

Torsten Kies

# 10 Grundregeln zur Konstruktion von Kunststoffprodukten



2., aktualisierte Auflage

HANSER

Kies

## **10 Grundregeln zur Konstruktion von Kunststoffprodukten**



### **Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

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

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

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

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

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

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

***Kunststoffe.de***

Torsten Kies

# **10 Grundregeln zur Konstruktion von Kunststoffprodukten**

2., aktualisierte Auflage

HANSER

Der Autor:

*Torsten Kies*, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg,

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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

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

© 2018 Carl Hanser Verlag München

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

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

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

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-45190-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-45633-4

# Vorwort

## ■ Vorwort zur 2. Auflage

Schneller als gedacht kam vom Verlag die Mitteilung, dass sich im Lager kaum noch Bücher befinden und eine zweite Auflage gedruckt werden soll. Weil die Resonanz der Kolleginnen und Kollegen überwiegend positiv ausfiel, wurde die grundlegende Konzeption und der Aufbau des Buches beibehalten. Die vorliegenden Texte wurden verfeinert und eventuelle Fallen für Missverständnisse beseitigt. So wurde die Darstellung der Zusammenhänge verbessert, um hoffentlich dem Leser ein schnelleres Verständnis zu ermöglichen. Bleibt zu wünschen, dass auch die zweite Auflage Verbreitung in den Bücherregalen oder besser noch auf den Schreibtischen der Konstrukteure findet.

Halle im Januar 2018

## ■ Vorwort zur 1. Auflage

Dieses Buch konnte entstehen, weil Studentinnen und Studenten Fragen stellten. So suchte ich Wege, angeregt durch die Fragen während und auch nach den Lehrveranstaltungen, meine Vorlesung zur Konstruktion von Kunststoffteilen für den Masterstudiengang Maschinenbau zu verbessern. Auch wenn einige Kollegen im wissenschaftlichen Vortrag auf höchstem Niveau die einzige Möglichkeit sehen, den Studierenden Wissen zu vermitteln, stellte ich meine Vorlesung auf eine didaktisch determinierte Konzeption um. Beim Vergleich des Kenntnisstandes von Prüflingen hatte ich – wenn auch sicherlich subjektiven – Eindruck, dass das Niveau des wiedergegebenen Wissens nach der Umstellung wesentlich höher anzusiedeln war als vor der Änderung. Besonders beeindruckte mich, dass die Kandidaten die konstruktiven Merkmale und Besonderheiten realer Teile, die sie während ihres mündlichen Examins in die Hand bekamen, nun viel besser beschreiben

konnten als ihre Vorgänger vergangener Jahre. Vielleicht haben sich die Prüflinge einfach besser vorbereitet, vielleicht gelang ihnen die Aufbereitung der Inhalte besser, weil sie mit der didaktischen Konzeption der zehn Grundregeln einen roten Faden finden konnten. Die Studierenden sprachen auch von ihren „Zehn Geboten“. Zu hoffen bleibt, dass ihnen dieser rote Faden ein ganzes Berufsleben von Nutzen sein kann und sie mit ihm weitere Wissensbausteine verknüpfen können.

Natürlich möchte ich die Kolleginnen und Kollegen im Rahmen dieser Danksagung erwähnen, die mich einerseits mit Hinweisen und Ideen, andererseits mit Aufgabenstellungen und Problemen der einen oder der anderen Art bei der Umsetzung dieses Projekt unterstützten.

Besonderer Dank gilt meinem persönlichen Umfeld. Meine liebe Frau zeigte großes Verständnis während der Schreibphase und brachte viele Mülleimer weg, deren Entsorgung in unserem Haushalt eigentlich mir zugestanden hätte. Als die Konzeption stand, fand sie die meisten Rechtschreibfehler im Manuskript. Während der Überarbeitung hatte sie viel Geduld und Einfühlungsvermögen und entlastete mich an vielen anderen Stellen.

Eine Entschuldigung möchte ich an meine Kinder richten: Auch Erwachsene wollen mal ein bisschen spielen – und manche Große machen das, indem sie an einem Buch schreiben. Ich gelobe das nächste Projekt viel näher an die Interessenlage meiner Söhne anzulehnen als dieses.

Es möge gelingen.

Halle im Januar 2014

# Der Autor

## ■ Prof. Dr.-Ing. Torsten Kies

Torsten Kies ist Fachmann für Kunststofftechnik und Spezialist für Spritzgießen. Er ist an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg tätig. An der Hochschule Lausitz im Masterstudiengang Maschinenbau, lehrte er unter anderem die Fachgebiete Kunststoffkonstruktion und Funktionsintegration mit Kunststoffen. Seine wissenschaftlichen Kenntnisse auf dem Gebiet der Kunststofftechnik, die während seiner mehrjährigen Industrietätigkeit als Entwickler von Kunststoffprodukten erworbenen Fertigkeiten und die Erfahrungen aus der fachbezogenen Hochschullehre verarbeitete er zu dem vorliegenden Buch.



# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
Vorwort zur 2. Auflage .....	V
Vorwort zur 1. Auflage .....	V
<b>Der Autor</b> .....	<b>VII</b>
Prof. Dr.-Ing. Torsten Kies .....	VII
<b>Zum Inhalt des Buches</b> .....	<b>XV</b>
Die Zehn Grundregeln .....	XVI
<b>1 Grundregel: Temperatureinsatzbereich</b> .....	<b>1</b>
1.1 Phasenübergänge bei Kunststoffen .....	1
1.1.1 Der Übergang vom festen in den geschmolzenen Zustand .....	1
1.1.2 Die Volumenänderung beim Phasenübergang von der Schmelze zum festen Zustand .....	6
1.1.3 Phasenübergänge am starren Körper .....	7
1.2 Die Temperaturabhängigkeit der Materialkennwerte von Kunststoffen ..	9
1.2.1 Der Vergleich mit anderen Werkstoffgruppen .....	9
1.2.2 Die thermische Ausdehnung .....	9
1.2.3 Temperaturabhängiges Spannungs-Dehnungs-Verhalten .....	13
1.3 Der Einsatztemperaturbereich .....	15
1.3.1 Tatsächlich wirkende Temperaturen .....	15
1.3.2 Temperaturabhängige Lasteinwirkung .....	16
1.3.3 Die Notwendigkeit von einsatznahen Funktionsuntersuchungen .....	18
1.4 Der Einfluss der Geometrie auf die Temperaturbeständigkeit .....	19
1.4.1 Aussagefähigkeit der Rohstoffkennwerte .....	19
1.4.2 Betrachtete Geometrie .....	20
1.4.3 Modifikation der Wanddicke .....	22
1.4.4 Belastungsdauer und Durchwärmung der Produkte .....	22

