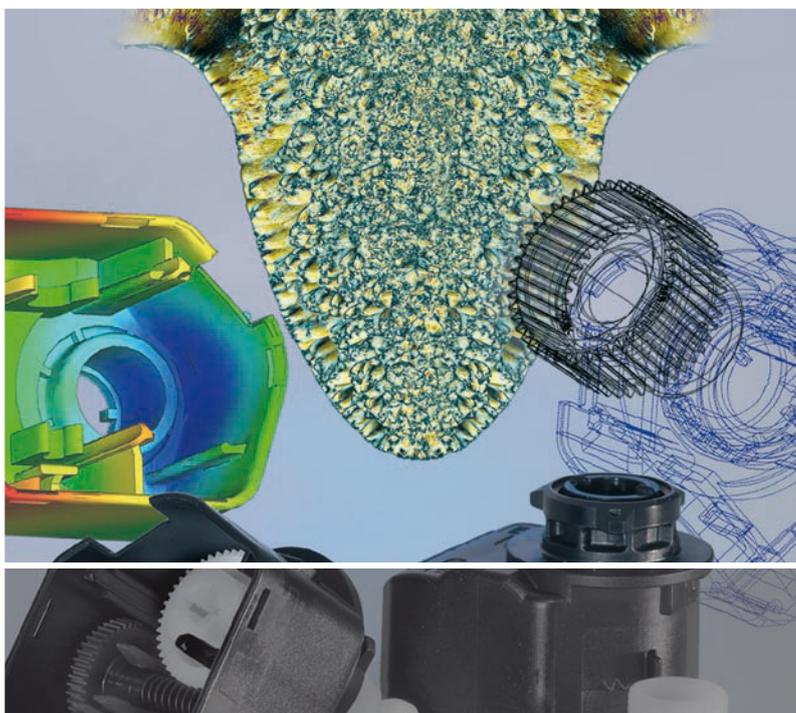


Gottfried W. Ehrenstein

Mit Kunststoffen konstruieren



3. Auflage

HANSER

Gottfried W. Ehrenstein
Mit Kunststoffen konstruieren

Die Internet-Plattform für Entscheider!

- **Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!
- **Richtungweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!
- **Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.DE

Immer einen Click voraus!

Gottfried W. Ehrenstein

Mit Kunststoffen konstruieren

3. Auflage

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried Wilhelm Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik LKT, Universität Erlangen-Nürnberg, Am Weichselgarten 9,
D-91058 Erlangen, ehrenstein@ltk.uni-erlangen.de

zum Titelbild:

Konstruktion, Prozessanalyse und Einzelteile / Baugruppe einer Scheinwerfer-Verstelleinheit
für Pkw, Hersteller: OECHSLER AG, Ansbach

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

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

ISBN: 978-3-446-41322-1

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.

Die in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt
und mit Sorgfalt geprüft. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen.

Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner
Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen in-
folgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung
übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder
Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nach-
druckes 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.

© 2007 Carl Hanser Verlag München

www.hanser.de

Herstellung: Oswald Immel

Satz: PTP-Berlin GmbH, Berlin

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, Rebranding, München

Umschlaggestaltung: MCP • Susanne Kraus GbR, Holzkirchen

Druck und Bindung: Kösel GmbH, Altusried-Krugzell

Printed in Germany

Vorwort zur 3. Auflage

Kunststoffe sind weniger fest und steif als die meisten anderen Konstruktionswerkstoffe, außerdem hängen ihre Eigenschaften stärker von der Verarbeitung ab als dieses zumindest von den Metallen her bekannt ist. Das Konstruieren mit Kunststoffen ist daher ein sehr komplexer Vorgang.

Wegen der großen Anzahl an möglichen Einflussgrößen, die bei einer genaueren Erfassung der Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen wären, wird es bei einer Vielzahl von Kunststofftypen und Beanspruchungsgegebenheiten niemals möglich sein, komplette Materialeigenschaften-Spektren zu ermitteln. Für einen erfolgreichen Konstrukteur ist es jedoch viel wichtiger, sich vertraut zu machen mit dem grundsätzlichen Materialverhalten, dessen möglichen Einflüssen auf die Bauteileigenschaften sowie mit den Verfahren zur Auslegung von Bauteilen unter definierten Anforderungen. Dazu gehören z.B. besondere beanspruchungs-, fertigungs- und kunststoffgerechte Fertigungsprinzipien, spezielle Verbindungstechniken, Verrippungen und andere Versteifungsmöglichkeiten, Maschinenelemente und Mehrkomponenten-Hybridstrukturen. An diesen Beispielen lassen sich das Wissen und die für den Ingenieur so notwendige Intuition schulen und erarbeiten, die es ermöglichen, hochwertige Kunststoffbauteile zu konstruieren und zu entwickeln.

In der 3. Auflage wurden die Inhalte noch einmal sorgfältig überprüft und sinnvoll ergänzt, Berechnungsformeln aktualisiert und Errata korrigiert. Darüber hinaus umfassen die Kurzcharakterisierungen der verschiedenen Kunststoffarten nun auch für den Konstrukteur wichtige Kennwerte, Diagramme zum mechanischen und thermischen Verhalten sowie Richtpreise.

Erlangen, Herbst 2007

G.W. Ehrenstein

Inhalt

1	Eigenschaften – Werkstoffkennwerte	1
1.1	Mechanische Eigenschaften	4
1.1.1	Festigkeits-Kennwerte	6
1.1.2	Verformungs-Kennwerte	9
1.1.3	Einfluss von Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, -dauer und Feuchte	12
1.1.4	Zähigkeit	17
1.1.5	Querkontraktionszahl	20
1.1.6	Statisches Langzeitverhalten	24
1.1.7	Dynamisches Verhalten	35
1.2	Thermische Eigenschaften	41
1.2.1	Temperatur-Steifigkeits-Verhalten	41
1.2.2	Temperatur-Zeit-Grenzen	46
1.3	Kurzcharakterisierung wichtiger Kunststoffe	49
2	Dimensionierung	91
2.1	Dimensionierungskennwerte	91
2.2	Zuverlässigkeit	99
2.3	Ähnlichkeitsbetrachtungen	101
2.4	Prototypen	104
3	Fertigungseinflüsse	111
3.1	Maß- und Formgenauigkeit	111
3.1.1	Schwindungen	111
3.1.2	Toleranzen und Maße	115
3.1.3	Gestaltungseinflüsse	117
3.2	Fertigungsbedingte Einflüsse	121
3.2.1	Bindenaht	121
3.2.2	Molekülorientierungen	123
3.3	Wärmespannungen	124
4	Werkstoff- und beanspruchungsgerechtes Konstruieren	129
4.1	Einfache kombinierte Beanspruchung	129
4.1.1	Biegeweiche Konstruktionen	129
4.1.2	Biegeweiche, zug- und drucksteife Konstruktion	132
4.1.3	Biegeweiche-torsionssteife Konstruktion	133
4.1.4	Biegesteife Konstruktion	134

4.1.5	Biegesteife-torsionsweiche Konstruktionen	135
4.1.6	Torsionsfeste, torsionssteife Konstruktionen	136
4.1.7	Biegesteife, torsionssteife Konstruktionen	136
4.1.8	Torsionsweiche Konstruktionen	139
4.1.9	Zugfeste, zugsteife und torsionsweiche Konstruktionen.	139
4.1.10	Schubfeste, schubsteife Konstruktionen	140
4.1.11	Druckweiche, drucksteife Konstruktionen.	141
4.2	Akustik Design	144
5	Rippen, Sicken, Leichtbau	145
5.1	Versteifungsmaßnahmen	145
5.2	Sicken	146
5.3	Rippen	147
5.3.1	Rippenhöhe	147
5.3.2	Rippenanzahl	147
5.3.3	Rippenkreuzungspunkte	148
5.3.4	Rippenlage.	149
5.3.5	Einspannung.	151
5.4	Fertigungsgerechte Gestaltung.	152
5.4.1	Spritzgegossene Rippen	152
5.4.2	Spritzgegossene Sicken.	154
5.4.3	Blasgeformte Rippen	154
5.4.4	Blasgeformte Sicken	155
5.4.5	Gepresste Rippen	155
5.5	Verbund und Leichtbauwesen	156
5.5.1	Kunststoff-Metall-Verbunde	156
5.5.2	Mehrkomponentenspritzguss	158
5.5.3	Gas-Innendruck-Verfahren	159
5.5.4	Gitterleichtbauweise.	160
6	Verbindungstechnik	163
6.1	Schrauben	163
6.1.1	Gewindeformende Schrauben (aus Metall)	164
6.1.2	Schrauben aus Kunststoffen	170
6.2	Gewindeeinsätze	178
6.3	Angeformte Bauteilgewinde.	185
6.4	Schweißverbindungen	190
6.5	Kleben	195
6.5.1	Klebstoffe.	195
6.5.2	Vorbehandlung.	197
6.5.3	Festigkeit und konstruktive Gestaltung	199
6.6	Outsert-Technik	204
6.7	Umspritzen	208

