

Thomas Neff

Lochleibung von Polymeren



Herbert Utz Verlag
München, 2001

Thomas Neff

Geboren am 1. Juni 1967 in München. Abschluss als Diplomingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik 1992 an der Technischen Universität München.

1997 Auszeichnung für den besten post-graduierten Vortrag bei der *International Conference for Polymer Mechanics*. Von 1996 bis 1998 Präsident der EUROAVIA München e.V.

2001 Promotion am Fachgebiet für Mechanik und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München.

Derzeit Systemtechnik-Ingenieur am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Oberpfaffenhofen bei München.

Fotos der spannungsoptischen Aufnahmen:
Petra Wallner, München

Die Deutsche Bibliothek - CIP Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Copyright © 2001 Herbert Utz Verlag GmbH

Printed in Germany

ISBN 3-8316-0013-9

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089 / 27 77 91 00
Fax: 089 / 27 77 91 01
utz@utzverlag.com
www.utzverlag.de

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Polymere	5
2.1	Morphologie der Polymere	5
2.1.1	Makromolekularer Aufbau	5
2.1.2	Gestalt der Makromoleküle	5
2.1.3	Einteilung nach der Gestalt der Makromoleküle	6
	<i>Thermoplaste (Plastomere)</i>	6
	<i>Elastomere</i>	8
	<i>Duromere (Duroplaste)</i>	8
2.1.4	Bindungskräfte	9
2.2	In dieser Arbeit verwendete Polymere	10
2.2.1	Epoxydharz	10
	<i>Herstellung</i>	11
	<i>Eigenschaften</i>	12
2.2.2	R&G Martens - Plus - EP	12
	<i>Beschaffenheit</i>	13
	<i>Verarbeitung</i>	13
	<i>Anwendungsgebiet</i>	14
2.2.3	Polymethylmethacrylat (PMMA)	14
	<i>Herstellung</i>	15
	<i>Verarbeitung</i>	15
	<i>Eigenschaften</i>	15
	<i>Anwendungsgebiete</i>	15
2.2.4	Werkstoffauswahl	16

3	Theoretische Grundlagen	17
3.1	Die Viskoelastizitätstheorie	17
3.1.1	Lineare Viskoelastizität	18
	<i>Das Boltzmannsche Superpositionsprinzip</i>	18
	<i>Das Korrespondenzprinzip</i>	19
	<i>Das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip</i>	19
3.1.2	Grundlagen der linearen Viskoelastizität	20
	<i>Elastizitätstheorie</i>	20
	<i>Hydrodynamische Theorie</i>	20
3.1.3	Mechanische Modelle	21
	<i>Das Maxwell-Modell</i>	21
	<i>Das Voigt-Kelvin-Modell</i>	22
	<i>Das Burgers-Modell</i>	24
	<i>Verallgemeinertes Maxwell-Modell</i>	25
	<i>Verallgemeinertes Voigt-Kelvin-Modell</i>	27
3.1.4	Nichtlineare Viskoelastizität	29
3.1.5	Erweiterte Berechnungsmethode	31
3.2	Size-Effekt	34
3.3	Einfluss der Lochleibung	35
3.3.1	Geometrischer Einfluss des Lochs	36
3.3.2	Kerbwirkung	40
3.4	Einfluss des Materials	43
3.5	Linearisierung der Gleichung	44
4	Versuche	47
4.1	Kriechversuche	47
4.2	Fertigung der Prüflinge	48
4.2.1	Epoxydharz-Prüflinge	48
	<i>Unverstärktes Epoxydharz</i>	48
	<i>Carbonfaserverstärktes Epoxydharz mit thermoplastischem Anteil</i>	49
	<i>Carbonfaserverstärktes Epoxydharz</i>	49
4.2.2	PMMA-Prüflinge	51
4.2.3	Form der Prüflinge	51