1.4.5	Bessere Wärmestandfestigkeit durch Faserverstärkung . . . . .	23
1.4.6	Werkstoffkombination . . . . .	24
1.4.7	Zusätzliche Versteifungen gegen die thermisch bedingte Biegung . . . . .	25
1.4.8	Einseitige Kühlung am Erzeugnis . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Grundregel: Medienangriff . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1	Die Wirkung von Medien auf Kunststoffe. . . . .	29
2.1.1	Begriffserklärung: Medienangriff . . . . .	29
2.1.2	Direkter und indirekter Medienangriff . . . . .	30
2.1.3	Strahlungs- und stofflich-medialer Angriff . . . . .	31
2.1.4	Chemischer und physikalischer Medienangriff . . . . .	33
2.2	Voraussetzungen für einen Medienangriff . . . . .	34
2.3	Der Schutz vor Medienangriff . . . . .	35
2.4	Die Schädigungsmechanismen . . . . .	36
2.4.1	Arten der Schädigungsmechanismen . . . . .	36
2.4.2	Der oxidative Abbau . . . . .	37
2.4.3	Schädigung durch Hydrolyse . . . . .	38
2.4.4	Schädigung durch Chemikalien . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Grundregel: Spannungszustand . . . . .</b>	<b>45</b>
3.1	Die Ursache von Spannungen . . . . .	45
3.1.1	Krafteinwirkung auf eine Flüssigkeit . . . . .	45
3.1.2	Krafteinwirkung auf einen Festkörper . . . . .	47
3.1.3	Viskoses und elastisches Verformungsverhalten von Kunststoffen . . . . .	48
3.2	Spannungen am Bauteil . . . . .	50
3.3	Spannungen und Orientierungen . . . . .	52
3.3.1	Die Unterscheidung zwischen Spannungen und Orientierungen . . . . .	52
3.3.2	Orientierungen in Kunststoffprodukten . . . . .	55
3.3.2.1	Voraussetzungen für Orientierungen . . . . .	55
3.3.2.2	Orientierungen bei faserverstärkten Materialien . . . . .	56
3.3.2.3	Molekülorientierungen . . . . .	57
3.3.3	Eigenspannungen . . . . .	58
3.4	Die Bildung von Orientierungen und Eigenspannungen . . . . .	61
3.4.1	Unterschiede zwischen Spannungen und Orientierungen . . . . .	61
3.5	Eigenspannungen und Orientierungen beim Spitzgießen . . . . .	63
3.5.1	Orientierungen und Eigenspannungen am Spritzgussteil . . . . .	63
3.5.2	Die Ausbildung von Orientierungen . . . . .	63

3.5.3	Eigenspannungen beim Spritzgießen .....	64
3.5.3.1	Ursachen der Eigenspannungen .....	64
3.5.3.2	Prozessablauf beim Spritzgießen .....	65
3.5.3.3	Die Entformung .....	68
3.5.3.4	Auswirkungen einer Schwindungsbehinderung auf Eigenspannungen .....	70
3.5.3.5	Eigenspannungen bei Montageprozessen .....	71
<b>4</b>	<b>Grundregel: Schadensfreie Verformung .....</b>	<b>73</b>
4.1	Einleitung .....	73
4.2	Differential- und Integralbauweise .....	74
4.2.1	Unterscheidung der Kategorien .....	74
4.2.2	Die Differentialbauweise .....	74
4.2.3	Die Integralbauweise .....	75
4.2.4	Die Mischbauweise .....	76
4.2.5	Geeignete Bauweisen für Kunststoffprodukte .....	77
4.3	Das Verformungsverhalten der Werkstoffe .....	78
4.3.1	Begriffe zum Verformungsverhalten .....	78
4.3.2	Die Zugfestigkeit .....	79
4.3.3	Die Steifigkeit eines Materials .....	79
4.3.4	Die Dehnung .....	80
4.3.4.1	Die Kritische Dehnung .....	80
4.3.4.2	Die zulässige Dehnung .....	81
4.3.5	Bauteilspezifische Minderung .....	83
4.3.5.1	Einflussfaktoren .....	83
4.3.5.2	Vorgehensweise .....	84
4.3.5.3	Anzahl der Lastwechsel .....	84
4.3.5.4	Füll- und Verstärkungsstoffe .....	85
4.3.5.5	Starke Materialbelastung bei der Fertigung .....	86
4.3.5.6	Mehrachsige Spannungszustände .....	87
4.3.5.7	Beanspruchungsgeschwindigkeit .....	87
4.3.5.8	Die Wanddicke .....	87
4.3.5.9	Berücksichtigung der Kerbwirkung .....	87
4.4	Starre und flexible Konstruktionen .....	89
<b>5</b>	<b>Grundregel: Entformbarkeit .....</b>	<b>95</b>
5.1	Beschreibung der Situation .....	95
5.1.1	Die Entwicklung von Werkzeugen .....	95
5.1.2	Stückzahlen .....	96
5.1.3	Die Verwendung von Normalien im Werkzeugbau .....	98
5.2	Teile aus der flachen Trennebene .....	99

5.2.1	Die Werkzeuganlage .....	99
5.2.2	Auswerfen .....	104
5.2.3	Besonderheiten .....	106
5.3	Teile aus Werkzeugen mit Trennungssprung .....	107
5.3.1	Die Werkzeuganlage .....	107
5.3.2	Auswerfen .....	109
5.3.3	Besonderheiten .....	110
5.4	Teile mit Durchbrüchen und Werkzeuge mit Blockierungen .....	111
5.4.1	Die Werkzeuganlage .....	111
5.4.2	Auswerfen .....	114
5.4.3	Besonderheiten .....	117
5.5	Becherförmige Teile .....	119
5.5.1	Die Werkzeuganlage .....	119
5.5.2	Auswerfen .....	120
5.5.3	Besonderheiten .....	122
5.6	Schieber- und Backenwerkzeuge mit zusätzlichen Trennebenen .....	127
5.6.1	Der Werkzeugaufbau .....	127
5.6.2	Auswerfen .....	129
5.6.3	Besonderheiten .....	130
5.7	Ausdreh-Werkzeuge für innere Gewinde .....	133
5.7.1	Die Werkzeuganlage .....	133
5.7.2	Auswerfen .....	135
5.7.3	Besonderheiten .....	135
5.8	Werkzeuge mit inneren Schiebern und Einfallkernen .....	137
5.8.1	Das Werkzeugkonzept .....	137
5.8.2	Auswerfen .....	139
5.8.3	Besonderheiten .....	140
5.9	Teile mit extremen Hinterschneidungen .....	142
5.9.1	Verfahrenstechnik und Werkzeugaufbau .....	142
5.9.2	Auswerfen und Nachbearbeitung .....	145
5.9.3	Besonderheiten .....	146
5.10	Teile mit Hinterschneidungen, die Zwangsentformung zulassen .....	147
5.10.1	Der grundsätzliche Werkzeugaufbau .....	147
5.10.2	Auswerfer .....	149
5.10.3	Besonderheiten .....	150
<b>6</b>	<b>Grundregel: Konstante Wanddicken .....</b>	<b>153</b>
6.1	Wanddicken an einem Erzeugnis .....	153
6.1.1	Wanddicken und Leichtbau .....	153
6.1.2	Wanddicke und Verarbeitungsverfahren .....	154