6.8	Schnappverbindungen	212
6.8.1	Gestaltung	212
6.8.2	Berechnung und Dimensionierung	215
6.8.3	Konstruktionshinweise	223
6.9	Filmgelenke	225
6.10	Klipse	228
6.11	Nieten und Bördeln	230
6.12	Pressverbindungen	231
7	Maschinenelemente	243
7.1	Gleitlager	243
7.1.1	Reibung und Verschleiß	244
7.1.2	Auslegung von Gleitlagern	249
7.2	Rollen	259
7.2.1	Laufrollen	259
7.2.2	Kugellager mit Laufringen aus POM	264
7.2.3	Seilrollen	267
7.3	Zahnräder	270
7.3.1	Werkstoffe	270
7.3.2	Wärmebilanz	272
7.3.3	Tragfähigkeit	275
8	EDV-Unterstützung	281
8.1	Rheologische Auslegung	282
8.2	Bauteil-Auslegung	284
9	Umweltgerechtes Konstruieren	287
9.1	Systematisches Konstruieren	287
9.2	Aspekte des umweltgerechten Konstruierens	288
9.2.1	Rezyklieren	291
9.2.2	Kriterien für das umweltgerechte Konstruieren und Fertigen	293
9.3	Flammschutz	295
Index	299

1 Eigenschaften – Werkstoffkennwerte

Das Verhalten von Kunststoffen wird im Wesentlichen dadurch bestimmt, dass die Grundelemente, die Makromoleküle, eine linienförmige Struktur haben und untereinander durch mechanische Verschlaufungen, physikalische Nebervalenzbindungen oder zusätzlich zu diesen durch chemische Hauptvalenzbindungen untereinander verbunden sind. Die Stärke der chemischen Bindungen ist etwa hundert- bis tausendmal so groß wie die der physikalischen Bindungen. Die chemischen Bindungen sind kovalent und daher gerichtet, d. h. die Elektronen sind fest in die Bindungen zwischen den Atomen eingebunden und können nicht großräumig verschoben werden, weshalb Kunststoffe eine geringe elektrische und thermische Leitfähigkeit haben. Kovalente Bindungen, besonders die sehr häufig auftretenden C-C-Bindungen, sind fester als die metallischen Bindungen, Tabelle 1.1.

Bindungen

Ein Vergleich der theoretisch möglichen Festigkeiten mit den in der Praxis bisher erreichten unterscheidet sinnvollerweise zwischen der Faser- und der kompakten Werkstoffform. Deutlich erkennbar ist, dass die Festigkeiten realer Werkstoffe in kompakter Form weit niedriger sind als die theoretisch möglichen Festigkeiten. Hierbei liegen die klassischen Konstruktionswerkstoffe, Stahl und Aluminium, rund eine Zehnerpotenz günstiger als die Kunststoffe.

Werkstoff	E-Modul [N/mm ²]		Zugfestigkeit			
	theoretisch	experimentell		theoretisch	experimentell	
		Faser	kompakt		Faser	kompakt
Polyethylen	300.000	100.000 (33 %)	1.000 (0,33 %)	27.000	1.500 (5,5 %)	30 (0,1 %)
Polypropylen	50.000	20.000 (40 %)	1.600 (3,2 %)	16.000	1.300 (8,1 %)	38 (0,24 %)
Polyamid	160.000	5.000 (3 %)	2.000 (1,3 %)	27.000	1.700 (6,3 %)	50 (0,18 %)
Glas	80.000	80.000 (100 %)	70.000 (87,5 %)	11.000	4.000 (36 %)	55 (0,5 %)
Stahl	210.000	210.000 (100 %)	210.000 (100 %)	21.000	4.000 (19 %)	1.400 (6,67 %)
Aluminium	76.000	76.000 (100 %)	76.000 (100 %)	7.600	800 (10,5 %)	600 (7,89 %)

Tabelle 1.1: Vergleich der theoretischen und experimentell ermittelten Werte für Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit verschiedener Werkstoffe

Bei den klassischen Werkstoffen bestehen zwischen den theoretischen und den realen Elastizitätsmoduln keine Unterschiede. Bei den Kunststoffen sind sie deutlich, vor allem bei Kunststoff in kompakter Form. Die Unterschiede bei den Elastizitätsmoduln sind nicht so ausgeprägt wie die Unterschiede bei den Festigkeiten.

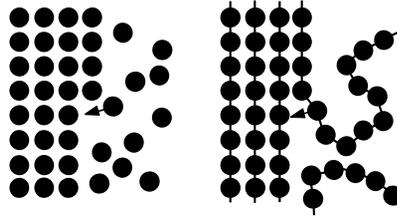


Bild 1.1: Schematische Darstellung des Elementarschritts bei der Kristallisation eines niedermolekularen oder atomaren Stoffs (links) und eines Makromoleküls (rechts) (nach Schultz)

Vergleich Metalle

Verallgemeinert kann man davon ausgehen, dass die Steifigkeit der Kunststoffe etwa 1/100, die Festigkeit aber 1/10 der Metalle beträgt. Da die Ausbildung an den Hochschulen in den meisten Fächern „stahlorientiert“ ist, ist beim Konstruieren mit Kunststoffen im Vergleich zum Stahl die unterschiedliche Steifigkeit besonders zu berücksichtigen. Kunststoffgerechte Konstruktionen können aber auch Vorteile aus den besonderen Verformbarkeiten schöpfen.

Die weniger festen physikalischen Bindekräfte sind relativ leicht reversibel lösbar durch Wärme, Lösemittel und mechanische Kräfte, ohne dass der Werkstoff chemisch verändert wird. Sie können sich dementsprechend reversibel an anderer Stelle neu bilden. Hierauf beruhen die meisten Verarbeitungsverfahren, das Aufschmelzen und Spritzgießen in geschlossene Werkzeuge, das Extrudieren durch formende Düsen, das Warmumformen oder das Vergießen als lösemittelhaltige Harze oder Lacke und Dispersionen sowie die weniger gebräuchliche spanende Bearbeitung. Chemische Bindekräfte können nur durch Zerstören, z. B. Verbrennen, chemischen Angriff oder Strahleneinwirkung und dann immer irreversibel gelöst werden. Auch bei chemisch vernetzten Kunststoffen wirken zusätzlich physikalische Bindekräfte, diese können gelöst (= erweicht) werden, während die chemischen erhalten bleiben.

Unterschiede in der Struktur und beim Erreichen eines Gleichgewichtszustandes lassen sich anschaulich aus einer modellhaften Darstellung des Aufbaus der Metalle aus einzelnen Atomen, die regelmäßige Gitterplätze einnehmen, und Kunststoffen aus kettenförmigen Makromolekülen, die entweder wirt im Raum verteilt (amorph) oder teilweise kristallin geordnet (teilkristallin) sind. Zum Erreichen dieser Anordnung benötigen Metalle sehr viel weniger Zeit als teilkristalline Thermoplaste, Bild 1.1. Während Metallatome ohne wechselseitige Beeinflussung ihre Gitterplätze einnehmen, ziehen Makromoleküle quasi einen Schwanz hinter sich her, der zudem andere Molekülabschnitte erst zur Seite drängen muss.

Morphologie

Der Vorgang ist zeitabhängig. Er kann durch Abkühlen im unzureichend erwärmten Werkzeug und dem damit verbundenen Reduzieren der Molekülbeweglichkeit behindert oder sogar abgebrochen werden. Dadurch entstehen unterschiedliche Strukturen im gleichen Bauteil. Bei dem Druckknopf aus POM ist die Gleitfläche wenig kristallin und damit weicher und verschleißempfindlicher, im Inneren ist das Gefüge dagegen kristalliner, fester und härter, Bild 1.2. Die Lunker ergeben sich durch die mit der Kristallisation verbundene Schwindung im Material, die durch Nachdrücken von Schmelze nicht ausgeglichen werden konnte. Je höher die Molekülbeweglichkeit, z. B. durch erhöhte Temperaturen, ist und je mehr Zeit zur Verfügung steht, umso vollständiger läuft die Kristallisation ab, die zwischen 30 und 70 % im Endzustand beträgt.

In Bereichen kristalliner Anordnung der Makromoleküle wirken die physikalischen Bindekräfte optimal und können nur mit erhöhter Energie (Wärme) bei der Kristallschmelztempe-

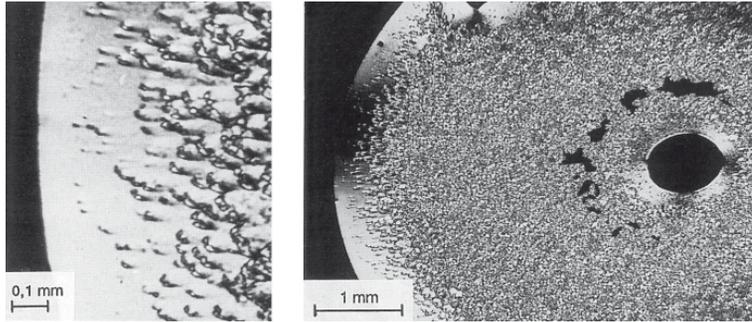
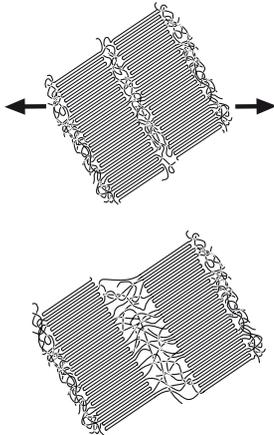


Bild 1.2: Schnitt durch einen Druckknopf aus POM mit amorpher Randzone und Lunker mit Ausschnittvergrößerung (links)

ratur gelöst werden, während der Zusammenhalt zufällig günstig liegender Makromoleküle im amorphen Bereich bei deutlich geringerer Temperatur, der Glasübergangstemperatur, erweicht, Bild 1.3. Die Glasübergangstemperatur, s. Kapitel 1.2.1 und Bild 1.42, ist die Temperatur größter Änderungen der Steifigkeit im nicht geschmolzenen Zustand. Solange die Kristallschmelztemperatur nicht erreicht ist, liegt trotzdem ein fester Werkstoff vor. Sind die amorphen Bereiche erweicht, verhalten sie sich duktil.