4.3 Versuchsaufbau	53
4.3.1 Kriechversuche mit Hilfe der Hochtemperatur-Kriechprüfstände	53
<i>Mechanische Komponenten</i>	53
<i>Komponenten der Messvorrichtung</i>	55
<i>Die Funktionsweise der Wheatstoneschen Vollbrücke</i>	55
4.3.2 Kriechversuche mit Hilfe der KRZ 600 Kriechprüfstände	56
<i>Mechanische Komponenten</i>	56
<i>Komponenten der Messvorrichtung</i>	57
4.3.3 Zugversuch	57
4.4 Versuchsdurchführung der Kriechversuche	59
<i>Kalibrierung des Extensometers</i>	59
<i>Versuchsvorbereitung</i>	59
<i>Starten des Versuchs</i>	60
5 Ergebnisse	63
5.1 Vorversuche	63
5.1.1 Round-Robin-Tests	63
5.1.2 Lochleibung unter Temperatureinfluss	65
5.2 Polymethylmethacrylat	69
5.2.1 Kriechkurven der gleichmäßig belasteten Prüflinge	69
5.2.2 Ergebnisse der Lochleibungsversuche bei PMMA	73
5.2.3 Ergebnisse der Lochleibungsversuche an PMMA bei unterschiedlichen Lochdurchmessern	75
5.3 Unverstärktes Epoxydharz	76
5.3.1 Ergebnisse der gleichmäßig belasteten Rechteckprüflinge	76
5.3.2 Ergebnisse der Lochleibungsversuche am Epoxydharz	79
5.4 Carbonfaserverstärktes Epoxydharz	81
5.4.1 Ergebnis des gleichmäßig belasteten, 16 lagigen, $\pm 45^\circ$ verstärkten Materials	81
5.4.2 Ergebnis der Lochleibungsversuche an 16 lagigem, $\pm 45^\circ$ verstärktem Material	82
5.4.3 Ergebnis des gleichmäßig belasteten, 16 lagigen, 90° verstärkten Materials	82
5.4.4 Ergebnis der Lochleibungsversuche an 16 lagigem, 90° verstärktem Material	83
5.4.5 Ergebnis des gleichmäßig belasteten, 16 lagigen, 0° verstärkten Materials	84
5.4.6 Ergebnis der Lochleibungsversuche an 16 lagigem, 0° verstärktem Material	84
5.5 Spannungsoptische Überprüfung der Lochpassung und der Spannungsverteilung	85

6 Überprüfung und Vergleich der theoretischen Modelle und der Versuchsergebnisse	89
6.1 Polymethylmethacrylat (PMMA)	89
6.2 Epoxydharz	94
6.3 Carbonfaserverstärktes Epoxydharz	96
6.3.1 $\pm 45^\circ$ carbonfaserverstärktes Epoxydharz	96
6.3.2 90° carbonfaserverstärktes Epoxydharz	97
6.3.3 0° carbonfaserverstärktes Epoxydharz	97
6.4 Vergleich des Kriechverhaltens von carbonfaserverstärktem Epoxydharz und Reinharz	98
6.5 Einfluss der Lochgröße	102
6.6 Bruchverhalten der getesteten Werkstoffe	103
7 Zusammenfassung und Ausblick	105
Anhang	107
<i>Kurzzeit-Zug-Versuche</i>	107
<i>Langzeit-Kriech-Versuche</i>	110
Literaturverzeichnis	129
Index	135

1 Einleitung

Bei den industriell, speziell großserienmäßig, eingesetzten Materialien überwiegen momentan immer noch die Metalle. Diese Werkstoffe haben konstruktiv und berechnungstechnisch die wichtige Eigenschaft, dass sie ein hochgradig isotropes Materialverhalten aufweisen, das Deformationsverhalten also von der Ausrichtung der Belastung unabhängig ist. Dadurch und aufgrund der Tatsache, dass Metalle bereits seit einigen hundert Jahren als Grundlage für Werkzeuge und Maschinen jeglicher Art dienen, ist ihr Verhalten unter Last hinlänglich erforscht und es existieren für die meisten, praktisch relevanten Belastungsarten gute mathematische Modelle zur Berechnung und Konstruktion von Bauteilen und Baugruppen.

