

HANSER



Leseprobe

zu

„Energie in der Kunststofftechnik“

von Wolfgang Kaiser und Willy Schlachter

Print-ISBN: 978-3-446-45409-5
E-Book-ISBN: 978-3-446-46059-1

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45409-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

Die Autoren	XIII
Prof. Dr. phil. nat. Wolfgang Kaiser	XIII
Prof. Dr. sc. techn. Willy Schlachter	XIV
Vorwort	XV
Hinweise zur Benutzung des Buches	XIX
Verzeichnis der physikalischen Größen	XXV
Griechische Zeichen	XXV
Lateinische Zeichen	XXVII
Teil 1 Einführende Grundlagen	1
1 Einleitung	3
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
2 Thermodynamik	15
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
3	Fluidmechanik	65
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 λ	92
3.9	Beispiel B 3.3: Zur Auswertung von Modellversuchen	94
	Literatur zu Kapitel 3	98
4	Wärmeübertragung	99
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
5	Materialverhalten	157
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 λ	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

6 Stationäre Wärmeleitung 215

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
7	Instationäre Wärmeleitung	233
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_{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
8	Thermodynamik	293
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
9	Fluidmechanik	337
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
10	Recycling von Kunststoffen	383
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
	Teil 3 Praxisbeispiele	401
	11 Praxisbeispiele	403
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
	12 Anhang Bilder	449
	Index	451

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

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:

CAMPUS plastics	www.campusplastics.com/
Material Data Center – M-Base	www.m-base.de/de.html
MatWeb	www.matweb.com
Polymat	www.polybase.com
SpringerMaterials – properties of materials	materials.springer.com
Total Materia	www.totalmateria.com/de

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- α -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

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

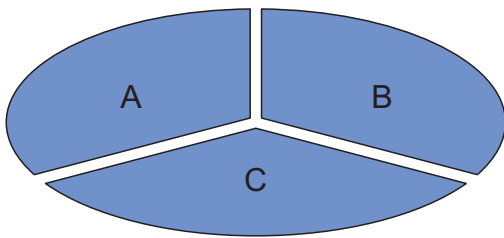
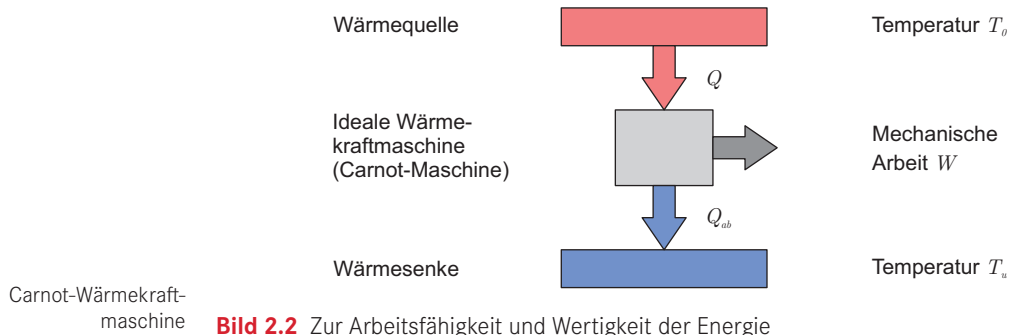


Bild 2.1
Zum Nullten Hauptsatz der Thermodynamik

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 ϑ 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 η_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.

liche Temperaturdifferenzen, Diffusionsvorgänge über endliche Konzentrationsunterschiede, Fluidreibung.

Im reversiblen Fall zeigt der 2. HS der Thermodynamik keine irreversible Entropieerhöhung an. Somit ist die freie Reaktionsenthalpie ΔG_R ein Maß für die *reversible Reaktionsarbeit*, d. h. für die maximal mögliche Nutzarbeit:

Reversible
Reaktionsarbeit

$$W_{rev} = \Delta G_R, \quad \text{bzw. molar: } W_{mrev} = \Delta G_{Rm} \quad (2.86)$$

Direkt daraus abgeleitet ergibt sich für viele Polymere die Möglichkeit der Nutzung des *rohstofflichen Recyclings* vom Polymer zum Monomer, vgl. Kapitel 10.

Wie bereits erwähnt, bietet die *Brennstoffzelle* eine Möglichkeit der angenähert reversiblen direkten Umsetzung der gebundenen chemischen Energie in Elektrizität.

Wir verzichten an dieser Stelle darauf, das *Chemische Potenzial* einzuführen und lassen es mit der Bemerkung bewenden, dass für reine Stoffe – als Einkomponentensystem – das Chemische Potenzial der molaren Gibbs-Energie G_m entspricht.

■ 2.5 Beispiel B 2.1: Wärmepumpe



Problemstellung

Wärmepumpen werden vor allem zu Heizzwecken eingesetzt. Ihr thermodynamisches Prinzip ist im Grunde die Umkehrung der Wärmekraftmaschine. Eine Wärmepumpe entzieht einer Wärmequelle (Atmosphäre, Erdreich, Fluss) auf unterem Temperaturniveau T_1 die Wärme Q_1 und bringt diese unter der Arbeitszufuhr W (= thermodynamisch hochwertige Energie) auf ein höheres Temperaturniveau T_2 , von dem aus sie genutzt werden kann. Es geht in diesem Beispiel darum, rein theoretisch auf der Basis der idealen Wärmepumpe (Carnot) den Einfluss des Temperaturniveaus der Wärmequelle und der zur Wärmeübertragung auf der kalten und warmen Seite notwendigen endlichen Temperaturdifferenzen ΔT_1 bzw. ΔT_2 zu ermitteln. Der Bezug zur Praxis geschieht mittels eines Gütegrades, der die Irreversibilitäten innerhalb des Systems pauschal erfasst. Er ist definiert als das Verhältnis reale Leistungsziffer/Carnot-Leistungsziffer.

Hinweis zu den Temperaturen: Beim Carnot-Prozess erfolgen Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr bei *konstanten* Temperaturen, bei realen Prozessen bei *gleitenden* Temperaturen. Wir gehen hier nicht auf die Eigenheiten realer Prozesse ein, sondern betrachten lediglich den Einfluss der zur Wärmeübertragung erforderlichen endlichen Temperaturdifferenzen auf die Carnot-Leistungsziffer (engl.: coefficient of performance COP).

Tabelle 2.1 Gegebene Daten (vgl. Bild 2.13)

Temperatur	Luft-WP	Erdsonden-WP
Obere Prozesstemperatur T_2	303	303
Niveau der Nutzung $T_N = T_2 - \Delta T_2$	293	293
Übertragungs-Differenz ΔT_2	10	10
Übertragungs-Differenz ΔT_1	15	20
Wärmequelle $T_{wQ} = T_1 + \Delta T_1$	273	288
Untere Prozesstemperatur T_1	258	268

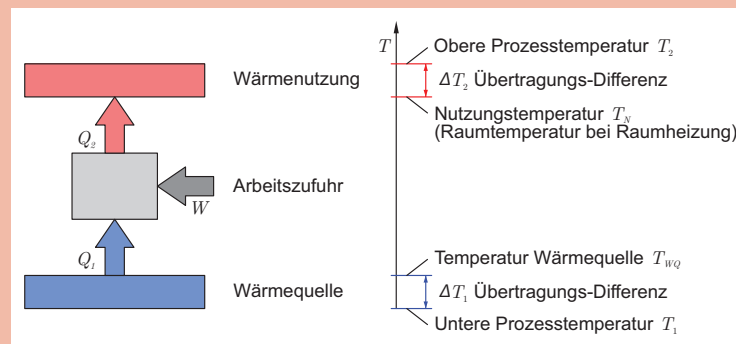
Der Gütegrad φ sei in beiden Fällen mit 0,6 angenommen.

Gesuchte Information

- Carnot-Leistungsziffer ε_C mit endlichen und verschwindenden Übertragungs-Differenzen $\Delta T_1, \Delta T_2$
- Energieflussbild und Exergieflussbild

System (Bild 2.13)

Zwischen den Prozesstemperaturen T_1 und T_2 arbeitende Wärmepumpe. Damit die Wärmen Q_1 und Q_2 übertragen werden können, sind endliche Übertragungs-Differenzen erforderlich (2. HS).

**Bild 2.13** Prozess-Schema

Vereinfachende Annahmen

Carnot-Wärmepumpe im Stationärbetrieb. Konstant bleibende Temperaturen T_{wQ} und T_N . Erfassung der Irreversibilitäten in der Wärmepumpe global durch Gütegrad φ

Analyse

Energiebilanz der Wärmepumpe und Definition der Leistungsziffer:

$$Q_2 = Q_1 + W, \quad \varepsilon = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \quad 1$$

Die Gleichungen in 1 gelten allgemein. Für die Carnot-Wärmepumpe gilt nach dem 2. HS (ohne Herleitung):

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad 2$$

Das Verhältnis der Wärmen entspricht – nach Lord Kelvin bzw. nach Carnot – dem Temperaturverhältnis. Mit 1 liefert 2 die Carnot-Leistungsziffer:

$$\varepsilon_C = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad 3$$

Nach dem 2. HS ist durch 3 die höchstmögliche Leistungsziffer definiert. Aus dem einfachen Ausdruck 3 ergibt sich die Handlungsanweisung für hohe Leistungsziffern: Man erkennt den dominanten Einfluss des Temperaturhubes $T_2 - T_1$. Dieser ist wegen der erforderlichen Übertragungsdifferenzen höher als der minimale Temperaturhub $T_N - T_{WQ}$, der auf eine höhere Carnot-Leistungsziffer führt:

$$\varepsilon_C^* = \frac{T_N}{T_N - T_{WQ}} = \frac{T_2 - \Delta T_2}{T_2 - T_1 - (\Delta T_2 + \Delta T_1)} \quad 4$$

Der Unterschied zwischen den Werten nach 3 und 4 ist auf die Irreversibilität infolge der Wärmeübertragung über endliche Temperaturdifferenzen zurückzuführen. Der Grenzfall reversibler Wärmeübertragung wird mit kleiner werdenden Übertragungsdifferenzen erreicht. Dies würde theoretisch auf unendlich große Wärmeübertragungsflächen führen. Wie weit man in der Praxis gehen will, ist eine Frage der Wirtschaftlichkeit.

Tabelle 2.2 Numerische Auswertung (gerundete Zahlen) mit den gegebenen Temperaturwerten

Leistungsziffer	Luft-WP	Erdsonden-WP
Carnot, Gleichung (3)	$\varepsilon_C = 6,73$	$\varepsilon_C = 8,66$
Carnot*, Gleichung (4)	$\varepsilon_C^* = 14,65$	$\varepsilon_C^* = 58,6$
Carnot mit Gütegrad	$\varepsilon = \varepsilon_C \cdot \varphi = 4,0$	$\varepsilon = \varepsilon_C \cdot \varphi = 5,2$

Es zeigt sich das bekannte Resultat, dass die Ausführung mit Erdsonde wegen höherem Temperaturniveau der Wärmequelle auf höhere Leistungsziffern führt.

Am Beispiel der Luft-Wärmepumpe wird der Energieumsatz vom Standpunkt des 1. HS (Energieflussbild) und vom Standpunkt des 2. HS (Exergieflussbild) dargestellt, Bilder 2.14 und 2.15.