Unterhalb der Erweichungs(Glasübergangs-)temperatur sind die amorphen und die kristallinen Bereiche spröde und fest. Daraus folgt, dass amorphe Thermoplaste nur unterhalb der

Erweichungs-/ Schmelztemperatur



Kunststoff	Feuchte [%]	T _g [°C]	T _m [°C]
PE		- 125	135
PP		20	170
POM		- 65	178
PET		80	255
PBT		43	223
PA 6	tr 0,2	78	223
	lf 3,0	28	223
	n 8,0	- 8	223
PA 46	tr 0,2	94	287
	lf 3,5	31	287
	n 9,7	- 10	287
PA 66	tr 0,2	90	264
	lf 2,7	39	264
	n 7,2	- 6	264
PA 610	tr 0,1	77	222
	lf 1,5	48	222
	n 3,2	19	222
PA 66/PA6	tr 0,2	81	243
	lf 2,7	29	243
	n 7,4	- 6	243
PA (amorph)	tr 0,3	152	-
	lf 2,9	114	-
	n 5,0	97	-

Bild 1.3: Verformung eines teilkristallinen Thermoplasten unterhalb und oberhalb der Glastemperatur (T_g), (nach Ingram, Kiko, Peterlin); T_m = Kristallschmelztemperatur; Bestimmung von T_g, s. Bild 1.41

tr. = trocken = keine Feuchtigkeit; lf. = luftfeucht = Feuchtigkeitsgehalt im Klima 23 °C – 50 % rel. Feuchte; n = nass = Feuchtigkeitsaufnahme im Wasser.

Erweichungstemperatur konstruktiv eingesetzt werden können, bei teilkristallinen halten die kristallinen Bereiche den Werkstoff dagegen auch bei höheren Temperaturen zusammen. Unterhalb der Erweichungstemperatur bei spröden (eingefrorenen) amorphen Bereichen verhält sich ein teilkristalliner Thermoplast spröde und hart. Oberhalb der sich über einen großen Temperaturbereich erstreckenden Erweichung (wenige $zig\text{ }^{\circ}\text{C}$) wird der gleiche Werkstoff zäh und duktil.

Bei räumlich vernetzten Duroplasten gilt vergleichbares, besonders bei den weitmaschig vernetzten Elastomeren. Die chemischen Bindungen halten den Werkstoff zusammen, sind die physikalischen Bindungen erweicht, ist der Werkstoff zäh.

1.1 Mechanische Eigenschaften

Bei der Verformung von Kunststoffen unter der Einwirkung einer äußeren Kraft kann man drei Verformungsanteile unterscheiden, die sich überlagern:

- spontan, *elastische* Verformung (spontan reversibel),
- zeitabhängig *viskoelastische oder relaxierende* Verformung (zeitabhängig reversibel),
- zeitabhängig *viskose* Verformung (zeitabhängig irreversibel).

Verformung Die Verformungserscheinungen sind durch die im Kunststoff ablaufenden molekularen Verformungs- und Schädigungsmechanismen charakterisiert. Die *rein elastische* Verformung ist auf spontane Abstandsänderungen von Atomen und Valenzwinkelverzerrungen zurückzuführen. Besonders die festen chemischen Bindungen zeigen dieses Verhalten. Bei der *zeitabhängig viskoelastischen oder relaxierenden* Verformung benötigen die Moleküle oder Molekülgruppen eine gewisse Zeit, um durch Umlagerung in eine den einwirkenden Spannungen entsprechende Gleichgewichtslage der Verformung zu kommen. Der Kunststoff reagiert auf eine aufgeprägte Beanspruchung also mit gewisser Zeitverzögerung, gekennzeichnet durch die Relaxationszeit.

Relaxation Unter der *Relaxationszeit* versteht man die Zeit, bis zu der die relaxierende Verformung bei konstanter Spannung $1 - 1/e = 0,632$ der Endverformung erreicht hat oder bis zu der die Spannung bei konstanter Dehnung auf $1/e$ oder $0,368$ der Anfangsspannung zurückgegangen ist, Bild 1.4. Ein großer Teil dieser Verformungen geht nach Entfernen der Beanspruchung wieder zurück, er ist zeitabhängig reversibel. Den nicht zurückgehenden Anteil, bedingt durch nicht rückstellbare, irreversible Molekülumlagerungen, nennt man *viskos*. Die zeitabhängig relaxierenden und viskosen Verformungen hängen mit der mechanischen Lösbarkeit der physikalischen Bindungen zusammen.

Die Relaxation tritt sowohl bei Verformung als auch bei Belastung auf. Wird ein Körper plötzlich deformiert, baut sich in ihm zunächst eine relativ hohe Spannung auf, die aber im Laufe der Zeit immer weiter abklingt (*Spannungsrelaxation*). Auch hier bewirken die langen und verknäulten Kettenmoleküle durch Umlagerungen die verzögerte Einstellung des Gleichgewichts. Neben der Spannungsrelaxation gibt es die *Dehnungsrelaxation*. Aufgeprägte Spannungen führen zu einer zeitabhängigen Verformung, auch *Retardation* oder *Kriechen* genannt, wie z. B. beim Abplatteln einer Rolle am Auflagepunkt, wobei durch die vergrößerte Auflagefläche die Spannung erniedrigt wird. Normalerweise wird bei der Spannungsrelaxa-

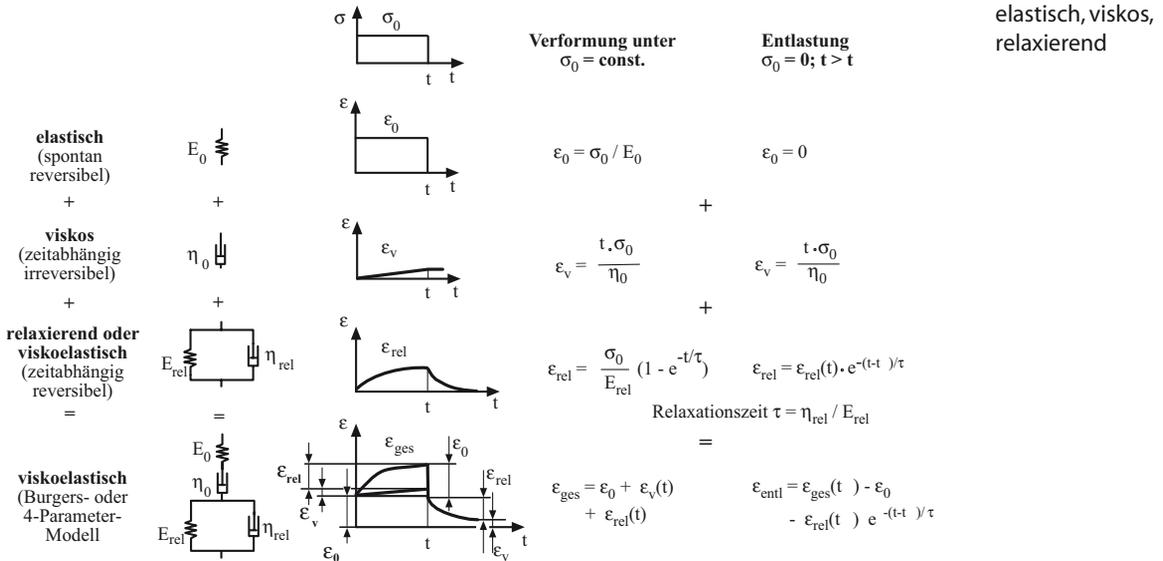


Bild 1.4: Beschreibung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen mit dem 4-Parameter-Modell

tion durch die abnehmende Spannung im Vergleich zur Dehnungsrelaxation mit konstanter Spannung die Belastung des Bauteils geringer.

Dieses Materialverhalten kann im Prinzip durch das sogenannte 4-Parameter-Modell aus hintereinander- und parallelgeschalteten Federn und Dämpfern dargestellt werden, Bild 1.4. Es besteht aus einer Feder, kennzeichnend den E-Modul E_0 , und einem dazu in Serie geschalteten Dämpfungstopf mit der Viskosität η_0 . Dazu kommt ein Parallel-Element aus einer Feder E_r und einem Dämpfer η_r . Der übliche, nach Norm bestimmte E-Modul entspricht etwa dem Wert von E_0 , da er bei sehr niedrigen Belastungen und relativ zügig (< 1 min) gemessen wird. Die elastische Verformung bei einer plötzlichen Belastung ist durch die Beziehung $\epsilon_0 = \sigma/E_0$ gekennzeichnet, die viskose Verformung ϵ_v durch die Höhe und Dauer der einwirkenden Spannung σ_0 und umgekehrt proportional durch die Viskosität η_0 , $\epsilon_v = \sigma_0 \cdot t/\eta_0$.

