

Einführung in die Kunststoffverarbeitung

Walter Michaeli

ISBN 3-446-40580-1

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/3-446-40580-1> sowie im Buchhandel

4 Werkstoffkunde der Kunststoffe

4.1 Allgemeines zum Werkstoffverhalten

Die Entwicklung der Kunststoffe führte zum Schlagwort der „Werkstoffe nach Maß“. Nach den Erfordernissen des Marktes, im Hinblick auf bessere Verarbeitbarkeit und durch ein gezielt anzupassendes *Eigenschaftsprofil* wurden die Kunststoffe optimiert. Die stete Ausweitung des Werkstoff- und Anwendungsspektrums erfolgte vorwiegend durch *Modifikation* der Rohstoffe mit *Zusatzstoffen* (zum Verstärken, Füllen, Weichmachen), durch Mischen (Blenden) mit anderen Polymeren sowie durch die Entwicklung neuer Polymere und so genannter Verbundwerkstoffe.

Werkstoffe
nach Maß

Das technische und technologische Verhalten der Kunststoffe wird im Wesentlichen bestimmt durch die chemische Natur der Grundbausteine, die Länge und Anordnung der Makromoleküle. Entsprechend dem molekularen Aufbau können alle Zustandsformen zwischen Festkörper und Flüssigkeit vorliegen.

Zur Klassifizierung und zur Kennzeichnung des mechanisch-thermischen Verhaltens der Kunststoffe können die Temperaturfunktionen des *Schubmoduls* und der mechanischen *Dämpfung* herangezogen werden. Bei der Anwendung und der Prüfung von Kunststoffen ist der strukturbedingte Einfluss von Temperatur und Zeit (auch Belastungszeit bzw. -geschwindigkeit) auf das Formänderungsverhalten zu beachten (Bild 4.1.1). Für das *Verformungsverhalten* der Kunststoffe gelten nachstehende, allgemeingültige Grundeigenschaften:

Klassifizierung

- Kunststoffe sind *viskoelastische* Werkstoffe (Bild 4.1.2) – dies bedeutet: Das Werkstoffverhalten bei äußerer Beanspruchung ist eine Funktion der Zeit. Bei konstanter Last nimmt die Deformation mit der Zeit zu (*Kriechen, Retardieren*). Bei einer konstanten Verformung nimmt die Spannung mit der Zeit ab (*Erholen, Relaxieren*).
- Kunststoffe sind *nicht-linear viskoelastische* Werkstoffe, d. h.: Die Beanspruchungshöhe ist von entscheidender Bedeutung. Eine Verdopplung der Spannung führt im gleichen Zeitraum zu einer mehr als doppelt so hohen *Deformation*, bei der Verdopplung der Deformation ergibt

Viskoelastizität

nicht linear
viskoelastisch

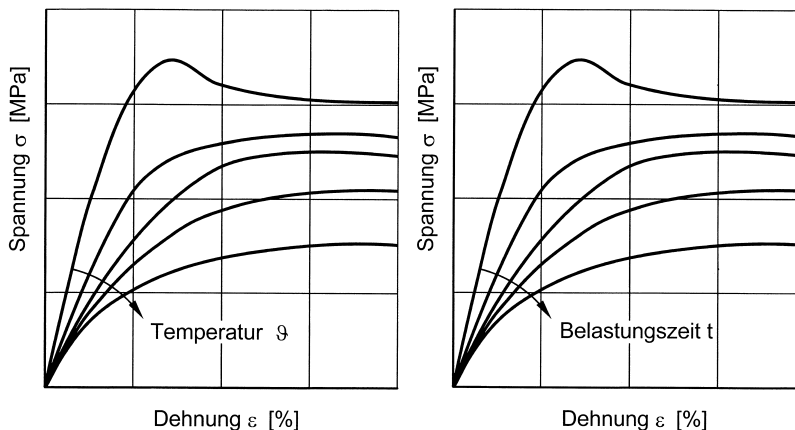


Bild 4.1.1 Einfluss von Temperatur und Zeit auf das Formänderungsverhalten

sich im gleichen Zeitraum weniger als die zweifache Spannung (isochrone σ - ϵ -Diagramme sind daher degressiv).

temperatur-
abhängig

- Kunststoffe haben ein temperaturabhängiges Werkstoffverhalten: Bei erhöhter Temperatur laufen die zeitabhängigen Erscheinungen beschleunigt ab. Dieser Zeitraffereffekt wird durch *Zeit-Temperatur-Verschiebungsregeln*, z. B. nach Arrhenius, empirisch beschrieben.