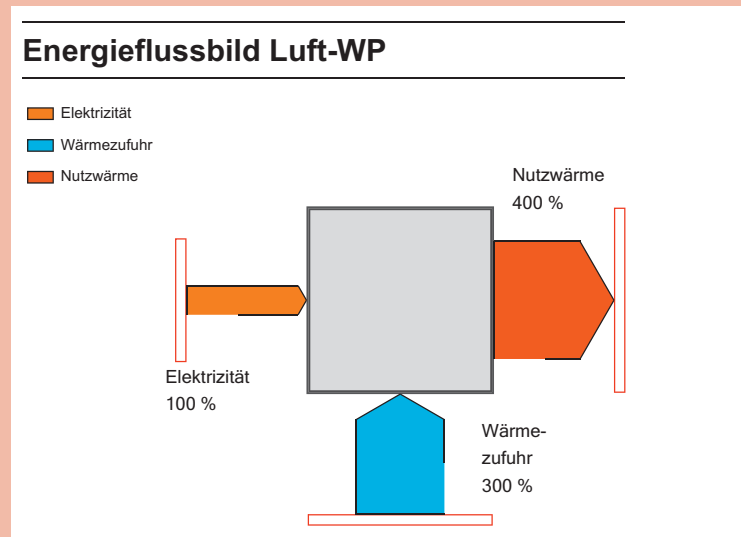


Bild 2.14 Energieflussdiagramm, erstellt mit esankey 4

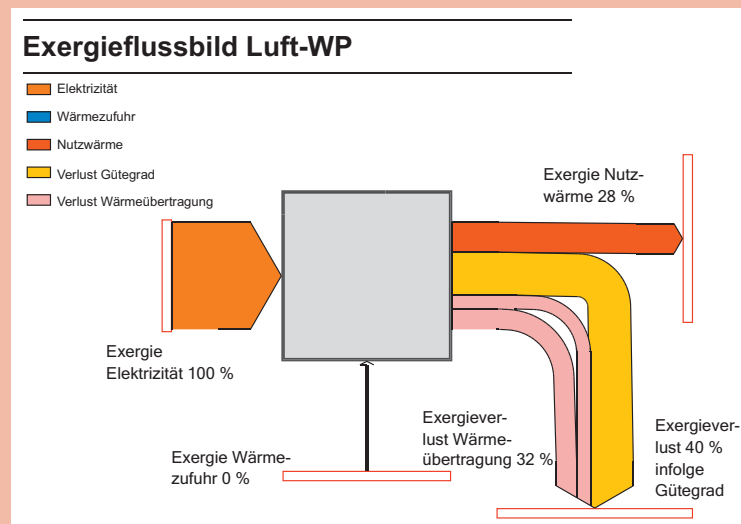


Bild 2.15 Exergieflussdiagramm, erstellt mit esankey 4

Beide Bilder sind auf die Zufuhr der elektrischen Energie = Exergie = 100% normiert und enthalten gerundete Zahlen. Die beiden Darstellungen unterscheiden sich markant. Das Energieflussbild ist einfach verständlich. Zum Exergieflussbild 2.15: Die Exergie ist auf die Umgebungstemperatur $T_0 = T_{W0} = 273 \text{ K}$ normiert. Die Exergie der bei Umgebungstemperatur zugeführten Wärme Q_1 verschwindet, Gleichung 2.3. Die Exergie der Nutzwärme Q_2 folgt ebenfalls aus 2.3. Die Exergieverluste infolge der Wärmeübertragung sind nach Gleichung 2.6 ermittelt. Der Wert am kalten Ende ist trotz geringerem Wärmefluss höher als am warmen Ende. Der dem Gütegrad φ zuzuschreibende Exergieverlust ist $(1 - \varphi) \cdot 100\% = 40\%$.

Diskussion

Die Ökologie der Wärmepumpe liegt in der Nutzung von Energie aus der Umwelt, ist aber auch maßgeblich abhängig von der Art der Stromproduktion. Eine mit Strom aus einem Gas-und-Dampfkraftwerk – thermischer Wirkungsgrad leicht über 60% nach aktueller Technik – betriebene Wärmepumpe mit einer Leistungsziffer von 5 führt im Vergleich zu einem erdgasgefeuerten Kondensations-Heizkessel auf eine Reduktion von fossiler Energie um knapp Faktor 3.

Die thermodynamische Betrachtung von Wärmepumpenprozessen, wie sie in jedem Thermodynamik-Lehrbuch zu finden ist, würde eine quantitative Angabe zum Gütegrad φ liefern.

Das Exergieflussbild zeigt eindeutig die *Quellen der thermodynamischen Verluste*, d. h. die Orte, an denen Energie entwertet wird. Man erhält damit klarere Hinweise, wo und wie das System energetisch verbessert werden kann, als wenn man sich lediglich auf das Energieflussbild stützt. Leider stehen derzeit die für Exergieanalysen von Verarbeitungsprozessen erforderlichen Stoffdaten von handelsüblichen Kunststoffen in Tabellenform nicht zur Verfügung.

Die in Gleichung 4.25 gemittelte Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_m$ im Wärmeübertrager heißt mittlere logarithmische Temperaturdifferenz.

Mittlere logarithmische Temperaturdifferenz

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_E - \Delta\vartheta_A}{\ln\left(\frac{\Delta\vartheta_E}{\Delta\vartheta_A}\right)} \quad (4.26)$$

Der identische Ausdruck gilt für den Gegenstromapparat.

Gleichung 4.26 ist auf den Spezialfall $\Delta\vartheta_E = \Delta\vartheta_A$ nicht direkt anwendbar, für den logischerweise

$$\Delta\vartheta_m = \frac{\Delta\vartheta_E + \Delta\vartheta_A}{2} = \Delta\vartheta, \quad \Delta\vartheta_E = \Delta\vartheta_A = \Delta\vartheta \quad (4.27)$$

gilt. Der Ausdruck 4.27 strebt gegen $\Delta\vartheta$, wenn das Verhältnis $\Delta\vartheta_E/\Delta\vartheta_A$ gegen Eins geht.

Die mittlere logarithmische Temperaturdifferenz hat Bedeutung über die Theorie der Wärmeübertrager hinaus. Sie spielt eine Rolle in jedem durch ein Wärmeträgermedium beheiztes oder gekühltes System. Das zeigt das **Beispiel B 7.3**. „Aufheizen eines Spritzgieß-Werkzeugs“, Abschnitt 7.11.

■ 4.4 Konvektion – Allgemeines

Definition Konvektion Unter Konvektion versteht man Wärmeübertragung zwischen einer festen Wand und einem strömenden Fluid unterschiedlicher Temperatur.

Erzwungene und freie Konvektion: Übertragungsmechanismen Wird die Strömung durch Geräte wie Gebläse, Pumpen „erzwungen“, spricht man von *erzwungener* Konvektion. Kommt die Konvektionsströmung als Folge von temperaturbedingten Dichteunterschieden im Fluid zustande (Archimedische Auftriebsströmung), spricht man von *freier* Konvektion.

In beiden Fällen sind folgende Energietransportvorgänge maßgebend,

- der molekulare Austausch (Wärmeleitung in Wandnähe) und
- der makroskopische Austausch infolge turbulenter Fluidbewegung (Impuls- und Energieaustausch).

Die entscheidenden Zonen sind die hydrodynamische und die thermische Grenzschicht entlang der Wand, Bild 4.4.

Ferner spricht man von *interner* (Rohr-, Kanalströmung) und *externer* Strömung (entlang freier Oberflächen wie Platten, Zylinder, querangeströmte Körper).

Annahmen Das Ganze gilt für newtonsche Fluide. Ferner beschränken wir uns auf Wärmeübertragung ohne Phasenänderung der beteiligten Fluide.

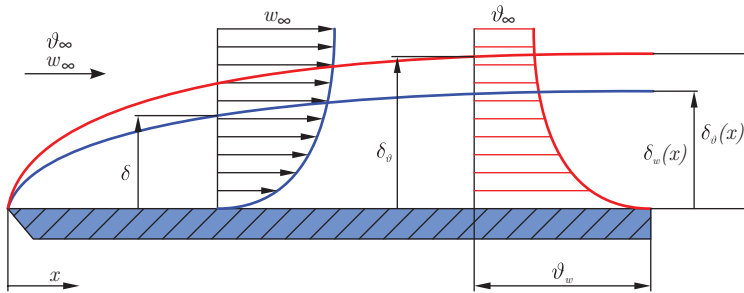


Bild 4.4 Wärmeübertragung durch Konvektion, Strömungs- und Temperaturgrenzschicht an längs angeströmter Platte

Wie bereits mit Gleichung 4.2 eingeführt, wird die Wärmestromdichte durch den auf Newton zurückgehenden Ansatz ausgedrückt:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (\vartheta_w - \vartheta_x) \quad (4.28) \quad \text{Wärmeübergangszahl}$$

Dabei bedeuten α die Wärmeübergangszahl in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, ϑ_∞ die Fluidtemperatur außerhalb der Grenzschicht, ϑ_w die Oberflächentemperatur der wärmeabgebenden Wand. Das ganze Problem ist auf die Bestimmung der α -Zahl zurückgeführt, die von einer Vielzahl von Parametern abhängt: Art der Strömung (laminar, turbulent), Oberflächenstruktur, Fluideigenschaften. Die Ermittlung der α -Zahlen erfolgt mehrheitlich durch Korrelationen, die auf Experimenten beruhen. Die theoretische Bestimmung ist nur bei einfachen Randbedingungen und Strömungsverhältnissen möglich, z. B. bei Plattengrenzschichten oder voll ausgebildeten Rohrströmungen.

An der Wandoberfläche gilt die Energiebilanz: Die durch Wärmeleitung in der Wand mit Wärmeleitfähigkeit λ an die Wandoberfläche transportierte Wärme wird dort an das Fluid abgegeben, d. h. es gilt die Übergangsbedingung:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (\vartheta_w - \vartheta_x) = \lambda \cdot \left. \frac{d\vartheta}{dy} \right|_{y=0} \quad (4.29) \quad \text{Übergangsbedingung}$$

Da in der wandnahen Schicht (laminare Unterschicht) des strömenden Fluids der Wärmetransport ebenfalls durch Leitung erfolgt, lässt sich die rechte Seite der Gleichung 4.29 auch mit dem Produkt „Wärmeleitfähigkeit des Fluids mal Temperaturgradient im Fluid an der Wand“ schreiben.

Ist das Fluid wärmer als die Wand, erfolgt der Wärmefluss nach dem 2. HS der Thermodynamik zur Wand hin.

Wärmeübergangskorrelationen werden unter Nutzung der *Ähnlichkeitstheorie* in dimensionsloser Form angegeben. Die für Wärmeübertragung durch Konvektion maßgebenden dimensionslosen Kennzahlen und ihre Bedeutung sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Die mit diesen Kennzahlen gebildeten Korrelationen für in der Kunststofftechnik relevante Wärmeübergangssituationen werden in den folgenden Abschnitten 4.5 und 4.6 aufgeführt.

Tabelle 4.1 Wichtigste dimensionslose Kennzahlen der Wärmeübertragung durch Konvektion

Kennzahl	Definition	Physikalische Bedeutung
Reynolds-Zahl	$Re = \frac{\eta \cdot w \cdot L_{ref}}{\rho} = \frac{w \cdot L_{ref}}{\nu}$ <p>L_{ref}: Bezugslänge [m] w: Bezugsgeschwindigkeit</p> <p>Stoffwerte des Fluids η: dynamische Viskosität [Pa·s] ν: kinematische Viskosität [m²/s] ρ: Dichte [kg/m³]</p>	<p>Trägheitskräfte Zähigkeitskräfte</p> <p>Charakterisiert die Art der Strömung (laminar, turbulent)</p>
Prandtl-Zahl	$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}, a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ <p>Stoffwerte des Fluids: a: Temperaturleitfähigkeit [m²/s] c_p: Spez. Wärmekapazität bei $p = \text{konst.}$, vgl. Gleichung (2.54) λ: Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]</p>	<p>Stoffgröße, verknüpft Temperatur- mit Geschwindigkeitsfeld Größenordnung Pr-Zahl: Gase: $Pr \approx 1$ Flüssigkeiten: $Pr \approx 10$ Öl: $Pr \approx 1000$ Werte sind temperaturabhängig</p>
Nusselt-Zahl	$Nu = \frac{\alpha \cdot L_{ref}}{\lambda}$	<p>Dimensionslose Wärmeübergangszahl, verknüpft charakteristische Länge mit der Dicke der Temperaturgrenzschicht</p>
Stanton-Zahl (im angelsächsischen Sprachraum gebräuchlich)	$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{\alpha}{w \cdot \rho \cdot c_p}$	<p>Speziell geeignet für Wärmeübergangsverhältnisse in Kanälen; ermöglicht anschauliche Deutung, vgl. Abschnitt 4.5.1 und Beispiel B 4.2, Abschnitt 4.9</p>
Grashof-Zahl	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\vartheta_w - \vartheta_\infty) \cdot L_{ref}^3}{\nu^2}$ <p>β: Ausdehnungskoeffizient [1/K]. Ideales Gas $\beta = 1/T$ g: Erdbeschleunigung 9,81 m/s²</p>	<p>Auftriebskräfte Zähigkeitskräfte</p>
Rayleigh-Zahl (im angelsächsischen Sprachraum gebräuchlich)	$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\vartheta_w - \vartheta_\infty) \cdot L_{ref}^3}{\nu \cdot a}$ <p>L_{ref}: Bezugslänge</p>	<p>Abgeleitete Kennzahl für freie Konvektion</p>

- *Rheologische Stoffgleichungen*, die Spannungs- und Deformations- bzw. Strömungszustand verknüpfen: z.B. dynamische Viskosität η in Funktion der Scherrate.
- *Transporteigenschaften* wie Wärmeleitungs- und Temperaturleitfähigkeit zur Erfassung der stationären und instationären Wärmeleitung innerhalb des Fluids oder Festkörpers → Fouriersches Wärmeleitungsgesetz, Gleichungen 4.3 bzw. 4.4.
- *Materialeigenschaften*, die bei Einsatz von Kunststoffen als Ingenieur-Werkstoffe wichtig sind, z.B. Elastizitäts- und Schubmodul.

