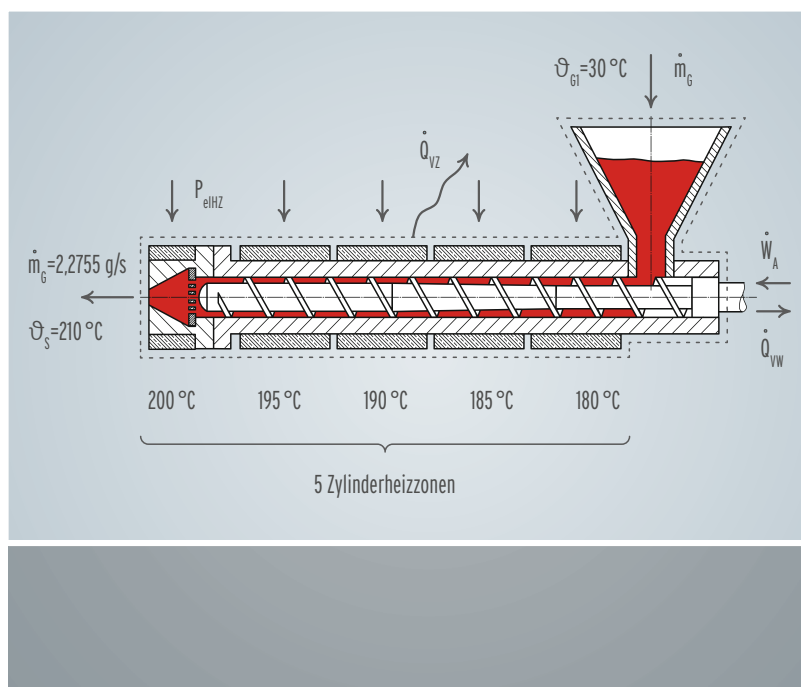


Wolfgang Kaiser  
Willy Schlachter

# Energie in der Kunststofftechnik

Grundlagen und Anwendungen für Ingenieure



HANSER



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe.de***

Wolfgang Kaiser  
Willy Schlachter

# **Energie in der Kunststofftechnik**

Grundlagen und Anwendungen für Ingenieure

HANSER

Die Autoren:

*Prof. Dr. Wolfgang Kaiser*, 5034 Suhr

*Prof. Dr. Willy Schlachter*, 5400 Baden

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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 Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2019 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Titelmotiv: Grafik aus Buch

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45409-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46059-1

# Inhalt

<b>Die Autoren</b> .....	<b>XIII</b>
Prof. Dr. phil. nat. Wolfgang Kaiser .....	XIII
Prof. Dr. sc. techn. Willy Schlachter .....	XIV
<b>Vorwort</b> .....	<b>XV</b>
<b>Hinweise zur Benutzung des Buches</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Verzeichnis der physikalischen Größen</b> .....	<b>XXV</b>
Griechische Zeichen .....	XXV
Lateinische Zeichen .....	XXVII
<b>Teil 1 Einführende Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
1.1 Zur Bedeutung der Energietechnik in der Kunststoffverarbeitung .....	3
1.2 Erforderliche Grundlagen .....	5
1.2.1 Übersicht .....	5
1.2.2 Systembetrachtung .....	6
1.2.3 Systemarten .....	9
1.2.4 Methodik der Problemlösung .....	9
1.3 Beispiel B 1.1: Beschreibung der Wechselwirkung mit der Umgebung für die Systemgrenzen A und B des skizzierten Systems „Extruder“ .....	12
Literatur zu Kapitel 1 .....	13
<b>2 Thermodynamik</b> .....	<b>15</b>
2.1 Thermodynamik – Übersicht .....	15
2.1.1 Vier Hauptsätze .....	15
2.1.2 Stoffverhalten und Zustandsgleichungen .....	19
2.2 Thermodynamik – Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme .....	21
2.2.1 Totale Energie und innere Energie .....	21

2.2.2	Verschiedene Formen des Energieerhaltungssatzes	22
2.2.3	Arbeitsterme	23
2.2.4	Volumenänderungs- und Verschiebearbeit, quasistatische Zustandsänderung	24
2.2.5	Reversible und irreversible Prozesse	26
2.2.6	Reibungsarbeit	27
2.2.7	1. HS mit Volumenänderungs- und Reibungsarbeit für das geschlossene System	29
2.2.8	Erste Fundamentalrelation	30
2.3	Thermodynamik – Erster Hauptsatz für offene Systeme	31
2.3.1	Massenbilanz	31
2.3.2	Ein-/Ausschiebearbeit, Enthalpie und Energiebilanz	32
2.3.3	Bernoulli-Gleichung als Spezialfall	35
2.3.4	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	36
2.3.5	Zweite Fundamentalrelation	37
2.3.6	1. HS mit Druckänderungs- und Reibungsarbeit für das offene System	38
2.4	Thermodynamik – Chemische Reaktionen	40
2.4.1	Einleitende Bemerkungen	40
2.4.2	Definitionen	41
2.4.3	Exotherme und endotherme Reaktionen	43
2.4.4	Gibbs-Energie/freie Enthalpie, freie Reaktionsenthalpie und Reaktionsentropie	44
2.5	Beispiel B 2.1: Wärmepumpe	47
2.6	Beispiel B 2.2: Isentrope und polytrope Zustandsänderungen	52
2.7	Beispiel B 2.3: Laden eines Druckluftspeichers I	56
2.8	Beispiel B 2.4: Laden eines Druckluftspeichers II	60
	Literatur zu Kapitel 2	64
<b>3</b>	<b>Fluidmechanik</b>	<b>65</b>
3.1	Einleitung	65
3.1.1	Allgemeine Bemerkungen	65
3.1.2	Grundlegende Strömungstypen	68
3.2	Klassifizierung viskoser Fluide	69
3.2.1	Ebene Scherströmung und Scherviskosität	69
3.2.2	Dehnströmung und Dehnviskosität	72
3.3	Aufwärmung von Polymerschmelzen durch Arbeitszufuhr	74
3.4	Einführung in die Ähnlichkeitstheorie am Beispiel Rohrströmung	77
3.4.1	Grundsätzliche Überlegungen	77
3.4.2	Moody-Diagramm	80
3.4.3	Hydraulischer Durchmesser	81
3.5	Ausgebildete laminare Strömung newtonscher Fluide in einfachen Kanälen	81

3.5.1	Kreisrohr .....	82
3.5.2	Schlitz (Rechteckquerschnitt) .....	84
3.6	Druckverluste newtonscher Fluide in Leitungssystemen .....	85
3.7	Beispiel B 3.1: Rohrströmung: Druckabfall und Temperaturerhöhung ..	87
3.8	Beispiel B 3.2: Zum Ansatz des Rohrreibungskoeffizienten $\lambda$ .....	92
3.9	Beispiel B 3.3: Zur Auswertung von Modellversuchen .....	94
	Literatur zu Kapitel 3 .....	98
<b>4</b>	<b>Wärmeübertragung .....</b>	<b>99</b>
4.1	Übersicht und Definitionen .....	99
4.2	Stationäre Wärmeleitung in ruhenden Stoffen und Wärmedurchgang ..	101
4.2.1	Fouriersches Wärmeleitungsgesetz .....	101
4.2.2	Wärmedurchgang – ebene Wände .....	102
4.2.3	Wärmedurchgang in Hohlzylindern und Hohlkugeln .....	103
4.3	Wärmeübertrager und mittlere logarithmische Temperaturdifferenz ..	106
4.4	Konvektion – Allgemeines .....	108
4.5	Erzwungene Konvektion .....	111
4.5.1	Interne Strömung (Rohre, Kanäle) .....	111
4.5.2	Externe Strömung (Plattenströmung, querangeströmte Körper)	116
4.5.3	Prallströmung .....	117
4.6	Freie Konvektion .....	120
4.7	Strahlung .....	123
4.7.1	Einführung und Definitionen .....	123
4.7.2	Schwarzkörperstrahlung .....	126
4.7.3	Emissions-, Absorptions- und Transmissionsverhältnis .....	128
4.7.4	Strahlungsaustausch – Einführung .....	130
4.7.5	Sichtfaktoren (View-Factors) .....	131
4.7.6	Strahlungsaustausch zwischen schwarzen Flächen .....	135
4.7.7	Strahlungsaustausch zwischen grau-diffus strahlenden Flächen .....	136
4.8	Beispiel B 4.1: Kritischer Isolationsradius .....	140
4.9	Beispiel B 4.2: Rohrisolation .....	145
4.10	Beispiel B 4.3: Abkühlung Folie .....	150
4.11	Beispiel B 4.4: Wärmeverlust Werkzeug .....	154
	Literatur zu Kapitel 4 .....	156
<b>5</b>	<b>Materialverhalten .....</b>	<b>157</b>
5.1	Grundsätzliche Bemerkungen .....	157
5.2	Materialverhalten von Kunststoffen .....	158
5.2.1	Grundlagen .....	158
5.2.1.1	Polymer-Rohstoff/e .....	159
5.2.1.2	Zusatzstoff/e/Additiv/e .....	161



5.2.2	Einteilung der Kunststoffe	163
5.2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	163
5.2.3.1	Hauptvalenzbindungen	163
5.2.3.2	Nebervalenzbindungen	165
5.2.3.3	Mechanische Bindungen	168
5.2.4	Verhalten von Kunststoffen im festen Zustand	169
5.2.4.1	Thermisch-mechanisches Verhalten	169
5.2.5	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoffschmelzen	174
5.2.5.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplast-Schmelzen	176
5.2.5.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen	179
5.2.6	Thermische Kennwerte	181
5.2.6.1	Spezifische Wärmekapazität $c_p$ , spezifische Enthalpie $h$	183
5.2.6.2	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	185
5.2.6.3	Temperaturleitfähigkeit $a$ und Wärmeeindringzahl $b$	187
5.2.6.4	Thermische Ausdehnung	189
5.2.6.5	$p$ - $v$ - $T$ -Diagramme	191
5.2.6.6	Sonderfall: Schweißen von Kunststoffen	196
5.2.7	Thermische Einflüsse bei der Alterung von Kunststoffen	198
5.2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge	198
5.2.7.2	Thermisches Alterungsverhalten von Kunststoffen	199
5.3	Zum fluidmechanischen Verhalten von Fluiden	201
5.3.1	Einleitung	201
5.3.2	Newtonsches und nicht-newtonsches Fluidverhalten, experimentelle Beobachtungen	202
5.3.3	Zur tensoriellen Beschreibung	204
5.3.4	Rheologische Stoffgleichungen	208
5.4	Quellen für Stoffdaten	209
5.4.1	Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase	209
5.4.1.1	Ideale Gase und feuchte Luft	210
5.4.1.2	$h$ - $x$ -Diagramme	210
5.4.1.3	Öle (Mineral- und Hydrauliköle)	210
5.4.2	Kunststoffe	211
	Literatur zu Kapitel 5	211

## Teil 2 Erweiterte Grundlagen 213

<b>6</b>	<b>Stationäre Wärmeleitung</b>	<b>215</b>
6.1	Temperaturverlauf in Rippen (Rippentheorie)	215
6.1.1	Energiebilanz	215
6.1.2	Lange Rippe	217
6.1.3	Rippe endlicher Länge	218
6.1.4	Rippenwirkungsgrad	220
6.1.5	Längsleitung in langen Körpern mit Relativbewegung	221

6.2	Beispiel B 6.1: Wirksamkeit von Rippen .....	224
6.3	Beispiel B 6.2: Abkühlung Polyamid-Draht – Stationäre Betrachtung ..	228
	Literatur zu Kapitel 6 .....	232
<b>7</b>	<b>Instationäre Wärmeleitung .....</b>	<b>233</b>
7.1	Einleitung und Fouriersche Wärmeleitungsgleichung .....	233
7.2	Einführung in die eindimensionale Wärmeleitung, Biot-Zahl und Fourier-Zahl .....	239
7.2.1	Anfangsphase („early regime“) – näherungsweise Betrachtung	240
7.2.2	Spätphase („late regime“) .....	242
7.2.3	Halbunendlicher Körper .....	244
7.3	Kontaktproblem: zwei sich berührende halbunendliche Körper .....	247
7.4	Periodische Temperaturänderungen .....	249
7.5	Eindimensionaler Wärmefluss in einfachen Körpern – Einleitung .....	251
7.6	Eindimensionaler Wärmefluss in einfachen Körpern – Platte .....	255
7.7	Eindimensionaler Wärmefluss in einfachen Körpern – Zylinder und Kugel .....	260
7.7.1	Langer Zylinder .....	260
7.7.2	Kurzer Zylinder .....	262
7.7.3	Kugel .....	262
7.8	Näherungslösungen für Platte, Zylinder und Kugel .....	265
7.8.1	Korrelationen .....	265
7.8.2	Vereinfachte Ermittlung der Abkühlzeiten .....	266
7.8.2.1	Abkühlzeiten für $Bi \rightarrow \infty$ .....	266
7.8.2.2	Abkühlzeiten für beliebige Werte $Bi$ .....	268
7.8.3	Effektive Temperaturleitfähigkeit $a_{\text{eff}}$ .....	270
7.9	Beispiel B 7.1: Abkühlung Polyamid-Draht – Instationäre Betrachtung ..	271
7.10	Beispiel B 7.2: Wanddicke versus Zykluszeit .....	272
7.11	Beispiel B 7.3: Temperieren Werkzeug .....	280
7.12	Beispiel B 7.4: Kühlwalze .....	287
	Literatur zu Kapitel 7 .....	291
<b>8</b>	<b>Thermodynamik .....</b>	<b>293</b>
8.1	Trocknung .....	293
8.1.1	Einleitung .....	293
8.1.2	Eigenschaften feuchter Luft .....	295
8.1.3	Eigenschaften des Feuchtgutes .....	305
8.1.4	Massen- und Energiebilanz .....	306
8.2	Ergänzungen zur Trocknung .....	307
8.2.1	Sorptionsisotherme .....	307
8.2.2	Kühlgrenze .....	308
8.2.3	Zeitlicher Verlauf der Lufttrocknung .....	311