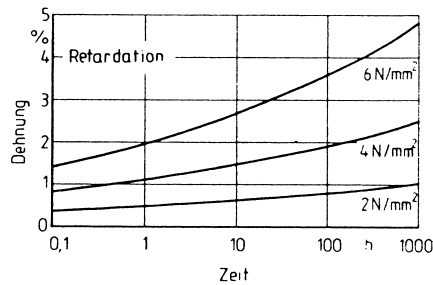
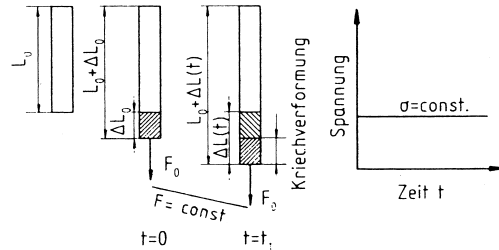


Bild 4.1.2a Viskoelastisches Werkstoffverhalten (Retardation, Werkstoff: PE-HD)

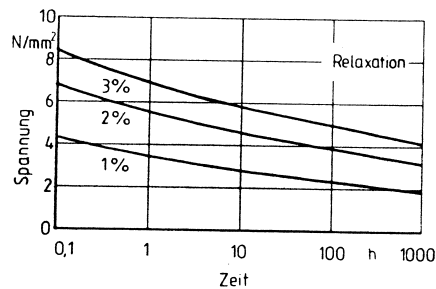
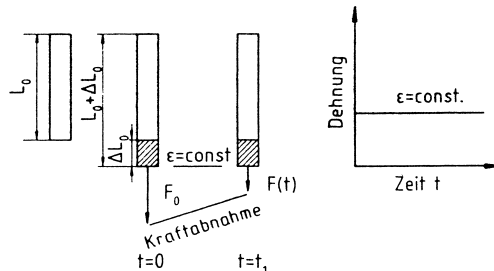


Bild 4.1.2b Viskoelastisches Werkstoffverhalten (Relaxation, Werkstoff: PE-HD)

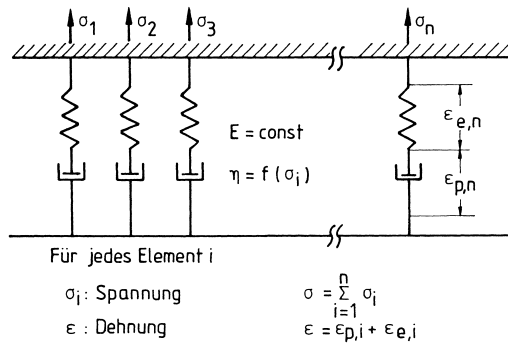


Bild 4.1.3 Deformationsmodell (nach Menges/Schmachtenberg)

Dieses Werkstoffverhalten, insbesondere die Zeitabhängigkeit vieler Materialgrößen, speziell bei den Thermoplasten, machte die Suche nach *zeitraffenden* Prüfmethoden und sicheren *Extrapolationsmethoden* notwendig.

Um auf das Langzeitverhalten unter Praxisbedingungen extrapolieren zu können, führt man „*verschärfte*“ Prüfungen unter Erhöhung von Spannung, Temperatur oder Medienkonzentration aus. Voraussetzung für Extrapolationen ist, dass keine signifikante Materialschädigung eintritt.

Als *zeitraffende* Methode für das *Alterungsverhalten*, d. h. speziell für die Schädigung der Materialien durch Sauerstoff und Wärme, hat sich die Extrapolation nach dem so genannten *Arrhenius-Ansatz* bewährt.

Die *zeitraffende* Prüfung erfolgt hier bei Temperaturen weit oberhalb der Betriebstemperatur – jedoch unterhalb eines Umwandlungsbereiches – und man extrapoliert auf länger dauernde Belastungen bei niedrigeren Temperaturen. Probekörper werden bei verschiedenen Temperaturen gelagert und es wird die Zeit bestimmt, bei der eine bestimmte Eigenschaft um einen definierten Prozentsatz abnimmt. Die Induktionszeit bis zur definierten Änderung der Eigenschaft wird logarithmisch über dem reziproken Wert der Temperatur aufgetragen. Die gefundenen Eigenschaftsänderungen, z. B. die Reißdehnungen, zeigen bei dieser Auftragung Geraden. Daraus kann die Lebenserwartung bei Betriebstemperatur extrapoliert werden.