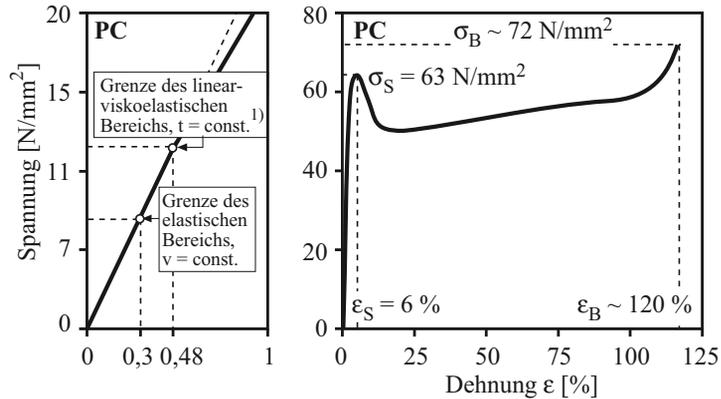
Beim Dämpfungskolben stellt sich die Spannung proportional der Dehnungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ multipliziert mit der Viskosität η_0 ein, also $\sigma = \eta_0 \dot{\epsilon}$. Eine endliche, aber zeitlich verzögerte Verformung ergibt sich beim parallelen Feder-Dämpfer-Element. Aus diesen Beziehungen wird anschaulich, dass Kunststoffe bei einer höheren Belastungsgeschwindigkeit, aber gleicher Verformung, eine höhere Spannung und damit ein größeres Verhältnis von Spannung zu Dehnung, d. h. einen höheren E-Modul aufweisen, s. a. Bild 1.12

Solange die Gesamtverformung rein additiv aus den Einzelverformungsanteilen (elastisch ϵ_{el} + relaxierend ϵ_{rel} + viskos ϵ_v) zusammengesetzt werden kann, spricht man von *linear-viskoelastischem* Verhalten, Bild 1.5. Ein linear-viskoelastisches Verhalten bedeutet, dass die elastischen und nichtelastischen Verformungsanteile direkt lastabhängig sind. Jegliche Schädigung oder zum Versagen führende zusätzliche nichtelastische Verformung ist nicht mehr direkt proportional zur Last, der Kunststoff verhält sich also nicht mehr linear-viskoelastisch. Das durch stärkere nichtelastische und nichtreversible Verformungsanteile gekennzeichnete Verhalten oberhalb dieser Grenze heißt *nichtlinear-viskoelastisch*. In diesem Belastungsbereich

E-Modul

Dämpfung

linear-viskoelastisch



Werkstoff	σ_0 [N/mm ²]	σ_{ev} [N/mm ²]	E [N/mm ²]
PP	1,5	2,5	1450
PA66 lf.	3,0	5,0	1300
PBT	3,0	5,0	2600
POM	5,0	7,0	2900
ABS	5,0	7,0	2400
PC	7,0	11,0	2300
SAN	7,0	10,0	3700

Bild 1.5: Spannungen bei der Grenze der elastischen (σ_0) und der linear-viskoelastischen (σ_{ev}) Verformung bei Polycarbonaten (PC) und anderen Thermoplasten
¹⁾ aus isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagrammen übernommen

wird eine analytische Darstellung der Zusammenhänge von Last, Verformung und Zeit zunehmend kompliziert und ist in geschlossener Form nicht möglich. Leider werden die meisten konstruktiven Anwendungen in diesem Bereich belastet, was die Berechnung und Gestaltung von Bauteilen verglichen z. B. mit den elastischen Metallen sehr erschwert. Die Grenze der elastischen und linear-viskoelastischen Verformung liegt bei den meisten Thermoplasten und Elastomeren weit unterhalb der Bemessungsgrenzwerte, Bild 1.5.

Die Grenze der elastischen Verformung ergibt sich bei Abweichung vom linearen Verlauf beim üblichen σ - ϵ -Diagramm (Abzugsgeschwindigkeit = const.). Das Gleiche gilt für die Grenze der linear-viskoelastischen Verformung beim isochronen σ - ϵ -Diagramm (Zeit = const.).

1.1.1 Festigkeits-Kennwerte

Die Kennwerte von Kunststoffen hängen in hohem Maße von den Fertigungs- und den Prüfbedingungen ab. Daher ist beim Vergleich von Kennwerten und einer daraus abgeleiteten Werkstoffauswahl auch bei ähnlichen Kunststoffen Vorsicht geboten.

Statt einer Vielzahl möglicher Messwerte sollte man sich auf eine begrenzte Anzahl aussagekräftiger Kennwerte und -funktionen konzentrieren, die nach definierten Prüfbedingungen ermittelt werden. Ebenso sollten die Probekörperperform und die Fertigungsparameter der Proben festgeschrieben sein.

Die hierzu entwickelten Normen sind die Basis der PC-Datenbank *CAMPUS* (Computer Aided Material Preselection by Uniform Standards) von verschiedenen Kunststoffherstellern. Ziel der Probekörperherstellung und -prüfung nach *CAMPUS* ist der Vergleich der Werkstoffeigenschaften unter einheitlichen Bedingungen für Probekörpergeometrie, Werkzeugprinzip, Fertigungs- und Prüfbedingungen auf der Basis der internationalen Normen. Für die Dimensionierung ergeben sich folgende *Festigkeitskennwerte*, Bild 1.6:

CAMPUS

- *Streckspannung* σ_s als diejenige Zugspannung, bei der die Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve erstmals den Wert 0 annimmt,
- *Zugfestigkeit* σ_B als die Spannung bei Höchstkraft im Zugversuch,
- *x %-Dehnspannung* $\sigma_{x\%}$ als diejenige Zugspannung, bei der die Spannungs-Dehnungs-Kurve vom anfänglich linearen Verlauf um x %-Dehnung abweicht,
- *Bruchspannung* σ_R beim Reißen, wenn keine Streckspannung oder x %-Dehnspannung besteht bzw. ermittelt werden kann.

Spannung

Die x %-Dehnspannung kann als Dimensionierungskennwert verwendet werden, wenn die Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Werkstoffs keine ausgeprägte Streckspannung aufweist und der Bruch erst bei hohen Dehnungswerten erfolgt, also bei ausgeprägt nichtlinearem Werkstoffverhalten.

Alle Kurzzeit-Bemessungskennwerte können den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen entnommen werden, Bild 1.6. Der wichtigste Festigkeitskennwert ist die *Zugfestigkeit* mit einem eindeutigen, über dem Querschnitt gleichmäßigen und daher am besten überschaubaren Spannungszustand. Allerdings wirken sich Risse und Fehlstellen wegen der damit verbundenen Kerbspannungen festigkeitsmindernd aus.

Zug

Neben den Kennwerten aus dem Zugversuch werden immer wieder auch solche aus dem Biegeversuch gewünscht mit der Begründung, dass die Biegebeanspruchung eine häufige Belas-

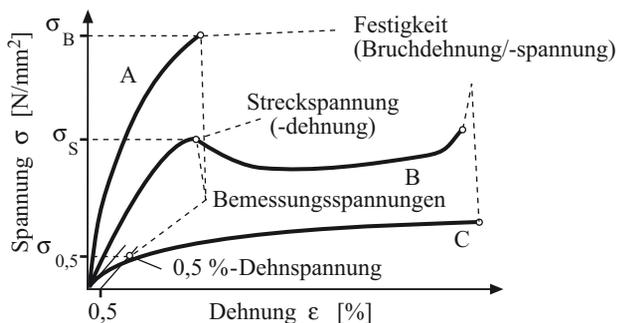


Bild 1.6: Bemessungskennwerte aus Spannungs-Dehnungs-Kurven im Zugversuch

- A: spröde Werkstoffe
- B: zähe Werkstoffe mit Streckgrenze
- C: zähe Werkstoffe ohne Streckgrenze

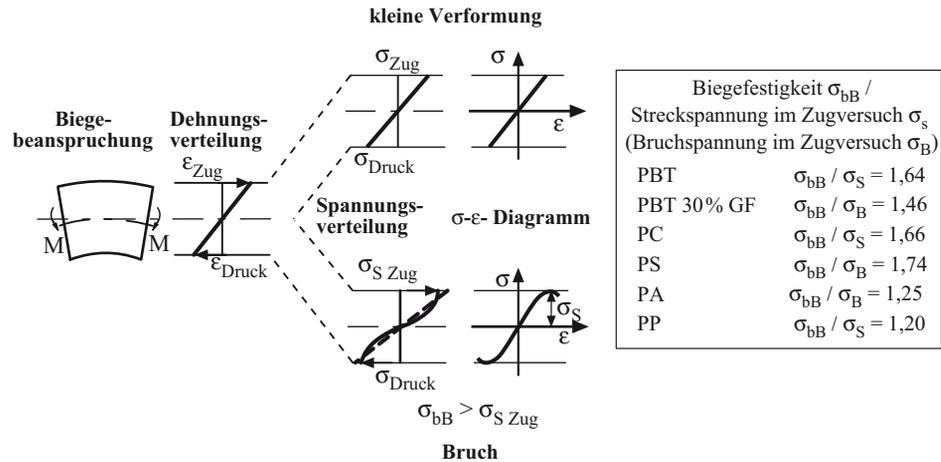


Bild 1.7: Dehnungs- und Spannungsverteilung bei Biegebelastung (nach Oberbach)

Biegung tungsart in der Praxis sei. Gegen die zusätzliche Angabe der *Biegefestigkeit* sprechen einige Punkte. Wie aus Bild 1.7 hervorgeht, ist der Spannungs-Dehnungs-Verlauf über dem Querschnitt nur bei kleinen Dehnungen linear. Bei höheren Lasten liegt zwar eine lineare Dehnungsverteilung über die Höhe des Biegekörpers vor, die Spannungsverteilung ist jedoch entsprechend den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für Zug und Druck leicht S-förmig. Dieser nichtlineare Spannungsverlauf wird bei der üblichen Berechnung der Randfaserspannung aus dem Biege- und Widerstands-Moment ($\sigma = M/W$) nicht berücksichtigt. Man erhält eine fiktive Biegespannung σ_{bB} , die deutlich über der im Zugversuch ermittelten Streckspannung σ_S liegt.