8.2.3.1	Qualitative Betrachtung	311
8.2.3.2	Vereinfachte quantitative Betrachtung für die Trocknungsphase I	312
8.2.3.3	Örtlicher und zeitlicher Verlauf der Lufttrocknung über- und durchströmter ruhender Güter	320
8.3	Beispiel B 8.1: Trocknung Granulat	324
8.4	Beispiel B 8.2: Kühlgrenze	328
8.5	Beispiel B 8.3: Bandtrockner	331
	Literatur zu Kapitel 8	334
<b>9</b>	<b>Fluidmechanik</b>	<b>337</b>
9.1	Einleitung	337
9.2	Fließgesetz von Ostwald-de Waele	339
9.3	Ebene Kanalströmung newtonscher Fluide	341
9.3.1	Geschwindigkeitsprofil	341
9.3.2	Temperaturprofil	345
9.3.3	Energie- und Wärmeflussbetrachtung	347
9.4	Ebene Kanalströmung nicht-newtonscher Fluide	350
9.4.1	Geschwindigkeitsprofil	350
9.4.2	Temperaturprofil	353
9.5	Axiale Rohrströmung nicht-newtonscher Fluide	356
9.5.1	Geschwindigkeitsprofil	356
9.5.2	Temperaturprofil	357
9.6	Axiale Ringspaltströmung newtonscher Fluide	358
9.7	Abschließende Hinweise	362
9.8	Beispiel B 9.1: Reibungspumpe	365
9.9	Beispiel B 9.2: Zur Ähnlichkeitstheorie nicht-newtonscher Fluide	369
9.10	Beispiel B 9.3: Tankentleerung	371
9.11	Beispiel B 9.4: Viskose Rohrströmung: Druckabfall und Temperaturerhöhung	376
9.12	Beispiel B 9.5: Temperaturprofil bei viskoser Rohrströmung	379
	Literatur zu Kapitel 9	382
<b>10</b>	<b>Recycling von Kunststoffen</b>	<b>383</b>
10.1	Einleitung	383
10.1.1	Im Spannungsfeld der Kunststoffabfälle zwischen Recycling und kontrollierter energetischer Nutzung	383
10.1.2	Nachhaltige Entwicklungsziele, SDG	384
10.1.3	Die Kunststofftechnik und ihr Beitrag zu den SDGs	385
10.1.4	Fazit	386
10.2	Abfallwirtschaft und Grenzen des Recyclings	386

10.2.1	Abfall- und Recyclinghierarchie .....	386
10.2.2	Abfallwirtschaft und Recycling aus Sicht der Kunststoffindustrie .....	387
10.2.3	Deponie .....	388
10.2.4	Littering alias Vermüllung .....	389
10.3	Behandlung von Kunststoffabfällen .....	389
10.3.1	Die Crux des werkstofflichen Recyclings .....	390
10.3.2	Am Ende der Lebensdauer angelangt? .....	393
10.4	Kontrollierte energetische Nutzung .....	394
10.4.1	Kehrichtheizkraftwerke .....	394
10.4.2	Zementindustrie .....	396
10.4.3	Hochofenprozess .....	396
10.5	Energiebilanzen .....	397
10.6	Zusammenfassung und Ausblick .....	398
10.6.1	Ausblick .....	399
	Literatur zu Kapitel 10 .....	400
	<b>Teil 3 Praxisbeispiele .....</b>	<b>401</b>
	<b>11 Praxisbeispiele .....</b>	<b>403</b>
11.1	Energiefluss Produktion .....	403
11.2	Energiebedarf Spritzgießmaschine .....	406
11.3	Energiebilanz Spritzgießmaschine .....	409
11.4	Düsencharakteristik .....	417
11.5	Granulat-Trocknung .....	420
11.6	Reibschweißen .....	431
11.7	Speicherhydraulik .....	438
	Literatur zu Kapitel 11 .....	448
	<b>12 Anhang Bilder .....</b>	<b>449</b>
	<b>Index .....</b>	<b>451</b>



# Die Autoren

## ■ Prof. Dr. phil. nat. Wolfgang Kaiser

Wolfgang Kaiser studierte und promovierte am Chemischen Institut der Universität Zürich. Anschließend folgten mehrere Jahre Industrietätigkeit im Bereich F+E auf dem Gebiet der Additive (J. R. Geigy AG, Basel). Danach die Berufung zum Professor an die FH Nordwestschweiz (ehemals HTL Brugg-Windisch).

Vor Jahrzehnten formulierte der Autor für seine Studierenden den „Hauptsatz der Kunststofftechnik“:

Polymer-Rohstoff(e) + Zusatzstoff(e)  $\Rightarrow$  Kunststoff

Dieser erleichtert nach wie vor vielen Ingenieuren den Zugang zu den Kunststoffen als Werkstoffklasse mit eigenen Gesetzmäßigkeiten.

Anlässlich seines 70. Geburtstags wurde Wolfgang Kaiser von der ETH Zürich mit der Staudinger-Durrer-Medaille ausgezeichnet. Die Ehrung erfolgte in Anerkennung seiner großen Verdienste auf dem Gebiet der Polymerwerkstoffe. Als „Kunststoff-Kaiser“ prägte er Hundertschaften von Ingenieuren in Windisch, in späteren Jahren auch am Departement Materialwissenschaft der ETH Zürich. Daneben übernahm er „berufsbegleitend“ den Aufbau und Betrieb des Kunststoff-Ausbildungs- und Technologie-Zentrums (KATZ) in Aarau und war dessen langjähriger erster Geschäftsführer in Personalunion. Er ist Begründer einer systematischen Aus- und Weiterbildung in Kunststofftechnik für Ingenieure in der Schweiz.

Wolfgang Kaiser ist darüber hinaus Autor und Koautor zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen auf dem Gebiet der Kunststofftechnik.



## ■ Prof. Dr. sc. techn. Willy Schlachter

Willy Schlachter studierte Maschinenbau an der ETH Zürich und promovierte am Institut für Thermische Turbomaschinen bei Prof. Dr. Walter Traupel. Anschließend war er an der Naval Postgraduate School in Monterey/California als Visiting Assistant Professor in Lehre und Forschung tätig. Seine Industrietätigkeit begann er bei der Brown Boveri-Sulzer Turbomaschinen AG als Entwicklungsingenieur. Seine weiteren Stationen waren: Leiter Entwicklung Gasturbinen bei Sulzer in Winterthur, Abteilungsleiter im Labor Thermische Maschinen bei BBC in Baden, Mandat Technik im Kraftwerksbereich der BBC und nach der Fusion mit ASEA bei ABB. Ruf als ordentlicher Professor für Thermische Strömungsmaschinen an die Universität Stuttgart, den er aus familiären Gründen nicht annehmen konnte. Ruf als Dozent für Maschinentechnische Fächer und Abteilungsvorstand Maschinenbau an die damalige HTL Brugg-Windisch. Vizedirektor und später Direktor Technik der Fachhochschule Aargau. Unterrichtstätigkeit in Thermodynamik, Fluidmechanik, Wärmeübertragung und Energietechnik sowie Betreuung von Studien- und Forschungsprojekten in diesen Gebieten. Nach der Fusion zur Fachhochschule Nordwestschweiz Leitung des Aufbaus der interdisziplinären Forschung.

Willy Schlachter war Mitverfasser eines Thermodynamik-Lehrbuches und Mitherausgeber der beiden Bände „Ingenieure bauen die Schweiz“, Verlag NZZ Libro.



# Vorwort

Energie ist unzerstörbar – doch was bedeutet diese fundamentale Erkenntnis in der Praxis für die Kunststofftechnik?

Basierend auf wissenschaftlich-technischen Überlegungen versucht dieses Buch seinem Benutzer primär geeignete „Werkzeuge“ für das bessere Verständnis und die Anwendung dieser Aussage im Kunststoff-Alltag an die Hand zu geben. Speziell auf dem Gebiet der Ver- und Bearbeitung von Kunststoffen und den damit verbundenen Energieflüssen zukünftig noch mehr Beachtung schenken zu können. Das Ganze nicht zuletzt zum eigenen Vorteil. Zugleich ist in den letzten Jahren das Bewusstsein für den sorgsamen Umgang mit Energie als wertvolle und Kosten verursachende Ressource enorm gestiegen.

Energie in der Kunststofftechnik ist ein stark interdisziplinäres Gebiet, in dem es bislang an Lehrbüchern, speziell unter Einbeziehung der Praxis, mangelt. Dies betrifft sowohl den deutschen als auch den angelsächsischen Sprachraum. Mit dem vorliegenden Werk wurde daher der Versuch unternommen, diese Lücke zu schließen und den Ingenieurinnen und Ingenieuren im Berufsalltag:

- eine Einführung und Übersicht in dieses interdisziplinäre Fachgebiet zu geben;
- die wesentlichsten theoretischen Grundlagen und deren Anwendung zu vermitteln;
- den Zugang zur Fachliteratur zu erleichtern;
- energietechnische Fragestellungen methodisch anzugehen; d. h. die wesentlichen Zusammenhänge und das Abschätzen korrekter Größenordnungen ingenieurmäßig zu erfassen als Vorstufe zu detaillierteren Abklärungen (Simulationen, Konzeption von Experimenten).

## **An wen richtet sich dieses Buch?**

Vornehmlich an:

- Ingenieurinnen und Ingenieure, die in Industrie, Forschung und/oder Entwicklung tätig sind,
- Studierende an Universitäten und Hochschulen,
- aber auch an all diejenigen, die einen Einstieg in dieses faszinierende Gebiet suchen.



## Zum Inhalt und zum Aufbau des Buches

Der *erste Teil* ist einführenden Grundlagen gewidmet, wie sie in Bachelor-Kursen der Verfahrenstechnik oder des Maschinenbaus vermittelt werden. Im *zweiten Teil* folgen erweiterte Grundlagen, die eher auf Master-Level anzusiedeln sind. Jedem Grundlagenkapitel sind exemplarische, nach einheitlicher Methodik gelöste *Grundlagenbeispiele* zur Vertiefung beigelegt. In beiden Teilen geht es um das erleichterte Verständnis der Grundlagen in den Fachgebieten

- Thermodynamik,
- Fluidmechanik newtonscher und nicht-newtonscher Fluide,
- Wärmeübertragung,
- Stoffübertragung,
- Materialverhalten von Fluiden und von Feststoffen.

Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass je nach Vorbildung die Zuhilfenahme eines Lehrbuchs aus dem einen oder anderen Fachgebiet empfehlenswert ist. Auch finden sich im Literaturverzeichnis die jeweils empfohlenen Lehrbücher (Textbooks), auf die sich die einzelnen Darstellungen stützen. Die Beschreibung der Stoffübertragung, ein Gebiet, das in engem Zusammenhang mit der Wärmeübertragung steht, beschränkt sich auf Lufttrocknung unter atmosphärischen Bedingungen. Ferner wurde auf die Darstellung der elektrotechnischen Grundlagen verzichtet.

Im *dritten Teil* folgen umfassendere, d. h. interdisziplinäre, wiederum methodisch behandelte *Praxisbeispiele*. Diese stützen sich auf Experimente und Daten aus der Praxis von Planern, Maschinenherstellern und Produzenten von Kunststoffteilen.

- Beim Urformen, vgl. Anfang Kapitel 1, befinden sich die Polymere im schmelzflüssigen Zustand, wobei sich das Materialverhalten als sehr komplex erweist. Zu dessen Beschreibung gibt es neben den numerischen Verfahren zahlreiche mehr oder weniger aufwendige Ansätze. Im Rahmen dieses Buches genügt eine Beschränkung auf den einfachsten Ansatz, das *Potenzgesetz* von Ostwald-de Waele für den Zusammenhang zwischen Scherspannung und Scherrate.
- Nicht zuletzt möchte dieses Buch einen Beitrag leisten im Sinne eines Brückenschlags zwischen „hochkarätiger“ Theorie und den Bedürfnissen der Praxis.

*Dank:* Zahlreiche Fachleute aus Firmen und Hochschulen haben uns wertvolle Unterstützung zuteilwerden lassen.