Eine Methode zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens ist das so genannte *Deformationsmodell*, das als Grundlage von einer Vielzahl parallel angeordneter *nichtlinearer Maxwell-Elemente* ausgeht (Bild 4.1.3). Jedes dieser Elemente wird durch die Federsteifigkeit und die dem Dämpfer zugeordnete Fließfunktion beschrieben. Diese stellt die Abhängigkeit zwischen der auf den Dämpfer wirkenden Spannung und der hieraus resultierenden Fließgeschwindigkeit dar.

Insgesamt werden die Kunststoffe zurecht als „Werkstoffe nach Maß“ bezeichnet. Das spezielle Eigenschaftsbild ist bei der Werkstoffauswahl auf das vielfach komplexe Anforderungsprofil in der Anwendung abzustimmen. Die notwendigen Werkstoffwerte werden durch Werkstoffprüfungen nach genormten Verfahren ermittelt und damit vergleichbar.

Langzeitverhalten

zeitraffende
Prüfung

4.2 Spannungs-Dehnungs-Verhalten

Einflussfaktoren	Bei fast allen Anwendungen von Kunststoffen sind die mechanischen Eigenschaften in irgendeiner Form mitbestimmend. Für die mechanischen Eigenschaften, insbesondere das Spannungs-Dehnungs-Verhalten, spielen neben den von außen auf den Werkstoff einwirkenden Faktoren (wie Temperatur und umgebende Medien) Größe und Zeitdauer der Belastung eine entscheidende Rolle. Dies ist bei den <i>Thermoplasten</i> weit stärker als bei den <i>Duroplasten</i> oder den <i>faserverstärkten Kunststoffen</i> ausgeprägt. Für die Beurteilung des mechanischen Werkstoffverhaltens der Kunststoffe ist daher die übliche Angabe von Festigkeitswerten, wie der <i>Zugfestigkeit</i> , oder von elastischen Kenngrößen, wie dem <i>Elastizitätsmodul</i> , nicht ausreichend. Erst das Spannungs-Dehnungs-Verhalten beschreibt das Verhältnis von innerer Werkstoffanstrengung infolge von äußerlich angreifenden Kräften und den damit erzwungenen Materialdehnungen. Es stellt insofern eine wichtige Information für den Konstrukteur dar.
Beanspruchungsarten	Bezüglich der Beanspruchungsarten unterscheidet man zwischen <i>einachsiger</i> und <i>zweiachsiger Belastung</i> , wobei man prüftechnisch einachsige Belastung vorzieht und nur in besonderen Fällen eine zweidimensionale Belastung aufbringt. Im Wesentlichen werden Probekörper in Biege-, Druck-, Zug-, Scher- und Schubversuchen auf ihr Verhalten unter diesen Belastungsarten untersucht. Diese gängigen Prüfmethoden sind in verschiedenen Normen und Prüfvorschriften beschrieben.
Prüfmethoden	Anhand des Zugversuches lassen sich die Vorgänge im Probekörper beim einachsigen Belastungszustand am einfachsten beschreiben, weshalb im Folgenden vorwiegend auf diese Beanspruchungsart aufgebaut wird. Bei <i>Biege-, Druck- und Scher- bzw. Schubbeanspruchung</i> ist trotz quasi-einachsiger Kraftwirkung mit Überlagerung von Spannungen im Werkstoff insbesondere bei <i>anisotrop</i> aufgebautem Material, wie z. B. geschichteten oder gefüllten Systemen, zu rechnen. Beim Zugversuch werden stabförmige Probekörper mit vorgegebener Geschwindigkeit durch eine äußerlich angreifende Kraft, die parallel zur Stablängsachse wirkt, beaufschlagt, wobei senkrecht zur Belastungsrichtung keine äußeren Kräfte herrschen und demzufolge keine Dehnungsbehinderung eintritt. Während des Belastungsvorgangs werden die Längsverformungen gemessen und als Funktion der Zugkraft aufgezeichnet. Auf diese Weise erhält man eine Kraft-Verformungs-Kurve, die unter Berücksichtigung einflussgebender Prüfparameter rechnerisch oder durch geeignete Messtechnik in einem so genannten <i>Spannungs-Dehnungs-Diagramm</i> ausgedrückt werden kann.

