

1	Einleitung	1
1.1	Ziele	1
1.2	Herausforderungen	3
1.3	Der Kunststoffkreislauf	4
1.4	Terminologie	6
	Literatur	9
2	Kunststoff – ein nachhaltiger Werkstoff	11
2.1	Physikalische Eigenschaften	11
2.2	Gebrauchseigenschaften und Anwendungen	13
2.3	Lebenszyklen	14
2.4	Wirtschaftlichkeitsaspekte	15
2.5	Zur Natur der Kunststoffe	16
2.6	Kunststoffsorten	17
	Literatur	17
3	Rohstoffbasis	19
3.1	Fossile Rohstoffe	19
3.2	Zirkuläre Rohstoffe	20
3.2.1	Rezyklate	21
3.2.2	CO ₂ – Carbon Capture and Usage (CCU)	22
3.2.3	Biogene Rohstoffe – Biomasse und nachwachsende Rohstoffe	23
3.3	CO ₂ e-Emissionen	24
3.4	Perspektiven	26
	Literatur	27
4	Die Kunststoffwirtschaft	29
4.1	Kunststoffindustrie und Kunststoffwirtschaft	30
4.2	Kunststofferzeugung	30
4.3	Kunststoffverarbeitung	32

4.4	Kunststoffmaschinen und -anlagenbau	33
4.5	Recycler	34
4.6	Wertschöpfungsketten	34
4.7	Dienstleister	35
4.8	Wissenschaft	36
4.9	Verbände und Register	37
4.10	Weitere Teile der Kunststoffwirtschaft.	38
	Literatur.	39
5	Stoffströme.	41
5.1	Anwendungen	42
5.2	Quantitative Darstellung	43
5.3	Produktion	44
5.4	Märkte	44
5.5	Rezyklate und ihr Einsatz	46
5.6	Export von Kunststoffabfällen	49
5.7	Prognosen.	50
5.8	Daten und Quellen	52
	Literatur.	54
6	Produktverantwortung und Beispiele für ihre Umsetzung.	55
6.1	Produktverantwortung für die Kreislaufführung	55
6.2	Design-Phase	58
6.2.1	Umweltbezogene Design-Begriffe und ihre Einordnung.	58
6.2.2	Beispiel: Eco-Design von Kunststoffverpackungen	60
6.2.3	Beispiel: Design for Recycling von Kunststoffverpackungen	62
6.3	Herstellungsphase	65
6.3.1	Beispiele für Rezyklateinsatz.	65
6.3.2	Beispiele für die Senkung des Gehaltes an gefährlichen Stoffen	66
6.4	Gebrauchsphase	67
6.4.1	Beispiel: Wiederverwendung von Fässern und IBC	67
6.5	End of Life-Phase	68
6.5.1	Beispiel: Pfandsystem für PET-Getränkeflaschen und HDPE-Kreislauf für Flaschen.	68
6.5.2	Beispiel: Sammlung und Recycling von Agrarfolien und -kunststoffen	69
6.5.3	Beispiel: Sammlung und Recycling von PVC-Fenstern und -Türen	71
6.5.4	Beispiel: Sammlung und Recycling von EPS-Abfällen aus der Gebäudeisolierung.	73

6.5.5	Beispiel: Recycling von Kunststoffteilen aus Altfahrzeugen.	74
6.5.6	Recycling von Matratzen aus PUR	76
6.6	Ausblick.	78
	Literatur.	79
7	Kreislaufforientiertes Industriedesign mit Kunststoffen	83
7.1	Design for Circularity mit Kunststoffen	84
7.2	Beispiele nachhaltiger Gestaltung mit Design for Circularity	84
7.3	Gestaltung von Produkten in Kunststoff – von Dieter Rams zum Design for Circularity	86
7.4	Gestaltung und Produktentwicklung mit Design for Circularity	88
7.5	Ausblick.	90
	Literatur.	91
8	Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffabfällen	93
8.1	Rolle der Sortierung und Aufbereitung in der Kreislaufwirtschaft	93
8.2	Sortierung und Aufbereitung von Verpackungen	95
8.3	Aufbereitung von Altfahrzeugen	97
8.4	Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten.	98
8.5	Ausblick und Herausforderungen	99
	Literatur.	100
9	Verwertung von Kunststoffabfällen	103
9.1	Verwertung und Verwertungsverfahren	104
9.2	Werkstoffliches (mechanisches) Recycling	105
9.3	Lösemittelbasierte Verfahren	109
9.4	Chemisches oder rohstoffliches Recycling	110
9.5	Massenbilanzierung	115
9.6	Energetische Verwertung	117
	Literatur.	120
10	Nicht-verwertete Kunststoffabfälle	123
10.1	Globale nicht-verwertete Stoffströme	123
10.2	Deponieren.	124
10.3	Marine Litter	126
10.3.1	Ursachen von Marine Litter.	126
10.3.2	Ökologische und andere Folgen.	127
10.3.3	Quellen, Eintragspfade und Mengen	129
10.3.4	Maßnahmen gegen den Kunststoffabfalleintrag	130
10.4	Makro- und Mikroplastik.	132
10.5	Littering in Deutschland	133
	Literatur.	135

