

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
**TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN**

SERIE 8 · NUMMER 1 · 1983

FILM C 1309

**Deformations- und Bruchverhalten von
spritzgegossenem Standard-Polystyrol**

**Einfluß der Verformungs-
geschwindigkeit bei Zugbeanspruchung**



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Tonfilm (Komm., deutsch oder engl.), 16 mm, schwarzweiß, 116 m, 10 1/2 min (24 B/s). Hergestellt 1973 bis 1977, veröffentlicht 1979.

Der Film ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt.

Veröffentlichung aus dem Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. K.P. GROSSKURTH, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL; Aufnahme: J. THIENEL, H. SCHRADER, E. FRIXE, Dipl.-Ing. R. TILKE; Schnitt: G. HUMMEL.

Zitierform:

GROSSKURTH, K.P., und INST. WISS. FILM: Deformations- und Bruchverhalten von spritzgegossenem Standard-Polystyrol – Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit bei Zugbeanspruchung. Film C 1309 des IWF, Göttingen 1979. Publikation von K.P. GROSSKURTH, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 8, Nr. 1/C 1309 (1983), 25 S.

Anschrift des Verfassers der Publikation:

Prof. Dr.-Ing. K.P. GROSSKURTH, Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Hopfengarten 20, D-3300 Braunschweig.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion MEDIZIN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

NATURWISSENSCHAFTEN

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftliche Ergänzung zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (0551) 202202

FILME FÜR FORSCHUNG UND HOCHSCHULUNTERRICHT

KLAUS PETER GROSSKURTH, Braunschweig, und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM, Göttingen:

Film C 1309

Deformations- und Bruchverhalten von spritzgegossenem Standard-Polystyrol

Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit bei Zugbeanspruchung

Verfasser der Publikation: KLAUS PETER GROSSKURTH unter Mitarbeit von GÜNTER HUMMEL und JOSEF THIENEL¹

Mit 12 Abbildungen

Inhalt des Films:

Deformations- und Bruchverhalten von spritzgegossenem Standard-Polystyrol. Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit bei Zugbeanspruchung. Der Film zeigt Initiierung und Wachstum von inhomogenen Deformationserscheinungen und Bruchvorgängen in einem spritzgegossenen, transparenten Standard-Polystyrol. Die Probekörper werden bei Raumtemperatur konstanter, zügiger und schlagartiger Zugbeanspruchung unterworfen; die erzielten Dehngeschwindigkeiten variieren zwischen 10^{-3} und 10^5 %/min. Das Verformungsverhalten ist nur bei sehr niedrigen, im Zeitstand-Zugversuch realisierbaren Deformationsgeschwindigkeiten durch das Entstehen von Scherbändern und nachfolgender makroskopischer Einschnürung gekennzeichnet. Normalerweise treten jedoch nach Überschreiten kritischer Nachgiebigkeiten Fließzonen auf.

Aufgrund der über dem Probenquerschnitt vorhandenen herstellungsbedingten Eigenspannungs- und Orientierungsverteilungen setzt die Fließzonenbildung stets im Probeninnern ein. Niedrige Dehngeschwindigkeiten ergeben eine geringe Fließzonenkonzentration, wobei die hochorientierte Spritzhaut nicht von Deformationserscheinungen erfaßt wird; der spröde Trennbruch erfolgt ohne erkennbare Vorankündigung. Höhere Dehngeschwindigkeiten führen zu einer großen Anzahl von Fließzonen, die nunmehr partiell in die Spritzhaut hineinwachsen. Der Bruch wird durch enorme Zunahme der Fließzonenkonzentration eingeleitet, die in einigen Fällen von einer geringfügigen Einschnürung begleitet ist. Er zeigt im Bereich der Spritzhaut plastische Verformungen. Mit Hilfe des Einsatzes einer Hochgeschwindigkeits-Drehspiegelkamera gelingt es, den Bruchablauf bei schlagartiger Zugbeanspruchung in seinen Einzelphasen sichtbar zu machen und eine maximale Bruchgeschwindigkeit von 970 m/s zu ermitteln.

¹ Kapitel 2: Zur Entstehung des Films.

Summary of the Film:

Kinetics of Stress-crazing and Fracture Processes in Injection Moulded Polystyrene at Different Strain Rates. The film shows initiation and propagation of inhomogeneous deformation and fracture processes in injection moulded transparent polystyrene. The strain rates of the specimens subjected to constant, normal and impact tensile load at room temperature varied between 10^{-3} and 10^5 %/min. The formation of shear bands and macroscopic necking only can be observed at very low strain rates verified in creeping tests. Normally, however, crazes become visible after passing a critical strain. In the course of processing internal stress and molecular orientation distributions exist in the specimen cross section. These effect that tensile bars always craze internally. Low elongation speeds show a small craze concentration. Near the surface, where molecular orientations are high, the material is still uncrazed. The brittle fracture takes place without recognizable warning. Higher elongation speeds cause a great number of crazes growing partially into the oriented region near the surface. The fracture is initiated by enormous increase of craze concentration followed by unimportant necking in some cases. In the area near the surface the fracture shows plastic deformations. The nucleation and propagation of fracture processes obtained in an impact tensile test can be investigated by means of a high speed rotation mirror camera; by single frame analysis a maximum crack velocity of about 970 m/s is detected.