Die Erhaltungsgleichungen in Verbindung mit den Stoffgesetzen sind gekoppelte nichtlineare Differenzialgleichungen. Mit gewissen Vereinfachungen ist zumindest teilweise eine Entkopplung möglich. Zum Beispiel erfolgt die analytische Behandlung erzwungener inkompressibler Strömungsprozesse üblicherweise als isothermer Vorgang; d.h. die Energiegleichung wird außer Acht gelassen; Temperaturunterschiede werden nicht erfasst. Die isotherme Betrachtung schafft erst die Voraussetzung zur Auswertung der Energiegleichung.

Im nachfolgenden Abschnitt 5.2 werden einige Stoffdaten über in der Kunststoffverarbeitung eingesetzte newtonsche Fluide und Festkörper zusammengestellt.

■ 5.2 Materialverhalten von Kunststoffen

5.2.1 Grundlagen

„Dass ich erkenne, was die Welt im Innersten zusammenhält“ ist das trotzige Verlangen des gelehrten Dr. Faustus, gleich zu Beginn in Goethes Meisterwerk. Doch weder Faust noch anderen Gelehrten ist es bisher gelungen, auf diese indirekt verpackte Frage eine aus philosophischer Sicht einigermaßen befriedigende Antwort zu erhalten. Ganz ähnlich verhält es sich bei der Suche nach einer *Weltformel*, mit der sich das ganze Universum in einer einzigen Formel mathematisch beschreiben lässt, inklusive aller beteiligten Kräfte. Bis auf weiteres ein Traum der Physiker! Stattdessen soll – basierend auf technisch-naturwissenschaftlichen Erkenntnissen – im Rahmen dieses Abschnitts zumindest in den *Grundzügen das Materialverhalten* von Kunststoffen vor, während und nach der Verarbeitung behandelt werden. Dass auch hier Kräfte in vielfältiger Form zum Tragen kommen, versteht sich von selbst. Zentrale Bedeutung zum weiteren Verständnis erlangt hierbei der sogenannte Hauptsatz (Axiom) der Kunststofftechnik. Denn Kunststoffe liegen üblicherweise als *komplexe Mischungen* vor, d.h. mit dem Verhalten eines reinen Stoffes nicht vergleichbar. Erfahrungsgemäß ausgedrückt handelt es sich um ein meist mit großer Sorgfalt aufbereitetes Stoffgemisch aus den beiden Komponenten:

Hauptsatz der
Kunststofftechnik



Polymer-Rohstoff/e + Zusatzstoff/e/ Additiv/e → Kunststoff

Das Pfeilsymbol kennzeichnet die Verfahrensschritte Aufbereitung/Verarbeitung.

In der Praxis bedeutet dies indessen, dass *durch noch so kleine Änderungen* (sei es im Mischungsverhältnis oder bei der Zuführung einer dieser Komponenten) das bisherige Materialverhalten nicht mehr garantiert ist. Zusätzlich wird die Transparenz dieser an sich einfachen Aussage dadurch erschwert, dass im Alltag dieselben Bezeichnungen für den Polymer-Rohstoff wie auch für den Kunststoff üblich sind.

5.2.1.1 Polymer-Rohstoff/e

Als erstes soll am Beispiel des *Polypropylens, PP*, dieses Axiom *exemplarisch* für den Einfluss der Polymer-Rohstoffe auf das Materialverhalten eines Kunststoffs verdeutlicht werden. So kann bereits das *Propylen* (Monomer) bei der Polymerisation zum Polypropylen (Polymer-Rohstoff) durch unterschiedliche Herstellungsbedingungen wie Druck und Temperatur, besonders aber durch hochspezifische Katalysatoren zu Polymeren mit verschiedenen Eigenschaften umgesetzt werden. Man erhält somit, am Beispiel des PP, den gleichen Polymer-Rohstoff in variabler Molmasse bzw. Molmassenverteilung sowie wechselndem Gehalt an isotaktischen Makromolekülen, vgl. Bild 5.1.

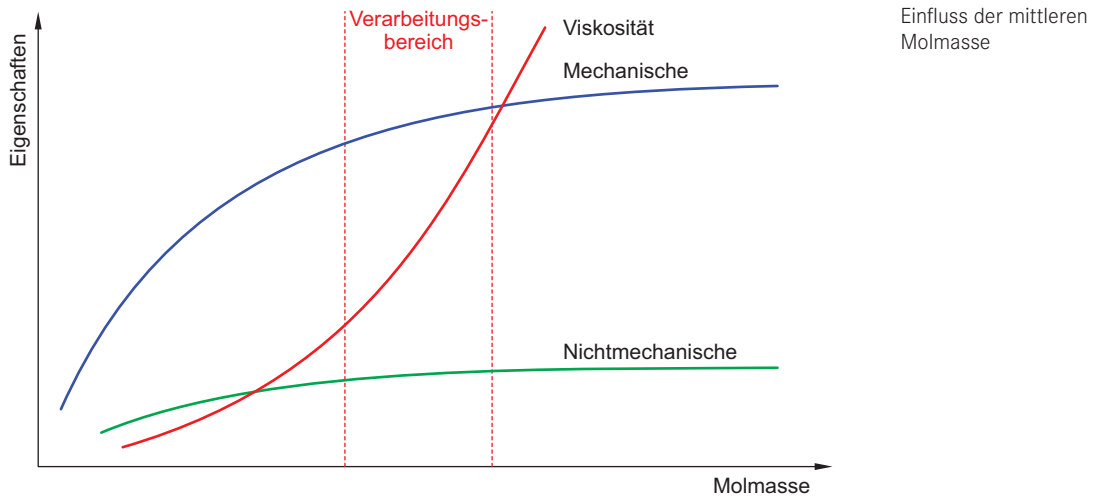


Bild 5.1 Einfluss der mittleren Molmasse auf physikalische Eigenschaften in schematischer Darstellung, aus [KA-1]

Sollen die spezifischen Vorteile sowohl von niederen als auch sehr hohen Molmassen kombiniert werden, bietet sich die Herstellung eines Kunststoffs mit bimodaler Verteilung des Polymers an, vgl. Bild 5.2.

Bimodale
Verteilungskurve

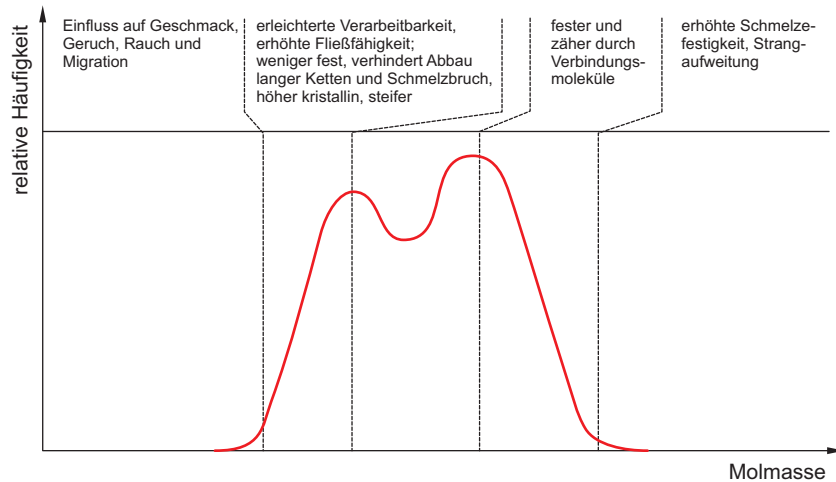


Bild 5.2 Schema einer bimodalen Verteilungskurve, aus [KA-1]

Weitere Möglichkeiten „maßgeschneiderte Polymere“ für die Praxis zu erhalten, bieten die zahlreichen Varianten der *chemischen Modifikation von Polymeren*. Ausgeprägt im Falle des PP beispielsweise durch den Einsatz weiterer Monomere, z. B. Ethylen. Unter dem Oberbegriff „*PP-Copolymere*“ finden sie vielfältige Anwendung, vgl. Bild 5.3.

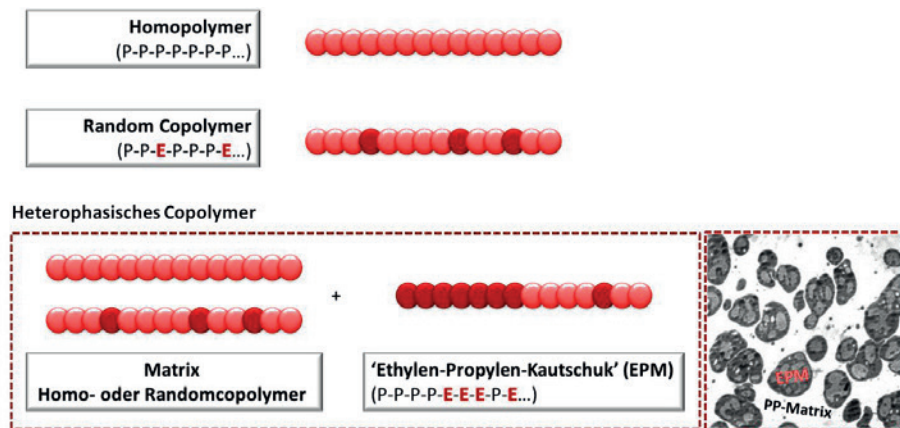


Bild 5.3 Schematischer Aufbau der Propylen-Copolymere, aus [KA-1]

Nicht zuletzt lassen sich am fertigen Polymer-Rohstoff weitere chemische Modifikationen vornehmen. Beispielhaft sei die nachträgliche chemische Vernetzung von Thermoplasten erwähnt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die bisher genannten und noch folgenden Möglichkeiten, einen Polymer-Rohstoff „maßzuschneiden“, keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern – wie bereits erwähnt – nur als *exemplarische Beispiele* zu verstehen sind.

Bewusst beabsichtigt ist auch, in diesem Abschnitt 5.2 bei der weiteren *Beschreibung des Materialverhaltens* auf chemische und physikalische Formeln weitgehend zu verzichten und stattdessen für einmal dem qualitativen Zugang in Wort und Bild den Vorrang zu lassen.

Für ein vertiefteres Verständnis – insbesondere was die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Kunststoffen betrifft – sei einmal mehr an dieser Stelle auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

5.2.1.2 Zusatzstoff/e/Additiv/e

Desgleichen lassen sich durch eine selektive Wahl der Zusatzstoffe die Eigenschaften eines Kunststoffs für den vorgesehenen Einsatz in der Praxis nachhaltig verändern. Im Alltag der Kunststoffanwendungen werden diese zusätzlichen Möglichkeiten der *physikalischen Modifikation* fast immer ausgeschöpft zur Herstellung hochwertiger Bauteile bzw. Halbzeuge (Rohre, Platten, Profile etc.). Und meist in Kombination mit den bereits erwähnten chemischen Varianten zur Optimierung des Polymer-Rohstoffs.

