik	167
	Index	168

Verzeichnis der Beispiele

1. Mikro- und Makrozustände eines Systems	10
2. Energiezufuhr in Form von Arbeit oder Wärme	16
3. Bestimmung des Exergieanteils u^E der spezifischen inneren Energie u	32
4. Bewertung einer Wärmeübertragung als Teil eines Kreisprozesses	53
5. Entropieproduktion in einer Trennwand	54
6. Reversibler und irreversibler Wärmeübergang im Vergleich	61
7. Bestimmung der Reibungszahl einer ausgebildeten laminaren Kanalströmung mit glatten Wänden	74
8. Bestimmung der Reibungszahl einer ausgebildeten laminaren Kanalströmung mit rauen Wänden	76
9. Bestimmung des Verlust-Beiwertes eines laminar durchströmten 90°-Krümmers	80
10. Bestimmung der Reibungszahl einer ausgebildeten turbulenten Rohrströmung mit rauen Wänden	96
11. Bestimmung des Verlust-Beiwertes eines turbulent durchströmten 90°-Krümmers	99
12. Entropieproduktion in einer Trennwand, vgl. Beispiel 5	104
13. Bestimmung der Entropieproduktion aus den Daten einer Direkten Numerischen Simulation (DNS)	109
14. Wärmeübergang mit Phasenwechsel / ein Argument für Dampfkraftwerke	115
15. Hohlraum- und Schwarzkörper-Strahlung als Idealisierung realen Strahlungsverhaltens	128
16. Energetische und exergetische Wirkungsgrade von Wärmekraftanlagen	141
17. Exergetische Bewertung des konvektiven Wärmeübergangs einer turbulenten Rohrströmung	146
18. Exergetische Bewertung des konvektiven Wärmeübergangs einer turbulenten Rohrströmung mit Wandrauheit	148
19. Optimierung einer Diffusorgeometrie mit zwei freien Parametern	154
20. Optimierung einer Diffusorgeometrie mit mehreren freien Parametern	159

Nomenklatur

Indizes, Sub- und Superskripte

- \square' Wert pro Länge
- \square' Wert in der flüssigen Phase
- \square' Schwankungsgröße
- \square'' Wert pro Fläche
- \square'' Wert in der Dampfphase
- \square''' Wert pro Volumen
- \square_1 Wert im Querschnitt ①
- \square_{12} Änderung eines Wertes vom Querschnitt ① zum Querschnitt ②
- \square_2 Wert im Querschnitt ②
- \square_A Wert im Teilsystem A
- \square_B Wert im Teilsystem B
- \square_U Wert der Umgebung bzw. im Umgebungszustand
- \square^A Anergieanteil
- \square^E Exergieanteil
- $\Delta\square$ Differenz/Änderung eines Wertes

Variablen und Konstanten

A	Fläche	m^2
\hat{A}	Teilfläche, Übertragungsfläche	m^2
A_m	Querschnittsfläche	m^2
c	(querschnittsgemittelte) Geschwindigkeit	m/s
c_p	spezifische isobare Wärmekapazität	J/kg K
c_W	Widerstands-Beiwert	-
D	Durchmesser	m

D_h	hydraulischer Durchmesser	m
E	Energie	J
\dot{E}	Energiestrom, Leistung	W
E^A	Anergieanteil der Energie	J
E^E	Exergieanteil der Energie	J
E_V^E	Exergieverlust	J
\vec{g}	Gravitationsvektor ($\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)$; $ \vec{g} = g$)	m/s ²
h	spezifische Enthalpie	J/kg
h	charakteristische Länge der Rauheitselemente	m
H	halbe Kanalhöhe	m
Δh_V	spezifische Verdampfungsenthalpie	J/kg
k	turbulente kinetische Energie	m ² /s ²
k_S	Sandrauheit	m
K	relative Rauheit	-
K_S	relative Sandrauheit	-
L	charakteristische Abmessung	m
L_c	charakteristische Länge	m
L_N	Länge des Nachlaufs	m
\hat{L}_N	Bereich des Nachlaufs in dem 95 % von $\dot{S}_N - \dot{S}_{N,0}$ auftritt	m
L_V	Länge des Vorlaufs	m
\hat{L}_V	Bereich des Vorlaufs in dem 95 % von $\dot{S}_V - \dot{S}_{V,0}$ auftritt	m
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
Nu	Nußelt-Zahl	-
p	Druck	Pa
p_U	Umgebungsdruck	Pa
P	normierter Prozess-Parameter	-
P_{el}	elektrische Leistung	W
P_{mech}	mechanische Leistung	W
q	spezifischer Wärmestrom	J/kg
\vec{q}	Wärmestromdichtevektor ($\vec{q} = (\dot{q}_x, \dot{q}_y, \dot{q}_z)$)	W/m ²