Anders verhält es sich mit der, verglichen mit den Metallen, relativ neuen Gattung der Polymere. Im Gegensatz zu den metallischen Werkstoffen zeigen die Polymere bereits bei relativ geringer Belastung ein ausgeprägt zeitabhängiges, viskoelastisches Verhalten. Dies bedeutet, dass die Kunststoffe keinen reinelastischen Bereich besitzen, sondern auch unter kleinen Lasten viskoelastisch deformiert werden (kriechen). [BLAND, 1960; FERRY, 1980; FINDLEY, 1958]

Ferner ist das Verhalten vor allem unverstärkter Polymere hochgradig umgebungsabhängig. Sowohl Temperatur- als auch Luftfeuchtigkeitsänderungen haben teilweise eklatante Auswirkungen auf das Verformungsverhalten [KATOUZIAN, 1994]. Diese Einflüsse erschweren die Berechnungen bzw. die Voraussagen des Materialverhaltens wesentlich. Aufgrund dieser Schwierigkeiten ist auch das Materialverhalten von Polymeren, insbesondere unter speziellen Belastungsarten noch weitgehend unerforscht, obwohl viele verstärkte und unverstärkte Kunststoffe bereits zunehmend in Großserienproduktionen einfließen.

Eine sehr wichtige, bei Polymeren bislang noch nicht bzw. nicht hinreichend untersuchte Belastungsart, ist die sogenannte Lochleibung. Dies bezeichnet das Materialverhalten aufgrund einer kleinflächigen Lasteinleitung, wie sie bei einer Kraftübertragung über eine Bolzen-Loch-Passung auftritt. Zweifelsfrei handelt es sich hierbei um einen Grenzfall (worst-case), welcher auftreten kann, wenn bei Verschraubungen oder Vernietungen die Kraft nicht, wie gewünscht, mittels Reibschlusses der Flächenpressung, sondern aufgrund des Formschlusses Bolzen-Loch übertragen wird. Dies kann einerseits durch eine mangelhafte Montage, andererseits durch Relaxation des Materials an der Kontaktstelle hervorgerufen werden.

Ziel dieser Arbeit ist, ausgehend von den bekannten Gleichungen zur Beschreibung des nichtlinear-viskoelastischen Materialverhaltens von Polymeren, ein mathematisches Modell zu entwickeln, welches dem Konstrukteur oder Planungsingenieur ein Hilfsmittel in die Hand gibt, das Verhalten von Polymerwerkstoffen, welche durch herkömmliche Befestigungsmethoden wie Schrauben, Bolzen oder Niete montiert sind, zu berechnen.

Im den nächsten Abschnitten soll einleitend eine kurze Übersicht über die Entstehung und Entwicklung der Polymere, sowie über den aktuellen Stand der Wissenschaft gegeben werden.

Entstehungsgeschichte der Polymere

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts gelangen erstmals Versuche, die Naturstoffe Kautschuk und Cellulose chemisch so zu verändern, dass sie als Gummi, Vulkanfiber und Celluloid völlig neue Eigenschaften besaßen. Ihre gegenüber dem Naturstoff in vielerlei Hinsicht verbesserten technischen Eigenschaften führten bald dazu, dass diese, heute als *abgewandelte Naturstoffe* oder auch *Kunststoffe* bezeichneten Polymere nicht mehr nur als Ersatzstoffe verwendet wurden, sondern sich umfangreiche neue Einsatzgebiete eroberten.