6.2	Grundlagen von technologischen Prozessen bei der Kunststoffverarbeitung . . . . .	156
6.2.1	Einordnung . . . . .	156
6.2.2	Betrachtungsweise . . . . .	156
6.2.3	Erwärmen der Schmelze . . . . .	160
6.2.4	Kompression zur Formgebung . . . . .	160
6.2.5	Abkühlung unter Druckabbau . . . . .	161
6.2.6	Isobare Abkühlung bei atmosphärischem Druck . . . . .	162
6.3	Probleme, die durch Wanddickenunterschiede verursacht sind . . . . .	163
6.4	Das Kantenproblem bei kastenartigen Strukturen . . . . .	166
<b>7</b>	<b>Grundregel: Geometrische Versteifung . . . . .</b>	<b>171</b>
7.1	Ausführungen einer geometrischen Versteifung . . . . .	171
7.1.1	Erhöhung der Steifigkeit . . . . .	171
7.1.2	Varianten der geometrischen Versteifung . . . . .	172
7.2	Versteifung mit Rippen . . . . .	174
7.2.1	Rippenversteifung an belasteten Flächen . . . . .	174
7.2.2	Anordnung der Rippen . . . . .	175
7.2.3	Belastungsgerechte Anpassung der Rippen . . . . .	176
7.2.4	Anbindung der Rippen an die Grundstruktur . . . . .	179
7.2.5	Werkzeugtechnische Umsetzung von Rippenstrukturen . . . . .	183
7.2.6	Funktionale Einbindung von Rippen . . . . .	186
7.3	Versteifung mit Schalengeometrie . . . . .	187
7.3.1	Schalengeometrie als Art des fertigungsgerechten Konstruierens . . . . .	187
7.3.2	Zur konstruktiven Umsetzung . . . . .	189
7.4	Anwendung des Prinzips „Wellblech“ . . . . .	190
7.5	Kombination der Möglichkeiten zur geometrischen Versteifung . . . . .	191
<b>8</b>	<b>Grundregel: Konstruktive Duktilität . . . . .</b>	<b>193</b>
8.1	Duktilität als Konstruktionsforderung . . . . .	193
8.2	Rasthaken . . . . .	196
8.2.1	Vorteile von Rasthaken . . . . .	196
8.2.2	Montagestrategien . . . . .	197
8.2.3	Varianten der Rastverbindungen . . . . .	199
8.3	Montagebruch an Rasthaken . . . . .	204
8.3.1	Grundsätzliche Lösungsansätze . . . . .	204
8.3.2	Technologische Maßnahmen gegen den Montagebruch von Rasthaken . . . . .	204
8.3.2.1	Zur Vorgehensweise . . . . .	204

8.3.2.2	Eingangsgrößen für den Prozess	205
8.3.2.3	Betrachtung des Herstellungsprozesses für die Bauteile	206
8.3.2.4	Betrachtung des Montageprozesses	207
8.3.3	Grundsätzliche konstruktive Möglichkeiten zur Vermeidung des Montagebruchs von Rasthaken	208
8.3.4	Beseitigung der Kerbwirkung	208
8.3.5	Vergrößerung der Biegelänge	209
8.3.6	Veränderungen am Querschnitt des Rasthakens	211
8.3.7	Verminderung der Durchbiegung	212
8.3.8	Zusätzliche, alternative Verformungsmechanismen	213
8.3.9	Alternatives Konstruktionsprinzip für die Rastverbindung	214
8.4	Vermeidung einer unbeabsichtigten Demontage von Rastverbindungen	215
8.5	Weitere elastische Konstruktionselemente	217
8.6	Möglichkeiten zur Verbesserung der Elastizität	217
8.6.1	Überblick	217
8.6.2	Anspritzen einer weichen Komponente	218
8.6.3	Schlitze an becherartigen Formteilen	219
8.6.4	Faltungen an Schalenelementen	220
8.7	Zur Modifikationen von Gehäusen	221
<b>9</b>	<b>Grundregel: Veränderliche Geometrie</b>	<b>225</b>
9.1	Begriffsbestimmung	225
9.2	Veränderliche Geometrie als Nutzungsmerkmal bei Kunststoffprodukten	228
9.2.1	Mögliche Mechanismen	228
9.2.2	Temperatureinfluss	229
9.2.3	Medienaufnahme und Medienabgabe	230
9.2.4	Freisetzen von Spannungen	231
9.2.5	Verformungsverhalten	231
9.3	Veränderliche Geometrie für unterschiedliche Abschnitte des Produktlebenszyklus	233
9.3.1	Motivation	233
9.3.2	Allmähliche Veränderung der Geometrie im Herstellungsprozess und beim Gebrauch	235
9.3.3	Allmähliche anwendungsbedingte Veränderung der Geometrie	237
9.4	Diskontinuierliche, schnelle Veränderung der Geometrie im Herstellungsprozess	238
9.4.1	Begriffserklärung	238

9.4.2	Spannvorrichtungen .....	239
9.4.3	Vorrichtungen zum nachträglichen Kalibrieren .....	243
9.4.4	Nachträgliche Bearbeitung eines Bauteils .....	245
9.4.5	Einspannen des Bauteils für die Montage .....	246
9.4.6	Demontage von Baugruppen vor dem Einsatz .....	248
9.4.7	Umbau von Baugruppen nach der ersten Nutzungsphase, um eine weitere Nutzung zu ermöglichen .....	249
9.4.8	Endgültiger Rückbau von Baugruppen nach der Nutzung .....	250
9.5	Funktionsbedingte veränderliche Geometrie .....	253
9.5.1	Erprobte Einsatzgebiete .....	253
9.5.2	Gelenklose Anwendungen, die Duktilität nutzen .....	255
9.5.3	Lokale Gelenke .....	257
9.5.4	Faltbare Anwendungen .....	260
9.5.5	Lokale Flexibilität und Hochelastische Anwendungen .....	262
	9.5.5.1 Realisierung mit einer weichen Materialkomponente ..	262
	9.5.5.2 Abdichtung mit konstruktiver Duktilität .....	264
9.5.6	Reversibles Beulen .....	266
<b>10</b>	<b>Grundregel: Funktionsintegration .....</b>	<b>269</b>
10.1	Der Begriff Funktionsintegration .....	269
10.2	Die konstruktive Funktionsintegration .....	273
10.2.1	Das Wesen der konstruktiven Funktionsintegration .....	273
10.2.2	Das Prinzip „Funktionelle Mehrfachnutzung“ .....	275
10.2.3	Das Prinzip „zusätzliche Geometrie“ zur Gewährleistung einer weiteren Funktion .....	276
10.2.4	Vergleich der beiden Prinzipien .....	278
10.2.5	Beispiele für eine konstruktive Funktionsintegration .....	279
10.3	Die technologische Funktionsintegration .....	282
10.3.1	Optimierung der technologischen Abläufe .....	282
10.3.2	Funktionsintegration durch Anpassung technologischer Abläufe .....	283
10.4	Sonderverfahren als Mittel der technologischen Funktionsintegration ..	288
10.4.1	Übersicht .....	288
10.4.2	Die Sondertechnologie „Mehrkomponentenspritzgießen“ .....	288
10.4.3	Einige Gestaltungsregeln zum Mehrkomponentenspritzgießen	290
10.4.4	Sondertechnologien als Hinterspritzverfahren .....	293
<b>11</b>	<b>Checkliste zur Konstruktion von Kunststoffteilen .....</b>	<b>299</b>
<b>12</b>	<b>Weiterführende Literatur .....</b>	<b>305</b>
<b>Index</b>	<b>.....</b>	<b>307</b>