4.2.1 Kurzzeit-Verhalten

Kurzzeitzugversuche	Für die <i>Dimensionierung</i> von Kunststoffherzeugnissen sind, wie bei anderen Werkstoffen auch, Kennwerte aus Kurzzeitversuchen, die unter den oben genannten Belastungsarten ermittelt wurden, grundlegend. In Bild 4.2.1 werden die Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen für sprödes, zähelastisches und weichelastisches Material gezeigt. Bei den Kurzzeit-Versuchen wird die <i>Beanspruchungsgeschwindigkeit</i> so gewählt, dass eine zügig wachsende Spannung oder Verformung derart eintritt, dass der charakteristische Werkstoffkennwert, in der Regel <i>zerstörendes</i> oder <i>instabiles Probenversagen</i> , innerhalb von wenigen Minuten eintritt. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit kann durch eine konstante Laststeigerung oder durch eine konstante <i>Verformungsgeschwindigkeit</i> erzeugt werden, wobei die letztere Variante bei der Prüfung von Kunststoffen üblich ist.
viskoelastischer Werkstoff	Da die Kunststoffe zu den viskoelastischen Werkstoffen zählen, sind ihre mechanischen Eigenschaften von der Dauer und der Geschwindigkeit der Beanspruchung abhängig. Bild 4.2.2 zeigt den Einfluss, den unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten auf die Zugfestigkeit von einigen thermoplastischen Kunststoffen ausüben. Dabei wird deutlich, dass die verschiedenen Kunststoffe bei charakteristischen Dehngeschwindigkeiten eine maximale Festigkeit aufweisen. Diese Dehngeschwindigkeiten liegen zum Teil deutlich über den bei <i>Kurzzeit-Beanspruchung</i> gewählten.

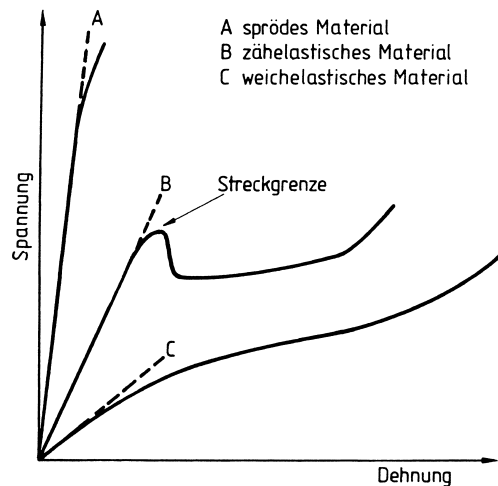


Bild 4.2.1 Grundformen von Spannungs-Dehnungs-Kurven

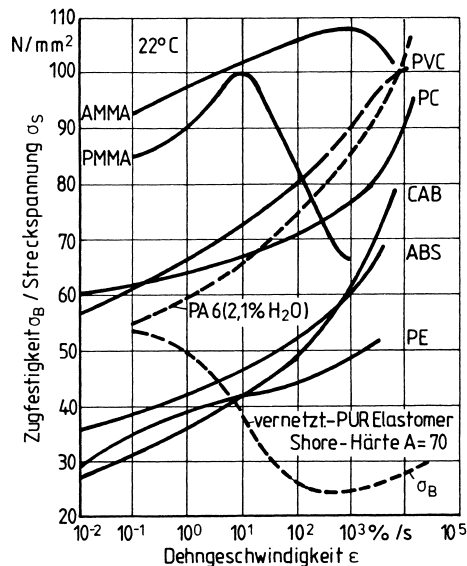


Bild 4.2.2 Abhängigkeit der Zugfestigkeit bzw. der Streckspannung von der Dehngeschwindigkeit (nach Oberbach)

4.2.2 Stoßartige Beanspruchung

Bei hohen Geschwindigkeiten, bei denen die Beanspruchung so aufgebracht wird, dass sie schlagartig auftritt, kann das Material so spröde reagieren, dass verformungslose bzw. verformungsarme *glasartige Brüche* auftreten. Von einem stoßunempfindlichen Formteil erwartet man, dass es Energien, die bei Stoßeinwirkung auftreten, je nach Anwendungsgebiet elastisch oder plastisch ohne Bruch absorbiert. Hohe *Arbeitsaufnahme* bzw. *Energieabsorption* haben solche Werkstoffe, die möglichst hohe Verformungen bei hohen Kräften ertragen. Dies beruht darauf, dass das Integral der Spannung