Firmenseitig gilt unser verbindlichster Dank den Unternehmen:

- Arburg GmbH +Co KG (Herren Martin Hoyer, Marcel Fuß und Bartolomej Geisler),
- B. Braun Medical AG (Herren Peter Lochmann, Rolf Grossenbacher und Wolfgang Baumer),
- Geberit AG (Herrn Lothar Stockmann und Mitarbeitern),
- IE Plast Engineering (Herrn Percy Limacher),
- Netstal AG (Frau Dr. Christina Härter und Herrn Manuel Hausammann),
- Georg UTZ AG (Herren Andreas Schlegel und Marcel Meier).

Unseren Kollegen aus der Academia danken wir ebenso herzlich für ihre mit Rat und Tat geleisteten wertvollen Dienste:

- Herrn Prof. Dr. Theo Tervoort, ETH Zürich
- Herren Prof. Dr. Christoph Gossweiler, Prof. Dr. Peter Stuber, Prof. Dr. Daniel Weiss von der Hochschule für Technik, Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW),
- Herrn Dipl.-Math. Clemens Holzapfel von der Universität Konstanz.
- Herrn Prof. Dr. Mathias Schärli, Hochschule für Technik FHNW, für seine tatkräftige Unterstützung beim Gebrauch des Rechenwerkzeugs Maple.

Ein großes Dankeschön gebührt Herrn Stephan Tanner für die sorgfältige und ansprechende Gestaltung der zahlreichen Bilder.

Herrn Peter Müller-Beilschmidt, ifu Hamburg GmbH, danken wir für die Lizenz und für seine Unterstützung beim Einsatz der Software e!sankey.

Wir danken Frau Julia Engstler, HYDAC TECHNOLOGY GmbH, für die Benutzung des Programms ASP 5.

Ein spezielles Dankeschön für ihre stets zuvorkommende Unterstützung beim Carl Hanser Verlag geht an Frau Ulrike Wittmann, Herrn Dr. Mark Smith und an Herrn Jörg Strohbach.

Wir hoffen auf eine wohlwollende Aufnahme unseres Buches bei der Leserschaft. Da auch die Autoren dieses Buches vor Druckfehlern und anderen Unzulänglichkeiten nicht gefeit sind, nehmen sie konstruktive Kritik und Verbesserungshinweise gerne entgegen.

Wolfgang Kaiser und Willy Schlachter, im Juli 2019



# Hinweise zur Benutzung des Buches

Oberstes Ziel dieses Buches besteht darin, dem Ingenieur in einem ausgewogenen Verhältnis zwischen Theorie und Praxis grundlegende Kenntnisse auf diesem interdisziplinären Gebiet zu vermitteln. Da die Behandlung dieses Themas ein breites technisches Basiswissen voraussetzt, könnte es im Einzelfall sein, dass da und dort im Stoff Verständnislücken auftreten. Je nach den Vorkenntnissen wäre es unter diesen Umständen empfehlenswert, auf dem einen oder anderen Fachgebiet bewährte Lehrbücher beizuziehen. Zusätzlich finden sich zahlreiche Hinweise auf weiterführende Lehrbücher in jedem Kapitel.

Es empfiehlt sich, systematisch vorzugehen und den Stoff in der gegebenen Reihenfolge durchzulesen. Teil 1 behandelt einfachere Grundlagen, gefolgt von erweiterten Grundlagen im Teil 2. Wertvolle Dienste leisten in diesem Zusammenhang die in jedem Kapitel enthaltenen *Grundlagenbeispiele*. Ihr Ziel: exemplarisch die Anwendung der Grundlagen an konkreten Problemstellungen aufzuzeigen. Mit einzelnen Beispielen wird gleichzeitig der Versuch unternommen, die im betreffenden Kapitel erläuterten Wissensgebiete zu ergänzen und zu erweitern.

Das in allen Beispielen verfolgte *methodische Vorgehen* sei mit Nachdruck empfohlen. Bevor man sich in die *Analyse* begibt, sollte man sich über die *Problemstellung* klarwerden, um was es geht, was man über das Problem weiß und was man darüber wissen will. Entscheidend ist die *Wahl des Systems* und die Formulierung der *Wechselwirkung* zwischen dem gewählten System und seiner Umgebung. Jegliche Bilanz, sei es die Massen-, Energie- oder die Impulsbilanz, erfordert Klarheit über das System und der Wechselwirkung mit seiner Umgebung. Die zweckmäßige Wahl des Systems, bzw. der Systemgrenze, in diesem Buch „Kontrollvolumen“, abgekürzt „KV“ genannt, ist eng mit der Problemstellung verbunden.

Die meisten in der Praxis anzutreffenden Problemstellungen sind zu komplex, als dass man sie ohne *vereinfachende Annahmen* angehen könnte. Vielfach ermöglichen daher einzig im Voraus getroffene Vereinfachungen eine mathematische Analyse des Problems. Äußerst hilfreich erweist sich dabei, die in Kapitel 1 dargestellten methodischen Grundlagen nicht außer Acht zu lassen.

Jegliche Analyse setzt die Verfügbarkeit *konsistenter Materialdaten* voraus. Wie sich bei der Bearbeitung der Beispiele mehrfach gezeigt hat, ist die Beschaffung bestimmter Materialdaten für Polymere bzw. Kunststoffe eine Herausforderung. Dies liegt sowohl an der enormen Vielfalt als auch an den ungezählten Möglichkeiten der Modifikation bei den einzelnen Kunststoffen.

Im Teil 3 werden einige *Praxisbeispiele* behandelt, die in Zusammenarbeit mit Maschinenherstellern und Produktionsbetrieben entstanden sind. Während die Grundlagenbeispiele eher propädeutischen Charakter haben, sind die Praxisbeispiele in der Mehrzahl komplexer Natur. Sie zeigen, dass in der Praxis nicht immer verlässliche Informationen über die maßgebenden Prozesse zur Verfügung stehen. Man ist deshalb gezwungen, plausible Annahmen zu treffen und mit diesen zu versuchen, zu Ergebnissen zu gelangen und Zusammenhänge aufzuzeigen. Dabei erfolgt die Behandlung der Praxisbeispiele nach derselben Methodik wie bei den Grundlagenbeispielen. Hier wie dort ist die Anwendung solider Grundlagen der einzelnen Fachgebiete unabdingbar. Mit den vermittelten Kenntnissen steht – so das Ziel – ein Instrumentarium zur Verfügung, welches die Bearbeitung von Fragestellungen in einem weiten Bereich erlaubt. Die dargestellten Praxisbeispiele sind demzufolge in keiner Weise abschließend zu verstehen, vielmehr sollen sie der Leserschaft als Anstoß dazu dienen mit selbstgewählten Beispielen die Kenntnisse auf diesem Gebiet weiter zu entwickeln bzw. zu vertiefen.

### Zum Literaturverzeichnis

Die Literaturangaben sind mit folgenden Abkürzungen nach Fachgebieten geordnet:

Abkürzung	Fachgebiet
CH	Unterlagen zur <b>Chemie</b>
FA	<b>Fachbeiträge</b> über Kunststofftechnik
FM	Fachbücher über Grundlagen der <b>Fluidmechanik</b>
HY	Fachbücher über <b>Hydraulik</b>
KA	Fachbücher über <b>Kunststofftechnik allgemein</b>
KV	Fachbücher über <b>Verarbeitung</b> von <b>Kunststoffen</b>
RE	<b>Recycling</b> von <b>Kunststoffen</b>
RH	Fachbücher über <b>Rheologie</b>
SD	<b>Stoffdaten</b> für Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase
TH	Fachbücher über Grundlagen der Technischen <b>Thermodynamik</b>
TR	Fachbücher über <b>Trocknung</b>
WK	Fachbücher und Unterlagen über <b>Werkstoffdaten</b> von <b>Kunststoffen</b>
WU	Fachbücher und Fachbeiträge über Grundlagen der <b>Wärmeübertragung</b>

Bei den zitierten Fachbüchern handelt es sich um eine *Auswahl* ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Ergänzend zum Fachgebiet WK „Werkstoffdaten von Kunststoffen“ sei auf den untenstehenden Abschnitt „Benutzung von Datenbanken“ verwiesen.

### Kennzeichnung von Kunststoffen

Da die chemischen Namen der Polymere oft sehr lang sind und für Nichtchemiker schwierig zu handhaben, wurden für die einzelnen Kunststoffe „Kurzzeichen“ eingeführt. Den Vorteil dieser abgekürzten Schreibweise macht sich auch dieses Buch zu Nutze. Dies wiederum setzt bei der Leserschaft die Kenntnis dieser meist international genormten Vereinbarungen voraus.

Der nachfolgende Abschnitt vermittelt zu diesem Zweck einen Überblick über die Kennzeichnung von Kunststoffen. Für eine ausführliche Darstellung muss auf die entsprechenden Normen sowie auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen werden.

Die Kunststoffe werden nach den zu ihrer Herstellung verwendeten Monomeren – bei den Homopolymerisaten der Thermoplaste im Regelfall unter Vorsetzen der Silbe „Poly“ bezeichnet. Beispielsweise beim thermoplastischen Ausgangsmonomer Methylmethacrylat; Name des Polymers: Polymethylmethacrylat oder in abgekürzter Form: PMMA. Diese Kurzzeichen sind größtenteils genormt, teilweise aber auch von Herstellerfirmen oder der Praxis in Gebrauch genommen worden. Bei der Angabe von Kurzzeichen wurde nach Möglichkeit auf DIN EN ISO 1043 zurückgegriffen. In Tabelle 1 sind die aktuellen Kurzzeichen für die wichtigsten Kunststoffe aufgeführt. Wegen der Vielfalt der Kunststoffe und ihrer Modifikationen sollen aus den Kurzzeichen aber auch weitergehende Informationen daraus hervorgehen. Weitere Kennzeichnungen betreffen daher die Füll- und Verstärkungsstoffe, Weichmacher und Flammenschutzmittel oder hinsichtlich der Verwertung von Kunststoffen in Kapitel 10 Recycling von Kunststoffen. Außerdem beinhaltet jede Teilnorm Kennbuchstaben zur weiteren Differenzierung, vgl. Tabelle 2.

Älter als die Kunststoffe, im engeren Sinne, d. h. Thermoplaste und Duroplaste, sind die Elastomere bzw. Kautschuke oder Gummi-Sorten, die eine von den Kunststoffen getrennte Entwicklung in der Kautschukindustrie erlebten und für deren Kurzzeichen eigene, internationale Normen (DIN ISO 1629) gelten. Da viele Kautschuke neben ihrer Verwendung für die Herstellung von Gummiartikeln seit längerer Zeit auch auf dem Kunststoffsektor – vor allem zur Schlagzähmodifizierung – eine Rolle spielen, bestehen für einige Kautschukarten zwei verschiedene Kurzzeichen, einerseits nach DIN EN ISO 1043 und andererseits gemäß DIN ISO 1629.

Für die Bezeichnung duroplastischer Formmassen bestand lange Zeit die „Typisierung“ nach DIN 7708. Durch die Übernahme der ISO-Normen wurde 7708 nicht nur ersetzt, sondern wesentlich geändert, z. B. durch DIN EN ISO-Norm 14526 (PF), 14527 (UF), 14528 (MF), 14530 (UP) und 15252 (EP).

Die Kurzzeichen von Polymerblends, Gemischen aus verschiedenen Polymeren und Polymerlegierungen werden nach DIN 16780 so gebildet, dass die Grundpolymere durch ein Pluszeichen, jedoch ohne Leerzeichen und Klammern verbunden werden; z. B. die Mischung aus Polypropylen (PP) und Ethylen/Propylen-Dien (EPDM) wird mit PP+EPDM bezeichnet.

### Benutzung von Datenbanken

Ihre Benutzung bietet eine Fülle von Informationen, beispielsweise was die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen betrifft.