# Zum Inhalt des Buches

Nur wenige technische Erzeugnisse kommen ohne Kunststoffteile aus. Die polymeren Werkstoffe haben sich von billigen Ersatzstoffen zu einzigartigen Hochleistungsmaterialien entwickelt. Das Konstruieren und Gestalten von Erzeugnissen wird derzeit vorwiegend mit dem Einsatz von Metallen als Hauptwerkstoff gelehrt und dem entsprechend angewendet. Bei dieser Herangehensweise können aber bei der Verwendung von Kunststoffen nicht alle Möglichkeiten dieser Materialgruppe genutzt werden und in die Produkte einfließen.

Eine wichtige Sparte der Materialwissenschaft stellt die Kunststofftechnik dar. Auf diesem Gebiet wird intensiv geforscht. Gleichberechtigt zum werkstofftechnischen Aspekt müssen Regeln für eine kunststoffgerechte Konstruktion aufgestellt, verbreitet und angewendet werden. Eine ganze Reihe von Empfehlungen zur Gestaltung von Kunststoffprodukten ist bereits vorhanden. Der praktisch tätige Konstrukteur, der Einsteiger und der „Metall-Umsteiger“ benötigen jedoch eine Systematisierung dieser Lösungsvorschläge, Tipps und Hinweise. Mit diesem Buch wird eine Methodik zur Konstruktion mit Kunststoffen vorgestellt, welche die bekannten Ansätze zu zehn Grundregeln zusammenfasst. Der Anspruch soll nicht sein, diese in aller Vollständigkeit und Tiefe darzustellen. Vielmehr wird ein System eröffnet, mit dem es gelingen sollte, die Besonderheiten der Konstruktion mit Kunststoffen zu erfassen und zu verinnerlichen. Neben dem Aufgreifen und der Diskussion vieler bereits bekannter Lösungsansätze stellt das Buch auch einige neue Lösungen vor und eröffnet alternative Sichtweisen für bestimmte Zusammenhänge.

Das Bestreben der vorliegenden Darstellungsweise ist es, die Sachverhalte in einer einfachen, verständlichen Form wiederzugeben. Vielleicht hat die Entscheidung für eine unkomplizierte Sprache die Konsequenz, dem wissenschaftlichen Anspruch des einen und anderen Kollegen nicht voll und ganz gerecht zu werden. Als Techniker kennen wir aber auch die Aussage, dass einfache Systeme meist zuverlässig und sicher funktionieren. Vielleicht ist der Versuch, das Wissen mit leicht verständlichen Texten darzustellen, auch ein Weg, mehr Personen für das vorliegende Fachgebiet zu gewinnen und damit schon im Ansatz dem nunmehr zur Realität werdenden Fachkräftemangel entgegenzuwirken.

Natürlich wird auf die spezifischen Fachbegriffe zurückgegriffen. Diese werden im Text eingeführt und erklärt.

Für die Übermittlung der inhaltlichen Botschaft spielen die Abbildungen eine wesentliche Rolle. So wird der Leser auch zum Betrachter. Ob ein Bild wirklich mehr als tausend Worte sagen kann, sei dahingestellt. An vielen Stellen unterstützt jedoch die Bebilderung nicht nur das Verständnis der Inhalte, sondern trägt die primären Informationen und soll damit zum schnellen Verständnis der Zusammenhänge beitragen.

Um den Preis des Buches auch für Studentinnen und Studenten attraktiv gestalten zu können, wurde die Print-Ausgabe in Graustufen realisiert. In der E-Book Ausgabe sind die Abbildungen dagegen farbig gestaltet. Welchem Medium man nun den Vorzug gibt, kann man nach eigenen Vorstellungen entscheiden.

## ■ Die Zehn Grundregeln

Die zehn Grundregeln sind anwendungsbezogen formuliert worden. Ihnen werden die bekanntesten und bewährtesten Konstruktionshinweise zu Kunststoffprodukten zugeordnet.

Zunächst erfolgen materialspezifische Betrachtungen in Bezug auf die Umgebungsbedingungen (*Kapitel 1: „Temperatureinsatzbereich“*).

Untersucht wird, in welchen Temperaturbereichen die Funktion von Kunststoffteilen gegeben ist. Zum Verständnis der Herstellungsprozesse werden die grundlegenden Vorgänge beim Phasenwechsel, von der hochviskosen Schmelze zum erstarrten Zustand und umgekehrt, beschrieben und auf weitere Phasenübergänge am starren Körper und deren Konsequenzen eingegangen. Dem Leser wird vermittelt, dass die Temperaturabhängigkeit von Werkstoffkennwerten bei Kunststoffen besonders stark ausgeprägt ist und eine genaue Kenntnis über die von außen auf das Erzeugnis einwirkenden Größen die Voraussetzung für die Entwicklung eines hochwertigen Erzeugnisses ist. Letztlich werden einige konstruktive Möglichkeiten vorgestellt, mit denen Kunststoffherzeugnisse auch noch bei grenzwertigen Temperaturen ihre Funktion erfüllen.

Das *zweite Kapitel („Medienangriff“)* behandelt die Wechselwirkungen, die Kunststoffe mit den sie umgebenden Medien eingehen. Zunächst erfolgt eine Systematisierung der angreifenden Stoffe und Strahlungen sowie Erklärungen zu den beim Medienangriff ablaufenden Mechanismen. Aufbauend auf diesen Grundlagen folgen Äußerungen zu den Auswirkungen angreifender Medien auf die Funktionserfüllung von Kunststoffteilen.