Résumé du Film:

Comportement de déformation et de rupture de polystyrène standard moulé par injection. Influence de la vitesse de déformation lors de la contrainte de traction. Le film montre la naissance et la croissance de phénomènes non-homogènes de déformation et de rupture dans un polystyrène standard transparent moulé par injection. Les échantillons sont soumis, à la température ambiante, à une contrainte de traction constante, progressive et brusque; la vitesse d'allongement varie ente 10^{-3} et 10^5 %/min. Le comportement de déformation est caractérisé par la naissance de bandes de cisaillement suivie de la striction macroscopique, qui ne se manifestent qu'à des vitesses de déformation très faibles, obtenues dans l'essai de fluage à long temps pour l'effort de traction. Dans le cas normal toutefois, des zones de fluage apparaissent dès l'élasticité critique est dépassée.

La contrainte propre et l'orientation due à la fabrication sont réparties sur la section des échantillons de manière telle que les zones de fluage prennent toujours naissance au coeur de l'échantillon. Des vitesses d'allongement faibles engendrent une concentration minimale de zones de fluage at la peau, orientée vers le haut, n'est pas touchée par les phénomènes de déformation; la rupture fragile survient sans signe avant-coureur. Des vitesses d'allongement plus élevées donnent lieu à des zones de fluage plus nombreuses qui font alors partiellement saillie dans la peau. La rupture est précédée d'une augmentation énorme de la concentration des zones de fluage qui est accompagnée dans quelques cas d'une faible striction. La cassure présente des déformations plastiques au niveau de la peau. En utilisant une caméra à miroir tournant à grande vitesse, on réussit à rendre visible le déroulement de la rupture dans ses différentes phases, sous l'effet d'une contrainte de traction brusque, et à calculer une vitesse maximale de rupture de 970 m/s.

Allgemeine Vorbemerkungen

Der praktische Einsatz von Polymerwerkstoffen setzt zunächst grundlegende Kenntnisse über material- und belastungsspezifische Versagensmechanismen voraus. Sie werden in der Regel anhand von vereinfachenden, überschaubaren Modellversuchen unter definierten Bedingungen erarbeitet.

Neben einer Vielzahl anderer Faktoren üben Verformungsgeschwindigkeit und molekulare Orientierungen einen entscheidenden Einfluß auf das Deformations- und Bruchverhalten von zugbeanspruchten Thermoplasten aus. Technisches Interesse besitzen in der Praxis die als Folge zahlreicher Verarbeitungsprozesse entstehenden ortsvariablen

Orientierungszustände. Ihre Auswirkungen auf die durch Zugbeanspruchung bei Raumtemperatur nach Überschreiten kritischer Nachgiebigkeiten hervorgerufenen inhomogenen Deformationserscheinungen und das Bruchgeschehen werden am Beispiel spritzgeossener Probekörper besonders deutlich.

1.1. Molekulare Orientierungen und mechanische Eigenschaften

Polymerschmelzen wälzen sich beim Einspritzen in die Form infolge Quellströmung an der Formwand entlang. Die Scherung der Schmelze führt dabei vor allem in der Nähe der Formwand zur Ausrichtung der Makromoleküle, was am Beispiel der Verzerrung einer kreisförmig geknäulten Molekülkette besonders deutlich wird (Abb. 1). WOEBCKEN et al. ([18]) gelang der Nachweis, daß außerdem im Inneren der einströmenden Masse Dehnkräfte herrschen, die zusätzlich eine geringe Formänderung der Molekülketten senkrecht zur Spritzrichtung bewirken.

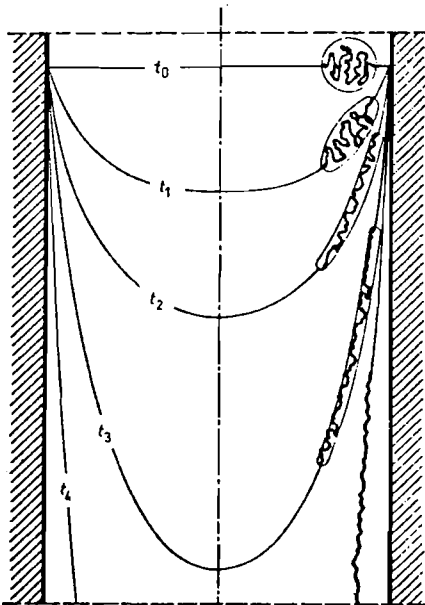


Abb. 1. Deformation eines geknäulten Makromoleküls durch Scherströmung nach CHATAIN ([2]), ref. von SCHREYER ([14])
 $t_0 < t_1 < t_2 < t_3 < t_4$