schlagartige
Belastung

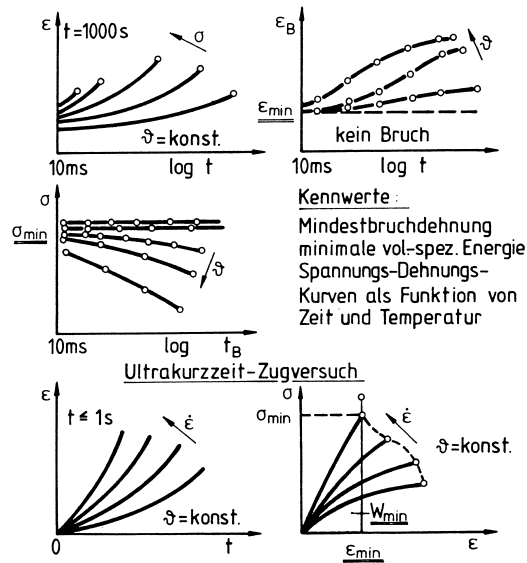


Bild 4.2.3 Verformung und Versagen von Thermoplasten bei Stoßbelastung (nach Menges)

über der Dehnung der verrichteten Arbeit entspricht. Somit ist es möglich, erste Hinweise auf das *Zähigkeitsverhalten* aus den Ergebnissen von Zugversuchen mit verschiedener Belastungsgeschwindigkeit abzuleiten. Die Zusammenhänge zwischen Spannung, Dehnung, Belastungsgeschwindigkeit und Prüftemperatur sind für Thermoplaste in Bild 4.2.3 dargestellt.

Zähigkeitsverhalten

Zur Untersuchung des Zähigkeitsverhaltens bei stoßartiger Beanspruchung von Kunststoffen werden im Wesentlichen die genormten *Schlagbiege- und Schlagzugversuche* herangezogen. Für die Betrachtung bei zweidimensionaler Beanspruchung erweisen sich die ebenfalls genormten *Durchstoßversuche* als geeignet. An Probekörpern, die bei Schlagbiege- oder Schlagzugbeanspruchung nicht brechen, kann die *Schlagzähigkeit* nicht zahlenmäßig ausgedrückt werden; sie sind jedoch als schlagzäh einzuordnen. Solche Werkstoffe werden mit definierten Kerben versehen und so genannten *Kerbschlagversuchen* unterzogen. Hinsichtlich der Kerbenform wird zwischen U-, V- und Lochkerben unterschieden.

Stoßartige Beanspruchungen lassen sich mit entsprechend ausgestatteten Prüfgeräten ähnlich den Kurzzeit-Versuchen bei den dort üblichen Beanspruchungsarten vornehmen. Dabei wird jedoch eine hohe Anforderung an die zeitliche Auflösung der Messwerte gestellt. Solche Untersuchungen sind noch nicht allgemein genormt und haben mehr wissenschaftlichen Charakter.

4.2.3 Verhalten bei langzeitiger und ruhender Beanspruchung

Zeitstand-zugversuche

Für die konstruktive Anwendung von Kunststoffen unter langzeitiger Lasteinwirkung sind die Ergebnisse so genannter *Zeitstandversuche* wichtig. Im Folgenden wird besonders der Einfluss der Größe und der Dauer der Belastung diskutiert. Der Einfluss durch Alterung und Beeinflussung durch von Normalbedingungen abweichende Umgebungsmedien wird hier nicht berücksichtigt. Dies ist im Anwendungsfall besonders zu beachten, da sie nicht unerheblich wirken können.

Zur Beschreibung des Dauerverhaltens unter ruhender Last sind allgemein folgende Darstellungen gebräuchlich:

- Zeitverformungslinien (Zeitdehnlinien),
- Kriechmodullinien,
- Zeitspannungslinien und
- isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme.

Die *Zeitverformungslinien* bzw. *Zeitdehnlinien* werden in langzeitigen Biege-, Druck-Zug- oder Schubversuchen, so genannten *Retardationsversuchen* ermittelt. Sie zeigen das Verformungsverhalten der Werkstoffe unter bestimmten äußeren Bedingungen. Für die Darstellung werden in der Regel halb- oder doppeltlogarithmische Maßstäbe gewählt, wobei die Zeitachse logarithmisch in die Abszisse gelegt wird und die Verformungsgröße in die Ordinate. Als Parameter können verschiedene Spannungszustände und weitere Umgebungsbedingungen, wie Temperatur oder Medien, berücksichtigt werden. Man erhält die Messwerte aus den Retardationsversuchen, indem der Werkstoff bzw. der Probekörper einer konstanten Belastung von bestimmter Höhe unterworfen wird und die zeitabhängigen Verformungen erfasst werden. Das Bild 4.2.4 enthält unter anderem schematisch einige Kriechkurven. Da Erzeugnisse aus Kunststoffen unter Umständen über einen langen Gebrauchszeitraum eingesetzt werden sollen und Zeitstandsversuche naturgemäß lange Versuchszeiten erfordern, ist unter der Voraussetzung, dass die Kriechkurven ein lineares Verhalten (in der halblogarithmischen Darstellungsweise) zeigen, eine Extrapolation unter Berücksichtigung der kritischen Dehnungsgrenze statthaft.