Anschließend werden in *Kapitel 3* („*Spannungszustand*“) die Auswirkungen des auf die Bauteile einwirkenden Kraftfeldes dargelegt. Herausgearbeitet werden die Unterschiede zwischen Orientierungen und Spannungen. Möglichkeiten ihres Nachweises werden aufgezeigt und die Konsequenzen von wirkenden Spannungen und vorhandenen Orientierungen auf ein Kunststoffergebnis benannt.

Ab dem vierten Kapitel werden die Unterschiede zwischen den beiden Materialklassen Metalle und Kunststoffe dargestellt. Nach notwendigen Erklärungen zu grundlegenden technischen Sachverhalten und Herstellungsverfahren von Kunststoffergebnissen wird auf die für die Polymere charakteristischen mechanischen Eigenschaften eingegangen und diese mit denen der Metalle verglichen. Auch wenn die Steifigkeit und die Festigkeit der Kunststoffe geringer ist als die der meisten Metalle, erschließt das deutlich bessere Verformungspotenzial von Polymeren Einsatzmöglichkeiten, die mit Metallen so nicht zugänglich sind. Herausgearbeitet wird, dass mit Polymeren große Verformungen schadensfrei realisiert werden können (*Kapitel 4: „Schadensfreie Verformung“*). Im Gegensatz zur Konstruktion mit Metallen betrachtet man bei Kunststoffen nicht primär die aufnehmbaren Spannungen, sondern die möglichen Verformungen. Mit Kunststoffen können nicht nur starre, sondern auch flexible Konstruktionen realisiert werden. Die unterschiedliche Herangehensweise für diese beiden Varianten wird erklärt.

Ein Schwerpunkt wird im Rahmen von *Kapitel 5* („*Entformbarkeit*“) auf die fertigungsgerechte Konstruktion von Kunststoffteilen gelegt. Während zur Herstellung von Produkten aus Metall mehrere Fertigungsverfahren auch bei der Massenfertigung in Frage kommen, konzentriert sich das Produktionsverfahren bei Kunststoffen bei strang- oder plattenartigen Produkten auf das Extrusionsverfahren, bei dreidimensional ausgeprägten Erzeugnissen vor allem auf das Spritzgießen. Weil das Spritzgießen allein wegen der Vielzahl der Erzeugnisse ein deutlich höheres ingenieurtechnisches Volumen beansprucht, konzentrieren sich hier die Überlegungen zur Entformbarkeit von Kunststoffteilen auf dieses Verfahren. Die fundamentalen Aussagen sind selbstverständlich auf andere Verfahren übertragbar. Dem Leser werden einführende Kenntnisse zum Werkzeugbau vermittelt, damit er in der Lage ist, die Konsequenzen seiner Konstruktion für die Umsetzung der Werkzeugtechnik einzuschätzen. Die Möglichkeiten des Spritzgusswerkzeugbaus werden vom Einfachen zum Komplizierten hin aufgezeigt und einige Anwendungen dargestellt, die mit den besprochenen Werkzeugen hergestellt werden können. Wenn mit diesen Kenntnissen die Konstrukteure Teile auf optimale Entformungsmöglichkeiten hin entwickeln, eröffnen sich neue Impulse für eine hocheffektive Massenfertigung.

Im *sechsten Kapitel* („*Konstante Wanddicken*“) wird die Forderung nach gleichmäßigen Wandstärken bei Kunststoffprodukten erhoben, die sich aus der im Vergleich zu Metallen sehr langsamen Abkühlungsgeschwindigkeit polymerer Werkstoffe beim Urformen ableitet. Die Aussagen werden mit der verfahrenstechnischen Be-

schreibung des Spritzgussprozesses untermauert. So können anschließend Probleme am Erzeugnis erklärt werden, die aufgrund von Wanddickenunterschieden entstehen und Lösungsempfehlungen ausgesprochen werden. Weiterhin folgt die Darstellung von Besonderheiten an Ecken und Kanten am Erzeugnis und Vorschläge für entsprechende Konstruktionsregeln, um verzugsfreie Formteile gestalten zu können.

Nachdem die ersten sechs Grundregeln material- und fertigungstechnische Aspekte behandeln, konzentrieren sich die folgenden drei Kapitel auf die geometrische Ausgestaltung der Produkte.

Aufgrund des geringeren Moduls von Kunststoffen können viele Produkte mit der beim Einsatz von Metall bewährten Geometrie nicht zufriedenstellend umgesetzt werden. Die geringfügige Erhöhung des Moduls durch die Zugabe von Verstärkungsfasern zum Grundpolymer bringt selten hinreichende Ergebnisse. Im *siebten Kapitel* („*Geometrische Versteifung*“) werden drei Möglichkeiten aufgezeigt, die Aussteifung der Erzeugnisse mit geometrischen Mitteln zu realisieren, und deren Besonderheiten beim Einsatz in Kunststoffbauteilen erklärt.

Genauso, wie durch eine entsprechende Gestaltung die Versteifung einer Geometrie möglich ist, kann mit geometrischen Mitteln auch eine stärkere Verformung in bestimmten Bereichen eines Teils erreicht werden, ohne dass man Modifikationen am Grundwerkstoff vornimmt. Das Buch stellt dazu in *Kapitel 8* („*Konstruktive Duktilität*“) Methoden vor und zeigt eine Reihe von praktischen Anwendungen auf.

Viele technische Produkte realisieren in der einen oder anderen Form Bewegungen. Bei starren Konstruktionen werden solche Anwendungen durch die Verschiebung von Einzelteilen zueinander realisiert. Das ist fertigungstechnisch aufwendig und wirkt sich stark auf den Preis der Produkte aus. In Folge des ausgeprägten Verformungsverhaltens polymerer Materialien können mit (teil-) flexiblen Konstruktionen aber auch Lösungen realisiert werden, bei denen die funktionelle Bewegung durch ein integrales Teil wahrgenommen wird. Einige solcher Realisierungsmöglichkeiten werden in *Kapitel 9* („*Veränderliche Geometrie*“) vorgestellt und diskutiert. Neben der erwünschten Verformung der Produkte im Rahmen ihres Einsatzes muss bei Kunststoffen auch eine objektiv vorhandene Verformung nach dem Spritzgießen bei Lagerung und Transport sowie eine Veränderung der Geometrie bei nachgelagerten Produktionsprozessen berücksichtigt werden; diese kann vielleicht sogar zweckdienlich ausgenutzt werden. Der Konstrukteur muss das einkalkulieren und die Geometrie der Erzeugnisse für die jeweiligen Zeitpunkte beziehungsweise Zustände beschreiben.