Die nach Norm bestimmte Biegefestigkeit ist also zumindest bei Thermoplasten unrealistisch hoch. Bei der Anwendung von Biegefestigkeitswerten bei der Berechnung wird dieser Fehler wieder kompensiert, aber nur, wenn die Wanddicke in vergleichbarer Größenordnung wie die Prüfkörperdicke ist. Entsprechendes gilt auch für den E-Modul. Zudem weisen nur wenige biegebeanspruchte Bauteile auch eine reine Biegespannung auf. Bei einem Doppel-T-Träger treten z. B. in den Gurtzonen nahezu konstante Zug- bzw. Druckspannungen auf, so dass hier die Zug- oder die Druckfestigkeit das Bemessungskriterium sein muss. Im Steg selbst ist besonders bei 3-Punkt-Biegebelastung oder einem eingespannten Kragträger mit zusätzlichem Schub zu rechnen. Wie sehr die an identischen Materialien gemessenen σ - ϵ -Diagramme bei Zug-, Druck- und Biegebelastung voneinander abweichen, zeigt Bild 1.8.

Druck Die *Druckfestigkeit* σ_{dB} wird wegen der Knickgefahr an kurzen Prüfkörpern gemessen. Dabei führen die mangelnde Parallelität und Ebenheit der beanspruchten Oberfläche und in die Probekörper hineinwirkende mehrachsige Verformungsbehinderungen (Druckkegel, Auflagerreibung) häufig zu Verfälschungen der Ergebnisse. Andererseits sind Kerben und kleine Risse im Gegensatz zur Zugbelastung unerheblich, weil sie sich unter Druck schließen. Die Druckfestigkeit ist daher immer höher als die Zugfestigkeit. Eine Ausnahme bilden die langfaserverstärkten Kunststoffe, besonders die Duroplaste, bei denen die Faserfestigkeit dominiert.

Schub Die *Schubfestigkeit* τ_B kann definiert an zylindrischen Probekörpern unter Torsionsbeanspruchung gemessen werden. Ein Beulen ist jedoch bei normalen Thermoplasten wegen deren

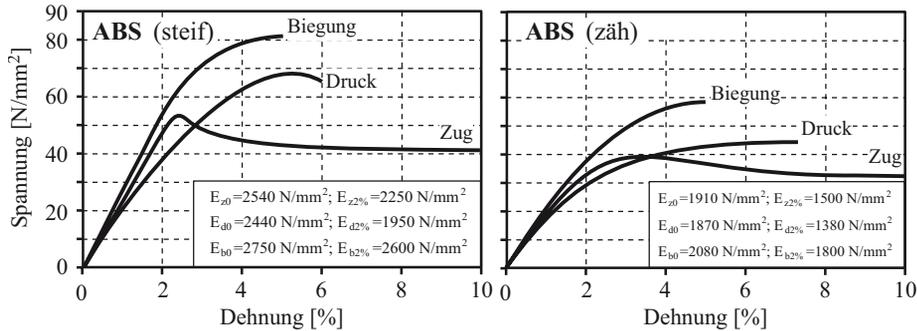


Bild 1.8: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für ein steifes (links) und ein hochzähes (rechts) Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat (ABS) unter (z) Zug-, (d) Druck- und (b) Biegebelastung

E_0 = E-Modul als Anfangssteigung durch Null;
 $E_{S2\%}$ = Sekantenmodul zwischen 0 und 2 % Verformung

niedriger Steifigkeit praktisch nicht zu vermeiden. Die Schubfestigkeit τ_B wird daher besser aus der Zugfestigkeit σ_{zB} nach der Schubspannungsversagenshypothese mit $\tau_B = 0,5 \sigma_{zB}$ bestimmt. Ist der Spannungszustand genau bekannt, kann auch nach der Gestaltänderungshypothese (Huber, von Mises, Henky) mit $\tau_B = 0,58 \sigma_{zB}$ gerechnet werden. Daher gilt generell:

Schubfestigkeit < Zugfestigkeit < Druckfestigkeit < Biegefestigkeit

Ein weiterer Grund spricht gegen die Angabe mehrerer unterschiedlicher Festigkeitskennwerte. Unterschiedliche Geometrien und Herstellbedingungen von Probekörpern können, z. B. durch Molekül- oder Verstärkungsmittellorientierung, zu einer Festigkeitsanisotropie führen, die wesentlich größer ist als z. B. der Unterschied zwischen der Zug- oder Druckfestigkeit am gleichen Probekörper. Viel wichtiger als ein zweiter Festigkeitskennwert wären deshalb z. B. längs und quer zur Fließrichtung der Schmelze bei der Werkzeugfüllung gemessene Kennwerte. Mit der Zugfestigkeit liegt man immer auf der sicheren Seite, da sie niedriger als die Druck- und Biegefestigkeit ist. Deshalb und wegen der überschaubareren Versuchstechnik wird sie daher bevorzugt.

1.1.2 Verformungs-Kennwerte

Den im vorherigen Abschnitt für die Dimensionierung definierten Festigkeitskennwerten können entsprechende Verformungskennwerte zugeordnet werden, Bild 1.6 und Bild 1.9:

- *Streckdehnung* ϵ_S bei der Streckspannung σ_S ,
- *Bruchdehnung* ϵ_B bei der Bruchspannung σ_B ,
- *Elastizitätsmodul* E_0 beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung und zugeordneter Verformung, im linearen Bereich gilt das Hookesche Gesetz $E = \sigma/\epsilon = \text{const.}$,
- *Sekantenmodul* E_S kennzeichnet den Widerstand gegen Verformung am Belastungspunkt,

- *Tangentenmodul* E_T kennzeichnet das Steifigkeitsverhalten am Lastpunkt gegenüber zusätzlicher Belastung,
- *Kriechmodul* E_C ist für zeitabhängige Belastungen definiert als das Verhältnis zwischen Spannung und der zeitabhängig sich einstellenden Verformung, $E_C = \sigma/\epsilon_{ges}(t)$, s. a. Bild 1.4.

Die Verformung von Kunststoffen ergibt sich aus der additiven Überlagerung des elastischen, relaxierenden und viskosen Anteils. Da die beiden letzteren zeit- und belastungsabhängig sind, verhält sich ein Kunststoff umso linearer bzw. elastischer, je schneller er belastet wird. Bei normaler statischer Beanspruchung ist die Grenze, bei der mit zunehmender Spannung das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von dem linearen Verhalten abweicht, sehr niedrig. Besonders bei erhöhten Temperaturen ist selbst bei niedriger Verformung keine Linearität mehr gegeben.

E-Modul Aus messtechnischen Gründen wird der *Elastizitätsmodul* nicht als Tangente durch den Nullpunkt, sondern als Sekante zwischen 0,05 % und 0,25 % Dehnung gemessen. Eine geringe untere Belastung ist die Voraussetzung für das Funktionieren der Messgeräte. Damit wird $E_o = (\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}) / (\epsilon_{0,25} - \epsilon_{0,05})$. Diese Festlegung ist für Kunststoffe besonders bei ausgeprägt nichtlinearem Verformungsverhalten nötig, um einen Materialvergleich zu ermöglichen. Damit ist das Verformungsverhalten aber nicht ausreichend gekennzeichnet. Es werden daher

Nullpunktsmodul drei Elastizitätsmoduln definiert, Bild 1.9. Der Konstrukteur wird den normgerecht gemessenen *Elastizitäts-* oder *Nullpunktsmodul* E_o ohnedies nur zum Werkstoffvergleich bzw. zur Werkstoffauswahl verwenden. Da Konstruktionen aus Kunststoffen i. a. über $\epsilon = 0,25$ % beansprucht werden, wird für Berechnungen solcher Bauteile der *Sekantenmodul* E_s eingeführt. Unter dem Sekantenmodul wird formal der Quotient aus der durch die Belastung erzeugten Spannung σ und der dabei auftretenden Dehnung ϵ verstanden, $E_s = \sigma/\epsilon$. Er nimmt also mit zunehmender Belastung ab. Mit ihm wird versucht, auf vereinfachte Weise das nichtlineare Werkstoffverhalten bei Verformungsberechnungen zu berücksichtigen. Eine dritte Möglichkeit ergibt sich durch den sog. *Tangentenmodul*, der die Steigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms an einem bestimmten Punkt kennzeichnet. Er ist für die Praxis i. a. von geringerer Bedeutung und nur zur Kennzeichnung des weiteren Verformungsverhaltens von vorbelasteten Bauteilen nützlich, z. B. durch Beulung.

Tangentenmodul

Für die geschilderten Vorgänge spielt selbstverständlich neben der Zeit und der Höhe der Belastung die Einsatztemperatur eine maßgebliche Rolle, insbesondere hinsichtlich ihrer

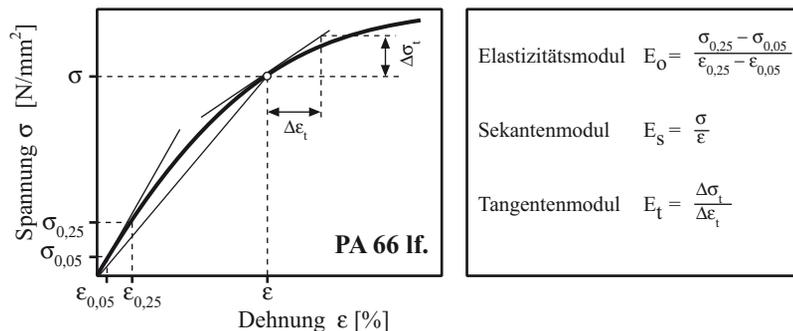


Bild 1.9: Definition verschiedener Elastizitätsmoduln zur Kennzeichnung des Verformungsverhaltens von Kunststoffen

relativen Lage zur Glasübergangstemperatur T_g . Bei einer Einsatztemperatur deutlich oberhalb von T_g verhalten sich die Kunststoffe duktil und zäh, unterhalb dagegen spröde. Dieses gilt insbesondere bei teilkristallinen Thermoplasten, deren amorphe Phase erweichen kann, ohne dass der durch die kristallinen Bereiche fest zusammengehaltene Werkstoff seine Gebrauchstauglichkeit verliert.