Physikalische
Modifikation

An mehreren Beispielen – zunächst als unerwünschte Effekte – sei das physikalische Modifizieren ebenfalls *in exemplarischer Form* näher erläutert. So ist PP in der Anwendung als Kunststoff, aufgrund seiner chemischen Struktur, als *hydrophob* zu bezeichnen. Ganz anders verhält es sich bei einem mit Glasfaser verstärkten PP. Das physikalische Phänomen der Benetzbarkeit von Glasfasern durch H₂O (Wasserfilm) erfordert demzufolge noch vor der Verarbeitung im Schmelzprozess eine *kontrollierte Vortrocknung*. Die erwünschte Verbesserung der mechanischen Eigenschaften würde sonst durch gebildeten Wasserdampf und dessen Folgen, z. B. Schlieren- und Blasenbildung, zu einer Einbuße am Bauteil führen. Noch extremer verhält sich Polyethylenterephthalat (PET) in der Verarbeitung, z. B. beim Spritzgießen von Vorformlingen („preform“), die zur Fertigung der PET-Flaschen dienen. Bereits als unverstärkter Polymer-Rohstoff erweist es sich in Gegenwart geringster Spuren von Wasser, bedingt durch seine gegebene hydrophile Polyester-Struktur, als *hydrolyseanfällig* und erfordert demzufolge eine *extreme Vortrocknung* vor der Verarbeitung. Ganz im Gegensatz dazu erlangt ein Polyamid, z. B. ein PA 66, erst durch die Aufnahme von Wasser als äußerem Weichmacher seine Zähigkeit.

Für den Nichtfachmann ebenfalls überraschend kann beispielsweise ein *Farbwechsel* beim gleichen Kunststoff zu unvorhergesehenen Folgen führen. Im Alltag des Kunststoffverarbeiters zwingt dieser Farbwechsel, z. B. von Grün auf Gelb, unter anderem ein besonderes Augenmaß auf das veränderte *Schwindungsverhalten* zu richten.

Folgenreicher
Farbwechsel

Die Modifizierung der Polymer-Rohstoffe mit Zusatzstoffen erfolgt, je nach den Anforderungen an das betreffende Kunststoffteil, entweder bereits beim Polymer-Rohstoffhersteller (Erzeuger) und/oder beim Compoundeur bzw. beim Verarbeiter. Welche Anforderungen im Einzelnen an Zusatzstoffe gestellt werden, fasst Tabelle 5.1 in einer Übersicht zusammen.

Gewissermaßen als Nebeneffekt resultiert aus den bislang erörterten chemischen und physikalischen Modifikationen eine einfache Erklärung für die riesige Vielfalt an maßgeschneiderten Kunststoffanwendungen, die im Alltag anzutreffen sind. Dieser offensichtliche Vorteil im Wettbewerb mit anderen Werkstoffen erweist sich

Recycling von Kunststoffen

hingegen als empfindlicher Nachteil beim Recycling. Aktuell betroffen von dieser Kehrseite sind je länger desto mehr Einwegverpackungen aus Kunststoffen. Das Kapitel 10 befasst sich zu diesem Zweck ausführlich mit dem Thema Recycling von Kunststoffen sowie mit den vorhandenen Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von „Plastikmüll“.

Definition Makromolekül

Erweitertes Verständnis für das Materialverhalten von Kunststoffen setzt auch voraus, über die andersartige Struktur der Polymere im Vergleich zu anderen Materialien, beispielsweise zu den Metallen, in den Grundzügen informiert zu sein. Betrachtet man beim Aufbau von Metallen Atome als deren kleinste Bausteine, die sich in Atomgittern anordnen, finden sich dazu im Gegensatz bei den Polymeren Moleküle, wobei als unterste Grenze mindestens 1000 Atome beteiligt sind. Mit dem Ausdruck *Makromolekül* soll dieser Besonderheit Rechnung getragen werden. Ein reines Polymer (Polymer-Rohstoff) besteht somit im einfachsten Fall aus einer Vielzahl von chemisch identischen Makromolekülen, wobei je nach Kunststoffart amorphe (ungeordnete) und/oder kristalline Strukturen ausgebildet sind.

Tabelle 5.1 Thematische Übersicht: Zusatzstoffe (Additive) für Kunststoffe (Auswahl), aus [KA-1]

Reaktionsstoffe	Verarbeitung fördernde Zusatzstoffe	Festigkeit erhöhende Zusatzstoffe	Steifigkeit erhöhende Zusatzstoffe	Steifigkeit verringende Zusatzstoffe
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Härter (Vernetzer) ▪ Photo-Initiatoren ▪ Katalysatoren ▪ Beschleuniger ▪ Treibmittel (für Schaumstoffe) ▪ Abbau bewirkende Zusatzstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stabilisatoren (gegen Wärme) ▪ Antioxidantien ▪ Gleitmittel ▪ Haftvermittler (bei Füllstoffen, Fasern, usw.) ▪ Nukleierungsmittel ▪ Antistatika ▪ Trennmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verstärkungen wie Fasern, Gewebe, Matten ▪ Füllstoffe mit Verstärkerwirkung (z. B. Ruß, Kieselsäure bei Elastomeren) ▪ Harzträger bei Duroplasten (z. B. Holzmehl, Cellulose) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verstärkungen wie Fasern, Gewebe, Matten ▪ Füllstoffe ohne Verstärkerwirkung (z. B. Quarzmehl, Gesteinsmehl) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weichmacher ▪ Kautschukartige Polymere, eingemischt in den weichmachenden Kunststoff (sogen. Polyblends wie z. B. Nitrilkautschuk in PVC oder chloriertes PE in PVC)
Antimikrobielle Zusatzstoffe	Lebensdauer Verlängernde Zusatzstoffe	Färbende Zusatzstoffe	Eigenschaften verändernde Zusatzstoff	Verbilligende Zusatzstoffe
<p>Biostabilisatoren gegen biologischen Angriff (z. B. Fungistatika gegen Pilze)</p>	<p>Stabilisatoren (gegen Licht, Oxidation, Wärme, auch Alterungsschutzmittel genannt)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pigmente ▪ Farbstoffe ▪ Aufhellungsmittel (z. B. Waschblau bei PVC) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flammschutzmittel ▪ Wärmeleitung verbessernde Zusatzstoffe (z. B. Metallpulver) Antistatika 	<p>billige Füllstoffe (z. B. Schiefermehl, Kreide u. ä. sog. Streckmittel)</p>

6

Stationäre Wärmeleitung

■ 6.1 Temperaturverlauf in Rippen (Rippentheorie)

6.1.1 Energiebilanz

Zur Verbesserung der konvektiven Wärmeübertragung verwendet man das Prinzip der *Oberflächenvergrößerung* mittels Rippen oder Stäben. Die Rippentheorie befasst sich mit diesem Thema. Das ist namentlich bei Fällen mit geringen Wärmeübergangszahlen angebracht. Bei Extrudern z. B. werden außen am Zylinder berippte Kühlelemente eingesetzt, die von durch Gebläse bewegter Luft angeströmt werden, [KV-2].

Oberflächen-
vergrößerung

Wir stellen der Darstellung in [WU-2] folgend die Theorie für gerade Rippen dar und geben einige Angaben zu weiteren Rippenformen, wie sie sich in den einschlägigen Lehrbüchern [WU-1] bis [WU-7] finden lassen. Wir betrachten den Fall Wärmeabgabe der Rippe an das Fluid.

Die Theorie basiert auf folgenden *vereinfachenden Annahmen*:

Vereinfachende
Annahmen

- Eindimensionaler Temperaturverlauf in der Rippe;
- Homogenes Rippenmaterial mit konstanter Wärmeleitfähigkeit λ ;
- Konstante Wärmeübergangszahl α an der Rippenoberfläche;
- Konstante Temperatur ϑ_∞ des die Rippe umgebenden Fluids;
- Vernachlässigbarer Wärmestrom am Rippenende und an den Rippenflanken (breite Rippe).

Wir beschränken uns zur Begründung der wesentlichen Zusammenhänge auf die ebene Rippe konstanter Dicke s , Bild 6.1, und formulieren für das Volumenelement der Dicke dx die stationäre Energiebilanz:

$$0 = \dot{Q}(x) - \dot{Q}(x + dx) - U \cdot dx \cdot \alpha \cdot [\vartheta(x) - \vartheta_\infty] \quad (6.1) \quad \text{Stationäre Energiebilanz}$$

Wir gehen von der Vorstellung aus, dass die Rippe die Wärmeabfuhr einer ebenen Wand an ein Fluid tieferer Temperatur vergrößern soll, d. h. der Wärmestrom am Rippenfuß, $x = 0$, ist höher als außerhalb der Rippe, Bild 6.1. Die Rippenflanke gibt über den vom Fluid benetzten Umfang U Wärme an das umgebende Fluid ab, d. h.

es gilt $\vartheta(x) > \vartheta_\infty$. Mit dem Fourierschen Wärmeleitungsgesetz, Abschnitt 4.2.1, lauten die Wärmeströme an den Stellen x und $x + dx$:

$$\dot{Q}(x) = -\lambda \cdot A \cdot \frac{d\vartheta(x)}{dx}, \quad \dot{Q}(x+dx) = -\lambda \cdot A \cdot \left[\frac{d\vartheta(x)}{dx} + \frac{d^2\vartheta(x)}{dx^2} \cdot dx \right] \quad (6.2)$$

Dies eingeführt in die Energiebilanz 6.1 liefert die lineare Differentialgleichung zweiter Ordnung:

Differentialgleichung für die Temperatur

$$\frac{d^2\vartheta(x)}{dx^2} - \frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A} \cdot [\vartheta(x) - \vartheta_\infty] = 0 \quad (6.3)$$

Der Term mit der zweiten Ableitung beschreibt die Wärmeleitung in Längsrichtung, der andere die Konvektion in lateraler Richtung.

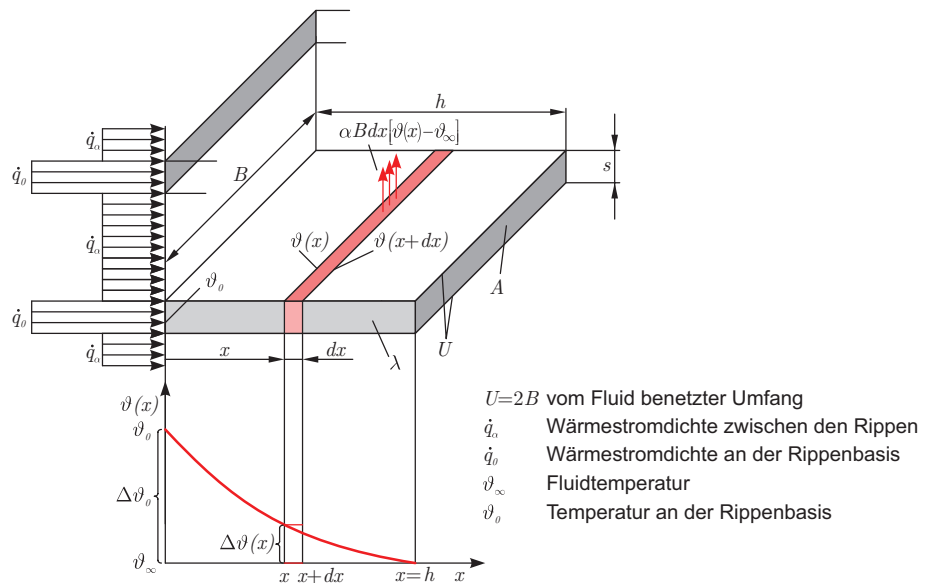


Bild 6.1 Längsleitung in einer Rippe konstanter Dicke s

Es ist zweckmäßig, zur Lösung die Übertemperatur

$$\Delta\vartheta(x) = \vartheta(x) - \vartheta_\infty \quad (6.4)$$

einzuführen. Damit lautet die Differentialgleichung

$$\frac{d^2\Delta\vartheta(x)}{dx^2} - m^2 \cdot \Delta\vartheta(x) = 0 \quad (6.5)$$

mit dem in der Rippentheorie wichtigen Parameter

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A}} \quad (6.6)$$

m hat die Dimension $[\text{m}^{-1}]$. Für die gerade Rippe großer Breite ist:

$$m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot s}} \quad (6.7)$$

6.1.2 Lange Rippe

Wir betrachten zunächst den Fall der langen Rippe. Die Randbedingungen lauten für

- $x \rightarrow \infty$: $\Delta \mathcal{G}(x) \rightarrow 0$, die Rippentemperatur nähert sich der Fluidtemperatur;
- $x = 0$: $\Delta \mathcal{G}(x = 0) = \Delta \mathcal{G}_0$.