Ebenfalls beobachtete man bereits im vorigen Jahrhundert, dass unter Einwirkung von Licht oder Wärme aus einigen einfachen gasförmigen oder flüssigen Stoffen zähflüssige oder feste Verbindungen entstehen können. Die Bedeutung dieser Veränderung als neues Herstellungsverfahren für Polymere wurde damals noch nicht erkannt. Erst nach 1900 gelang es, angeregt durch einen stetig steigenden Bedarf an Werkstoffen und bestärkt durch die Erfolge bei der Herstellung abgewandelter Naturstoffe, sog. *synthetische Kunststoffe* mit vergleichbaren Eigenschaften herkömmlicher Werkstoffe aus einfachen organischen Rohstoffen herzustellen.

Polymere sind heute aus keinem Bereich des täglichen Lebens, der Wirtschaft und Technik mehr wegzudenken. Ihre Bedeutung spiegelt sich wider in den viele Jahre lang anhaltenden Steigerungsraten, die nahezu alle anderen Industriezweige und Werkstoffgruppen übertrafen (vgl. Bild 1.1) [MENGENS, 1990].

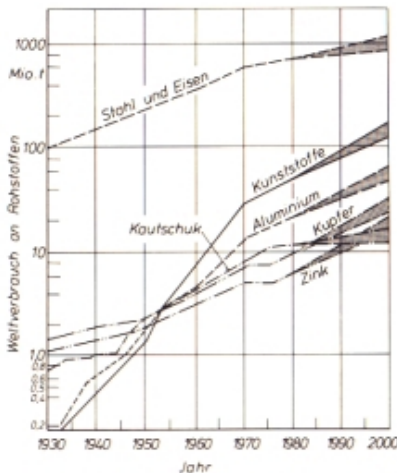


Bild 1.1: Entwicklung des Rohstoffverbrauchs in den letzten 70 Jahren [MENGENS, 1990]

Neben den vielen Vorteilen wie der geringen Dichte, der niedrigen Verarbeitungstemperatur, der Aufschäumbarkeit, der Einfärbbarkeit, der Variationsmöglichkeit der mechanischen Kennwerte, der niedrigen Leitfähigkeit, der größtenteils chemischen Beständigkeit und der hohen Schlagzähigkeit haben Kunststoffe aber auch einige Nachteile, wie z. B. niedriger E-Modul (unverstärkte Polymere), relativ geringe Temperaturbeständigkeit, niedrige Recyclingrate, Versprödung, Wasseraufnahme und eine meist stark ausgeprägte Kriechneigung.

Stand der Wissenschaft

Wie bereits erwähnt, darf zur Charakterisierung des Materialverhaltens bei den meisten Polymeren die plastische Deformation nicht vernachlässigt werden. Ein genaues Studium der Viskoelastizitätstheorie (vgl. Abschnitt 3.1) ist daher bei dieser Art von Materialien unumgänglich. Auf diesem Gebiet haben vor allem BLAND, SHAPERY und TSCHOEGL viel zum aktuellen Wissensstand beigetragen. [BLAND, 1960; SHAPERY, 1969; TSCHOEGL, 1989]

Wie sich zeigte, ist zur allgemeinen Charakterisierung von Polymerwerkstoffen die lineare Viskoelastizitätstheorie (vgl. Abschnitt 3.1.1) nicht ausreichend. Das Verhalten vieler Polymere ist, speziell bei hoher Belastung, zunehmend nicht-linear (vgl. Abschnitt 3.1.4). [FINDLEY, 1976; NAKADA, 1960; PIPKIN, 1968]

Diese, in erster Linie, theoretischen Betrachtungen, konnten bereits in zahlreichen Teilgebieten und mit diversen Polymeren experimentell untermauert werden. Aufgrund der ausgeprägten Kriechneigung, wurden häufig Thermoplaste als Versuchsbasis verwendet [BRÜLLER, 1983; MASCIA, 1982; SCHLIMMER, 1980; WARD, 1963]. Auch für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Polymethylmethacrylat (PMMA) existieren bereits einige Referenzveröffentlichungen. [BAU, 1993; BERTILSON, 1975; JANSSON, 1974]

Daneben wurden auch in einigen Spezialbereichen der Polymermechanik Arbeiten veröffentlicht. So wurde z.B. der Memory-Effekt bestimmter Materialien eingehend von [GREEN, 1957] und [NEIS, 1967] untersucht.