\dot{q}_{Sab}	abgehende Strahlungsstromdichte	W/m^2
\dot{q}_{Szu}	zugehende Strahlungsstromdichte	W/m^2
\dot{q}_{W}	Wandwärmestromdichte	W/m^2
\dot{q}_x	Wärmestromdichte in x -Richtung	W/m^2
\dot{q}_y	Wärmestromdichte in y -Richtung	W/m^2
\dot{q}_z	Wärmestromdichte in z -Richtung	W/m^2
Q	in Form von Wärme übertragene Energie	J
\dot{Q}	in Form von Wärme übertragener Energiestrom (Wärmestrom)	W
\dot{Q}_{W}	Wandwärmestrom	W
\dot{Q}^{E}	Exergieanteil eines Wärmestroms	W
R	Radius	m
Re	Reynolds-Zahl	-
Re_{Dh}	Reynolds-Zahl gebildet mit dem hydraulischen Durchmesser D_{h}	-
s	spezifische Entropie	J/kg K
\dot{s}_{irr}	Entropieproduktionsdichte	$\text{W/m}^2 \text{K}$
\dot{s}_{Sab}	abgehende Entropiestromdichte	$\text{W/m}^2 \text{K}$
\dot{s}_{Szu}	zugehende Entropiestromdichte	$\text{W/m}^2 \text{K}$
s_{U}	spezifische Entropie im Umgebungszustand	J/kg K
s^{H}	volumenspezifische Entropie der Hohlraumstrahlung	$\text{J/m}^3 \text{K}$
S	Entropie	J/K
\dot{S}	Entropieproduktionsrate	W/K
\dot{S}'	Entropieproduktion pro Lauflänge	W/m K
\dot{S}_{D}	Entropieproduktion auf Grund von Dissipation	W/K
\dot{S}'_{D}	querschnittsgemittelte Entropieproduktionsrate aufgrund von Dissipation	W/m K
\dot{S}'''_{D}	lokale Entropieproduktion auf Grund von Dissipation	$\text{W/m}^3 \text{K}$
\dot{S}''''_{D}	lokale Entropieproduktion aufgrund von direkter Dissipation	$\text{W/m}^3 \text{K}$
\dot{S}''''_{D}	lokale Entropieproduktion aufgrund von indirekter (turbulenter) Dissipation	$\text{W/m}^3 \text{K}$