Retardation

Die *Kriechmodullinien* beschreiben die zeitliche Abhängigkeit der „elastischen“ Eigenschaften von Kunststoffen. Man erhält sie durch Umrechnen der Ergebnisse von Zeitverformungslinien bzw. Zeitspannungslinien. Der Begriff „Kriechmodul“ ist nicht direkt vergleichbar mit dem Begriff „Elastizitätsmodul“. Es ist lediglich ein Korrelationsfaktor zwischen einer ständig wirkenden Spannung und der zeitabhängig auftretenden Dehnung.

Kriechmodul

Die *Zeitspannungslinien* erhält man entweder aus *Relaxationsversuchen* – hierbei wird bei einer konstant vorgegebenen Verformung die Spannungsabnahme als Funktion der Zeit ermittelt – oder durch einfaches Umzeichnen mehrerer Zeitverformungslinien. Die Darstellung erfolgt analog zu den Zeitverformungslinien im halb- oder doppeltlogarithmischen Maßstab. Die Kurvenscharen geben an, wie bei einer konstant aufgetragenen Verformung die Spannungen mit der Zeit abnehmen. Die Zeit bis zum Bruch nimmt mit abnehmender Spannung zu.

Relaxation

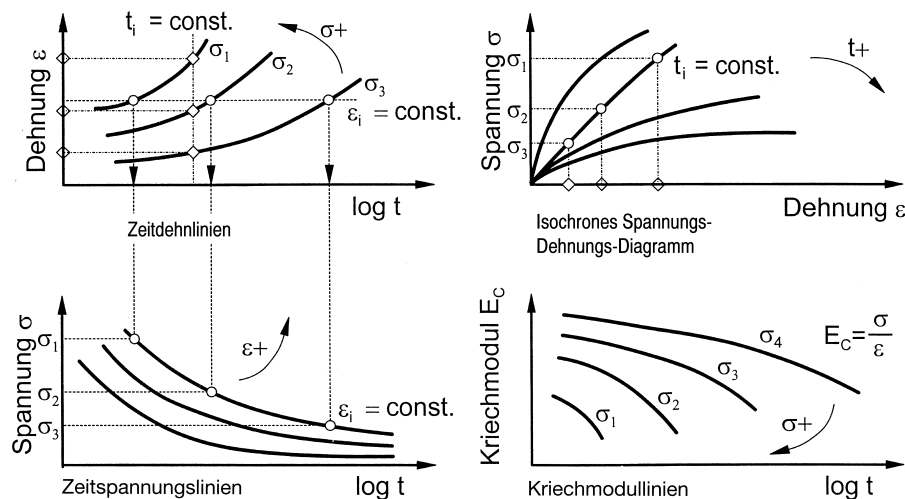


Bild 4.2.4 Ermittlung von Zeitstand-Schaubildern

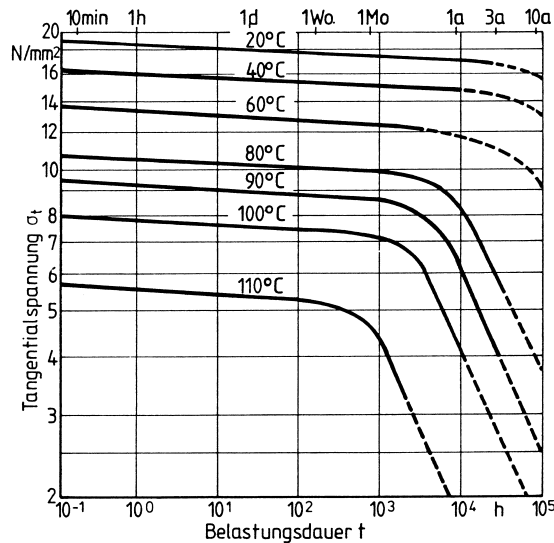


Bild 4.2.5 Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polybuten unter Innendruck, Prüfmedium: Wasser (nach Neitzel)