11	Ökobilanzen von Kunststoffkreisläufen	139
11.1	Einleitung	140
11.2	Grundlagen der Ökobilanzierung	140
11.2.1	Methodik und Daten	141
11.2.2	Bedeutung	142
11.2.3	Akzeptanz	142
11.3	Ökologische Bewertung von Kunststoffkreisläufen	142
11.3.1	Methodische Grundlagen	143
11.3.2	Müllverbrennung und Recycling im Vergleich	146
11.3.3	Co-Verbrennung und Recycling im Vergleich	150
11.3.4	Chemisches und werkstoffliches Recycling im Vergleich	151
11.4	Schlussfolgerungen für die Kreislaufwirtschaft in Deutschland	155
11.5	Treibhausgasneutrale Kunststoffe durch Kreislaufwirtschaft	156
	Literatur	158
12	Digitalisierung in der Kunststoffkreislaufwirtschaft	163
12.1	Bedeutung der Digitalisierung	164
12.2	Digitalisierung in der Praxis	165
12.3	Neue Strukturen und Kooperationen	168
12.4	Rahmenbedingungen	171
	Literatur	173
13	Logistik im Kreislauf	175
13.1	Bedeutung der Logistik	176
13.2	Die Logistik als Bindeglied	177
13.3	Wandel zu einem auftragsorientierten Sekundärrohstoffstrom	178
13.4	Herausforderungen und Chancen für Logistikdienstleister	180
	Literatur	181
14	Normung und Standardisierung für Kunststoffe im Kreislauf	183
14.1	Was sind Normung und Standardisierung?	184
14.2	Verbindung zwischen Normung und staatlicher Regelung	185
14.3	Normungslandschaft zu Circular Economy mit Bezug zu Kunststoffen	186
14.4	Normungsaktivitäten zu Kunststoff-Recycling und -Rezyklaten	187
14.4.1	Relevante Gremien	187
14.4.2	Zentrale Normen und Standards	188
14.5	Zukunftsthemen	190
14.6	Ausblick	192
	Literatur	192
15	Regulierung einer Kunststoffkreislaufwirtschaft	195
15.1	Historischer Abriss	196
15.2	Regulierung auf EU-Ebene	197

15.3	Regulierung in Deutschland	200
15.4	Regulierung des Rezyklateinsatzes	202
15.5	Stand und Ausblick zur Stoffkreislauf-Regulierung	206
	Literatur.	207
16	Fachpresse und Verbände.	211
16.1	Information & Kommunikation – Fachpresse	211
16.2	Interessenvertretungen – Verbände und Netzwerke	213
	Literatur.	218
17	Relevante Studien zum Thema	219
17.1	Circular Economy	220
17.1.1	Ellen MacArthur Foundation: the New Plastics Economy	220
17.1.2	Acatech: European Green Deal	221
17.1.3	WWF mit Wuppertal Institut: Impulspapier Kreislaufwirtschaftsstrategie	222
17.1.4	IN4Climate.NRW: Circular Economy in der Grundstoffindustrie	224
17.1.5	VCI: Branchenstrategie zirkuläre Wirtschaft.	226
17.1.6	VDI: Green Paper „Circular Economy für Kunststoffe neu denken“	227
17.1.7	BUND et al.: Wege aus der Plastikkrise	229
17.1.8	GKV et al.: Kunststoffe für Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz	230
17.1.9	CEID mit acatech: Zirkuläre Geschäftsmodelle	232
17.2	Potentialanalysen und Roadmaps	234
17.2.1	PEW mit Systemiq: Breaking the Plastics Wave	234
17.2.2	CEID mit acatech und Systemiq: <i>Circular Economy Roadmap</i> für Deutschland.	235
17.2.3	WWF mit Systemiq: Verpackungswende jetzt.	236
17.2.4	Systemiq: Reshaping Plastics	237
17.3	Stoffströme.	238
17.3.1	PlasticsEurope und EPRO: Plastics – the Facts 2020	238
17.3.2	BKV et al. mit Conversio: Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019	239
17.3.3	GPA, IK et al. mit Conversio: Global Plastics Flow 2018.	240
17.3.4	Geyer, Jambeck et al.: Production, Use, and Fate of All Plastics Ever made	241
17.4	Emissionen.	242
17.4.1	Agora Energiewende mit Wuppertal Institut: Klimaneutrale Industrie	242
17.5	Recycling, Rezyklateinsatz und Rezyklierbarkeit	243
17.5.1	Fraunhofer-CCPE: Recyclingtechnologien für Kunststoffe	243

17.5.2	Nova: Chemical Recycling	245
17.5.3	IN4Climate.NRW: Chemisches Recycling	246
17.5.4	RESAG-Bericht zum Rezyklateinsatz	248
17.5.5	GVM-Studie zum Stand der Recyclingfähigkeit von Kunststoffverpackungen 2020.	249
17.6	Quoten	250
17.6.1	IK mit AGVU: Gesetzliche Mindestquoten für Rezyklate in Kunststoffverpackungen?	250
17.6.2	KRU: Substitutionsquoten	251
17.7	Littering	252
17.7.1	FhG-UMSICHT: Konsortialstudie zu Mikroplastik	252
17.7.2	BKV mit Conversio: Kunststoffe in der Umwelt.	254
17.7.3	UNEP: Marine Litter and Plastics Pollution	255
	Literatur.	256
18	Fazit – Wohin geht die Reise?	259
	Begriffserläuterungen.	265