*Kapitel 10* („*Funktionsintegration*“) am Ende des Buches beschreibt die Funktionsintegration beim Einsatz von Kunststoffen. Inhaltlich wird dieses Kapitel aus einer Vorlesung gespeist, die der Autor bis zum Ende ihres Bestehens an der Hochschule Lausitz unter gleichem Titel hielt. Zunächst werden die Aspekte beim Entwurf von

Erzeugnissen untersucht. Hier möchte man das Erzeugnis mit Extra-Funktionen ausstatten, um dem Anwender einen zusätzlichen Nutzen zu eröffnen. Aber auch die technologischen Gesichtspunkte der Funktionsintegration werden dargestellt. Dieser herstellungstechnische Aspekt der Funktionsintegration zielt auf die Produktionsprozesse, um diese für die Massenproduktion noch günstiger zu gestalten. Einige der in diesem Zusammenhang stehenden Sonderverfahren des Spritzgießens werden vorgestellt und mit praktischen Beispielen belegt. Auf die Besonderheiten, die diese Sonderverfahren bei der Gestaltung von Formteilen erfordern, wird kurz eingegangen. So wird ein Handwerkszeug geschaffen, das auch die Entwicklung und konkurrenzfähige Produktion von Kunststofferteilen in Ländern mit hohem Lohnniveau ermöglicht.



# 1

## Grundregel: Temperatureinsatzbereich

### ■ 1.1 Phasenübergänge bei Kunststoffen

#### 1.1.1 Der Übergang vom festen in den geschmolzenen Zustand

In unserer Vorstellung verbinden wir einen Phasenübergang von fest nach flüssig oder umgekehrt, mit dem Abschmelzen von Eis oder dem Erstarren von Wasser. Herabfallende Tropfen verziehen einen festen Eisblock oder ein spiegelglatte Wasseroberfläche bildet eine Haut aus Eis. Bei vielen anderen Materialien erfolgt die Eigenschaftsveränderung aufgrund des Phasenübergangs ähnlich plötzlich an einem gut definierten Temperaturpunkt, wie am Gefrierpunkt des Wassers. So erfolgt das Aufschmelzen oder die Erstarrung für chemisch reine Metalle plötzlich bei einer definierten Temperatur.

Werden Kunststoffe betrachtet, kann kein plötzlicher Phasenübergang beobachtet werden. In der uns aus dem Alltag vertrauten, festen Phase erscheinen uns Gegenstände aus Kunststoff relativ weich und mehr oder weniger biegsam, also weniger steif als Metalle.

Werden Kunststoffherzeugnisse hohen Temperaturen ausgesetzt, versagen sie in der Regel. Viele kennen die Erfahrung einer geschmolzenen Vorratsdose, die unbedacht in den heißen Backofen gestellt wurde. Einige Kunststoffe versagen bereits bei Temperaturen unter einhundert Grad Celsius. Aus anderen polymeren Materialien können Erzeugnisse hergestellt werden, die auch noch bei zweihundert oder dreihundert Grad Celsius ihre Funktion erfüllen. Duroplastische Kunststoffe und Gummi widerstehen tendenziell höheren Temperaturen als Thermoplaste, werden aber noch im festen Zustand chemisch zersetzt. Thermoplaste können geschmolzen werden.

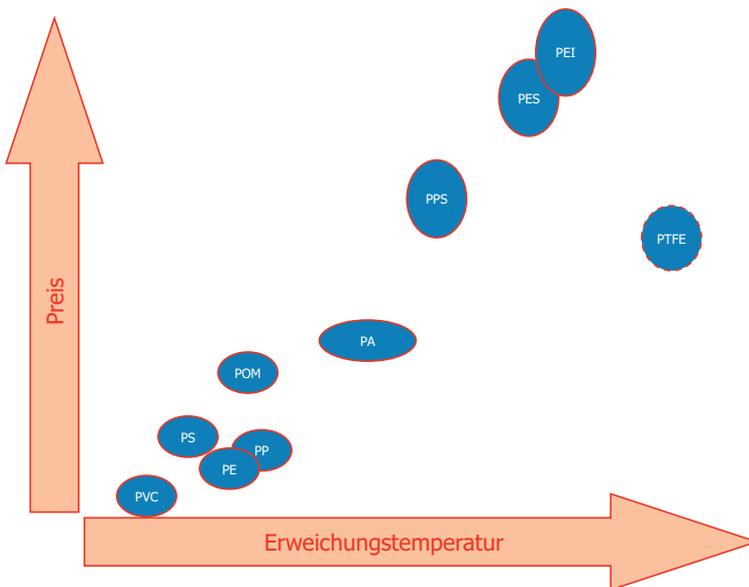
Kunststoffschmelzen sind extrem zähe Flüssigkeiten, die einen sehr großen Fließwiderstand haben. Der Übergang von „fest“ nach „flüssig“ erfolgt bei den thermoplastischen Kunststoffen nicht bei einer klar bestimmbaren Temperatur, sondern über einen mehr oder weniger breit ausgeprägten Temperaturbereich. Anders als

bei reinen Metallen verliert so ein Körper, der kurzzeitig knapp über die untere Grenze des Schmelztemperaturbereichs erwärmt wurde, nicht sofort seine Gestalt, wie wir es von einem schmelzenden Eiszapfen kennen. Bei einem Gegenstand aus Thermoplast bleibt die geometrische Gestalt zunächst erhalten. Es kommt lediglich zu einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Verziehen des Gegenstands.



Produkte aus Thermoplasten sind je nach Kunststofftyp bis zu Temperaturen von 80 bis 250 °C formstabil.

Die hochtemperaturfesten Polymere sind um ein mehrfaches teurer als die Massenplaste, die schon unter 100 °C ihre Formstabilität verlieren. In Bild 1.1 ist der Zusammenhang zwischen Wärmebeständigkeit und Preis in einem quantitativen Diagramm dargestellt. Allgemein gilt, dass eine erwünschte Formstabilität auch bei erhöhten Temperaturen den Einsatz von preisintensiveren Thermoplasten erfordert.



**Bild 1.1** Qualitativer Zusammenhang zwischen Temperaturformbeständigkeit und Materialpreis einiger Kunststoffe

Im Gegensatz zu Kunststoffprodukten sind Erzeugnisse aus Metall widerstandsfähig gegen mehrere hundert Grad Celsius. Allerdings gibt es auch hier Gegenbeispiele wie Quecksilber, Zinn oder Blei.



Nicht nur in Bezug auf die Schmelztemperatur gibt es einige Metalle, die den hier zugrunde gelegten Modellvorstellungen nicht entsprechen.

Für reine Metalle erfolgt der Phasenwechsel fest/flüssig analog zu schmelzendem Eis/Wasser an einem klar zu bestimmenden Schmelzpunkt. Die meisten Metalllegierungen verändern ihren Phasenzustand über einen Temperaturbereich. Ab der Überschreitung eines bestimmten Temperaturwerts beginnt ein Wechsel in eine zunächst breiige Struktur. Mit zunehmender Temperatur vermindert sich die Viskosität des Breis. Ab einer bestimmten Temperatur sind beide Komponenten verflüssigt und es liegt nun eine Metallschmelze mit den Eigenschaften einer Flüssigkeit und der charakteristischen geringen Viskosität vor.