\dot{S}_K	Entropieproduktionsrate im Krümmer	W/K
\dot{S}_N	Entropieproduktionsrate im Nachlauf	W/K
S_{pro}	Entropieproduktion	J/K
\dot{S}_{pro}	Entropieproduktionsrate	W/K
\dot{S}_Q	mit einem Wärmestrom übertragener Entropiestrom	W/K
\dot{S}_V	Entropieproduktionsrate im Vorlauf	W/K
\dot{S}_{WL}	Entropieproduktionsrate aufgrund von Wärmeleitung	W/K
\dot{S}'_{WL}	Entropieproduktionsrate aufgrund von Wärmeleitung pro Länge	W/m K
\dot{S}'''_{WL}	lokale Entropieproduktion auf Grund von Wärmeleitung	W/m ³ K
\dot{S}'''_{WL}	lokale Entropieproduktion aufgrund von direkter Wärmeleitung	W/m ³ K
$\dot{S}'''_{\text{WL}'}$	lokale Entropieproduktion aufgrund von indirekter (turbulenter) Wärmeleitung	W/m ³ K
dS	Entropieänderung	J/K
$d_{\text{pro}}S$	Entropieproduktion	J/K
$d_{\text{pro}}\dot{S}$	Entropieproduktionsrate	W/K
$d_{\text{trans}}S$	Entropieänderung aufgrund von Transportprozessen	J/K
$d_{\text{trans}}\dot{S}$	Entropieänderungsrate aufgrund von Transportprozessen	W/K
$d_{\dot{Q}_{\text{irr}}}\dot{S}$	Entropieänderungsrate aufgrund eines irreversibel übertragenen Wärmestroms	J/K
$d_{\dot{Q}_{\text{rev}}}\dot{S}$	Entropieänderungsrate aufgrund eines reversibel übertragenen Wärmestroms	J/K
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
\bar{T}	zeitlicher Mittelwert der Temperatur	K
T'	Schwankung der Temperatur	K
T_m	kalorische Mitteltemperatur	K
T_m	thermodynamische Mitteltemperatur	K
T_{SG}	Temperatur an der Systemgrenze	K
T_U	Umgebungstemperatur	K
T_W	Wandtemperatur	K

T_∞	Temperatur in weiter Entfernung von der Systemgrenze	K
ΔT	(treibende) Temperaturdifferenz	K
u	spezifische innere Energie	J/kg
u	Geschwindigkeit in x -Richtung	m/s
\bar{u}	zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit in x -Richtung	m/s
u'	zeitliche Schwankung der Geschwindigkeit in x -Richtung	m/s
u_c	charakteristische Geschwindigkeit	m/s
u_U	spezifische innere Energie im Umgebungszustand	J/kg
u^E	Exergieanteil der spezifischen inneren Energie	J/kg
u^H	volumenspezifische innere Energie des Hohlraum-Volumens	J/m ³
U	innere Energie	J
v	Geschwindigkeit in y -Richtung	m/s
v	spezifisches Volumen	m ³ /kg
\bar{v}	zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit in y -Richtung	m/s
v'	zeitliche Schwankung der Geschwindigkeit in y -Richtung	m/s
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor ($\vec{v} = (u, v, w)$)	m/s
v_U	spezifisches Volumen im Umgebungszustand	m ³ /kg
V	Volumen	m ³
w	Geschwindigkeit in z -Richtung	m/s
\bar{w}	zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit in z -Richtung	m/s
w'	zeitliche Schwankung der Geschwindigkeit in z -Richtung	m/s
w_t	spezifische technische Arbeit	J/kg
x	kartesische Koordinate (oft in Längenrichtung)	m
y	kartesische Koordinate (oft in Breitenrichtung)	m
z	kartesische Koordinate (oft in Höhenrichtung)	m

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
ε	Dissipation turbulenter kinetischer Energie	m ² /s ³

ζ	Verlust-Beiwert	-
ζ	exergetischer Wirkungsgrad	-
ζ^E	Exergieverlust-Beiwert	-
η	energetischer Wirkungsgrad	-
η	molekulare (dynamische) Viskosität	kg/m s
λ	molekulare Wärmeleitfähigkeit	W/m K
λ	Wellenlänge	m
λ_R	Reibungszahl	-
ν	kinematische Viskosität	m ² /s
ρ	Dichte	kg/m ³
$\vec{\tau}$	viskoser Spannungstensor	kg/m s ²
φ	spezifische Dissipation	J/kg
$\vec{\omega}$	Drehungsvektor	1/s
Φ	lokale Dissipation	W/m ³

1 Themenbegrenzung

Entropie für Ingenieure: dahinter verbirgt sich der Versuch bzw. die Hoffnung, dass Ingenieure - gewöhnt an pragmatisches Denken und Handeln - davon überzeugt werden können, auch die Entropie bei der Lösung technischer Probleme zu berücksichtigen. Dies kann nur gelingen, wenn praktische Gesichtspunkte im Vordergrund stehen und allzu abstrakte Ausführungen unterbleiben. Trotzdem verbleibt ein hoher Anspruch an die Bereitschaft und die Fähigkeit des Lesers bestehen, sich auf neue und vergleichsweise abstrakte Herangehensweisen an ein Problem einzulassen.