Nachfolgend sind alphabetisch (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) die Internetadressen häufig benutzter Werkstoff-Datenbanken aufgelistet:

<b>CAMPUS</b> plastics	<a href="http://www.campusplastics.com/">www.campusplastics.com/</a>
<b>Material Data Center – M-Base</b>	<a href="http://www.m-base.de/de.html">www.m-base.de/de.html</a>
<b>MatWeb</b>	<a href="http://www.matweb.com">www.matweb.com</a>
<b>Polymat</b>	<a href="http://www.polybase.com">www.polybase.com</a>
<b>SpringerMaterials – properties of materials</b>	<a href="http://materials.springer.com">materials.springer.com</a>
<b>Total Materia</b>	<a href="http://www.totalmateria.com/de">www.totalmateria.com/de</a>

**Tabelle 1** Kurzzeichen für wichtige Kunststoffe

Symbol	Kunststoff	Symbol	Kunststoff
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol	PI	Polyimid
AMMA	Acrylnitril-Methylmethacrylat	PIB	Polyisobutylen
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylat	PK	Polyketon
CA	Celluloseacetat	PLA	Polylactid
CAB	Celluloseacetobutyrat	PMI	Polymethacrylimid
CAP	Celluloseacetopropionat	PMMA	Polymethylmethacrylat
CF	Kresol-Formaldehyd	PMMI	Polymethacrylmethylimid
CN	Cellulosenitrat	PMP	Poly-4-methylpenten-(I)
COC	Cycloolefin-Copolymer	POM	Polyoxymethylen (Polyformaldehyd, Polyacetal)
CP	Cellulosepropionat	PP	Polypropylen
E/P	Ethylen-Propylen-Copolymer	PPA	Polyphthalamid
EIM	Ionomer-Copolymer	PPE	Polyphenylenether
ECTFE	Ethylen-Chlortrifluorethylen	PPP	Poly-para-Phenylen
ETFE	Ethylen-Tetrafluorethylen	PPS	Polyphenylensulfid
EVAC	Ethylen-Vinylacetat	PPSU	Polyphenylensulfon
EP	Epoxid	PPV	Polyphenylenvinyle
LCP	Flüssigkristall-Polymer	PPY	Polyppyrrrol
MABS	Methacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol	PS	Polystyrol
MBS	Methacrylat-Butadien-Styrol	PS-S	Polystyrol, syndiotaktisch
MF	Melamin-Formaldehyd	PSU	Polysulfon
MP	Melamin-Phenol-Formaldehyd	PT	Polythiophen
PAEK	Polyaryletherketon	PTFE	Polytetrafluorethylen
PAC	Polyacetylen	PUR	Polyurethan
PA	Polyamid	PVAL	Polyvinylalkohol
PAI	Polyamidimid	PVC	Polyvinylchlorid
PAN	Polyacrylnitril	PVDC	Polyvinylidenchlorid
PANI	Polyanilin	PVF	Polyvinylchlorid
PARA	Polyarylamid	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PB	Polybuten	SB	Styrol-Butadien
PBI	Polybenzimidazol	SMS	Styrol- $\alpha$ -Methylstyrol
PBT	Polybutylenterephthalat	SAN	Styrol-Acrylnitril
PC	Polycarbonat	SI	Silikon
PCTFE	Polychlorotrifluorethylen	TPE	Thermoplastische Elastomere
PDAP	Polydiallylphthalat	TPA	- auf Basis Polyamid
PE	Polyethylen (Polyethen)	TPC	- auf Basis Copolyester
PE-C	Polyethylen, chloriert	TPO	- auf Basis von Olefinen
PEBA	Polyether-Block-Amid	TPS	- auf Basis Styrol
PEEK	Polyetheretherketon	TPU	- auf Basis Polyurethan
PEI	Polyetherimid	TPV	- auf Basis von vernetztem Kautschuk weitere thermoplastische Elastomere
PEK	Polyetherketon	TPZ	Urea-Formaldehyd
PEN	Polyethylennaphthalat		(Harnstoff-Formaldehyd)
PESI	Polyesterimid	UF	Ungesättigter Polyester
PES	Polyethersulfon		Vinylchlorid-Ethylen
PET	Polyethylenterephthalat	UP	Vinylchlorid-Ethylen-Vinylacetat
PET-A	Polyethylenterephthalat, amorph	VCE	
PET-C	Polyethylenterephthalat, kristallin	VCEVAC	
PET-G	Polyethylenterephthalat, Glykol-modifiziert		
PEUR	Polyetherurethan		
PF	Phenol-Formaldehyd		
PHB	Polyhydroxybutyrat		

**Tabelle 2** Kennbuchstaben zur weiteren Differenzierung für die Teilnorm 1)

Symbol	Bedeutung	Symbol	Bedeutung
A	amorph	N	normal, nukleiert, Novolak
B	bromiert, block, biaxial	O	orientiert
C	chloriert, kristallin	P	weichmacherhaltig, thermoplastisch, plastifiziert
D	Dichte	R	erhöht, Resol, Random, hart
E	expandiert, schäumbar, oxidiert, Elastomere	S	gesättigt, sulfoniert, syndiotaktisch
F	flexibel, flüssig, fluoriert	T	Temperatur(beständig), thermoplastisch, zäh modifiziert
H	hoch, Homopolymer	U	ultra, weichmacherfrei, ungesättigt, unplastifiziert
I	schlagzäh, Impact	V	sehr
L	niedrig, linear	W	Gewicht, Weight
M	mittel, molekular	X	vernetzt, vernetzbar

1) Davon abweichend sind international Kennbuchstaben auch vor dem Kurzzeichen zu finden, z. B. HDPE.

Beispiele:

PET-A	amorphes Polyethylenterephthalat
PVC-U	weichmacherfreies PVC
PE-X	vernetztes Polyethylen
PE-UHMW	ultrahochmolekulares Polyethylen
PVC-C	chloriertes Polyvinylchlorid
PVC-P	weichmacherhaltiges PVC
PS-(H)I	schlagzähes Polystyrol
PE-LLD	linearer Polyethylen niedriger Dichte





# Verzeichnis der physikalischen Größen

## ■ Griechische Zeichen

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$\alpha$	Wärmeübergangszahl Absorptionsverhältnis	W/(m <sup>2</sup> · K) –
$\alpha$	Linearer Wärmedehnungskoeffizient (auch Wärmeausdehnungskoeffizient)	K <sup>-1</sup>
$\beta$	Räumlicher Ausdehnungskoeffizient	K <sup>-1</sup>
$\beta$	Konstante bzw. Radiusverhältnis, Gleichung 9.78	–
$\beta$	Stoffübergangszahl, Index m: mittlerer Wert	m/s
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit oder Scherrate, Index rep: repräsentative Scherrate, Bild 9.8	s <sup>-1</sup>
$\Delta$	Symbol für Differenz	–
$\Delta G_R$	Freie Reaktionsenthalpie	J, kJ
$\Delta G_{Rm}$	Molare freie Reaktionsenthalpie	J/kmol, kJ/kmol
$\Delta G_{Rm}^0$	Molare freie Standardreaktionsenthalpie	J/kmol, kJ/kmol
$\Delta H_A$ (bzw. $E_a$ )	Aktivierungsenergie/-enthalpie	J, kJ
$\Delta H_R$	Reaktionsenthalpie	J, kJ
$\Delta H_{Rm}$	Molare Reaktionsenthalpie	J/kmol, kJ/kmol
$\Delta H_{Rm}^0$	Molare Standardreaktionsenthalpie	J/kmol, kJ/kmol
$\Delta S_R$	Reaktionsentropie	J/K, kJ/K
$\Delta S_{Rm}$	Molare Reaktionsentropie	J/(kmol · K), kJ/(kmol · K)
$\Delta S_{Rm}^0$	Molare Standardreaktionsentropie	J/(kmol · K), kJ/(kmol · K)
$\delta$	Grenzschichtdicke, Index T bzw. $\vartheta$ : Temperaturgrenzschicht, C: Konzentrationsgrenzschicht Dünne Schicht, Abschnitt 7.2	m
$\varepsilon$	Emissionsverhältnis	–
$\varepsilon$	Energienutzungsgrad	–
$\varepsilon_{ij}$	Strahlungsaustauschkoeffizient	–
$\dot{\varepsilon}$	Dehngeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>
$\zeta$	(Druck-) Verlustkoeffizient	–

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$\eta$	Dynamische (Scher-)Viskosität	Pa · s
$\eta$	Wirkungsgrad	–
$\eta_C$	Carnot-Wirkungsgrad	–
$\eta_R$	Rippenwirkungsgrad	–
$\eta_D$	Dehnaviskosität	Pa · s
$\theta(x, t), \theta(t)$	Dimensionslose Temperaturfunktion	–
$\kappa$	Verhältnis $c_p/c_v$	–
	Isentropenexponent (ideales Gas)	–
$\kappa$	Radiusverhältnis Ringspalt, Gleichung (9.75)	–
$\kappa$ bzw. $\chi$	Kompressibilität	Pa <sup>-1</sup>
$\Lambda$	Dimensionsloser Parameter, Gleichungen (9.83/84).	–
	Wellenlänge Temperaturwelle, Bild 7.9	m
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
	Rohrreibungskoeffizient	–
	Wellenlänge (Strahlung)	m, $\mu$ m
$\mu$	Eigenwert, Kapitel 7	–
$\nu$	Kinematische Zähigkeit	m <sup>2</sup> /s
	Stöchiometrischer Koeffizient	–
$\zeta$	Korrekturfaktor (Stefan-Korrektur), Gleichung 8.43	–
	Dimensionsloser Radius, Gleichung 9.75	–
$\rho$	Massendichte	kg/m <sup>3</sup>
	Reflexionsverhältnis	–
$\sigma$	Axialspannung	Pa = N/m <sup>2</sup>
$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>4</sup> )
$\sigma_0$	Spezifische Schmelzenthalpie (Wasser)	J/kg, kJ/kg
$\tau$	Schubspannung	Pa = N/m <sup>2</sup>
	Zeitkonstante, charakteristische Zeit	s
$\vartheta$	Celsius-Temperatur	°C
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz, Index m: mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	K
$\vartheta_K$	Kontakttemperatur	K, °C
	Kühlgrenztemperatur, Kapitel 8	
$\phi$	Fluidität, Gleichung 9.1	(Pa · s) <sup>-1</sup> (newtonsches Fluid) Pa <sup>-m</sup> · s <sup>-1</sup> (nicht-newtonsches Fluid)
$\varphi$	Relative Feuchte, Gleichung 8.8	– bzw. %
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>
	Kreisfrequenz (Temperaturschwingung)	

## ■ Lateinische Zeichen

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$	Temperaturleitzahl, -leitfähigkeit	m <sup>2</sup> /s
$a_{\text{eff}}$	Effektive Temperaturleitfähigkeit	m <sup>2</sup> /s
$a_T$	Viskositätsverhältnis zur empirischen Erfassung der Temperaturabhängigkeit	–
$A$	Fläche	m <sup>2</sup>
$b$	Wärmeeindringkoeffizient	W · s <sup>1/2</sup> /(m <sup>2</sup> · K)
$b$	Temperaturkoeffizient	K <sup>-1</sup>
$B$	Breite (Kanal, Rippe)	m
$Bi$	Biot-Zahl	–
$Br$	Brinkman-Zahl	–
$C_i, c$	Integrationskonstante, Zahlenwert Reihenentwicklungskoeffizient (Kapitel 7)	Problembezogen –
$c_f$	Reibungsbeiwert	–
$c$	Spezifische Wärmekapazität (Festkörper, Flüssigkeiten)	J/(kg · K), kJ/(kg · K)
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/(kg · K), kJ/(kg · K)
$c_v$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen	J/(kg · K), kJ/(kg · K)
$D$	Durchmesser Diffusionskoeffizient	m m <sup>2</sup> /s
$D_h$	Hydraulischer Durchmesser	m
$D_1$	Entwicklungskoeffizient, Tabelle 7.2 und Abschnitt 7.8	–
$De$	Deborah-Zahl	–
$E$	Energie	J, kJ
$E_a$ (bzw. $\Delta H_A$ )	Aktivierungsenergie	kJ/mol
$E$	Emissionsdichte (Strahlung) Index S: Schwarzer Strahler	W/m <sup>2</sup>
$E_\lambda$	Spektrale Emissionsdichte	W/(m <sup>2</sup> · μm)
$e$	Äquivalente Sandrauigkeit	m, mm
ENE	Energetische Netto Effizienz Kennzahl	–
$Ex$	Exergie	J, kJ
$f_G, f_T$	Geometrie-, Temperatur-Parameter, Tabelle 4.3	–
$F$	Kraft	N
$F$	Ortsfunktion, Kapitel 7	–
$F_{ij}$	Sichtfaktoren, Abschnitt 4.7	–

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$f_G, f_T$	Geometrie- bzw. Temperaturparameter	-
$Fo$	Fourier-Zahl	-
$G$	Gibbs-Energie bzw. Freie Enthalpie	J, kJ
$G_m$	Molare Gibbs-Energie	J/kmol, kJ/kmol
$G_m^0$	Molare Standard Gibbs-Energie	J/kmol, kJ/kmol
$G$	Zeitfunktion, Kapitel 7	-
$G$	Schubmodul	N/m <sup>2</sup>
$G$	Immissionsdichte (Strahlung)	W/m <sup>2</sup>
$G_\lambda$	Spektrale Immissionsdichte	W/(m <sup>2</sup> · μm)
$Gr$	Grashof-Zahl	-
$Gz$	Graetz-Zahl	-
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$H$	Enthalpie	J, kJ
$H_m$	Molare Enthalpie	J/kmol, kJ/kmol
$h$	Spezifische Enthalpie	J/kg, kJ/kg
$h_{1+x}$	Spezifische Enthalpie der feuchten Luft, Gleichung 8.15	J/kg Trockenluft, kJ/kg Trockenluft
$H$ bzw. $h$	Kanalhöhe, Rippenlänge	m
$H_u; H_o$ $H_{mu}; H_{mo}$	Heizwert; Brennwert Molarer Heizwert; molarer Brennwert	J/kg, kJ/kg J/kmol, kJ/kmol
$i, j$	Laufender Summationsindex	-
$J$	Helligkeit (Strahlung)	W/m <sup>2</sup>
$J_0, J_1$	Bessel-Funktion, nullter bzw. erster Ordnung	-
$J_\lambda$	spektrale Helligkeit	W/(m <sup>2</sup> · μm)
$k$	Korrekturfaktor	-
$k$	Konsistenzfaktor (Potenzgesetz Ostwald-de Waele)	Pa · s (newtonsches Fluid) Pa · s <sup>n</sup> (nicht-newtonsches Fluid)
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m <sup>2</sup> · K)
$KE$	Kinetische Energie	J, kJ
$L$	(Kanal-)Länge	m
$Le = a/D$	Lewis-Zahl	-
$L_{ref}$	Bezugslänge	m
$m$	Masse, Index L: Trockenluft, W: Wasser, G Trockengut, fG: Feuchtgut, B: Brennstoff Rippenparameter, Kapitel 4	kg m <sup>-1</sup>
$m$	Exponent (Potenzgesetz Ostwald-de Waele)	-
$mi$	Massenstrom Index B: Brennstoffmassenstrom	kg/s
$M$	Molmasse	kg/kmol
$Ma$	Mach-Zahl	-
$M_t$	Drehmoment	N · m