Zeitbruchlinien

Für Kunststoffe, die gleichzeitig unter statischer Last, Temperatur- und Medieneinfluss stehen, eignet sich die Ermittlung von *Zeitbruchlinien* an Rohrprobekörpern (Bild 4.2.5). Die Kenntnis der *Zeitstandfestigkeit*, insbesondere bei weichelastischem Material, reicht nicht zur Dimensionierung von langzeitbelasteten Bauteilen aus. Je geringer die Festigkeit eines Produktes ist, um so höher ist im Allgemeinen seine Reißdehnung. Bei Kunststoffen mit geringer Festigkeit muss deshalb das Dehnverhalten zusätzlich beachtet werden.

Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme haben sich als vorteilhafte Arbeitsunterlage für den Konstrukteur erwiesen. Man erhält sie durch Austauschen der Parameter aus den Zeitdehnungs- bzw. Zeitspannungslinien.

Zeitstandschaubild

Im *Zeitstandschaubild* lässt sich der gesamte funktionale Zusammenhang zwischen den Größen Spannung, Verformung und Zeit in übersichtlicher Form darstellen. Zulässige Spannungen und Verformungen sowie auch Verformungen bei gegebenen Spannungen oder Spannungen bei gegebenen Verformungen können unter Berücksichtigung von Zeit- und gegebenenfalls Temperatureinfluss entnommen werden. Der Zusammenhang und die Art der grafischen Übertragbarkeit ist für konstante Temperaturverhältnisse Bild 4.2.4 zu entnehmen.

4.2.4 Schwingende Beanspruchung

dynamisch zyklische Belastung

Wenn periodisch wechselnde Beanspruchungen auftreten, was besonders im Maschinen- und Fahrzeugbau oft der Fall ist, können für die Berechnung der einzelnen Konstruktionselemente nicht die Festigkeitswerte, die unter stetiger Last- und Verformungssteigerung oder im Zeitstandversuch ermittelt werden, zugrundegelegt werden. Wiederholte Belastung kann bei geringeren Spannungen oder Verformungen als bei ruhender Beanspruchung zum *Bauteilversagen* führen.

Dauerschwing- versuch

Das Verhalten von Werkstoffen bei schwingender Beanspruchung wird in *Dauerschwingversuchen* ermittelt, wobei den zu untersuchenden Teilen meistens ein sinusförmiger Beanspruchungsverlauf aufgezwungen wird. Die zum Teil in Erscheinung tretende viskoelastische Komponente im Verhal-

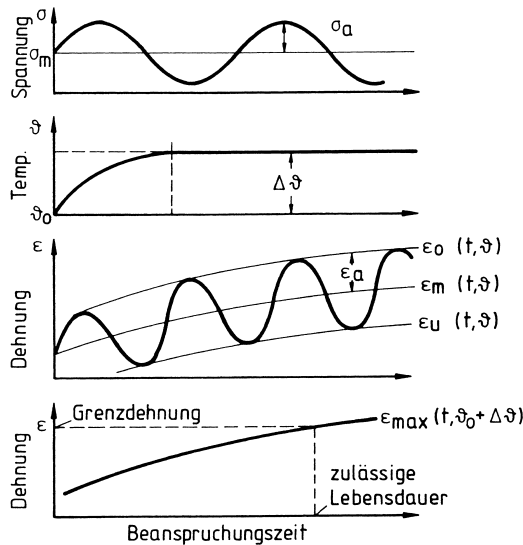


Bild 4.2.6 Kriechen unter dynamischer Belastung (nach Thebing)

ten der Kunststoffe bewirkt bei Beanspruchung eine irreversible Energieabsorption, die besonders bei wiederholter Beanspruchung innerhalb kurzer Zeiträume zur Werkstoffenerwärmung führen kann. Dieser Erscheinung, die mitunter von der Prüffrequenz und ganz entscheidend von den Bedingungen, unter denen die entstehende Wärme abgeführt wird, beeinflusst wird, muss bei der Durchführung und Beurteilung von Schwingversuchen Rechnung getragen werden. Bei *Schwingbeanspruchung* unterscheidet man zwischen Schwell- und Wechselbeanspruchungen, die verschiedenen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten ausüben. Ferner unterscheidet man zwischen Konstanthaltung der Spannungs- bzw. der Dehnungsamplitude. In Bild 4.2.6 werden die Auswirkungen konstanter sinusförmiger Wechselbeanspruchungen und der damit verbundenen Werkstoffenerwärmung auf das Kriechen, d. h. auf das Dehnungsverhalten beispielhaft dargestellt. Die *Wöhlerkurven*, wie man sie von Metallen her kennt, nähern sich auch bei Kunststoffen mit zunehmender Lastspielzahl asymptotisch einer Grenzspannung, die im Allgemeinen Dauerschwingfestigkeit genannt wird.

