

# Inhalt

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

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

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

5.2.2	Einteilung der Kunststoffe	163
5.2.3	Bindungskräfte in makromolekularen Systemen	163
5.2.3.1	Hauptvalenzbindungen	163
5.2.3.2	Nebervalenzbindungen	165
5.2.3.3	Mechanische Bindungen	168
5.2.4	Verhalten von Kunststoffen im festen Zustand	169
5.2.4.1	Thermisch-mechanisches Verhalten	169
5.2.5	Fließverhalten (Rheologie) von Kunststoffschmelzen	174
5.2.5.1	Viskositätsfunktionen von Thermoplast-Schmelzen	176
5.2.5.2	Zeitverhalten von thermisch instabilen Thermoplast-Schmelzen und reagierenden Formmassen	179
5.2.6	Thermische Kennwerte	181
5.2.6.1	Spezifische Wärmekapazität $c_p$ , spezifische Enthalpie $h$	183
5.2.6.2	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	185
5.2.6.3	Temperaturleitfähigkeit $a$ und Wärmeeindringzahl $b$	187
5.2.6.4	Thermische Ausdehnung	189
5.2.6.5	$p$ - $v$ - $T$ -Diagramme	191
5.2.6.6	Sonderfall: Schweißen von Kunststoffen	196
5.2.7	Thermische Einflüsse bei der Alterung von Kunststoffen	198
5.2.7.1	Alterung und Alterungsvorgänge	198
5.2.7.2	Thermisches Alterungsverhalten von Kunststoffen	199
5.3	Zum fluidmechanischen Verhalten von Fluiden	201
5.3.1	Einleitung	201
5.3.2	Newtonsches und nicht-newtonsches Fluidverhalten, experimentelle Beobachtungen	202
5.3.3	Zur tensoriellen Beschreibung	204
5.3.4	Rheologische Stoffgleichungen	208
5.4	Quellen für Stoffdaten	209
5.4.1	Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase	209
5.4.1.1	Ideale Gase und feuchte Luft	210
5.4.1.2	$h$ - $x$ -Diagramme	210
5.4.1.3	Öle (Mineral- und Hydrauliköle)	210
5.4.2	Kunststoffe	211
	Literatur zu Kapitel 5	211
<b>Teil 2 Erweiterte Grundlagen</b>		<b>213</b>
<b>6 Stationäre Wärmeleitung</b>		<b>215</b>
6.1	Temperaturverlauf in Rippen (Rippentheorie)	215
6.1.1	Energiebilanz	215
6.1.2	Lange Rippe	217
6.1.3	Rippe endlicher Länge	218
6.1.4	Rippenwirkungsgrad	220
6.1.5	Längsleitung in langen Körpern mit Relativbewegung	221

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

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

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