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$n$	Molmenge	mol, kmol
$n$	Exponent (Potenzgesetz Ostwald-de Waele) Oberer Summationsindex	–
$n$	Geometrieparameter der Wärmeleitung ( $n = 1$ : ebene Wand, $n = 2$ : Zylinder, $n = 3$ : Kugel)	–
$Nu$	Nusselt-Zahl, Index $m$ : mittlerer Wert	–
$p$	Absolutdruck, Index $s$ : Sättigungsdruck, $L$ : Partialdruck Luft, $W$ : Partialdruck Wasserdampf	Pa, bar
$p$	Exponent, Tabelle 4.4	–
$PE$	Potenzielle Energie	J, kJ
$Pe$	Péclet-Zahl	–
$Pr = \nu/a$	Prandtl-Zahl	–
$Q$	Wärme	J, kJ
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W, kW
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m <sup>2</sup> , kW/m <sup>2</sup>
$R$	Individuelle Gaskonstante Index $L$ : Luft, Index $W$ : Wasserdampf	J/(kg · K)
$R$	Radius (Kreisrohr)	m
$R_i, R_{ij}$	Widerstand (Strahlung)	m <sup>-2</sup>
$R_{th}$	Thermischer Widerstand, mit Zusatzindex $\alpha$ : Wärmeübergangswiderstand $\lambda$ : Wärmeleitwiderstand	K/W
$R_i$	Spezifischer Widerstand Index $i = \alpha$ Wärmeübergangswiderstand Index $i = \lambda$ Wärmeleitwiderstand	K/(m <sup>2</sup> · W)
$r$	(Laufender) Radius	m
$r_0$	Spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0 °C	J/kg, kJ/kg
$Ra$	Rayleigh-Zahl	–
$Re$	Reynolds-Zahl	–
$R_M = 8314,4621$	Universelle Gaskonstante	J/(kmol · K)
$S$	Loch- bzw Schlitzabstand (Bild 4.8/4.9)	m
$S$	Entropie	J/K
$s$	Spezifische Entropie	J/(kg · K)
$s$	Wandstärke (Kap. 4), Rippendicke (Kap.6), Halbe Plattendicke (Kap. 7)	m
$Sc = \nu/D$	Schmidt-Zahl	–
$Sh$	Sherwood-Zahl, Index $m$ : mittlerer Wert	–
$St$	Stanton-Zahl, Index $m$ : mittlerer Wert	–
$T$	Absolute Temperatur	K (Kelvin)

Physikalische Größe	Bezeichnung	Einheit
$T_g$	Glas-/Erweichungstemperatur bzw. - Übergangsbereich	°C
$T_m$	Schmelztemperatur bzw. - Übergangsbereich	°C
$T_z$	Zersetzungstemperatur bzw. - Übergangsbereich	°C
$t$	Zeit Teilung	s m
$t_e$	qualifizierte Lebensdauer	a (Jahre)
$t_{Kn}$	Knickpunktzeit	s
$U$	Innere Energie (Benetzter) Umfang	J, kJ m
$u$	spezifische innere Energie	J/kg, kJ/kg
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /s
$v$	Spezifisches Volumen	m <sup>3</sup> /kg
$v_{1+x}$	Spezifisches Volumen der feuchten Luft, Gleichung (8.11)	m <sup>3</sup> /kg Trockenluft
$W$	Schlitzweite (Bilder 4.7 bis 4.9)	m
$W$	Arbeit	J, kJ
$W_{KV}$	Technische Arbeit	J, kJ
$W_R$	Reibungsarbeit	J, kJ
$W_{rev}$	Reversible Reaktionsarbeit	J, kJ
$W_{mrev}$	Molare reversible Reaktionsarbeit	J/kmol, kJ/kmol
$W_t^{rev}$	Reversible technische Arbeit/Druckänderungs- arbeit, Gleichung (2.67)	J, kJ
$W_V$	Volumenänderungsarbeit, Gleichung (2.21)	J, kJ
$\dot{W}$	Mechanische Leistung, Wärmeleistung Index R: Reibungsleistung	W, kW
$w$	Geschwindigkeit, Index m: Mittelwert	m/s
$w_\infty$	Strömungsgeschwindigkeit außerhalb der Grenzschicht	m/s
$\dot{w}'_R$	Flächenbezogene Reibungsleistung, Gleichung 9.31	W/m <sup>2</sup>
$\dot{w}'$	Volumetrische Wärmeleistung, Gleichung 7.6	W/m <sup>3</sup>
$Ws$	Weissenberg-Zahl	-
$X$	Absoluter Feuchtegehalt Feuchtgut, Gleichung 8.30	kg/kg Trockengut, oder %
$x$	Absoluter Feuchtegehalt der feuchten Luft, Gleichung 8.5	kg/kg Trockenluft, oder %
$x, y, z$	Lagekoordinaten	m
$z$	Höhenkote	m

**Teil 1**

# **Einführende Grundlagen**





# 1

## Einleitung

### ■ 1.1 Zur Bedeutung der Energietechnik in der Kunststoffverarbeitung

Prozesse zur Aufbereitung von Kunststoffen und zur Fertigung von Produkten aus Kunststoffen sind übersichtsmäßig in Bild 1.1 dargestellt. Sie sind zum großen Teil verfahrenstechnisch anspruchsvoll und dabei energie günstig. Das betrifft insbesondere die unter „Urformen“, d.h. Schaffen der Form, genannten Prozesse. Einschränkung sei zugleich festgehalten, dass im Fokus dieses Buches die Thermoplaste stehen. Dies aufgrund ihrer überragenden Spitzenstellung im Produktionsvergleich mit den beiden anderen Kunststoff-Arten, den Duroplasten und Elastomeren, vgl. Abschnitt 5.2. Die Verarbeitungstemperaturen bei Thermoplasten bewegen sich üblicherweise im Bereich zwischen Raumtemperatur und 300 °C, in einigen Sonderfällen bis knapp 400 °C. Ihre gebräuchlichsten Vertreter, die Standardkunststoffe, haben Verarbeitungstemperaturen im Bereich 200 bis 250 °C, [WK-1]. Wärmetechnische Fragen spielen aus mehreren Gründen eine wichtige Rolle, namentlich hinsichtlich

- Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit (Energiebedarf, Zykluszeit bestimmt durch Aufheiz- und Abkühlzeiten; Fertigungsverfahren in der Zukunft);
- Qualität (stark beeinflusst von der Prozessführung, insbesondere von deren Temperaturverlauf).

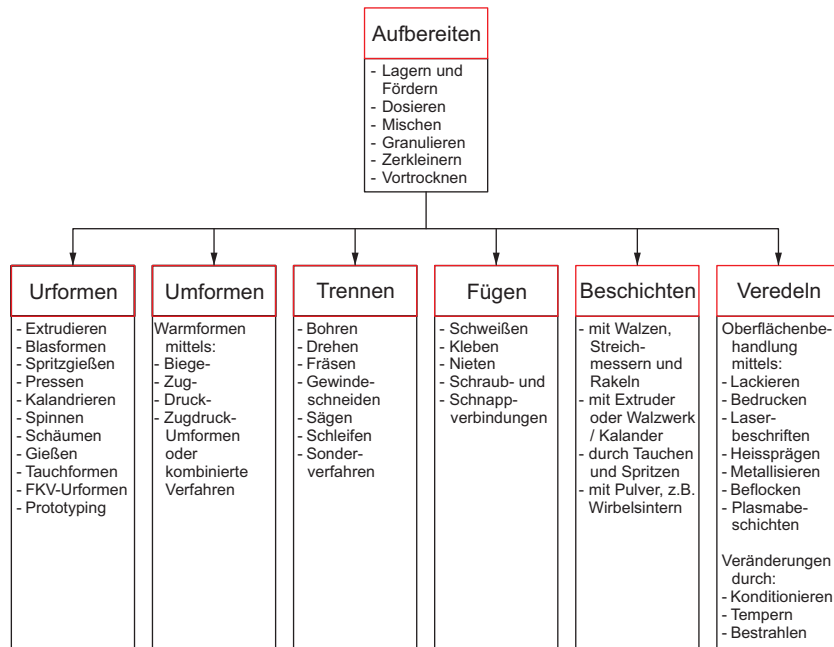
Es ist deshalb angebracht, diesen Fragen in den folgenden Kapiteln näher nachzugehen und zu ihrer Beantwortung die erforderlichen Grundlagen bereitzustellen.

Zunächst zur Energie: Energieintensive Prozesse wie das Spritzgießen oder Extrudieren sind in vielfachen Varianten anzutreffen. Wegen der tieferen Verarbeitungstemperaturen bleibt der Energiebedarf im Kunststoffbereich dennoch wesentlich tiefer im Vergleich z. B. mit den Metallen.

Aspekt Energie

Es besteht beispielsweise ein Bedarf an

- elektrischer bzw. mechanischer Energie für Antrieb und Bewegung (Pumpen, Schnecken, Werkzeugen, Pressen, ...);
- thermischer oder elektrischer Energie zum Aufheizen und Abkühlen der Kunststoffmasse, sowie z.B. zum Temperieren der Werkzeuge oder von Kalandrierwalzen;
- elektrischer Energie bei den verschiedenen Schweißverfahren, z. B. Laserstrahlschweißen.



**Bild 1.1** Fertigungsverfahren in der Kunststofftechnik, aus [KA-1]

Beim Spritzgießen zum Beispiel beträgt der Anteil der Energiekosten an den gesamten Herstellkosten allerdings lediglich ca. 3 bis 5%, [KV-1]. Das scheint sehr wenig, wenn man bedenkt, dass Energie gleich mehrfach erforderlich ist, zum Aufheizen des Granulats, zum Temperieren des Werkzeugs und zum Antrieb der Maschine. Dennoch ist es angebracht, sich im Interesse der Erhöhung der Energieeffizienz Gedanken zur Nutzung der anfallenden Abwärme zu machen.

Nutzung der Abwärme

In modernen Produktionsbetrieben wird die Abwärme von Verarbeitungsprozessen genutzt, sei es für Raumheizung, Klimatisierung oder zur Wärmespeicherung.

Zykluszeit

Für die Wirtschaftlichkeit von Bedeutung beim Spritzgießen ist die Zykluszeit, die maßgebend von den Aufheiz- und Abkühlzeiten bestimmt wird. Diese wiederum hängen von der Intensität der Wärmeübertragungsvorgänge ab.

Qualität

Die Qualität der Produkte ist stark abhängig von der Temperatur der Werkzeuge, Walzen etc., d. h. von der thermischen Prozessführung, die ihrerseits die Zykluszeit bestimmt.

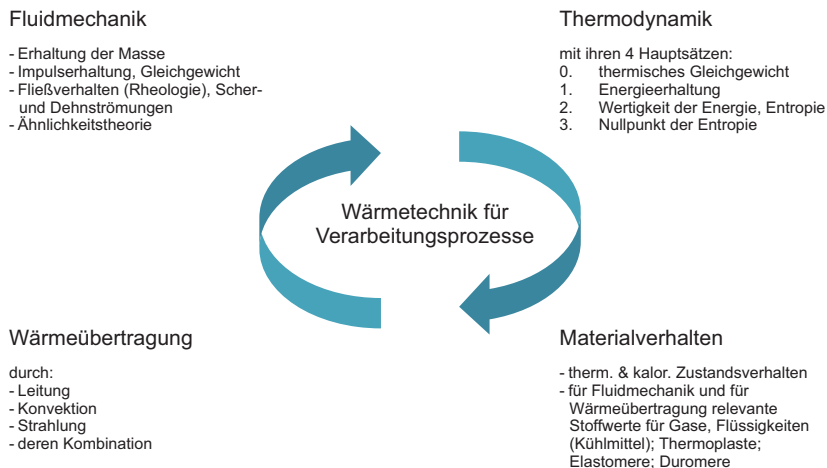
Diese wenigen Hinweise mögen zeigen, dass der Energietechnik Beachtung zu schenken ist. Das wird in der Praxis auch getan, jedoch zumeist auf empirischer Basis. Erst in neuerer Zeit werden wissenschaftliche Methoden zur Prozessoptimierung eingesetzt. Unsere Kontakte mit Maschinenherstellern und produzierenden Unternehmen zeigen, dass das Thema Nachhaltigkeit im Allgemeinen, Ressourceneffizienz im Energie- und Materialeinsatz im Speziellen, große Bedeutung hat.