4.3 Eindruck-, Verschleiß- und Reibverhalten

In den drei folgenden Abschnitten wird die Frage des Verhaltens von Kunststoff-Oberflächen bei berührender mechanischer Beanspruchung angesprochen und ihre Bedeutung für die Praxis aufgezeigt.

4.3.1 Härte

Unter *Härte* versteht man allgemein den Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt. Vielfach wird Härte in Verbindung mit *Verschleiß- und Reibverhalten* gesehen. Insgesamt fehlt ein Einheitsmaß für diese Eigenschaft, d. h. die Härte ist eine Kennzahl.

Härte

Grundprinzip	eindringender "härterer" Körper (bewegt) Kraft zu prüfender "weicher" Körper (in Ruhe)		
Bewegungsrichtung			
Belastungsrichtung			
Größe der Belastung			
Größe der Geschwindigkeit			
Zeitpunkt der Messung bzw. Beurteilung	unter Belastung	sowie nach Entlastung	unter Belastung
Grundform der Eindringkörper			
Meßwert bzw. Beurteilungskriterium			
zugrunde gelegter "Härtebegriff"	Widerstand gegen örtl., inhomogene Verformung	Widerstand gegen Zerspanung	Widerstand gegen Abrollvorg.

Bild 4.3.1 Prinzipielle Methoden der „Härte“-Prüfung (nach Müller)

Prüfverfahren Im Wesentlichen kann man bei den Prüfverfahren, siehe Bild 4.3.1, drei Gruppen der Härteprüfung bzw. -beurteilung unterscheiden:

- Methoden mit Messung der gesamten Verformung
z. B. *Kugeldruck- und Shore-Härte*,
- Methoden mit Messung der plastischen Verformung
z. B. *Rockwell- und Vickers-Härte*,
- Methoden zur Bestimmung des elastischen Verhaltens
z. B. *Stoßelastizität, Rückprallhärte*.

Neben der Temperatur und der Einwirkzeit sind genaue Festlegungen bezüglich der Geometrie des Eindringkörpers und der Art und Höhe der Belastung erforderlich.

Härteprüfung Bild 4.3.2 zeigt eine Gegenüberstellung der Eindringverfahren unter maßstabgenauer Darstellung von Eindringkörpergestalt, Eindringtiefenbereich und direkt erfasstem Oberflächenbereich. Die nach verschiedenen Verfahren erzielten Werte sind untereinander kaum vergleichbar, sie liefern jedoch vielfach brauchbare Angaben für einen Materialvergleich bzw. bei der Materialauswahl. Härtewerte sind jedoch keine Konstruktionswerte, d. h. sie können nicht als Berechnungsgrundlage herangezogen werden. Bewährt haben sie sich für die Produktions- und Wareneingangskontrolle. Insbesondere die Entwicklungen bei *Mikrohärtemessungen* zeigen Möglichkeiten für eine zerstörungsfreie Qualitätsüberwachung und für die Beurteilung der Alterung infolge Bewitterung, Medien- oder Wärmeeinwirkung.

Prüfverfahren	IRHD weich ①	IRHD normal ②	IRHD Mikro- härte③	Kugel- druck- härte④	Rockwell E.K.L.M.R. ⑤	αRockwell ⑥
Norm	DIN 53 519 Teil 1	DIN 53 519 Teil 1	DIN 53 519 Teil 2	DIN 53 456	ASTM D 785-65	ASTM D 785-65
Gestalt						
Eindringtiefenbereich						
Direkt erfasster Oberflächenbereich (Draufsicht)						

Prüfverfahren	Shore A ⑦	Shore D ⑧	Barcol ⑨	Vickers ⑩	Knoop ⑪	Buchholz ⑫
Norm	DIN 53 505	DIN 53 505	EN 59	DIN 51 225	ASTM D 1474	DIN 53 153
Gestalt						
Eindringtiefenbereich						
Direkt erfasster Oberflächenbereich (Draufsicht)						

Bild 4.3.2 Härteprüfverfahren für Kunststoffe 4–6, 8–11, Gummi 1–3, 7 und Beschichtung 11, 12 (nach Müller)