Entropie für Ingenieure beschreibt eine Einschränkung, ohne damit bereits präzise zu sein. Das im vorliegenden Buch verfolgte Konzept stellt gewollt und auch notwendigerweise eine starke Beschränkung gegenüber einem auch denkbaren Versuch dar, alle Aspekte der Entropie umfassend darzustellen. Die wesentlichen Einschränkungen und Themenbegrenzungen sind:

- *Die möglichst anschauliche Darstellung der Entropie bzw. aller damit verbundenen physikalischen Aussagen.* Dabei werden bestimmte Aspekte mit anschaulichen Begriffen erläutert, wie z.B. „Energieentwertung“ und „Arbeitsfähigkeit eines Systems“. In diesem Sinne wird bisweilen bewusst von einer thermodynamisch präzisen aber u.U. unanschaulichen und abstrakten Darstellung abgewichen.
- *Die Fokussierung auf Strömungs- und Wärmeübertragungsprozesse.* Damit werden physikalische Situationen behandelt, die vor allem im Zusammenhang mit der Energiewandlung aber auch der Heizung, Kühlung oder allgemein der Klimatisierung auftreten. Etwas verallgemeinert sind „energietechnische Prozesse“ bzw. „Strömungsprozesse mit Energieumsatz“ gemeint.

Damit werden z.B. Prozesse ausgeschlossen, in denen die chemischen oder biologischen Vorgänge oder die Mischung verschiedener Komponenten die wesentlichen Aspekte sind.

Insgesamt geht es im vorliegenden Buch darum, das physikalische Konzept zu vermitteln, das sich hinter der Größe Entropie verbirgt. Dies soll auch durch die Verwendung des Begriffes „Entropie-Konzept“ im Untertitel dieses Buches zum Ausdruck kommen.

2 Annäherung an einen Begriff: Was ist Entropie?

Was liegt näher, als im vorliegenden Zusammenhang zu fragen „Was ist Entropie?“ Ingenieure sind es gewöhnt, solcherart direkte und vermeintlich zielführende Fragen zu stellen. Sie erwarten dann Antworten der Art „Entropie ist ...“. Wenn nun dieses ... ein bestimmter Begriff oder einfacher Sachverhalt wäre, so würde „Entropie“ nur ein anderes Wort für einen bereits bekannten und klar umrissenen Sachverhalt sein. Dies ist aber nicht der Fall, weil sich hinter dem Begriff *Entropie* vielmehr ein physikalisches Konzept mit sehr vielen Facetten verbirgt, das nicht in einen anderen Begriff „übersetzt“, sondern nur in seiner Breite und Bedeutung in den unterschiedlichsten physikalischen Situationen erklärt werden kann. Diese Erklärung, bzw. die Aufnahme dessen, was im Zusammenhang mit der Entropie vermittelt werden kann und muss, ist ein Prozess, genauer ein *Lernprozess*.

In diesem Lernprozess geht es nicht darum, eine neue Vokabel zu lernen, sondern ein physikalisches Konzept sowie das dahinter stehende Prinzip zu verstehen und damit zu verinnerlichen. Solche Lernprozesse sind wir durchaus gewöhnt, weil wir z.B. mit dem Begriff der *Energie* auch erst nach einem langen Prozess des Umgangs mit diesem Begriff eine bestimmte Vorstellung damit verbinden. Nur, dieser Lernprozess hat im Falle der *Energie* sehr früh begonnen, weil er offensichtlich anders als dies bei der Entropie der Fall ist, einen Begriff betrifft, der für die unmittelbare Bewältigung unseres Alltags unerlässlich ist. Zumindest im Alltag kommen wir aber offensichtlich gut ohne den Entropie-Begriff zurecht. Dies heißt nicht, dass er überflüssig ist, sondern zunächst nur, dass er quasi als ein „Begriff höherer Ordnung“ erst gebraucht wird, wenn bestimmte spezielle Aspekte ins Spiel kommen, die erst bei einer gründlichen Durchdringung eines physikalischen Problems auftreten. In diesem Sinne ist der Energie-Begriff erforderlich, wenn wir z.B. verstehen wollen, wie elektrische Energie gewonnen werden kann, der Entropie-Begriff kommt ins Spiel, wenn wir verstehen wollen, warum man verschiedene Energieformen nicht beliebig ineinander umwandeln kann.