Zum klassischen Metallgießen sind solche Stoffgemische weniger geeignet. Ein sehr modernes Urformverfahren für einige solcher Metalllegierungen stellt das Thixotropiespritzgießen dar.

Eine bekannte Anwendung, bei der eine breiartige Struktur der Masse wichtig ist, kennen wir vom Löten bei Elektronikteilen. Bei dieser Technologie ist die Viskosität neben der Oberflächenspannung des Lots ein wichtiger Prozessparameter.

Bei diesen Metalllegierungen ist der unterschiedliche Schmelzpunkt der einzelnen Komponenten Ursache für den breiten Phasenübergangsbereich. Im Gegensatz zu Kunststoffen vermindert sich bei diesen Metallgemischen mit zunehmender Temperatur die Viskosität zunächst enorm. Sind beide Komponenten erschmolzen, bleibt die Viskosität auf einem konstant geringen Wert.

Bei Kunststoffschmelzen vermindert sich die Viskosität bei zunehmender Temperatur nur moderat, sie bleibt aber insgesamt auf einem hohen Niveau.

Bei länger einwirkenden hohen Temperaturen oberhalb des Erweichungsbereiches schmelzen Thermoplaste und verlieren ihre Form. Wird die Schmelze überhitzt, zersetzen sich die Polymere. Bei Elastomeren und Duromeren erfolgt die chemische Veränderung des Materials bei starker Wärmeeinwirkung, ohne dass vorher ein Zustandswechsel von fest nach flüssig erfolgte.

Der für Kunststoffe relativ niedrige Temperaturbereich, bei dem der Phasenübergang erfolgt, kann nicht allein auf Beschränkungen beim Einsatz der Produkte reduziert werden. Dadurch, dass man sich bei der Herstellung der Produkte auf moderate Temperaturen beschränken kann, ist die zur Produktformung notwendige Energie überschaubar. Zur Formübertragung kann man Werkzeuge aus gebräuchlichen Metallen verwenden. Die hervorragenden Abformeigenschaften von Kunststoffen schon bei relativ geringen Temperaturen machen die Polymerwerkstoffe so zu einem Material, mit dem die Erzeugung von unschlagbar preisgünstigen, komplex geformten und multifunktionalen Produkten mit einem überschaubaren Energieeinsatz möglich ist.



Dass die Temperaturen, bei denen der Phasenübergang von fest nach flüssig stattfindet, bei Kunststoffen viel geringer sind als bei Metallen, bringt einerseits gewisse Nachteile beim Einsatz in einer heißen Umgebung mit sich. Bedeutet aber andererseits auch deutliche Vorteile bei der Herstellung der Produkte und ermöglicht so ein unschlagbar attraktives Preis-Leistungs-Verhältnis der Produkte.



Um eine genaue Aussage zu bekommen, welche Temperaturen eine bestimmte Baugruppe im Einsatz aushält, sind genaue Untersuchungen nötig. Das verwendete Material ist ein wichtiger Parameter, daneben müssen aber auch die Dauer der Temperatureinwirkung und die geometrischen Einflüsse berücksichtigt werden.

### Vikat-Erweichungstemperatur

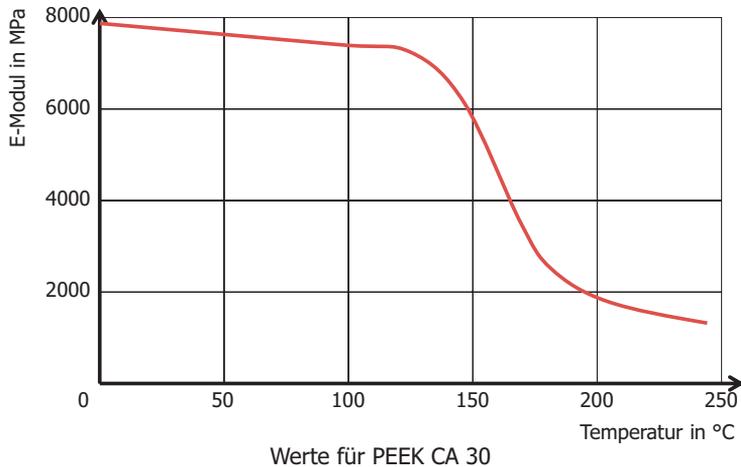
Innerhalb des Temperaturbereiches, bei dem die Geometrie des Erzeugnisses stabil erhalten bleibt und nicht durch Schmelzvorgänge verändert wird, ist die Gestaltfestigkeit der Produkte gegeben. Weil für technische Produkte die Erhaltung der Gestalt die Voraussetzung für die Funktionserfüllung ist, ist dieser Bereich von höchstem Interesse und wird durch den Temperatureinsatzbereich charakterisiert. Sollen die Eigenschaften von unterschiedlichen Thermoplasten miteinander verglichen werden, liefert die Vikat-Erweichungstemperatur (DIN EN ISO 306) einen ersten Anhaltspunkt. Diese gibt an, ab welcher Temperatur ein Körper in den Prüfling aus Kunststoff ohne nennenswerten Widerstand eindringen kann. Die in der Norm vorgegebene Heizrate und die Prüflast blenden ganz bewusst die geometrischen Einflüsse aus. Gut geeignet sind die mit der Norm ermittelten Werte, um Materialvergleiche für einen konkreten Anwendungsfall anzustellen. Formteile aus einem Werkstoff, für die eine höhere Vikat-Erweichungstemperatur ermittelt wurde, dürften auch im konkreten Einsatz bei höheren Temperaturen formstabil bleiben, im Unterschied zu Erzeugnissen aus einem Kunststoff mit geringeren Werten der Vikat-Erweichungstemperatur.

Unzulässig ist aber die Annahme, dass für jeden Anwendungsfall die nach DIN EN ISO 306 bestimmten Werte die Temperatur repräsentieren, bis zu der die Formstabilität der Baugruppe gegeben ist.

Um Rückschlüsse auf die Formstabilität physikalisch begründen zu können, müssen funktionale Abhängigkeiten untersucht werden.

## E-Modul

Eine Größe, welche die Zustandsänderungen sehr deutlich anzeigt, ist die Steifigkeit des Materials, die durch den Zug-E-Modul ausgedrückt wird. Das Bild 1.2 zeigt eine typische E-Modul-Temperatur-Kurve eines teilkristallinen Thermoplasts.