In diesem Buch beschränken wir uns auf Grundlagen und deren Anwendung zur Beurteilung bestehender Systeme (Analyse). Auslegungsfragen (Design) werden nicht angesprochen.

## ■ 1.2 Erforderliche Grundlagen

### 1.2.1 Übersicht

Bild 1.2 zeigt übersichtsmäßig die erforderlichen Grundlagen der Disziplinen Thermodynamik, Fluidmechanik, Wärmeübertragung sowie Materialverhalten, bei der Kunststoffverarbeitung speziell das komplexe Fließ- und Dehnverhalten von Polymerschmelzen (Rheologie).



**Bild 1.2** Zusammenwirken der Disziplinen Thermodynamik, Fluidmechanik, Wärmeübertragung und Materialverhalten zur Bearbeitung energietechnischer Fragen bei Verarbeitungsprozessen

Von besonderer Bedeutung ist zudem die *Stoffübertragung*, deren Grundlagen zur Bearbeitung von Aufbereitungsvorgängen wie Mischen, Entgasen und Vortrocknen erforderlich sind. Um den Umfang des Buches in Grenzen zu halten, wird auf die Darstellung der allgemeinen Grundlagen der Stoffübertragung verzichtet und stattdessen auf das Standardwerk im deutschsprachigen Raum verwiesen, [WU-1]. Desgleichen beschränkt sich das Kapitel 8 auf eine Übersicht zum Thema Trocknung und geht nur auf Grundlagen ein, die zur Bearbeitung einfacher Lufttrocknungsvorgänge unter Umgebungsbedingungen erforderlich sind.

In den Lehrbüchern werden die Disziplinen üblicherweise einzeln mit teilweisen Überlappungen abgehandelt. Bild 1.2 soll jedoch illustrieren, dass wenn praktische Probleme gelöst werden sollen, es um das interdisziplinäre Zusammenspiel geht.

In den nachfolgenden Unterkapiteln des Teils 1 werden einführende Erläuterungen, wichtige Definitionen und Grundlagen zu den einzelnen Themenbereichen gegeben. Erweiterte Grundlagen für praktische Bedürfnisse folgen in den Kapiteln des Teils 2. Im Teil 3 folgt in Form von *Praxisbeispielen* die Anwendung der bereitgestellten Grundlagen auf einige Verarbeitungsprozesse nach Bild 1.1.

Zunächst wird jedoch auf zwei wichtige Punkte eingegangen, auf die

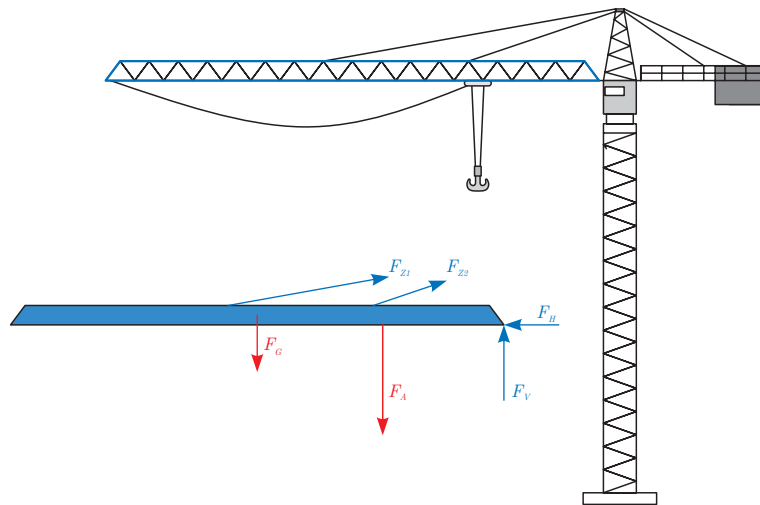
1. Systembetrachtung;
2. Methodik zum Vorgehen bei der Lösung energietechnischer Probleme.

## 1.2.2 Systembetrachtung

Ein wichtiger Schritt – übrigens bei jeder technischen Analyse – ist die genaue Beschreibung dessen, was analysiert werden soll.

Mechanik So ist in der *Mechanik*, z. B. bei der Untersuchung der statischen und dynamischen und der

Freimachen des Körpers Beanspruchung von Bauteilen, der erste Schritt stets das *Freimachen* des betrachteten Bauteils. Der Körper wird von seiner Umgebung isoliert. Anstelle der Bindungen werden die wirkenden Kräfte und Momente eingeführt. Hernach werden im statischen Fall die *Gleichgewichtsbedingungen* und im dynamischen Fall das *Newtonsche Bewegungsgesetz* formuliert. Das einfache Beispiel eines Drehkrans in Bild 1.3 möge das illustrieren.



**Bild 1.3** Beispiel aus der Mechanik: Freimachen des zu analysierenden Bauteils, hier des Auslegers

Gesucht ist die Beanspruchung des Kranauslegers. Dieser wird freigemacht und *alle Kräfte* eingetragen, die *die Umgebung auf ihn* ausübt: Das Eigengewicht  $F_G$  (dargestellt als Streckenlast), die horizontal verschiebbare Anhängelast  $F_A$ , die beiden oben am Ausleger schräg wirkenden Kräfte  $F_{Z1}$ ,  $F_{Z2}$  der Zugstäbe sowie die Lagerreaktionen  $F_H$ ,  $F_V$  im Lager rechts. Wie man die Gewichtskraft der Seilkabel erfasst, hängt von den Zielen und von den Genauigkeitsforderungen der Analyse ab; vereinfachend kann man das durchhängende Seil links der Laufkatze der Gewichtskraft

des Auslegers (Streckenlast) und das Zugseil unter der Laufkatze der Anhängelast hinzuaddieren.

*Bekannt* sind das Eigengewicht  $F_G$  und die Anhängelast, *gesucht* sind die Kräfte durch beide Zugstäbe und die beiden Lagerreaktionen. Somit liegen vier Unbekannte vor. Es können bei diesem zweidimensionalen Problem drei Gleichgewichtsbedingungen formuliert werden: eine Momentenbeziehung und zwei Kräftebeziehungen (je eine in horizontaler und in vertikaler Richtung). Das Problem ist einfach statisch unbestimmt, d. h. es braucht noch eine zusätzliche Beziehung, die sich hier aus einer Deformationsbedingung für die beiden Zugstäbe ergibt: Bei starr angenommenem Ausleger verlängern sie sich in einem durch die Geometrie gegebenen festen Verhältnis. Dieses Verhältnis gilt bei hier vorausgesetzter linear-elastischer Deformation (Hookesches Gesetz) auch für das Verhältnis der Kräfte  $F_{Z1}$ ,  $F_{Z2}$ . Damit sind alle äußeren Lasten des Auslegers bestimmbar und die Beanspruchung kann ermittelt werden.

Wie in der Technik üblich, müssen zumeist *Vereinfachungen* gemacht werden, z. B. wie man, wie oben angedeutet, das Eigengewicht der Seilkabel erfasst, oder Punktlasten einführt anstelle von verteilten Lasten.

In den hier vorherrschenden Disziplinen Thermodynamik, Fluidmechanik und Wärmeübertragung wird anstelle des freigemachten Körpers der *Begriff des Systems* verwendet, um den Gegenstand der Analyse klar abzugrenzen. Es ist nicht übertrieben, Folgendes zu sagen:

Systembegriff



Der Systembegriff spielt in der Energietechnik eine ebenso wichtige Rolle wie der Funktionsbegriff in der Mathematik.

Das System wird durch die *Systemgrenze* von der Umgebung abgegrenzt. Alles, was sich innerhalb der Systemgrenze befindet, gehört zum System, was außerhalb liegt, gehört zur Umgebung.

Systemgrenze

Analog zum Eintragen der Kräfte am Beispiel aus der Mechanik werden an der Systemgrenze die *maßgebenden Wechselwirkungen mit der Umgebung* formuliert bzw. in die Systemskizze eingetragen. Diese Wechselwirkungen sind vielfältiger als in der Mechanik: z. B. können Massenströme, Wärmeströme und mechanische Leistungen an verschiedenen Stellen die Systemgrenze überschreiten.

Wechselwirkungen mit der Umgebung

Das Analogon zur Formulierung der Gleichgewichtsbedingungen ist die Aufstellung der *Bilanzen*, in erster Linie für die Erhaltungsgrößen Masse, Impuls, Drehimpuls und Energie.



Fundamental bei der Formulierung von Bilanzen für Energie, Masse etc. sind:

- klare Umschreibung des Systems;
- eindeutige Festlegung der Systemgrenze: Was gehört zum betrachteten System, was gehört zur Umgebung?
- Beschreibung der Wechselwirkung zwischen System und Umgebung, d. h. Formulierung der die Systemgrenze überschreitenden Ströme.

Das System kann komplex sein, wie eine ganze Spritzgießmaschine, Bild 1.4, oder etwas einfacher wie ein Wärmeübertrager. Es kann aber auch ein differenzielles Volumenelement bei numerischen Verfahren zur Ermittlung von Strömungs- oder Temperaturfeldern sein.



**Bild 1.4** Spritzgießmaschine, „Foto Arburg“

- System Das System ist ein gedankliches Hilfsmittel für die Problemanalyse. Es ist ein materielles Gebilde, das von seiner Umgebung durch eine gedachte, dem Problem entsprechend zweckmäßig gewählte geschlossene, d.h. *das System vollständig umschließende Fläche, die Systemgrenze*, abgegrenzt ist.
- Kontrollvolumen KV Man verwendet dafür auch den Ausdruck „*Kontrollraum*“ oder „*Kontrollvolumen*“. Im vorliegenden Buch wird der Ausdruck Kontrollvolumen bevorzugt, abgekürzt KV. Die Systemgrenze kann raumfest oder beweglich sein.
- Die Wahl der Systemgrenze erfolgt problemorientiert. Steht das Interesse am Energie-Haushalt der ganzen Spritzgießmaschine im Vordergrund, legt man die Systemgrenze um sie herum. Handelt es sich hingegen nur um die Förderschnecke, wird diese als System definiert.
- Man wählt die Systemgrenze zweckmäßig so, dass die Wechselwirkungen mit der Umgebung möglichst eindeutig beschrieben werden können. Die Zweckmäßigkeit der Wahl der Systemgrenze ist mitunter auch eine Frage der Erfahrung.
- Ein unbestreitbarer Vorteil des Systemansatzes ist, dass man sich zumindest bei stationären Vorgängen nicht um die letzten Details komplexer Prozesse innerhalb der Systemgrenze kümmern muss, wenn es gelingt, einigermaßen zuverlässig zu beschreiben, was an der Systemgrenze geschieht, d.h. welche Massen- und Energieströme die Systemgrenze überschreiten. Mit Hilfe der Bilanzgleichungen ist es

möglich, rechnerisch oder messtechnisch aufwendig oder gar nicht zu erfassende Größen zu bestimmen.

### 1.2.3 Systemarten

In der Energietechnik werden verschiedene *Arten von Systemen* unterschieden. Die im vorliegenden Zusammenhang wichtigsten sind das *offene*, das *geschlossene* und das *adiabate* System.

Ein System ist offen, wenn neben Energie- auch Massenströme die Systemgrenze überschreiten. Bekanntlich transportieren Massenströme auch Energie, vgl. die Ausführungen zum ersten Hauptsatz der Thermodynamik in den Abschnitten 2.2 und 2.3. Die meisten Systeme in der Praxis sind offene Systeme. Beispiel: Das durch Öl- oder Wasserströme temperierte Werkzeug einer Spritzgießmaschine.

Offenes System

Ein System ist geschlossen, wenn seine Systemgrenze *massenundurchlässig* ist, d.h. das System während des betrachteten Prozesses eine definierte konstante Masse besitzt. Energie kann jedoch die Systemgrenze in Form von Wärme und/oder Arbeit überschreiten. Beispiel für ein geschlossenes System: Hubraum eines Kolbenmotors beim Kompressionstakt bei geschlossenen Ventilen und als dicht angenommenen Kolbenringen; Arbeitszufuhr über den bewegten Kolben, Wärmeaustausch via Zylinderwände.

Geschlossenes System

Ein System heißt adiabatisch, wenn seine Systemgrenze *wärmeundurchlässig* ist. Energie kann bei adiabatischen Systemen ausschließlich durch Arbeit die Systemgrenze passieren. Einfacher gesagt: Adiabatisches System = offenes oder geschlossenes System ohne Wärmeströme. Die Annahme adiabatischer Verhältnisse ist eine *Idealisierung* wie die Annahme einer Punktlast in der Mechanik.

Adiabatisches System

### 1.2.4 Methodik der Problemlösung

Folgendes systematisches Vorgehen hat sich bewährt. Es wird namentlich in Lehrbüchern im angelsächsischen Raum (z.B. in allen einschlägigen Textbooks des John Wiley Verlags) konsequent verwendet, aber auch immer mehr im deutschsprachigen Raum, z.B. [WU-4], [WU-5]. Man nennt es *6-Punkte-Lösungsmethodik*. Selbstverständlich kann es weiter verfeinert und durch weitere Punkte ergänzt werden ohne Änderung der Methodik.