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichung 6.5 lautet:

$$\Delta \mathcal{G}(x) = C_1 \cdot \exp(-m \cdot x) + C_2 \cdot \exp(m \cdot x) \quad (6.8)$$

Die Randbedingungen ergeben für die Koeffizienten C_1, C_2 :

$$C_1 = \Delta \mathcal{G}_0, \quad C_2 = 0 \quad (6.9)$$

Der *Temperaturverlauf* in der Rippe lautet in dimensionsloser und dimensionsbehafteter Form:

$$\theta(m \cdot x) = \frac{\Delta \mathcal{G}(x)}{\Delta \mathcal{G}_0} = \exp(-m \cdot x) \text{ bzw. } \mathcal{G}(x) = \mathcal{G}_x + \Delta \mathcal{G}_0 \cdot \exp(-m \cdot x) \quad (6.10)$$

Temperaturverlauf
lange Rippe

Die Rippentemperatur sinkt exponentiell gegen die Fluidtemperatur und nähert sich dieser. Demzufolge strebt der an das Fluid abgegebene Wärmestrom mit zunehmender Rippenhöhe gegen Null.

Ist die Rippe „lang genug“, d. h. wenn

$$m \cdot h \gg 1, \quad (6.11)$$

kann der an der Rippenspitze $x = h$ abgegebene Wärmestrom vernachlässigt werden. Sehr lange Rippen übertragen in ihrem äußeren Bereich wegen geringer Übertemperaturen wenig Wärme, haben demzufolge eine schlechte Materialausnutzung.

Von Interesse ist die Wärmestromdichte an der Rippenbasis, $x = 0$:

Wärmestromdichte an
der Rippenbasis

$$\dot{q}_0 = -\lambda \cdot \left. \frac{d\Delta \mathcal{G}(x)}{dx} \right|_{x=0} = \lambda \cdot \Delta \mathcal{G}_0 \cdot m = \Delta \mathcal{G}_0 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot \alpha \cdot U}{A}} \quad (6.12)$$

6.1.3 Rippe endlicher Länge

Wir betrachten nun eine Rippe endlicher Länge und setzen verschwindende Längsleitung an der Rippenspitze voraus (wärmeisolierte äußere Rippenfläche A). Die äußere Randbedingung lautet damit:

$$\text{Äußere Randbedingung} \quad x = h: \left. \frac{d\mathcal{G}(x)}{dx} \right|_{x=h} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \left. \frac{d\Delta\mathcal{G}(x)}{dx} \right|_{x=h} = 0 \quad (6.13)$$

Bei $x = 0$ gilt dieselbe Randbedingung wie oben, d. h. $\Delta\mathcal{G}(x = 0) = \Delta\mathcal{G}_0$.

Die allgemeine Lösung ist dieselbe wie für die lange Rippe, Gleichung 6.8. Mit den Relationen zwischen Exponential- und hyperbolischen Funktionen

$$\exp(y) = \cosh(y) + \sinh(y), \quad \exp(-y) = \cosh(y) - \sinh(y) \quad (6.14)$$

lässt sie sich wie folgt darstellen:

$$\Delta\mathcal{G}(x) = C_1' \cdot \sinh(m \cdot x) + C_2' \cdot \cosh(m \cdot x) \quad (6.15)$$

- Die Randbedingung bei $x = 0$ liefert $C_2' = \Delta\mathcal{G}_0$.
- Die Randbedingung bei $x = h$ fordert $0 = C_1' \cdot \cosh(m \cdot h) + C_2' \cdot \sinh(m \cdot h)$.

Dies in Gleichung 6.15 eingeführt ergibt:

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{G}(x) &= \Delta\mathcal{G}_0 \cdot [\cosh(m \cdot x) - \tanh(m \cdot h) \cdot \sinh(m \cdot x)] \text{ bzw.} \\ \text{Temperaturverlauf} & \quad \theta(m \cdot x) = \frac{\Delta\mathcal{G}(x)}{\Delta\mathcal{G}_0} = \frac{\cosh[m \cdot (h - x)]}{\cosh(m \cdot h)} \end{aligned} \quad (6.16)$$

in der Rippe

Die normierte Verteilung 6.16 ist in Bild 6.2 für verschiedene $m \cdot h$ -Werte dargestellt. Lange Rippen, kleine Wärmeleitfähigkeit, große Wärmeübergangszahl führen auf hohe Werte $m \cdot h$ und damit auf große Temperaturgradienten im Bereich des Rippenfußes. Das ist der Fall bei $m \cdot h > 2$, d. h. ein großer Teil der Rippe überträgt wegen geringer Übertemperatur wenig Wärme. Für die Praxis sei deshalb ein Bereich

$$0,7 < m \cdot h < 2 \quad (6.17)$$

Empfehlung zu $m \cdot h$ empfohlen, [WU-1].

für die Praxis

Dort und in [WU-2] findet sich auch die Lösung der *Optimierungsaufgabe*: Möglichst großer von der Rippe abgegebener Wärmestrom unter der Nebenbedingung minimalen Materialaufwandes (= minimales Rippenvolumen). Wir geben hier das Resultat ohne Herleitung an:

$$(m \cdot h)_{opt} = h \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda \cdot s}} = 1,419 \quad (6.18)$$

Dieser Parameterwert ist speziell im Bild 6.2 eingetragen.

Der hier hergeleitete Temperaturverlauf ist auch auf Stäbe anwendbar; man hat lediglich bei der Bildung des Parameters m , Gleichung 6.6, die entsprechenden Werte für den (konstanten) Querschnitt A und seinen Umfang U einzusetzen.

Materialoptimierte Rippe

Ergänzung ohne Nachweis: Will man die hier vernachlässigte Wärmeabgabe an der Rippenspitze berücksichtigen, kann man eine korrigierte Rippenhöhe einführen und h durch $h + s/2$ ersetzen, [WU-1].

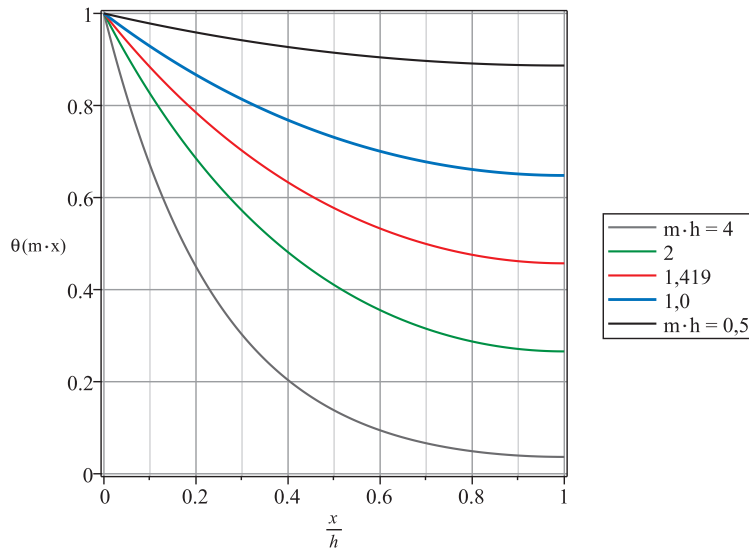


Bild 6.2 Temperaturverlauf in geraden Rippen und Stäben konstanter Dicke nach Gleichung 6.16 erstellt mit Maple

Die Übertemperatur an der Rippenspitze ($x = h$) ist:

Übertemperatur an der Rippenspitze

$$\Delta \vartheta(h) = \frac{\Delta \vartheta_0}{\cosh(m \cdot h)} \quad (6.19)$$

und die Wärmestromdichte an der Rippenbasis:

$$\dot{q}_0 = -\lambda \cdot \left. \frac{d\Delta \vartheta(x)}{dx} \right|_{x=0} = \lambda \cdot \Delta \vartheta_0 \cdot m \cdot \tanh(m \cdot h) = \Delta \vartheta_0 \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot \lambda \cdot U}{A}} \cdot \tanh(m \cdot h) \quad (6.20)$$

Wärmestromdichte an der Rippenbasis

Es gilt für die Rippe die Energiebilanz: Was an Wärme durch Leitung am Rippenfuß der Rippe zugeführt wird, wird über die Rippenoberfläche durch Konvektion an das umgebende Fluid abgegeben.

In den Lehrbüchern, z. B. [WU-1 bis 3], finden sich die Angaben für alle möglichen Rippenformen (veränderliche Rippendicke $s(x)$, Kreisrippen, Stäbe und Nadeln mit veränderlichen Querschnitten, etc.).

■ 7.2 Einführung in die eindimensionale Wärmeleitung, Biot-Zahl und Fourier-Zahl

Auch auf dem Gebiet der instationären Wärmeleitung arbeiten wir mit dimensionslos ausgestalteten Theorien. In diesem einführenden Abschnitt soll die physikalische Bedeutung der für die instationäre Wärmeleitung wichtigen dimensionslosen Kennzahlen *Biot-Zahl* und *Fourier-Zahl* auf anschauliche Weise erläutert werden.

Ein elementares und praktisch häufig auftretendes instationäres Wärmeleitproblem ist das plötzliche Eintauchen eines Körpers in ein Fluid tieferer oder höherer Temperatur. An der Körperoberfläche stellt sich eine rasche Temperaturänderung ein, die sich ins Innere des Körpers fortpflanzt. Nach längerer Zeit wird sich die Temperatur im ganzen Körper ausgleichen. Es interessiert also: Was geschieht unmittelbar (engl.: early regime), und was geschieht nach längerer Zeit (engl.: late regime)? Die dafür verwendeten Modellvorstellungen sind verschieden. Sie vermitteln ein elementares, aber wichtiges Verständnis der instationären Wärmeleitung.

Wir folgen der Darstellung bei Bejan [WU-2] und betrachten einen Körper, Anfangstemperatur ϑ_0 , Volumen V , Oberfläche A , Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c , Wärmeleitungskoeffizient λ , der zur Zeit $t = 0$ in ein Bassin mit dem Fluid der Temperatur $\vartheta_\infty < \vartheta_0$ eingetaucht wird. Die Fluidmasse sei groß im Vergleich zur eingetauchten Körpermasse, d. h. die mittlere Fluidtemperatur ϑ_∞ ändere sich nicht. Die Wärmeübergangszahl sei α und wird als konstant bleibend angenommen.

Eine dünne Schicht (engl.: skin layer) erfährt eine rasche Temperaturänderung, an der Oberfläche auf $\vartheta(x = 0, t = 0)$ zwischen ϑ_0 und ϑ_∞ , Bild 7.4. Mit der Zeit nähert sie sich der Fluidtemperatur ϑ_∞ an. Der heiße Kern des Körpers wird erst mit Zeitverzögerung erfasst. Nach langer Zeit nimmt der ganze Körper die Fluidtemperatur ϑ_∞ an. Bild 7.5 zeigt das Eindringen der thermischen Grenzschicht in den Körper.