Die Dehnungen sind an die Spannungen gebunden. In Bild 1.6 sind die den definierten Festigkeiten zugeordneten Dehnungen angegeben. Für die Auslegung von Bauteilen eignen sich die *Bruchdehnung* bei spröden Kunststoffen, die *Streckdehnung* bzw. die *0,5 %-Dehnung* bei zähen Werkstoffen ohne Streckgrenze. Die *Bruchdehnung* bei zähen Kunststoffen liegt weit oberhalb zulässiger Verformungen, ihr Wert ist dennoch für die Bewertung von Kunststoffen von Interesse, da ihr Abstand zur Streckdehnung die Verformungsreserve bei kritischer Belastung angibt und damit eine Schadenstoleranz.

Verformungen kennzeichnen gemeinsam mit der dabei auftretenden Last die *Zähigkeit* (E: toughness) eines Werkstoffs. Auch eine große Gesamtverformung kann alleine keine hohe *Energieabsorption* kennzeichnen, diese ist jedoch bei einer kleinen Dehnung nicht möglich. Die *Streckdehnung* kennzeichnet eine eindeutige Belastungsgrenze. Oberhalb dieser Grenze treten zwar strukturell interessante Phänomene auf, die bauteilbestimmende Gestalt wird jedoch durch die hier eintretende Verstreckung so geändert, dass die geometrischen Festlegungen nicht mehr eingehalten werden können.

Ohne Belastung ergibt sich zunächst keine Verformung, auch wenn eine nicht messbare Verformung durchaus nicht den Rückschluss auf fehlende Belastung zulässt. Bei mehrachsiger Beanspruchung können der Belastungsdehnung entgegenwirkende Querverformungen die angezeigte Dehnung erheblich reduzieren. Die Bewertung von Kunststoffen nach *zulässigen Dehnungen* (E: allowable strain) ist häufig sogar einfacher als nach zulässigen Spannungen, da die Dehnungskennwerte viel weniger empfindlich auf Einflussparameter reagieren als Spannungen/Festigkeiten. In Bild 1.10 sind Spannungs-Dehnungs-Diagramme für einen amorphen Thermoplasten, schlagfestes Polystyrol (SB), und einen teilkristallinen Thermoplasten, Polyamid 66 trocken (PA 66), aufgetragen. Während die Streckspannung mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit und noch mehr mit sinkender Temperatur deutlich steigt, ändert sich in allen Fällen die Streckdehnung nur unwesentlich. Daraus abgeleitete zulässige Dehnungswerte sind daher sinnvoller und viel einfacher zu handhaben als parameterabhängig ermittelte zulässige Spannungen. Ein weiteres Argument für die Dehnungsbetrachtung ergibt sich daraus, dass Beanspruchungen an Bauteilen am besten mit Dehnmessstreifen erfasst werden können.

Zudem muss berücksichtigt werden, dass Bauteile aus Metallen viel häufiger auf zulässige Spannungen als auf Überschreiten zulässiger Verformungen hin dimensioniert werden müssen. Da das Verhältnis der Festigkeiten zwischen Metallen und Kunststoffen im Mittel ca. 10, das der E-Moduln aber 100 beträgt, ist eine Auslegung gegenüber zulässigen Verformungen bei Kunststoffen von viel größerer Bedeutung. Den meisten stahlgeschulten Ingenieuren fehlt zudem das Gefühl für Verformungsbetrachtungen, die der Konstrukteur von Kunststoffteilen kennen muss.

Ein erhebliches Problem stellt aber das Fehlen einer geeigneten und erprobten Dehnungsver-sagenshypothese dar, sodass zulässige Vergleichsdehnungen kaum zuverlässig ermittelt werden können. Dehnungshypothesen werden sinnvoll verwendet bei eingepprägten Verformungen (z. B. Wärmedehnung), duktilem Verformungsverhalten (Kriechen, Fließen) und Kenntnis des Verformungszustandes aufgrund von Messungen (auch Spannungen werden mittels

Bruchdehnung

0,5 %-Dehnung

Zähigkeit

Streckdehnung

Temperatur

Belastungs-
geschwindigkeitDehnungs-
hypothese

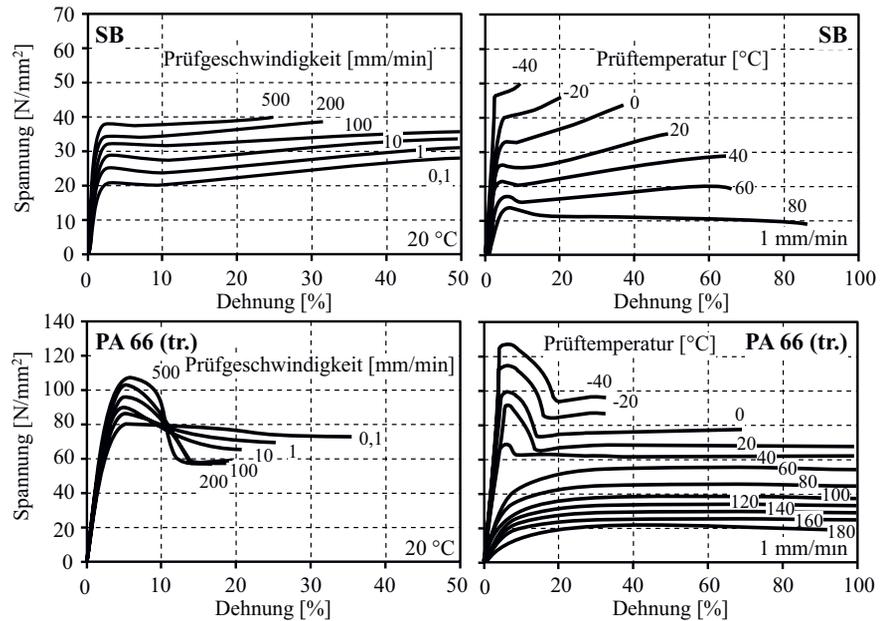
σ - ϵ -Diagramm

Bild 1.10: Spannungs-Dehnungs-Kurven in Abhängigkeit von Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur
 oben: schlagfestes Polystyrol (SB) (amorpher Thermoplast)
 unten: Polyamid 66 trocken (PA 66) (teilkristalliner Thermoplast)

Verformungen bestimmt). Zu nennen ist die *Hauptdehnungshypothese* (E: maximum strain theory), die die größte Schubverzerrung γ_{\max} bewertet, aus der wiederum eine Vergleichsdehnung ϵ_V berechnet werden kann: $\epsilon_V = \gamma_{\max} / (1 + \nu)$. Zudem kann nach Huber-v. Mises-Hencky analog zur Vergleichsspannung eine Vergleichsdehnung abgeleitet werden.

kritische Dehnung

Bedeutung gewonnen hat bisher in der Kunststofftechnik die kritische Dehnung nach Menges, der einen maximal zulässigen Hauptdehnwert $\epsilon_V < \epsilon_{\text{krit}}$ als Belastungsgrenze für Belastungen verschiedener Art definiert. Als Näherungswert besonders bei überwiegend einachsiger Verformung ist die ansonsten durchaus umstrittene kritische Dehnung nützlich und zu beachten.

1.1.3 Einfluss von Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, -dauer und Feuchte

Die Auswirkungen von Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit (Zeit) und Wasseraufnahme (besonders bei Polyamiden) auf den molekularen Zusammenhalt von Kunststoffen finden sich den Spannungs-Dehnungs-Kurven wieder. Zur betriebssicheren Auslegung von Bauteilen sind deshalb Kennwerte unter Variation dieser Randbedingungen erforderlich. Werkstoffgesetze, die das viskoelastische nichtlineare Werkstoffverhalten unter Einschluss von Zeit, Temperatur, Feuchte usw. beschreiben, liegen nicht vor und sind wegen der Komplexität in absehbarer Zeit auch nicht zu erwarten. Nur in seltenen Fällen wäre der gewaltige Prüfaufwand gerechtfertigt. Normalerweise genügen Vereinfachungen.