#### 1. Was ist gegeben

bzw. was ist über das Problem bereits bekannt? Problem studieren und sich vergegenwärtigen, um was es geht und was als bekannt gilt.

#### 2. Was ist gesucht

bzw. was will man über das Problem wissen? Zusammen mit Schritt 1 überlegen, was zu bestimmen ist und um welche Zusammenhänge es geht. Bei den Punkten 1 und 2 geht es um eine umfassende Problemstellung.



### 3. Wahl des Systems

Dem Problem entsprechend die angemessene Systemgrenze wählen. Die Systemgrenze zweckmäßig dort wählen, wo sich etwas über die Wechselwirkung mit der Umgebung aussagen lässt, und wo man etwas wissen will, das sich über Bilanzgleichungen erschließen lässt. Zu diesem Schritt gehört somit die *Identifikation der Wechselwirkung* mit der Umgebung. Ferner empfiehlt sich an dieser Stelle auch die Überlegung, welche Zustandsänderung das System beim betrachteten Prozess durchläuft. Zur Unterstützung der Anschauung empfiehlt sich das Aufzeichnen des Systemschemas und das Eintragen der Massen- und Energieströme an der Systemgrenze sowie der gegebenen Größen.

### 4. Vereinfachende Annahmen

Im Allgemeinen sind technische Systeme und ihre Wechselwirkung mit der Umgebung komplex, sodass bei ihrer Modellierung behelfsmäßige Vereinfachungen angesagt sind. Beispiele: eindimensionale Strömung, uniforme Druckverteilung, adiabate Wände, Vernachlässigung des Strahlungseinflusses, etc. Es empfiehlt sich, die getroffenen Vereinfachungen und angenommenen Randbedingungen klar festzuhalten.

### 5. Analyse

Erst bei diesem Schritt werden die Bilanzgleichungen für Masse und Energie, bei dynamischen Problemen auch für Impuls und ggf. Drehimpuls, und weitere Grundgesetze formuliert. Es sei dringend empfohlen:

- so lange wie möglich mit funktionalen Größen zu arbeiten und erst am Schluss Zahlen einzusetzen; nur so bleibt der Einfluss der einzelnen Größen transparent;
- Beziehungen und Daten auf Dimensionsrichtigkeit zu prüfen;
- Zwischenergebnisse einem Plausibilitätstest zu unterziehen.

Die wesentlichsten *Analyseschritte* sind folgende:

- Zweckmäßiges Koordinatensystem wählen;
- Randbedingungen, bei instationären Vorgängen die Anfangsbedingungen definieren;

Für gewähltes System und Koordinatensystem die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie formulieren: Hierfür ist erforderlich, im Einklang mit den Randbedingungen an den Systemgrenzen die Wechselwirkung mit der Systemumgebung zu spezifizieren. Dafür sind weitere Gesetze notwendig, z. B. das Fouriersche Wärmeleitungsgesetz, Stoffgesetz(e) zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Spannungs- und Dehnungsverhalten bzw. des Fließverhaltens.

Gleichungen bzw. Gleichungssystem lösen und die interessierenden Größen (Strömungsfeld, Temperaturfeld, Energieströme, ...) bestimmen und - zweckmäßigerweise - grafisch darstellen.

An dieser Stelle - oder in einem separaten Punkt - sind die *erforderlichen Stoffdaten* aus den einschlägigen Datenbanken zu beschaffen. Im Kapitel 5 finden sich dazu Angaben. Wegen der enormen Vielfalt und Komplexität von Polymeren er-

weist sich die Beschaffung von konsistenten Materialdaten – für Festkörper und für Schmelzen – oft als alles andere als einfach.

## 6. Diskussion

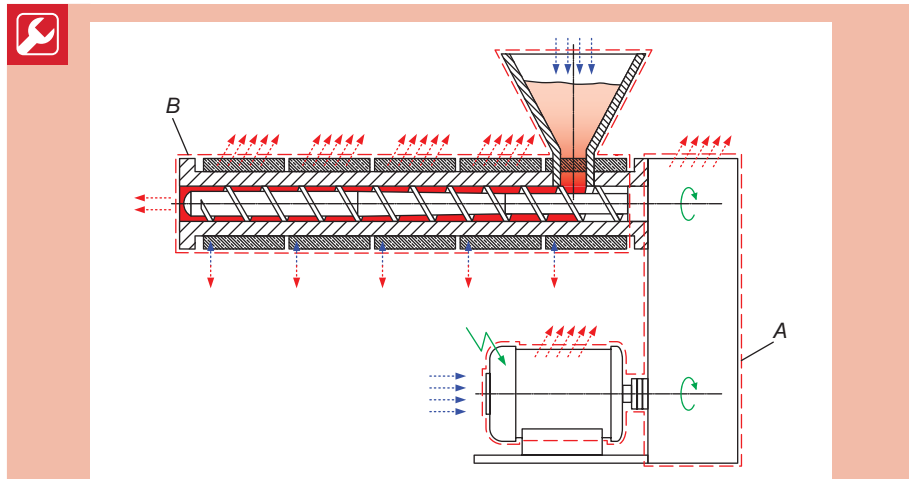
Hier geht es um die Beurteilung der Hauptergebnisse. Insbesondere ist zu prüfen, inwieweit die getroffenen vereinfachenden Annahmen zutreffen, oder ob sie angepasst werden müssen. Oder: Ist die getroffene Wahl der Systemgrenze zweckmäßig? Bei komplexen Zusammenhängen ergibt eine erste vereinfachte Analyse überhaupt ein „Gefühl für die Größenordnung“ der gesuchten Parameter. Dies erlaubt, in einem weiteren Schritt bessere und zutreffendere Annahmen zu treffen. Man wird so auf das typische *iterative ingenieurmäßige Vorgehen* geführt.

Kurz gefasst lautet die Methodik: Zuerst eine umfassende Problembeurteilung vornehmen (Schritte 1 bis 4). Dann erst kommen die Analyse und die Beurteilung der Ergebnisse (Schritte 5 und 6), ggf. mit weiteren Iterationsschritten.

Die Musterlösungen der Beispiele werden nach dieser Methodik behandelt. Es geht dabei stets darum, die Realität problemgerecht mathematisch zu modellieren. Diese Art der Modellierung wird auch Prozesssimulation genannt. Diese kann analytisch oder numerisch erfolgen. Die *analytische Methode* erfordert im Allgemeinen mehr oder weniger starke Vereinfachungen. Sie liefert jedoch mit vergleichsweise geringem Aufwand die wesentlichen Zusammenhänge in richtiger Größenordnung. Die *numerischen Methoden* (Finite-Differenzen-Methode, FDM) oder Finite-Element-Methode, FEM) sind aufwendiger, lassen aber eine realitätsnähere Modellierung zu. Beide Methoden haben ihre Berechtigung und sind in der Kunststofftechnik im Gebrauch. Für beide Methoden gibt es heute leistungsfähige Simulationswerkzeuge.

Als einführendes Lehrbuch konzipiert, beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen sinngemäß auf die analytische Methode, und was die Lösung der Rechenbeispiele betrifft, kommt das Software-Paket *Maple* zum Einsatz.

## ■ 1.3 Beispiel B 1.1: Beschreibung der Wechselwirkung mit der Umgebung für die Systemgrenzen A und B des skizzierten Systems „Extruder“



**Bild 1.5** Skizziertes System „Extruder“ [KA-1] Systemgrenze A um Motor, Riemenantrieb und Getriebe (Antriebsstrang)

### Systemgrenze A um Motor, Riemenantrieb und Getriebe (Antriebsstrang)

- Massenstrom: ggf. Kühlluftstrom des Elektromotors
- Energieströme: Elektrische Leistung an den Motor, mechanische Antriebsleistung an die Extruderwelle, Wärmeströme vom Getriebe- und Motorgehäuse an die Umgebung (Konvektion und Strahlung)

### Systemgrenze B um Trichter und den eigentlichen Extruder

- Massenströme: Granulatzufuhr, Extrudat am Austritt, Heiz- bzw. Kühlflüssigkeit zur Temperatursteuerung
- Energieströme: Vom Antrieb der Extruderwelle zugeführte mechanische Leistung, Heiz- bzw. Kühlleistung, von warmen Oberflächen abgegebene Wärmeströme (Konvektion und Strahlung)

## Literatur zu Kapitel 1

- [KA-1] Kaiser, Wolfgang: Kunststoffchemie für Ingenieure, Von der Synthese bis zur Anwendung, 4. neu bearb. und erw. Aufl., Hanser, München, 2016
- [KV-1] Stitz, Siegfried, Keller, Walter: Spritzgießtechnik, Verarbeitung – Maschine – Peripherie, 2. Aufl., Hanser München, Wien, 2004
- [WK-1] Menges, Georg, Edmund Haberstroh, Walter Michaeli, Ernst Schmachtenberg: Menges Werkstoffkunde Kunststoffe, 6., vollst. überarb. Aufl., Hanser Fachbuch, München, 2011
- [WU-1] Baehr, Hans Dieter, Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung. 9. Aufl., Springer, 2016
- [WU-4] Marek, Rudi, Nitschke, Klaus: Praxis der Wärmeübertragung, Grundlagen – Anwendungen – Übungsaufgaben, 4. neu bearb. Aufl., Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2015
- [WU-5] Von Böckh, Peter, Wetzels, Thomas: Wärmeübertragung, Grundlagen und Praxis, 6. Aufl., Springer, 2015



# 2

## Thermodynamik

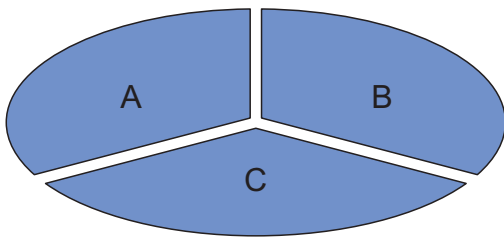
### ■ 2.1 Thermodynamik – Übersicht

#### 2.1.1 Vier Hauptsätze

In der Thermodynamik sind die *vier Hauptsätze* im Vordergrund. Im vorliegenden Kontext ist der Erste Hauptsatz (1. HS, Energieerhaltungssatz) für das geschlossene und für das offene System der wichtigste. Auf ihn wird in den Abschnitten 2.2 und 2.3 eingegangen. 1. HS

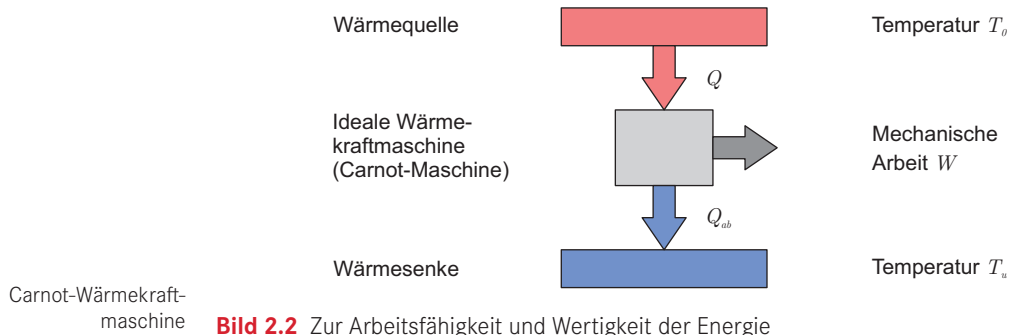
Hier folgen einige summarische Hinweise zur Bedeutung der übrigen drei Hauptsätze:

Der Nullte Hauptsatz (0. HS) handelt vom *thermischen Gleichgewicht*: Sind zwei Körper A und B je mit einem dritten Körper C im thermischen Gleichgewicht, dann sind sie untereinander im thermischen Gleichgewicht, Bild 2.1. Diese fundamentale Erkenntnis wurde erst als eigenständiges Prinzip formuliert, als die Bezeichnung 1. HS bereits vergeben war. Der 0. HS liefert einerseits die Basis für das Prinzip des Thermometers und andererseits – zusammen mit dem 2. HS – die Grundlage für die Definition der thermischen Zustandsgröße *Temperatur*. 0. HS



**Bild 2.1**  
Zum Nullten Hauptsatz der Thermodynamik

Der Zweite Hauptsatz (2. HS) bestimmt unter anderem, *in welcher Richtung* Prozesse *von selbst* ablaufen, z. B. fließt Wärme in einem Körper von selbst nur aus Bereichen höherer Temperatur zu solchen niedrigerer Temperatur. Ferner dient er der Beurteilung von Prozessen vom Standpunkt der Arbeitsfähigkeit (Exergie) aus. Das sei am folgenden einfachen Beispiel gezeigt, Bild 2.2. 2. HS



Absolute Temperatur  $T$  in Kelvin Gegeben seien eine Wärmequelle auf dem konstanten oberen Temperaturniveau  $T_0$  und eine Wärmesenke auf dem konstanten unteren Temperaturniveau  $T_u$ . Der Einfachheit halber sei  $T_u$  mit der Umgebungstemperatur identisch, dies als tiefstmögliche Temperatur für eine Wärmesenke. Unterhalb der Umgebungstemperatur  $T_u$  lässt sich eine Wärmesenke nicht ohne Aufwand aufrechterhalten. Die Temperaturen  $T$  bedeuten die absoluten oder thermodynamischen Temperaturen in Kelvin. Die Kelvin-Temperatur  $T$  hängt wie folgt mit der Celsius-Temperatur  $\vartheta$  zusammen:

$$\text{Celsius-Temperatur } \vartheta \quad T = \vartheta + 273,15 \quad (2.1)$$

Die Wärmequelle gebe die Wärme  $Q$  ab, Bild 2.2. Wird nichts weiter vorgekehrt, fließt sie von selbst zur Wärmesenke. Bei diesem reinen Wärmeübertragungsvorgang wird Energie „entwertet“; die Wärme  $Q$  hat in diesem Fall

- auf beiden Temperaturniveaus  $T_0$ ,  $T_u$  und dazwischen *dieselbe Quantität*,
- bei Temperaturen unterhalb  $T_0$  nach dem 2. HS eine *geringere Qualität*,
- nach dem „Fallen“ auf die Umgebungstemperatur  $T_u$  gar den *Wert Null*.