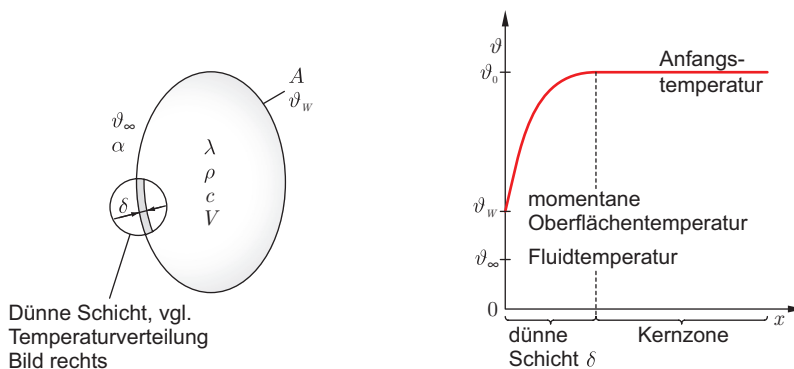


Bild 7.4 Bildung einer dünnen Temperatur-Schicht unter der Oberfläche beim Eintauchen eines Körpers, nach Bejan [WU-2]

7.2.1 Anfangsphase („early regime“) – näherungsweise Betrachtung

Näherungsbetrachtung
unmittelbar nach dem
Eintauchen

Wir betrachten zunächst den Vorgang unmittelbar nach dem Eintauchen *näherungsweise* und ziehen die Wärmeleitungsgleichung in eindimensionaler Form 7.6 heran. Sie lautet ohne interne Wärmequelle:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (7.17)$$

Die zweite Ableitung der Temperatur nach x ist näherungsweise:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x \approx \delta} - \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=0}}{\delta - 0} \quad (7.18)$$

und mit

$$\left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x \approx \delta} \approx 0, \quad \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=0} \approx \frac{\vartheta_0 - \vartheta_W}{\delta} \quad (7.19)$$

folgt:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \approx - \frac{\vartheta_0 - \vartheta_W}{\delta^2} \quad (7.20)$$

Die zeitliche Ableitung der Temperatur ist näherungsweise:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} \approx \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{t} \quad (7.21)$$

Die beiden Näherungsbeziehungen 7.20, 7.21 in die Differenzialgleichung 7.17 eingeführt liefert:

$$- \frac{\vartheta_0 - \vartheta_W}{\delta^2} \approx \frac{1}{a} \cdot \frac{\vartheta_W - \vartheta_0}{t} \quad (7.22)$$

Aus der Größenordnungsbeziehung 7.22 ergeben sich zwei wichtige Befunde:

1. Es ist eine dimensionslose Kenngröße erkennbar:

$$\text{Fourier-Zahl } Fo: \quad \text{dimensionslose Zeit} \quad Fo = \frac{a \cdot t}{L_{\text{ref}}^2} \quad (7.23)$$

Diese heißt *Fourier-Zahl* Fo und bedeutet eine dimensionslose Zeit. L_{ref} bedeutet die charakteristische Länge des Problems, hier zweckmäßigerweise das Volumen des Körpers im Verhältnis zur benetzten Oberfläche:

$$L_{ref} = \frac{V}{A} \quad (7.24) \quad \text{Charakteristische Länge}$$

2. Die Dicke δ der thermischen Schicht wächst mit der Quadratwurzel der Zeit:

$$\delta \approx \sqrt{a \cdot t} \quad (7.25)$$

Damit können die verschiedenen Phasen (engl.: regimes) wie folgt unterschieden werden, Bild 7.5.

Die verschiedenen Phasen

Anfangsphase („early regime“):

$$t \ll \frac{L_{ref}^2}{a} \quad (7.26)$$

Spätphase („late regime“):

$$t \gg \frac{L_{ref}^2}{a} \quad (7.27)$$

Dazwischen liegt die *Übergangsphase* (engl.: transition). Sie lässt sich kennzeichnen durch die Zeit, bei der der Kern durch die Temperaturänderung erfasst wird, d. h. wenn die thermische Schicht δ von der Größenordnung der charakteristischen Länge L_{ref} ist:

Übergangsphase („transition“):

$$t \approx \frac{L_{ref}^2}{a} \quad (7.28)$$

Wir betrachten im Abschnitt 7.2.2 die Spätphase näher.

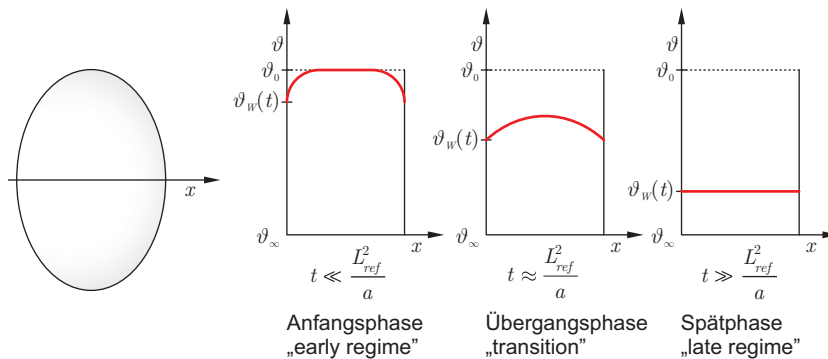


Bild 7.5 Eindringen der Temperaturänderung in den Körper bis zum vollständigen Temperatenausgleich, nach Bejan [WU-2]

10

Recycling von Kunststoffen

■ 10.1 Einleitung

Als direkte Folge der teilweise emotional geführten Debatten – vor allem in Mitteleuropa – zum aktuellen Thema Einsatz und Recycling von Kunststoffen, erfuhr auch der Teilaspekt Kunststoffabfälle und ihre *kontrollierte energetische Nutzung* eine zunehmend negative Bewertung in der breiten Öffentlichkeit sowie parallel dazu in den Tagesmedien.

10.1.1 Im Spannungsfeld der Kunststoffabfälle zwischen Recycling und kontrollierter energetischer Nutzung

Für eine Versachlichung dieses Themas scheint es dringend geboten, zunächst einige Fakten und Zahlen im Bewusstsein zu verankern „facts and figures“.

Fakten und Zahlen

Der weltweite Verbrauch an Erdöl belief sich im Jahr 2018 auf 4,6 Milliarden Tonnen. Mehr als 41 % davon entfielen auf vier Staaten: USA, China; Indien und Japan. Der Anteil von Deutschland an diesem Verbrauch betrug 113 Mio. Tonnen bzw. 2,5 %, in Österreich 13,4 Mio. Tonnen bzw. 0,3 % sowie in der Schweiz rund 10,5 Mio. Tonnen bzw. 0,2 %. [RE-1]

Weltweiter Verbrauch
an Erdöl

Von Interesse ist insbesondere die Aufschlüsselung nach den Einsatzgebieten

Mit einem Anteil von 45 % steht in Europa der Verkehr an erster Stelle, wobei die Forderung nach einem effizienten Recycling der Abgase (Hauptbestandteile CO₂ und H₂O) – im Gegensatz zu den Kunststoffen – wohlweislich in allen Debatten vermieden wird. Ähnlich verhält es sich auf dem Heizungssektor und bei der Stromerzeugung, die zusammen 42 % beanspruchen. Somit verwandeln sich jährlich fast neun Zehntel förmlich in „Luft“, ohne dass die Mehrheit der Verbraucher sich groß Gedanken über die Möglichkeiten eines Recyclings macht. Die Erzeugung von Kunststoffen benötigt 5 % sowie 8 % für Andere. [RE-2]

Wofür wird in Europa
Erdöl verwendet?

Vereinfacht und ohne die vielen Zusatzstoffe im Benzin zu berücksichtigen sowie perfekte Verbrennung (ohne NOx etc.) vorausgesetzt, stehe dafür exemplarisch die chemische Reaktion (numerisch) zwischen Oktan (Oktanzahl) und Sauerstoff:



Weit mehr als die Hälfte einer Tankfüllung mit Benzin ist „umsonst“.

Aus energetischer Sicht und technisch möglich erreicht dieser Verbrennungsvorgang im Benzinmotor aktuell einen optimalen Wirkungsgrad von 40%, d.h. weit mehr als die Hälfte einer Tankfüllung ist „umsonst“.

Erdölverbrauch für die Erzeugung von Polymer-Rohstoffen

Im Vergleich dazu wurden nur zwischen 4% bis maximal 6% des weltweiten Verbrauchs an Erdöl für die Erzeugung von Kunststoffen benötigt. In Zahlen ausgedrückt ließen sich damit im Jahre 2017 rund 350 Mio. Tonnen Kunststoff herstellen. Bezogen auf Deutschland belief sich die Produktion für das Jahr 2018 auf 19,3 Mio. Tonnen, was ein Minus zum Vorjahr von 3,1% ergibt.

Hohe Wertschöpfung des Erdöls

Auch darf an dieser Stelle der Hinweis auf die damit verbundene hohe Wertschöpfung des Erdöls nicht fehlen. Durch die Ver-/Umwandlung in Werkstoffe dank chemischer Synthesen (und bei Bedarf allen voran die chemischen Elemente Stickstoff, Sauerstoff etc. schadlos in das Gerüst der Makromoleküle einbauen zu können) gelang und gelingt es nach wie vor Einsatzgebiete zu erschließen, die bislang als Utopie galten, z.B. in der Raum- und Luftfahrt oder im IT-Bereich.

Zusammenfassung

Sauerstoff, Stickstoff aus der Luft, Silicium und weitere chemische Elemente aus dem Boden verringern gleichzeitig massiv den Erdölbedarf durch ihren „Einbau“ in Kunststoffprodukte. Zudem existieren keine Kunststoffe, die unmittelbar nach ihrer Erzeugung – im Gegensatz zu Benzin und Heizöl – praktisch zu 100% der Verbrennung zugeführt werden, sondern in der Mehrzahl über Jahre, wenn nicht über Jahrzehnte hinweg ihre guten Dienste leisten.

Um ein möglichst genaues und objektives Bild zum Thema *kontrollierte energetische Nutzung* von Kunststoffabfällen zu gewinnen, scheint es sinnvoll im Hinblick auf die nachfolgenden Ausführungen den Beitrag der Kunststoffe zur Erreichung der nachhaltigen Entwicklungsziele, SDG, vorgängig in Stichworten zu skizzieren.

10.1.2 Nachhaltige Entwicklungsziele, SDG

Entwicklungsziele der UNO

Ende September 2015 verabschiedeten die Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen (UN) 17 nachhaltige Entwicklungsziele (SDGs) für die Agenda 2030. International als Sustainable Development Goals (SDGs) bezeichnet, basieren sie auf der Grundidee der Ausgewogenheit eines globalen Zivilisationsprozesses, der zum einen die Lebenssituation der heutigen Generation verbessert (Entwicklung) ohne gleichzeitig die Lebenschancen künftiger Generationen zu gefährden (Erhaltung der Umwelt). Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung mit ihren 169 Unterzielen sollen bis 2030 global von allen Uno-Mitgliedstaaten erreicht werden. Somit sind alle

Staaten gleichermaßen im Rahmen ihrer Möglichkeiten „verpflichtet“, die drängenden Herausforderungen der Welt gemeinsam zu lösen. Im Klartext ist dies allerdings nur realisierbar, wenn die drei Hauptakteure Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt sich gegenseitig bei der Verwirklichung dieser äußerst hochgesteckten Ziele unterstützen, vgl. Bild 10.1 [RE-4].



Bild 10.1 Die 17 Sustainable Development Goals (SDGs) im Überblick [RE-4]

10.1.3 Die Kunststofftechnik und ihr Beitrag zu den SDGs

„Abstrakte Wichtigkeit macht noch keine Nachricht“

Walter von La Roche, 1991

Bei einer fiktiven Umfrage würde an dieser Stelle mit großer Wahrscheinlichkeit das Thema „Vermeiden von Kunststoff-Verpackungen“ großen Zuspruch erfahren. Bedeutend weniger im Allgemeinen Bewusstsein verankert ist die Wertschätzung der Kunststoffe als moderne Werkstoffe ohne die unsere postindustrielle Gesellschaft vermutlich keine Chance zum Überleben hätte. Und wem ist schon bewusst, welchen unersetzlichen Beitrag die Kunststofftechnik bereits heute zur Realisierung der SDGs leistet. Am Beispiel der Grundbedürfnisse eines Menschen – an einer Hand abzählbar – lässt sich hier bestens „die Probe aufs Exempel machen“. Zugleich sei es der Fantasie jedes Einzelnen überlassen Alternativlösungen zu

Wertschätzung
der Kunststoffe

■ 11.1 Energiefluss Produktion



Problemstellung

Ein Produktionsbetrieb hat *während eines ganzen Jahres* für den gesamten Produktionsbetrieb Energiemessungen (Elektrizität, Heizöl, Wärme- und Kälteflüsse, Verbrauch an Druckluft) erfasst und die kumulierten Jahresenergieflüsse bestimmt. Es geht um eine Übersichtsdarstellung (Sankey-Diagramm) und Betrachtung der Energiebilanzen für ausgewählte Teilsysteme.