Temperatur

Beim Bewerten von Kunststoffen für den konstruktiven Einsatz sind zwei wesentliche Temperaturen zu unterscheiden, die Glasübergangstemperatur und die Schmelztemperatur. Die Glasübergangstemperatur tritt in amorphen Molekülanordnungen in Erscheinung, besonders deutlich bei amorphen Thermoplasten, da bei ihnen außer Verschlaufungen keine weiteren dominierenden Zusammenhaltkräfte wirken, wie dieses bei teilkristallinen Thermoplasten in Form der Kristallite oder bei Duroplasten und Elastomeren in Form der Vernetzungspunkte der Fall ist, die den Zusammenhalt des Werkstoffs auch dann gewährleisten, wenn die amorphen Bereiche bei deren Glasübergangstemperatur erweichen. Kristalline Bereiche schmelzen stets oberhalb der Glasübergangstemperatur. Vernetzungen können nur thermisch irreversibel zerstört werden. Die Zersetzungstemperatur liegt mit wenigen Ausnahmen (z. B. Aramidfasern) über der Kristallitschmelztemperatur. Somit ergibt sich für ein und denselben Werkstoff:

Temperaturen

Glasübergangstemperatur	<	Kristallisations-temperatur	<	Schmelztemperatur	<	thermische Zersetzungstemperatur
(E: glass transition temperature)		(E: crystallization temperature)		(E: melting temperature)		(E: thermal degradation temperature)

Je nach Temperatur kann ein- und derselbe Kunststoff unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Verläufe annehmen. Dieses kann bei teilkristallinen Thermoplasten sogar innerhalb eines relativ eng begrenzten Temperaturbereichs der Fall sein, Bild 1.11. Solange T_g der amorphen Phase über der Prüftemperatur liegt (amorphe Bereiche eingefroren), bildet sich eine Streckgrenze aus, im umgekehrten Fall verstreckt sich der Werkstoff gleichmäßig duktil. Dementsprechend liegt auch eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit sämtlicher Festigkeits- und Dimensionierungskennwerte vor, was Berechnungen, insbesondere bei instationären Temperaturverteilungen sehr erschwert. Diesem Einfluss kann sich z. B. beim Polyamid 66 der Feuchtigkeitseinfluss überlagern. Die Glasübergangstemperatur T_g der amorphen Phase

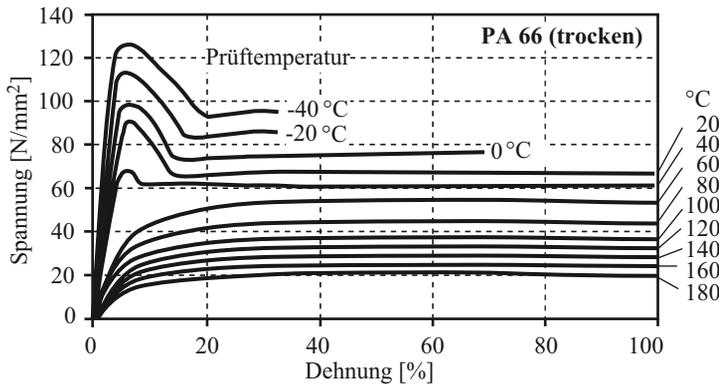


Bild 1.11: Spannungs-Dehnungs-Diagramme des teilkristallinen PA 66 (trocken)

schwankt je nach Feuchtigkeitsgehalt zwischen -6 und $+90$ °C, während die kristalline Phase erst oberhalb 250 °C schmilzt. Dabei ändern sich nicht nur die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte, sondern das gesamte Verformungsverhalten.

Belastungsgeschwindigkeit und -dauer

Temperatur/
Belastungs-
geschwindigkeit

Aufgrund zunehmender Belastungsgeschwindigkeit vermindern sich die zeitabhängigen nicht-elastischen Verformungsanteile; d. h. die Spannungs-Dehnungs-Diagramme werden steiler und damit steigt der Elastizitätsmodul, Streckspannung bzw. Zugfestigkeit nehmen zu, andererseits fällt die Bruchdehnung ab, Bild 1.12 links und Bild 1.13. Doch gilt grundsätzlich: Der Einfluss der Temperatur auf die Festigkeits- und E-Modul-Werte ist bedeutend größer als der der Belastungsgeschwindigkeit.

Deutlich wird dieses bei einem Polyamid 66 luftfeucht, wenn bis 4 % Dehnung die Temperatur als Parameter mit der Belastungszeit verglichen wird.

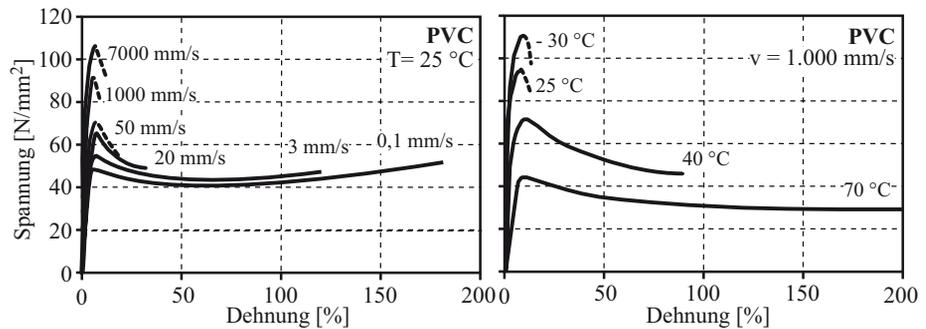


Bild 1.12: Spannungs-Dehnungs-Kurven von PVC, gemessen im Zugversuch, jede Kurve ist aus 100 Einzelmessungen gemittelt (nach Retting)
links: bei 25 °C mit unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten
rechts: bei konstanter Zuggeschwindigkeit (1 m/s) bei unterschiedlichen Temperaturen

isochromes
 σ - ϵ -Diagramm

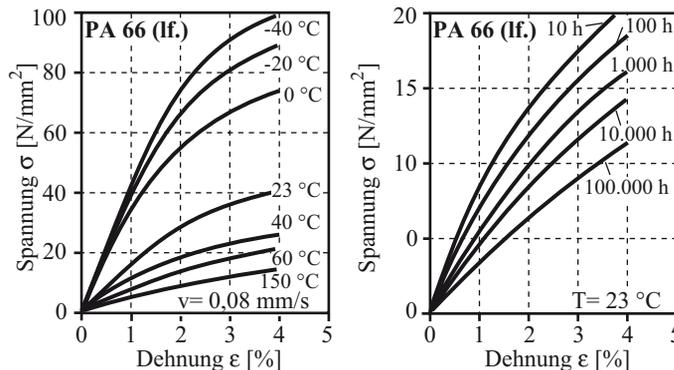


Bild 1.13: Spannungs-Dehnungs-Kurven von PA 66 luftfeucht für verschiedene Temperaturen und Zeiten (BASF)

Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme (E: water absorption) ist besonders bei Polyamiden zu berücksichtigen, die als bevorzugte Werkstoffe für Maschinenelemente und thermisch und mechanisch hoch belastete Teile im Automobilbereich und der Elektronik verwendet werden.

Wassermoleküle diffundieren in Polyamide ein und lagern sich überwiegend in den weniger dicht gepackten amorphen Bereichen, begünstigt durch die Wasserstoffbrücken, an. Es sind drei Konditionierungszustände trocken, luftfeucht und nass definiert.

Zustand	Umgebung	Wassergehalt PA 6 / PA 66 [Gew.-%]	Glasübergangs- temperatur PA 6 / PA 66 [°C]	Schmelz- temperatur PA 6 / PA 66 [°C]
trocken	keine Feuchte	< 0,2	78 / 90	223 / 264
luftfeucht	23 °C / 50 % rel. Feuchte	3 / 2,7	28 / 39	
nass	Wasser	8 / 7,2	-8 / -6	

Tabelle 1.2: Einfluss des Wassergehaltes auf die Glasübergangstemperatur und die Schmelztemperatur bei PA 6 und PA 66

Diese Zustände ergeben sich, wenn das Material bis zur Gewichtskonstanz (d. h. es findet keine Änderung des Wassergehaltes mehr statt) in einer definierten Umgebung gelagert wird.

Ein trockenes Teil mit 2 mm Wanddicke nimmt in normaler Umgebung in Monaten deren Feuchte an. Bei erhöhten Temperaturen wird der Vorgang erheblich beschleunigt. Kurzfristige, auch Tage dauernde Schwankungen der Feuchtigkeit in der Umgebung führen nur zu geringen Änderungen im Wassergehalt und damit der mechanischen Eigenschaften von Polyamid-Formteilen.

Die Feuchtigkeitsaufnahme ist mit einer Quellung verbunden. Die Längenänderung ϵ in % ergibt sich ungefähr als 1/4 der Gewichtsänderung in %. Eine weitere Besonderheit ergibt sich dadurch, dass während der Feuchtigkeitsänderung die mechanischen Eigenschaften über den Querschnitt variieren.

Da die Feuchtigkeit nur langsam in die Formteile eindringt, sind Maßänderungen fast unvermeidlich.

Deutlich erkennbar tritt durch die Aufnahme von Wasser eine Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu tieferen Temperaturwerten ein. Während die Glasübergangstemperatur für trockenes PA 6 bei +78 °C festgestellt wird, beträgt sie nach einer Wasseraufnahme von 3 % bereits +28 °C und von 8 % nur noch -8 °C, Bild 1.14.

Die Änderung von T_g mit der Wasseraufnahme gerade im Bereich der normalen Umgebungstemperatur macht sich auch in unterschiedlichen Formen der Spannungs-Dehnungskurven und damit der Steifigkeit und Festigkeit für diese Feuchtezustände bemerkbar, Bild 1.15 und Bild 1.16.

Im Gegensatz zur Festigkeit und Steifigkeit nimmt die Zähigkeit mit dem Wassergehalt zumindest bis zum luftfeuchten Zustand zu. Kennwerte von Polyamiden müssen immer einen Hinweis auf den Feuchtigkeitsgehalt enthalten.