Das sieht man leicht ein, wenn man zwischen Wärmequelle und Wärmesenke eine *ideale Wärmekraftmaschine* (Carnot-Maschine genannt nach Nicolas Sadi Carnot) schaltet, die einen Teil der Wärme in (hochwertige) mechanische Arbeit  $W$  umwandelt. Sie tut das mit dem Carnot-Wirkungsgrad,

$$\text{Carnot-Wirkungsgrad} \quad \eta_c = 1 - \frac{T_u}{T_0} \quad (2.2)$$

dem nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik höchstmöglichen thermischen Wirkungsgrad zwischen den Temperaturen  $T_0$  und  $T_u$ , z. B. [TH-1].

Gütegrad Thermische Wirkungsgrade *realer Wärmekraftmaschinen* liegen wegen unvermeidlicher Verluste (infolge von Fluidreibung, Wärmeübertragung über endliche Temperaturdifferenzen etc.) stets *unterhalb* des Carnot-Wirkungsgrades. Das heißt auch: der Betrag der abgeführten Wärme ist bei gegebener Wärmezufuhr beim realen Prozess stets höher als nach Carnot. Das Verhältnis des realen zum idealen Wirkungsgrad nach Carnot heißt *Gütegrad*. Dieser ist nach dem 2. HS stets  $< 1$ .

Die maximal gewinnbare Arbeit der Wärme  $Q$  ist nach Gleichung 2.2:

$$\text{Maximal gewinnbare Arbeit} \quad W = \eta_c \cdot Q \quad (2.3)$$

Die an die Umgebung abgegebene Abwärme  $Q_{ab}$  folgt mit der Erhaltung der Energie (1. HS) im System Carnot-Maschine aus  $Q = Q_{ab} + W$ :

$$Q_{ab} = (1 - \eta_c) \cdot Q \quad (2.4)$$

### Daraus folgen drei wichtige Erkenntnisse:

1. Die Wärme  $Q$  auf dem Temperaturniveau  $T_o$  hat die Wertigkeit = *Exergie* = Arbeitsfähigkeit  $Ex = \eta_c \cdot Q$ , mit  $\eta_c$  nach Gleichung 2.2. Die Wertigkeit der Wärme ist umso höher, je höher die Temperatur ist, bei der sie zur Verfügung steht. Hohe thermische Wirkungsgrade bei Wärmekraftprozessen erreicht man, wenn die Wärme bei möglichst hoher Temperatur zugeführt wird und das Temperaturniveau der Wärmeabfuhr möglichst tief liegt, d. h. knapp über der Umgebungstemperatur  $T_u$ , sodass die Abwärme an die Umgebung abfließen kann. Die Exergie ist stets auf einen bestimmten Umgebungszustand bezogen, z. B.  $p_u = 1 \text{ bar}/T_u = 288,15 \text{ K} = 15 \text{ °C}$ .

Arbeitsfähigkeit  
der Wärme

2. Beim reinen Wärmeübertragungsvorgang „Wärme fällt ohne Arbeitsleistung von  $T_o$  auf  $T_u$ “ ist  $Q = Q_{ab}$ , d. h. es wird Energie „entwertet“, „dissipiert“, und zwar um den Betrag der gewinnbaren Arbeit  $W$ . Der Exergieverlust bei der Übertragung der Wärme  $Q$  von der Temperatur  $T_o$  auf die Temperatur  $T_1$  lässt sich aus der Differenz der Arbeitsfähigkeiten der Wärme  $Q$  auf den beiden Temperaturniveaus ermitteln:

Energieentwertung/  
Dissipation

$$T_o : Ex_o = \eta_{c_o} \cdot Q = \left(1 - \frac{T_u}{T_o}\right) \cdot Q \quad (2.5)$$

$$T_1 : Ex_1 = \eta_{c_1} \cdot Q = \left(1 - \frac{T_u}{T_1}\right) \cdot Q$$

$$Ex_v = Ex_o - Ex_1 = \frac{T_u \cdot (T_o - T_1)}{T_o \cdot T_1} \cdot Q \quad (2.6)$$

Man beachte, dass für  $T_1 = T_u$  die Exergie verschwindet. Das heißt: Wärme, die auf dem Niveau der Umgebungstemperatur zur Verfügung steht, ist nach dem 2. HS „wertlos“. Das heißt auch: Man kann die innere Energie der Umgebungsluft, eines Sees oder des Erdreichs auf Umgebungstemperatur nicht als Wärmequelle zum Betrieb einer Wärmekraftmaschine nutzen, weil kein Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und Wärmesenke vorhanden ist. Hingegen lässt sich die Umgebung (Umgebungsluft, Fluss, See, Erdreich) als Wärmequelle zum Betrieb einer Wärmepumpe nutzen, vgl. Abschnitt 2.5, **Beispiel B 2.1 Wärmepumpe**.



*Man kann sich merken:*

Jeder Wärmeübertragungsvorgang über endliche Temperaturdifferenzen ist mit einem Verlust an Arbeitsfähigkeit bzw. Exergie verbunden.



Dieser Exergieverlust ist nach Gleichung 2.6 auf hohem Temperaturniveau  $T_0$ ,  $T_1$  geringer als auf tiefem. Dahinter verbirgt sich der in der Thermodynamik bekannte Begriff des *Rückgewinns*. Ein Exergieverlust auf hohem Temperaturniveau kann durch Maßnahmen teilweise „zurückgewonnen“ werden. Das ist nicht mehr oder nur in geringem Ausmaß möglich, wenn der Exergieverlust in einem Prozess auf tieferem Temperaturniveau entsteht. Mit Exergieverlusten verbundene Prozesse wie Wärmeübertragung oder reibungsbehaftete Vorgänge sind *irreversibel*, d.h. sie können ohne bleibende Änderung in der Umgebung nicht mehr rückgängig gemacht werden.

- Perpetuum Mobile 2. Art 3. Der Zweite Hauptsatz gebietet: Ein Wärmekraftprozess *muß* Wärme an die Umgebung abgeben. Es ist unmöglich, Wärme *fortlaufend* vollständig in mechanische Arbeit umzuwandeln. Es ist ebenso unmöglich, in der Umgebung enthaltene innere Energie durch eine Wärmekraftmaschine in mechanische Arbeit umzuwandeln. Ein System, das dies könnte, wäre ein Perpetuum Mobile zweiter Art.

Dieses einfache Beispiel zeigt: Exergetische Analysen von Prozessen zeigen Ursache und Betrag der Entwertung von Energie. Das Werkzeug dazu sind *Exergiebilanzen*. Solche werden bislang bei Verarbeitungsprozessen von Kunststoffen nicht gemacht. Es fehlen dafür auch die erforderlichen Werkstoffdaten. Exergiebilanzen würden jedoch der weiteren Energieoptimierung dienen. Wegen der im Unterschied zu Wärmekraftprozessen tieferen Temperaturen sind Exergieverluste infolge dissipativer Vorgänge wegen verminderter Rückgewinnmöglichkeiten möglichst gering zu halten, vgl. die Bemerkungen zu Gleichung 2.6.

Carnot-Kältemaschine  
Carnot-Wärmepumpe  
Leistungsziffer COP Gleichsam die Umkehrung der Carnot-Wärmekraftmaschine ist die Carnot-Kältemaschine bzw. die Carnot-Wärmepumpe. Durch Zufuhr von Arbeit wird Wärme von tiefem auf höheres Temperaturniveau „gepumpt“. Der Nutzen bei der Kältemaschine ist die der kalten Seite (Kühlraum) entzogene Wärme, bei der Wärmepumpe die auf der warmen Seite abgegebene Wärme. Die *Carnot-Leistungsziffer* (= Nutzen/Aufwand) ist die naturgesetzlich *höchstmögliche*. Die Leistungsziffern (engl.: coefficient of performance, COP) realer Prozesse liegen stets unterhalb der Carnot-Leistungsziffer.

Das **Beispiel B 2.1 Wärmepumpe**, Abschnitt 2.5, zeigt den Vergleich der Betrachtungen nach dem 1. HS (*Energiefluss*) und nach dem 2. HS (*Exergiefluss*). Auf den eigentlichen thermodynamischen Prozess wird nicht eingegangen; dieser wird summarisch mit einem Gütegrad bewertet.

An dieser Stelle möge dieser knappe Einblick in die Implikationen des Zweiten Hauptsatzes genügen.

Zustandsgröße Entropie Nachzutragen ist noch die abstrakte von Rudolf Clausius 1865 eingeführte Zustandsgröße Entropie zur mathematischen Formulierung des Zweiten Hauptsatzes. Hier sei für späteren Gebrauch lediglich eine Art angegeben, wie sie eingeführt werden kann:

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad (2.7)$$

Die spezifische Form ergibt sich aus der Division durch die Systemmasse  $m$ :

$$ds = \frac{dS}{m} \quad (2.8)$$

Wird einem System der Temperatur  $T$  reversibel die Wärme  $\delta Q_{\text{rev}}$  zugeführt, erhöht sich die Entropie des Systems um  $dS$ . Reversible Wärmezufuhr heißt nach Gleichung 2.6 Wärmezufuhr bei infinitesimal kleiner Temperaturdifferenz. Die Entropie eines Systems kann sich nicht nur durch Wärmetransfers ändern. Im Abschnitt 2.2 werden wir auf die Entropieerhöhung infolge dissipativer Vorgänge eingehen.

Die Entropie  $S$  ist eine Zustandsgröße. Sie ist ein Maß für den „Ordnungsgrad“ eines Systems: Je höher die Unordnung, umso höher die Entropie. Führt man z. B. einem Stoff Wärme zu, erhöht sich dessen Temperatur; die Intensität der ungeordneten Molekülbewegungen nimmt zu und damit die Entropie.

Die Einheit der Entropie  $S$  ist J/K bzw. kJ/K. Die spezifische Form, d. h. die auf die Masse  $m$  bezogene Entropie  $s = S/m$  J/(kg · K) bzw. kJ/(kg · K).

Für die detaillierte Begründung und weitergehende Betrachtungen sei auf die einschlägigen Thermodynamik-Lehrbücher verwiesen, z. B. [TH-1] bis [TH-4].

Chemische Reaktionen, wie sie bei Verarbeitungsprozessen von Kunststoffen oder bei Verbrennungsvorgängen auftreten, erfordern in den Energiebilanzen die Berücksichtigung der *Reaktionsenthalpien* der beteiligten Stoffe. Chemische Reaktionen sind – wenn sie nicht auf reversible Weise durchgeführt werden – stets mit Entropieerhöhungen verbunden. Darauf wird im Abschnitt 2.4 näher eingegangen.

Zum Dritten Hauptsatz (3. HS): Bei chemischen Reaktionen benötigt man bei Energie- und Exergiebetrauchtungen neben den Enthalpien auch für die Entropien der Ausgangs- und Endprodukte eine *gemeinsame Referenz*. Diese ergibt sich aus dem von Walther Nernst gefundenen Erfahrungssatz, dem Nernstschen Wärmetheorem, auch Dritter Hauptsatz der Thermodynamik genannt. In der Formulierung nach Max Planck lautet er, [TH-1]:

*Die Entropie jedes festen Körpers aus lauter gleichartigen Bestandteilen, der sich im ungehemmten Gleichgewicht befindet, nähert sich bei Annäherung an den absoluten Nullpunkt  $T = 0$  unbegrenzt dem Wert Null.  
Die auf dieser Basis ermittelten Entropien heißen absolute Entropien.*

## 2.1.2 Stoffverhalten und Zustandsgleichungen

Das Stoffverhalten kann durch zwei Arten von Zustandsgleichungen beschrieben werden, durch die *thermische* und durch eine Zustandsgleichung *kalorischen* Typs. Auf letztere wird im nächsten Abschnitt eingegangen. Hinweis: Die beiden Zustandsbeziehungen sind nicht unabhängig voneinander; der zweite Hauptsatz der Thermodynamik liefert eine Beziehung zwischen ihnen.

Hier beschränken wir uns auf die thermische Zustandsgleichung homogener reiner Stoffe. Sie ist eine Beziehung zwischen den *thermischen Zustandsgrößen* Druck  $p$ ,