Gegebene Daten

Vom Unternehmen zur Verfügung gestellt: Sankey-Flussbild (erstellt mit e!sankey 4) mit den hinterlegten Messdaten zu folgenden Teilsystemen

- Produktion (sämtliche Spritzgießmaschinen sowie Montage)
- Heizkessel
- Wärmepumpen
- Klimaanlage
- Kältemaschinen
- Druckluftsystem
- Nebenprozesse

Gesuchte Informationen

Energieflussdiagramm (Sankey-Flussbild) und Energiebilanzen einzelner Teilsysteme

System

Produktionshallen, Labors, Reinräume, Bürogebäude

Analyse

Das zur Verfügung gestellte Energieflussbild ist für dieses Buch angepasst und vereinfacht worden, vgl. *Bild 12.2 im Anhang*. Die Pfeildicken sind ein Maß für die transferierten Energien.

Tabelle 11.1 Bedeutung Pfeilfarben für Bild 12.2

Orange	Violett	Rot	Pink	Blau dunkel	Blau hell
Elektrizität	Heizöl	Wärme	Druckluft	„Kälte“ Werkzeug- kühlung	„Kälte“ Hydraulik- kühlung

Tabelle 11.2 Bezugsgrößen der in Bild 12.2 angegebenen Prozentzahlen

Teilsystem	Energie	Bezugsgröße (Jahres- betrag) = 100 %
Elektrizitätsversorgung	Elektrizität (Exergie)	Gesamte zugeführte Elektrizität
Heizkessel	Öl (Heizwert \cong 105,5 % Exergie, [TH-2])	Brennstoffenergie = Ölverbrauch x Heizwert
Klimatisierung Produktion + Heizung Nebenprozesse	Thermisch (Enthalpie)	Gesamter Wärme- verbrauch
Druckluftsystem	Thermisch (Enthalpie)	Enthalpie der produzier- ten Druckluft am Aus- tritt der Kompressoren
Kühlsystem (Kältemaschinen, Hermeticcooler, Wärmepumpen)	Thermisch (Enthalpie)	Gesamter Kühlungs- bedarf

Der Referenzwert 100 % ist jeweils vermerkt, auf den sich die anderen Teilströme beziehen. Die Bewertung der einzelnen Teilsysteme erfolgt nach den üblichen Beurteilungskriterien wie Wirkungsgrad, Verlustanteil, Arbeits- bzw. Leistungsziffer COP.

Bemerkungen: Die Zahlen entsprechen den Erwartungen nach heutigem Stand der Technik, lediglich die Jahresarbeitszahl (Leistungsziffer) der Wärmepumpen erscheint tief. Das mag mit ihrer Betriebsweise zusammenhängen. Bemerkenswert ist der mit ca. 10 % geringe Anteil fossiler Energie am gesamten Energiebedarf. Das zeigt, dass die Abwärme der Produktion in der kalten Jahreszeit effizient zur Raumheizung genutzt wird. Kondensationskessel würden den Nutzungsgrad des Heizöls erhöhen.

Der Abwärmeverlust der Spritzgießmaschinen erscheint hoch; es ist jedoch zu beachten (wie in der Tabelle vermerkt), dass die mit dem Materialfluss verbundenen Enthalpien darin enthalten sind. Die produzierten Kunststoffteile besitzen eine höhere Enthalpie als das zugeführte Granulat, vgl. dazu das **Praxisbeispiel 11.2 Energiebedarf Spritzgießmaschine**. Man wird bestrebt sein, z. B. durch Isolation kritischer Teile wie Werkzeug und Zylinder die Wärmeverluste infolge Abstrahlung und freier Konvektion zu minimieren.

Tabelle 11.3 Energiebilanzen für einzelne Teilsysteme

Teil-system	Zufuhr	Abfuhr	Bewertungs-grösse
Spritzgieß-maschinen	Elektrizität + Druckluft (100%)	Kühlung (Hydraulik und Werkzeuge) (75,5%), Abwärme (24,5%)	Abwärmeverlust (24,5%) (→ Enthalpieflüsse der Polymere nicht erfasst, aber enthalten)
Heizkessel	Öl (Heizwert), Elektrizität (100%)	Nutzwärme 74 °C (93,8%), Abwärme (6,8%)	Abwärmeverlust (6,2%) Wirkungsgrad (93,8%)
Wärme-pumpen	Elektrizität (100%), Wärme von Kälte-maschinen (180,7%)	Nutzwärme 65 °C (259,6%), Abwärme (21,1%)	Jahresarbeitszahl (COP) \approx 2,6 (Wert nicht repräsentativ)
Kälte-maschinen	Elektrizität (100%), Wärmezufuhr von Kühlsystem (425%)	Gesamte Wärme-abfuhr (525%)	Jahresarbeitszahl (COP) \approx 4,25
Druckluft-system	Elektrizität (100%), Enthalpie Frischluft (0%)	Enthalpie Druckluft (80%), Nutzwärme (12%), Wärmeverlust (8%)	<i>Annahme:</i> 80% der zugeführten Elektrizität geht in Enthalpie der Druckluft über

Diskussion

Die Messungen sind nicht für umfassende Bilanzanalysen für alle Teilsysteme angelegt. Sie sind für einen Produktionsbetrieb jedoch muster-gültig und erlauben eine sehr gute Gesamtbeurteilung der verzweigten Energieflüsse ausgehend von den zugeführten hochwertigen Energien Elektrizität und Heizöl. Derartige Messungen ermöglichen dem Unternehmen, gezielt Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs zu treffen. Monats-, tageweise und Tag/Nacht-Auswertungen unter Berücksichtigung des Verlaufs der Außentemperatur und der Sonneneinstrahlung liefern noch weitergehende Hinweise für Optimierungsmöglichkeiten der Betriebsprozesse.

Umfassende Bilanzanalysen würden auf das praktische Problem führen, dass man alle internen Energieflüsse erfassen müsste, auch solche, die messtechnisch kaum oder nur mit sehr großem Aufwand verfolgen könnte, z. B. die Sonneneinstrahlung, die Wärmeabfuhr durch die Gebäudehülle an die Umgebung, die Wärmeverluste der Spritzgieß-maschinen, die im Winter der Raumheizung zu Gute kommt. Einzelne messtechnisch schwierig zu erfassende Energieflüsse lassen sich über die Bilanz erschließen, wie oben für einzelne Teilsysteme gezeigt.

Eine **Exergieanalyse** wäre noch aussagekräftiger als eine Energieanalyse. Sie wäre grundsätzlich möglich und würde die thermodynamischen Verluste nach Größe und Ort ihres Auftretens liefern, vgl. das einfache **Grundlagenbeispiel B 2.1 Wärmepumpe**. Exergieanalysen setzen jedoch eine erweiterte und detailliertere Datenerfassung und –Auswertung voraus. Man müsste bei allen Massenströmen die thermischen Zustandsgrößen Temperatur und Druck erfassen. Die erforderlichen Zustandsdaten sind mit Ausnahme der Kunststoffe für alle involvierten Stoffe (Öl, Luft, Wasser) vollumfänglich verfügbar.

■ 11.2 Energiebedarf Spritzgießmaschine



Problemstellung

In einem Produktionsbetrieb sind verschiedene Typen von Spritzgießmaschinen – SGM – (voll elektrisch, hybrid, hydraulisch) im Einsatz. Im Zuge einer Energieanalyse für den ganzen Produktionsbetrieb wurden *während einer Stunde* stationären Betriebs von vier verschiedenen SGM Energiemessungen vorgenommen. Erfasst wurden der Bedarf an elektrischer Energie und die Wärmeabfuhr zur Kühlung des Werkzeugs und der Hydraulik, nicht jedoch der Aufwand für den Betrieb des Druckluftsystems. Ebenso blieben die mit dem Materialfluss (Granulatzufuhr, hergestellten Teile) zusammenhängenden Energieflüsse außer Acht.

Gegebene Daten

Tabelle 11.4 Angaben zu SGM-Typen und Betrieb

Nr.	Typ	Schließkraft kN	Zykluszeit s	Schussmasse g	Wandstärke mm	Werkzeugmasse kg	Elektrizitätsbedarf kWh/h gemessen
1	KM 80-180 EX Voll elektrisch	800	16,14	19,8	2,0	810	12,41
2	AB 420A-800-170 Voll elektrisch	1000	18,0	23,45	2,5	610	11,54
3	KM 320-2700 C3 Hydraulisch	3200	13,6	328	1,6	4540	31,25
4	AB 370H-600-100 Hybrid	600	8,4	12,7	1,0	250	7,25

Index

A

Abfall- und Recyclinghierarchie 386
Abkühlstrecke 222
Absorptionsverhältnis 129
Additiv 158, 161
Additive Fertigung 176
Adiabate Gutsbeharrungs-
temperatur 313, 320
Ähnlichkeit
– dynamische 79
– geometrische 79
– kinematische 79
Ähnlichkeitstheorie 77, 79,
109
Aktivierungsenergie 43, 200
Aktivierungsenthalpie 43
Alterung 198
Alterungsvorgänge 198
amorph 170, 175, 183
Analogie zwischen Impuls-,
Wärme- und Stoffaustausch
316
Anfangsbedingung 253
Anfangsphase 241
anisotrop 163
Anisotropie 190
Arbeit 22
– reversible technische 39
– technische 31, 38, 75
Arbeitsfähigkeit der Wärme 17
Arbeitsfähigkeit (Exergie) 15
Arrhenius-Gleichung 200
Aspirations-Thermometer 310

Ausschiebearbeit 33
äußere Alterungsursachen 199

B

Bernoulli-Gleichung 35, 39, 86
Bessel-Funktion 260
Bildungsenthalpie 41
bimodale Verteilung 159
Bindungsenergie 164, 293
Bindungskräfte 163
Biot-Zahl 239, 243, 253
Brennstoffzelle 43, 47
Brennwert 42
Brinkman-Zahl 346, 349
Brownsche Molekularbewegung
170
Buckingham Pi-Theorem 78

C

Carnot-Leistungsziffer (COP) 18
Carnot-Wärmekraftmaschine 16
Carnot-Wärmepumpe/-Kälte-
maschine 18
Carnot-Wirkungsgrad 16
Celsius-Temperatur 16
chemische Bindung 163
Clausius-Clapeyron-Gleichung
45
Clausius, Rudolf 18
Codierungssystem 392
Compoundieren 161
Copolymer 160

D

Dampfdiffusion 311
Dampfdruckkurve 296
Deborah-Zahl 73
Dehngeschwindigkeit 72
Dehnströmung 67, 72
Dehnviskosität 67, 72
Deponie 388
Dielektrischer Verlustfaktor 197
Differential-Kalorimetrie, DSC
195
Diffusionskoeffizient 314
Dimensionsanalyse 77
Dioxin 395
Dioxinbildung 394
Dipol-Dipol-Kräfte 166
Dispersionskräfte 182
Dissipation 17
Downcycling 391
Druckänderungsarbeit 39, 75
Druckströmung 68, 81, 341,
350, 353, 360
Duomere 173, 390
Duroplaste 163

E

Effektive Temperaturleitfähigkeit
270
Eigenwertproblem 260
Einlauflänge 85
Einschiebearbeit 33
Einstrahlung 124
– spektrale 125

Elastomere 163, 172, 390
 Elektromagnetschweißen 197
 Emission 124
 – spektrale 125
 Emissionsverhältnis 128
 Energie
 – innere thermische 21, 22
 – kinetische 21
 – potenzielle 21
 – totale 21
 Energiebilanz 397
 Energieeffizienz 395
 Energieerhaltung 22
 Energienutzungsgrad 395
 Energie-Richtungsgeber 196
 Enthalpie 34
 – freie 43, 44
 – molare freie 44
 – spezifische 34
 Entropie 18, 28
 Entropie-elastisch 175
 Erdölverbrauch 383
 Ermittlung Abkühlzeiten 266
 Erster Hauptsatz der Thermodynamik 15
 – für geschlossene Systeme 21
 – für offene Systeme 31, 34
 Erweichungstemperatur 170
 Exergiebilanz 18