Wasseraufnahme

Konditionierung

Glasübergang

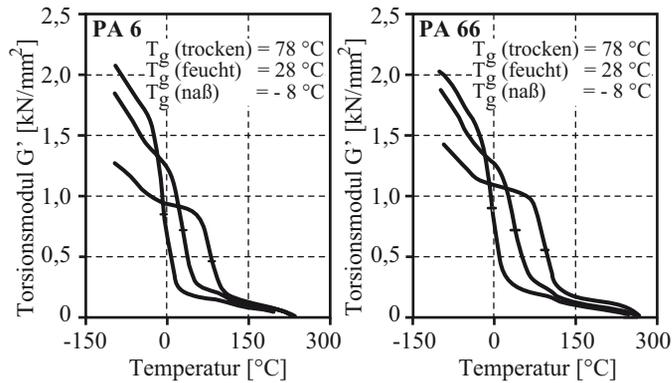


Bild 1.14: Dynamischer Torsionsmodul (geringe Belastung) von PA 6 und PA 66 mit Angabe der Glasübergangstemperatur im trockenen, luftfeuchten und nassen Zustand

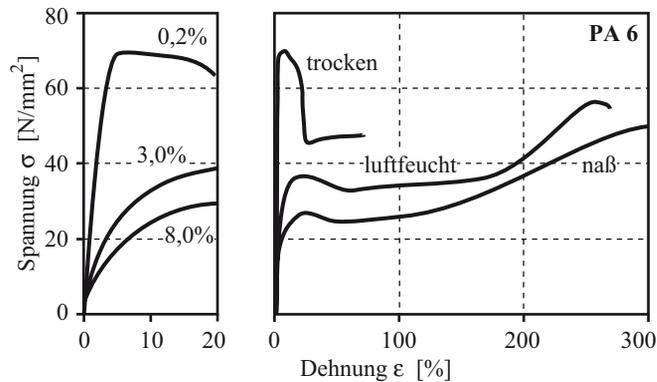


Bild 1.15: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA 6

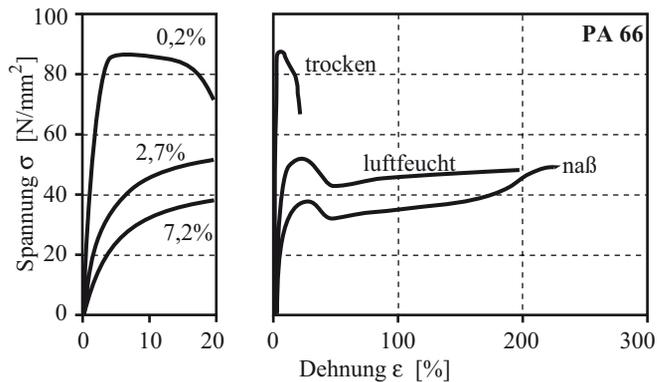


Bild 1.16: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von trockenem, luftfeuchtem und nassem PA 66

1.1.4 Zähigkeit

Als Arbeitsaufnahmevermögen eines Werkstücks wird die Energie bezeichnet, die man bis zu seinem Versagen aufbringen muss. Man erhält sie durch Integration der Kraft-Deformations-Kurve bis zum Versagenspunkt. Diese Energie, bezogen auf den Einheitsquerschnitt oder das Volumen des betreffenden Probekörpers, wird oft als *Zähigkeit* (E: toughness) bezeichnet.

Zum Begriff der Zähigkeit muss allerdings bemerkt werden, dass diese, wie man leicht erkennt, keine eindeutige Größe ist. Das Arbeitsaufnahmevermögen differenziert sehr viel besser als *Schlag- oder Kerbschlagzähigkeitskennwerte* (E: impact toughness o. notched impact toughness) zwischen zwei Materialien, da sich hinter gleicher Zähigkeit ein Werkstoffverhalten mit hoher Kraft und geringer Deformation wie auch umgekehrt verbergen kann. Um das Verhalten eines Materials hinreichend zu beschreiben, muss also außer seiner Zähigkeit mindestens eine weitere Kenngröße angegeben werden.

Eine große Fläche unter dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm ist gleichbedeutend mit einem hohen mechanischen Arbeitsaufnahmevermögen. Aus einem fiktiven Dreieck aus der Anfangssteigung bis zur Maximalspannung σ_S und der dazugehörigen Dehnung ϵ_{el} ergibt sich das rein elastische Arbeitsaufnahmevermögen W_{el} des Werkstoffs, Bild 1.17.

Die Aussagekraft normaler Schlag- und Stoßversuche kann bei Aufnahme eines Kraft-Verformungs-Diagramms durch eine Unterteilung der integral vom Probekörper bis zum Bruch aufgenommenen Schlag- bzw. Durchstoßarbeit in die Anteile Schädigungsarbeit und Restverformungsarbeit erhöht werden, Bild 1.18. Als Schädigungsarbeit wird diejenige Arbeit bezeichnet, die der Werkstoff bis zum Erreichen der Maximalkraft F_{max} und des ersten Anrisses aufgenommen hat. Dieses ist etwas mehr als die rein elastische Arbeit, da die Verformung bis zum ersten Anriss l_s auch einen nichtelastischen Verformungsanteil enthält. Der Energieanteil

Arbeitsaufnahme

Schädigung

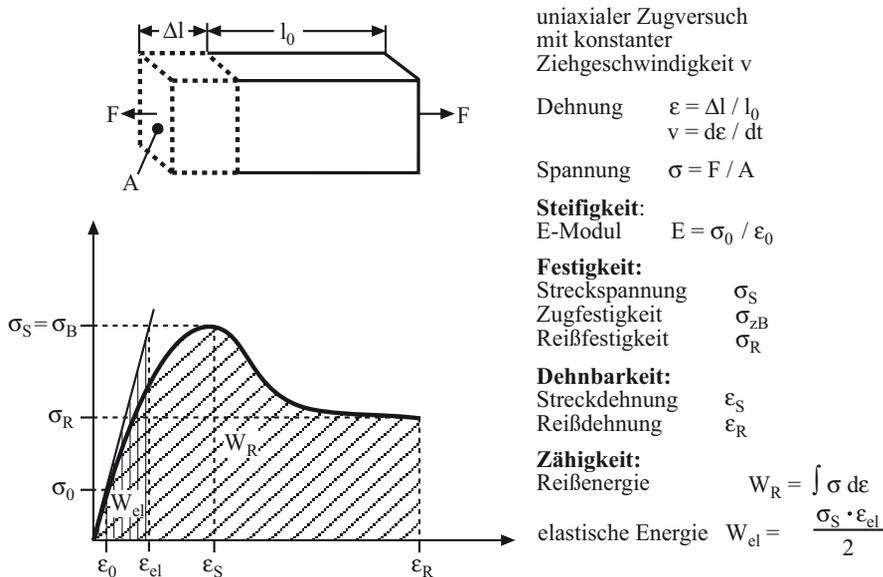


Bild 1.17: Begriffe und Kennwerte der mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen am Beispiel des Zugversuchs (nach Retting)

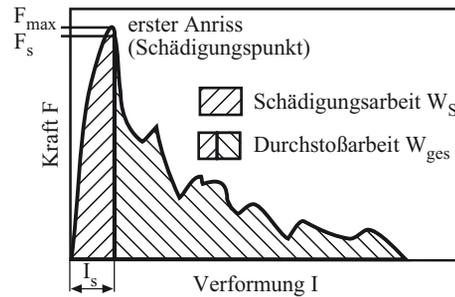


Bild 1.18: Aufteilung der Kraftverformungskurve beim Durchstoßversuch nach DIN 53443

nach Erreichen der Maximalkraft wird als Restverformungsarbeit bezeichnet. Die Streckdehnung und damit auch die Verformung bis zur beginnenden Materialschädigung nimmt z. B. bei PC wie bei anderen Kunststoffen in Abhängigkeit von der Temperatur deutlich ab. Eine größere temperaturbedingte Erweichung bedeutet also nicht unbedingt eine größere Arbeitsaufnahme, Bild 1.19.

Schlagzähigkeit

Die weit verbreitete Schlag- und Kerbschlagzähigkeit, nach Norm geprüft, kann dagegen lediglich einen qualitativen Hinweis darauf geben, ob beim Versagen von Bauteilen unter Stoßbeanspruchung mit einem mehr oder wenigen spröden oder duktilen Verhalten zu rechnen ist. Ein Vergleich verschiedener Kunststoffe untereinander wird dadurch erschwert, dass es mehr als 30 verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Geometrie- und Prüfparametern gibt. Nicht jede Probeform führt bei jedem Kunststoff zum Bruch.

Weitere Hinweise gibt die Bruchmechanik, die das Entstehen eines Risses bzw. den Widerstand des Werkstoffs dagegen sowie die dazu notwendige mechanische Beanspruchung kennzeichnet. Wegen der großen plastischen Verformbarkeit der Kunststoffe und der häufig auftretenden Mehrfachrissbildung ist die Anwendung bisher noch begrenzt, zumal sich die bruchmechanischen Kenngrößen auch nicht als Konstruktionskennwerte eignen.

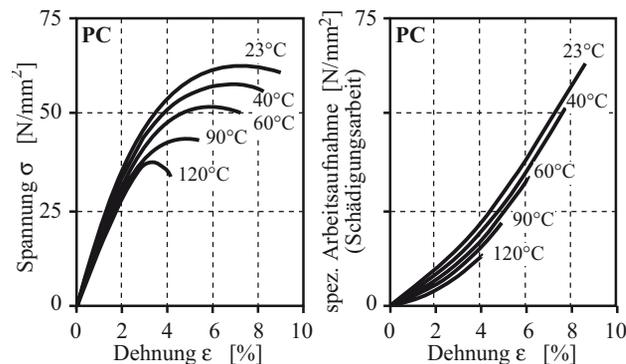


Bild 1.19: Isotherme Spannungs-Dehnungs-Diagramme und spez. Arbeitsaufnahmen von PC (nach Oberbach)

Die spezifische Arbeitsaufnahme beim Stoß ergibt sich aus dem Integral der Kraft F über dem Verformungsweg l zu $W = \int_0^{l_{\max}} F \, dl$, s. a. Bild 1.18