Auch der Weiterentwicklung und Verfeinerung der mathematischen Modelle wurde stets große Aufmerksamkeit gezollt. [FERRY, 1980; PIPKIN, 1972; SHAPERY, 1969; SCHWARZL, 1990]. Als untersuchte Teilbereiche auf diesem Gebiet sollen an dieser Stelle beispielhaft der einachsige Spannungszustand [GOTTENBERG, 1969], der mehrachsige Spannungszustand [STEINER, 1997], sowie die Modifikation des Boltzmannschen Superpositionsprinzips (vgl. Abschnitt 3.1.1) [FINDLEY, 1967/68; BAU 2000] Erwähnung finden.

Die gemeinsame Randbedingung, welche allen oben genannten Arbeiten zugrunde liegt, ist die Isotropie des Materials. Diese Annahme ist jedoch bei der Betrachtung von faserverstärkten Polymeren nicht mehr gültig. Die Gültigkeit einer gewählten Berechnungsmethode zur Beschreibung des Verhaltens eines verstärkten Werkstoffs muss daher explizit für jeden untersuchten Teilbereich überprüft werden. Beispiele für derartige Arbeiten sind [HOROSCHENKOFF, 1988/95] und [KARTOUZIAN, 1994].

Um die Entwicklung eines Schadensmodells zur Charakterisierung des Bruchverhaltens dieser Werkstoffgattung haben sich vor allem, [HILL, 1948], [PUCK, 1969] und [TSAI, 1971] verdient gemacht. Es wurden sogenannte Versagenskörper definiert, welche die Belastbarkeitsgrenzen des Materials darstellen. Dabei spannen die Hauptspannungen des ebenen Belastungsfalls, Normalspannung σ_1 , Querspannung σ_2 und Schubspannung τ_{12} , einen dreidimensionalen Raum auf. Aufgrund der durch das Material maximal übertragbaren Spannungen, welche in Faserrichtung um ein vielfaches höher sind als quer dazu, ergibt sich bei dieser Darstellungsweise ein sehr langgestreckter, ellipsoid-ähnlicher Körper. Materialversagen tritt auf, wenn die tatsächliche Belastung außerhalb dieses Versagenskörpers liegt. Dabei unterscheidet Puck zwei Bruchformen, den Faserbruch (Riss

in der Faser) und den Zwischenfaserbruch (Riss zwischen Faser und Matrix). Der von Puck aufgestellte Versagenskörper wird dabei – in Anlehnung an Hill – im wesentlichen vom Zwischenfaserbruchkriterium bestimmt. Der durch dieses Kriterium ermittelte Versagenskörper wird in Normalspannungsrichtung durch die Faserbruchflächen *abgeschnitten*. Tsai dagegen modifizierte den Versagenskörper von Puck dergestalt, dass sein Versagenskörper die gleiche Grundfläche in der ($\sigma_I=0$)–Ebene, sowie die gleichen zulässigen, maximalen Normalspannungen aufweist, dazwischen aber ein stetiger Körper aufgespannt wird.

Eine Anwendung sowie experimentelle Überprüfungen dieser Schadensmodelle finden sich in [KNAPPE, 1972] und [SCNEIDER, 1975] für unidirektionales Glasfaserlaminat, [PUCK, 1982] für Rohre, sowie [JAKOBI, 1987] für dickwandige Rohre.

Eine sehr umfassende Sammlung von Materialdaten bislang untersuchter Faser-Matrix-Kombinationen bietet das Handbuch Struktur Berechnung (HSB). Dabei handelt es sich um ein Nachschlagewerk, welches von Institutionen und Firmen, die sich mit Materialforschung beschäftigen, stetig durch neue Erkenntnisse erweitert wird. Das HSB ist sozusagen eine *lebende* Datensammlung, welche den aktuellen Stand der Wissenschaft dokumentiert.