Die vorhergehenden Ausführungen machen deutlich, dass folgende Aussage, die in Bezug auf die Entropie bisweilen getroffen wird, absolut nicht zutrifft: „Versuchen Sie nicht, sich eine Vorstellung von der Größe Entropie zu machen, denn jede Vorstellung, die Sie davon haben, ist mit Sicherheit falsch“. Das klingt vermeintlich gut, geht aber vollständig am eigentlichen Problem vorbei! Ganz im Gegenteil geht es darum, sich das Verständnis für die Größe Entropie in einem gründlichen Lernprozess so anzueignen, dass es sinnvoll eingesetzt werden kann, um die physikalischen Aussagen nutzen zu können, die mit der Entropie in einer

bestimmten physikalischen Situation verbunden sind, s. dazu auch Herwig (2000, 2010).

2.1 Die Bedeutung der Entropie in technischen Fragestellungen

Ohne an dieser Stelle bereits auf konkrete Fragestellungen einzugehen, können ganz allgemein drei Felder ausgemacht werden, in denen mit Hilfe der Entropie wichtige und physikalisch weitreichende Aussagen möglich sind, die auf anderem Wege nur ansatzweise gewonnen werden könnten. Diese drei Felder werden in den nachfolgenden Ausführungen in jeweils eigenen Abschnitten abgehandelt und machen den Hauptteil des vorliegenden Buches aus. Sie sollen an dieser Stelle mit einer jeweiligen Kurzbezeichnung benannt werden:

- **Entropie und konzeptionelle Überlegungen** (Teil A, S. 37)

Dies bezieht sich darauf, dass unter Berücksichtigung der Entropie zunächst idealisierte (z.B. reversible) Prozesse identifiziert bzw. entworfen werden können. Anschließend ist es dann möglich, reale Prozesse in Relation zu diesen idealisierten Prozessen einzuordnen und zu bewerten.

- **Entropie und die Bestimmung von Verlusten** (Teil B, S. 65)

Mit Hilfe der Entropie können „Verluste“ in Prozessen unterschiedlichster Art zunächst eindeutig identifiziert und anschließend in konkreten Prozessen auch bestimmt werden. Dies geschieht in der Regel auf der Basis einer genauen numerischen Berechnung der Prozesse. Im Rahmen solcher CFD-Lösungen (CFD: Computational Fluid Dynamics) gelingt es, die Produktion von Entropie entweder durch die Integration lokaler Werte oder durch eine entsprechende globale Bilanz zu bestimmen, und anschließend daraus Aussagen über die „Verluste“ abzuleiten.

- **Entropie und die Bewertung und Optimierung von Prozessen** (Teil C, S. 139)

Bei dem Versuch, technische Prozesse zu verbessern, tritt häufig die Situation auf, dass die dafür vorgesehenen Maßnahmen mit „Nebenwirkungen“ behaftet sind, d.h. dass bestimmte Teilaspekte des Gesamtprozesses wie beabsichtigt verbessert werden, gleichzeitig aber auch andere, unbeabsichtigte Nebeneffekte auftreten, die sich auf den Gesamtprozess u.U. negativ auswirken. Dann muss entschieden werden, ob sich die Maßnahme insgesamt „lohnt“. Dies setzt aber voraus, dass sowohl die Teilprozesse als auch der Gesamtprozess nach sinnvoll definierten Kriterien bewertet werden können. Mit Hilfe der Entropie können in diesem Zusammenhang aussagekräftige Bewertungskriterien entwickelt werden.

Diese Bewertungskriterien können dann auch dazu verwendet werden, die betrachteten Prozesse bzgl. der damit beschriebenen Aspekte zu optimieren.