**Bild 1.2** Veränderung des E-Moduls bei der Überschreitung des Phasenumwandlungs-Temperaturbereiches von Thermoplasten

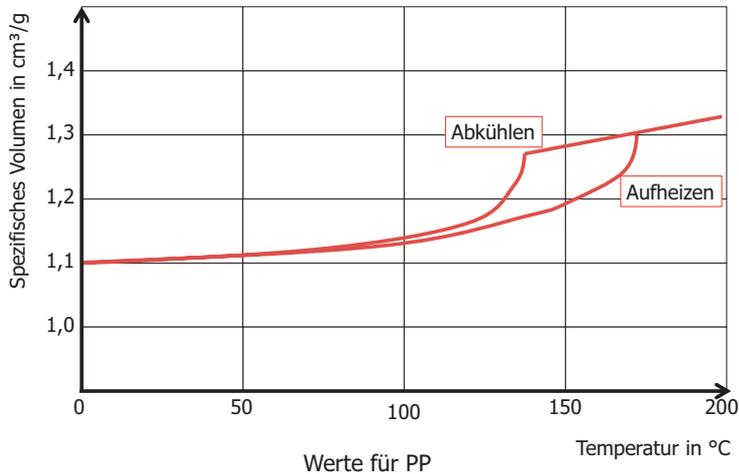
Mit zunehmender Temperatur reduziert sich bei Kunststoffen der E-Modul. Ein plötzlicher Zusammenbruch wie bei reinen Metallen beim Aufschmelzen kommt nicht vor. Bei Thermoplasten ist der Phasenübergang von einer stetigen Abnahme des E-Moduls gekennzeichnet. Wenn der Phasenübergang vollzogen ist und eine zähflüssige Schmelze vorliegt, kann für diese noch ein gewisser Restwert für den E-Modul ermittelt werden.

Der E-Modul des reinen Metalls bricht dagegen bei der Überschreitung des Schmelzpunktes auf nicht mehr bestimmbare Werte zusammen. Bei Metallegierungen außerhalb eines Eutektikums erfolgt die Zustandsänderung über einen Temperaturbereich. Der E-Modul vermindert sich beim Schmelzen von Legierungen allmählich, bis eine vollständige Metallschmelze vorliegt, die einer idealen Flüssigkeit sehr ähnlich ist. In der Schmelze können keine statischen Spannungen übertragen werden.

### 1.1.2 Die Volumenänderung beim Phasenübergang von der Schmelze zum festen Zustand

Dass eine Reststeifigkeit ebenfalls noch im geschmolzenen Zustand erkennbar ist, kann auch mit der molekularen Struktur erklärt werden. Die einzelnen fadenförmigen Makromoleküle unterscheiden sich voneinander in ihrer Länge, ihren Seitenkettenverzweigungen, an den copolymerisierten Anteilen etc. Auch der für alle Kunststoffe beobachtete Phasenübergang in einem mehr oder weniger breiten Temperaturbereich ist in der molekularen Struktur begründet. Im Gegensatz zu Schmelzen reiner Metalle weist eine Polymerschmelze aufgrund ihrer makromolekularen Struktur starke Unterschiede zu einer idealen Flüssigkeit auf. Daraus erklären sich die besonderen Fließeigenschaften der Kunststoffschmelzen.

Bei teilkristallinen Thermoplasten wird beim Phasenübergang von flüssig nach fest eine deutliche Reduzierung des spezifischen Volumens beobachtet (Bild 1.3).



**Bild 1.3** Spezifisches Volumen in Abhängigkeit von der Temperatur für einen teilkristallinen Thermoplast

#### Hysterese

Der in Bild 1.3 sichtbare unterschiedliche Kurvenverlauf beim Aufheizen und Abkühlen wird als Hysterese bezeichnet und erklärt sich durch die makromolekulare Struktur der Thermoplaste. Die Umlagerung der fadenförmigen Molekülketten erfordert eine längere Zeit, als die Platzwechselfvorgänge bei mehr oder weniger kompakten Molekülen von Metallen.

Wie aus Bild 1.3 weiter zu erkennen ist, zeigt ein teilkristalliner Kunststoff, wie das bei der Ermittlung der gezeigten Daten verwendete Polypropylen, im Bereich

des Phasenübergangs eine deutliche Reduktion des spezifischen Volumens. Die Makromoleküle ordnen sich hier zu lokalen Kristalliten und vermindern dabei das freie Volumen des Werkstoffs um fast zehn Prozent. Insgesamt kann sich bei der Abkühlung von Verarbeitungstemperatur (ca. 240 °C) auf Raumtemperatur das spezifische Volumen teilkristalliner Polyolefine um bis zu 20 % vermindern.



Die Kombination von Kunststoff und Metall in einem Bauteil führt wegen der hohen Schwindung der Polymere zu Problemen. So entscheidet man sich beispielsweise bei der Auslegung eines Stecker-Gehäuses für einen amorphen Kunststoff wie Polystyrol, der mit 7 bis 8 % nur eine relativ geringe Schwindung des spezifischen Volumens bei der Abkühlung von Verarbeitungs- auf Raumtemperatur zeigt.

In vielen Fällen werden die, vor dem Füllen der Kavität des Spritzgießwerkzeuges mit Kunststoff, in das Werkzeug eingelegten Stecker-Kontakte erwärmt; um geringere Unterschiede der Schwindung der beiden Materialien bei der Abkühlung zu erreichen

Die Voraussetzung für die Übertragung von Spannungen und somit der Aufnahme und Weiterleitung von Kräften durch das Material ist die Erstarrung des Werkstoffes. Das heißt alle hier angestellten Überlegungen zu den Eigenschaften der Thermoplastschmelzen und den Zusammenhängen beim Übergang zwischen erstarrtem und Schmelzzustand haben eine Bedeutung für die Verarbeitung der Kunststoffe, müssen aber beim Einsatz der Erzeugnisse ausgeschlossen werden.

### 1.1.3 Phasenübergänge am starren Körper

Anders als bei den gebräuchlichen Metallen, wie Stahl oder Aluminium muss man bei Kunststoffen den gesamten Temperatureinsatzbereich für die jeweilige Anwendung unbedingt hinterfragen.

Das bezieht sich nicht nur auf die obere Grenze des Temperatureinsatzbereiches, um ein ungewolltes Anschmelzen von Produkten zu vermeiden. Vor allem Elastomere werden bei sehr tiefen Temperaturen extrem spröde. Bei großer Kälte zerbrechen Formteile aus Gummi spröde, wie Glas, wenn sie schlagartig belastet werden.

Bei einem bekannten Schauexperiment wird ein Gummiformteil in flüssigen Stickstoff plötzlich abgekühlt und anschließend schlagartig belastet. Bei diesem Experiment kommt es immer wieder zu erstaunten Reaktionen der Beobachter, wenn der ehemals weiche Gummi nach dem Aussetzen in den niedrigen Temperaturen wie Glas zersplittert.

Die physikalische Ursache für diese Erscheinung sind Änderungen der mikroskopischen Struktur des Werkstoffs. Die Versprödung setzt dann ein, wenn die Ketten-