F

Fertigungsverfahren 4
 Feuchte
 – absolute 297
 – relative 298
 Feuchteleitkoeffizient 319
 Feuchte Luft 295
 – Definition 297
 – Energiebilanz 304
 – gesättigt 296
 – ungesättigt 296
 – Wasserbilanz 304
 Feuchtgut
 – absoluter Feuchtegehalt 305
 – Definition 305

Ficksches Diffusionsgesetz 312, 314
 Fließgesetz 337
 – Carreau 340
 – Cross 340
 Fließverhalten (Rheologie) 174
 Fluidverhalten
 – dilatantes 71
 – newtonsches 65, 71
 – nicht-newtonsches 65
 – pseudo-plastisches 71
 – strukturviskoses 71
 – viskoelastisches 73
 Fluidverhalten, 65
 Fouriersches Wärmeleitungsgesetz 101, 104, 216, 234, 312
 Fouriersche Wärmeleitungsgleichung 233, 235
 Fourier-Zahl 239, 240, 243, 253
 freies Volumen 164
 Fundamentalrelation der Thermodynamik
 – Erste 30
 – Zweite 37

G

Gaskonstante 20
 – individuelle 20
 – individuelle für Luft, Wasser 295
 – universelle 20
 Gaußsches Fehlerintegral 245
 Gesetz von Dalton 295
 Gesetz von Hagen-Poiseuille 363
 Gibbs-Energie 44
 Gibbs-Helmholtz-Gleichung 45
 Glaskonstante 170
 Gleichgewicht
 – chemisches 46
 Gleichgewichtsbedingung 66, 69
 Gleichgewichtsreaktion 46

Graetz-Zahl 349
 Grashof-Zahl 110, 121
 Grenzschicht 117
 – hydrodynamische 108
 – thermische 108
 Gütegrad 16
 Gutsbeharrungstemperatur 320

H

Hagen-Poiseuille-Gesetz 83
 Halbunendlicher Körper 244
 Hauptsatz der Kunststofftechnik 158
 Hauptsatz der Thermodynamik 15
 – Dritter 19, 42
 – Erster 15
 – Nullter 15
 – Zweiter 15, 28
 Hauptvalenzbindungen 163
 Heizelementschweißen 196
 Heizwert 42, 393
 Helligkeit 124, 125, 129, 136
 Hochfrequenzschweißen (HF-Schweißen) 197
 Hochofenprozess 396
 h-x-Diagramm (Mollier) 300
 – Randmaßstab 304
 hydraulischer Durchmesser 81, 112
 hydrophil 161
 hydrophob 161

I

Idealgasgleichung 20
 Induktion 197
 Induktionskräfte 166
 Induktionsschweißen 198
 Infrarotschweißen 198
 innere Alterungsursachen 199
 Instationäre Wärmeleitung 233
 Instationäre Wärmeleitung in einfachen Körpern 251

Irreversibilität 18
Isolationsradius
– kritischer 106
Isotropie 190

K

Kehrichtheizkraftwerk 394
Kennzahl
– dimensionslose 110
Kirchhoffsches Gesetz 129
Knickpunkt 311, 318
Knickpunktzeit 318
komplementäres Fehlerintegral 245
Kompressibilität 193
Kontaktproblem 238, 247
Kontakttemperatur 238, 247, 248
Kontinuumsmechanik 66, 76
Kontrollvolumen 8
Konvektion 100, 108, 197
– erzwungene 100, 108
– freie 100, 108, 120
kovalente Bindung 164
Kristallitschmelzbereich 171
Kristallitschmelztemperatur 171
Kugel 262
Kühlgrenze 309
Kühlgrenztemperatur 309, 313
Kunststoffabfall 396
Kunststoffe, Definition 158

L

Längsleitung 222
Laplace-Transformation 254
Laserstrahlschweißen 197
Lebensdauer 199, 393
Lewis-Zahl 317
Lichtstrahlschweißen 198
Littering 389
Logarithmische Temperaturdifferenz 112, 322
– mittlere 108, 112, 322

Lösungsmethodik 9
lumped capacitance model 242, 244

M

Mach-Zahl 65
Makromolekül 162
Massenbilanz
– für instationäre Vorgänge 32
– Momentanform 32
Materialverhalten 157, 161
Mechanische Bindungen 168
Memory-Effekt 73
Mikroplastik 393
Modellversuch 79
Modifikation 160
Mollier-Diagramm 300
Molmasse 20
– für Luft, Wasser 295, 296
Moody-Diagramm 80, 113

N

Nachhaltige Entwicklungsziele, SDG 384
Näherungslösung für Platte, Zylinder, Kugel 265
Navier-Stokes-Gleichungen 65
Nebelisotherme 310
Nebervalenzbindung 164
Nernst, Walther 19
Newtonsches Wärmeübergangsgesetz 100
Normalspannungen 157
Numerische Verfahren 363
Nusselt-Zahl 110, 243, 313
Nutzenergie 398
Nutzung, kontrollierte energetische 394

O

Oberflächen-Inhalt-Problem 243
Oberflächenwasser 293

Ohmsches Gesetz 102, 104, 137, 244
Ostwald-de Waele 66, 339

P

Partialdruck 295
Péclet-Zahl 349
Periodische Temperaturänderungen 249
Perpetuum Mobile 18
Pfpfenströmung 352
Phononen 185
physikalische Bindungen 165
Planck, Max 19
Plastikmeere 386, 389
Platte 255
– längsangeströmt 117
Polyethylen 397
Polymer 162
Polymer-Rohstoff 158
Potenzgesetz 66, 339
– Index 339
– Konsistenzfaktor 339
Potenzial
– chemisches 47
Prallströmung 117
Prandtl-Zahl 110, 316
Preform 161
Prinzip der korrespondierenden Zustände 21
Prozess 26
– Definition 27
– endergonischer 45
– exergonischer 45
– irreversibler 26
– reversibler 26
Prozessgröße 23
p-v-T-Diagramm 176, 191

R

Randbedingung 237, 253
– adiabate Wand 345
– isotherme Wand 345
Rayleigh-Zahl 110, 121

- Reaktion
 – chemische 40
 – elektrochemische 41
 – endotherme 44
 – exotherme 42, 43
 Reaktionsarbeit
 – reversible 46, 47
 Reaktionsenergie 44
 Reaktionsenthalpie 19, 40, 41
 – freie 43, 45
 – molare 42
 Reaktionsentropie 45
 Reaktionskinetik 40
 Recycling 383
 Reflexionsverhältnis 129
 Reibschweißen 196
 Reibungsarbeit 24, 27, 28, 29, 75
 – spezifische 38
 Reibungsbeiwert 78, 113
 Repräsentative Viskosität 363
 Reptation 169
 Reynolds-Analogie 113
 Reynolds-Zahl 65, 78, 110
 RGT-Regel 199
 Rheologie 68
 Rheologie (Fließverhalten) 174
 Ringspaltströmung 358
 Rippe
 – endlicher Länge 218
 – lange 217
 Rippentheorie 215
 Rippenwirkungsgrad 220
 Rohrreibungsbeiwert 86
 Rohrreibungskoeffizient 78, 80
 Rotationsschweißen 197
 Rückgewinn 18
 Rückstrahlende Wand 136
- S**
- Sättigungszustand 298
 Schergeschwindigkeit 70, 82, 179
 Scherrate 70, 339
 – repräsentative 364
 Scherströmung 67, 347
 Scherviskosität 67, 70, 72
 Schleppströmung 70, 341, 345, 353, 360
 Schmidt-Zahl 316
 Schubspannungsansatz (Newton) 79
 Schweißen 196
 Sherwood-Zahl 316
 Sichtfaktor 132
 – Reziprozitätsbeziehung 132
 – Summationsregel 133
 Siegelpunkt 194
 Sorptionsisotherme 307
 Spätphase 241
 spezifische Enthalpie 183
 Spezifische Enthalpie
 – feuchte Luft 299
 – Feuchtgut 305
 spezifisches Volumen
 – feuchter Luft 298
 Spezifisches Volumen 164
 spezifische Verdampfungsenthalpie 299
 spezifische Wärmekapazität 184
 Spezifische Wärmekapazität
 – bei konstantem Druck 36
 – bei konstantem Volumen 22
 – von Flüssigkeiten 37
 Stabilisatoren 200
 Standardbildungsenthalpie 41
 Standardreaktionsenthalpie 41
 – molare 41
 Stanton-Zahl 110, 112, 317
 Stefan-Boltzmann-Konstante 127
 Stefan-Korrektur 315
 Stöchiometrischer Koeffizient 41
 Stoffaustausch 316
 Stoffübergangskoeffizient 315
 Strahler
 – grau-diffuser 124
 Strahlung
 – grau-diffuse 128
 – Schwarzkörper- 126
 – thermische 123
 Strahlungsaustausch 130
 – zwischen grau-diffus strahlenden Flächen 136
 – zwischen schwarzen Flächen 135
 Strahlungsaustauschkoeffizient 139
 Strahlungsgesetz
 – Planck 127
 – Stefan-Boltzmann 127
 Strahlungsspektrum 124
 Strömung
 – Auftriebs- 120
 – ausgebildete 111
 – erzwungene 111
 – externe 116
 – interne 108
 – laminare 78, 113
 – turbulente 78, 113
 Strukturviskos 174
 Sublimationsdruckkurve 297
 System 8
 – adiabates 9
 – geschlossenes 9, 21
 – offenes 9, 31
 Systembegriff 7
 Systemgrenze 7
- T**
- Taupunkt 296
 Technoklima 199
 teilkristallin 171
 Temperatur 15
 – absolute 16
 – Celsius 16
 – Kelvin 16
 Temperaturleitfähigkeit 223, 349
 Temperatur-Zeitdiagramm 180
 Thermisches Alterungsverhalten 199
 Thermisch-mechanisches Verhalten 169

Thermoanalyse 195
Thermoplaste 163, 390
thermoplastische Elastomere
163
Transmissionsverhältnis 129
Trockenspiegel 311
Trocknungsgeschwindigkeit 311,
312, 323
Trocknungsprozess 293
– Konvektionstrocknung 294
– Lufttrocknung 320

U

Übergangsphase 241
Ultraschallschweißen 197

V

Verdampfungsenthalpie 45
Verhakungen 168
Verlustkoeffizient 86
Verschiebearbeit 26
Verstreckung 186
Verwertung von Kunststoff-
abfällen 388, 399
Vibrationsschweißen 196
Viskoelastizität 68, 73
viskos-elastisch 175
Viskosität
– transiente 73
Viskositätsfunktion 176
Volumenänderungsarbeit 23,
25, 29, 75
Volumenausdehnungskoeffizient
194

Volumenschwindung 191
Vorzeichenkonvention 22, 34

W

Wärme 22
– Erläuterung 23
Wärmeausdehnungskoeffizient
121
Wärmeausdehnungskoeffizient,
linear 189
Wärmedurchgang 100
– ebene Wand 102
– Hohlkugel 103
– Hohlzylinder 103
Wärmedurchgangswiderstand
102
Wärmedurchgangszahl 102, 105
Wärmeeindringkoeffizient 246
Wärmeeindringzahl 189
Wärme kraftmaschine
– ideale (Carnot) 16
– reale 16
Wärmeleitfähigkeit 101, 185
Wärmeleitung 100
Wärmeleitwiderstand 102
Wärmestrom 99
Wärmestromdichte 99
Wärmeübergangswiderstand
102
Wärmeübergangszahl 100, 109
– freie Konvektion 123
– Strahlung 131
Wärmeübertrager 106
Wärmeübertragung 99
– Konvektion 100

Warmgasschweißen 197
Wasserstoffbrückenbindungen
167
Weissenberg-Zahl 73
Werkstoffliches Recycling 389
Wertschöpfung des Erdöls 384
Widerstand
– Kontakt- 103
– spezifischer 102
– Strahlung 138
– thermischer 102
Wiensches Verschiebungsgesetz
128

Z

Zeitkonstante, Charakteristische
Zeit 243
Zementindustrie 396
Zusatzstoffe 161
Zustandsänderung 26
– Definition 26
– isentrope 40
– nichtstatische 27
– quasistatische 24
Zustandsgleichung 19
– kalorische 19
– thermische 19
Zustandsgröße
– Definition 21
– kalorische 21
– thermische 19
Zylinder 260
– Einzel-, querangeströmt 116