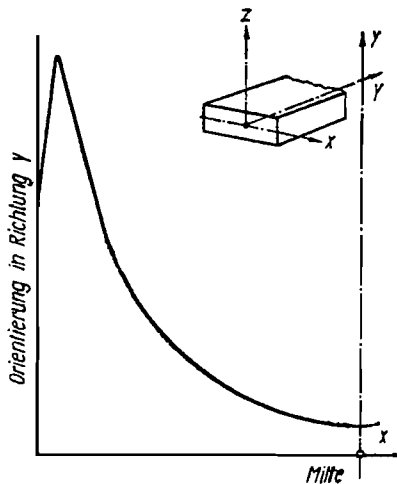


Abb. 2. Verlauf der molekularen Orientierungen in einem prismaförmigen Formteil. Massefluß in Richtung y

Welcher Anteil der entstandenen Orientierungen in einem Spritzgußteil eingefroren wird, hängt davon ab, wieviel Zeit den Makromolekülen im Verlauf der Abkühlung bleibt, dem energetisch günstigsten Zustand zuzustreben. Beim Spritzen in kalte Formen erhöht sich die für Desorientierungsvorgänge verbleibende Zeit mit zunehmendem Abstand von der Formwand. Dementsprechend werden sich in einem Spritzgußstab die höchsten Orientierungen normalerweise nahe der Formwand einstellen und zur Stabmitte hin rasch abnehmen. WIEGAND et al. ([16]) und WINTERGERST ([17]) haben über diese Zusammenhänge ausführlich berichtet. Der in Abb. 2 dargestellte qualitative Verlauf

der Orientierungen gibt vereinfacht die Meßergebnisse elektronenmikroskopischer Untersuchungen wieder (GROSSKURTH [7]). Je nach Spritzbedingungen kann es insbesondere bei Verwendung teilkristalliner Thermoplaste wegen der bei der Erstarrung zu beobachtenden plötzlichen Volumenkontraktion und infolge hohen Spritznachdrucks im Innern des Formteilquerschnitts noch zu einem weiteren relativen Orientierungsmaximum kommen (GROSSKURTH [4], WÜBKEN [19]).

Bedingt durch den Kettencharakter der Makromoleküle führen Orientierungen zur Anisotropie zahlreicher Materialeigenschaften. Die intramolekulare Kopplung ist nämlich aufgrund der hier vorliegenden Hauptvalenzbindungen um ein Vielfaches stärker als die auf van der Waals-Bindungen beruhenden intermolekularen Wechselwirkungen. Daher sind orientierte Kunststoffe in Orientierungsrichtung höher belastbar als senkrecht dazu. So lassen sich beispielsweise bei zügiger Zugbeanspruchung von einachsiger warmgerecktem Polystyrol Zugfestigkeit und Dehnung bei Maximalkraft in Reckrichtung etwa um das Zwei- bis Dreifache verbessern; die Schlagzugzähigkeit steigt gegenüber dem orientierungsfreien Grundzustand sogar um den Faktor 11,5 an (GROSSKURTH [6]). Dagegen fallen die genannten mechanischen Kennwerte senkrecht zur Orientierungsrichtung ungefähr auf die Hälfte ab. Überträgt man diese Erkenntnisse auf spritzgegossene Probestäbe, so werden gemäß der nach Abb. 2 ortsvariablen Orientierungen über dem Stabquerschnitt unterschiedliche mechanische Eigenschaften zu erwarten sein.

1.2. Deformationserscheinungen und Bruchprozesse

In amorph erstarrten Polymeren setzt inhomogene plastische Verformung als Folge von Dehnkräften ein, wenn die kritische Nachgiebigkeit in lokal eng begrenzten Bereichen überschritten wird. Die dadurch hervorgerufenen Deformationserscheinungen werden als Crazes oder Fließzonen bezeichnet. Um ihrem molekularen Aufbau stärker Rechnung zu tragen, schlug KAUSCH ([12]) kürzlich den Begriff „Mikroreckzone“ vor. Daneben lassen sich unter bestimmten Belastungsparametern auch in spröden amorphen Polymeren makroskopische Einschnürungen beobachten, die auf eine Schulter-Hals-Verstreckung zurückzuführen sind.

Fließzonen stellen Bereiche dar, in denen die Makromoleküle in Belastungsrichtung durch Einwirkung genügend starker Dehnkräfte gestreckt vorliegen. Zunächst hielt man diese Zonen für echte Gefügetrennungen und gab ihnen deshalb die unzutreffende Bezeichnung „Spannungsrisse“. Heute gilt es als erwiesen, daß sie aus elongierten Fibrillen bestehen, die ähnlich dem in Abb. 3 vorgeschlagenen Modell aus dem Grundmaterial herausgezogen wurden (SPURR et al. [15], KAMBOUR [10]). Bei Polystyrol ergaben Lichtbrechungsindexmessungen (KAMBOUR [11]) und rasterelektronenmikroskopische Betrachtungen sauerstoffionengeätzter Probenoberflächen (GROSSKURTH [5], [9]), daß das Fließzonenmaterial eine wesentlich geringere Dichte als die umgebende, unversehrte Polymermatrix besitzt. Dies hat einerseits zur Folge, daß die Fließzonen in transparenten Thermoplasten bei entsprechendem Lichteinfall mit bloßem Auge sichtbar sind. Andererseits wird deutlich, daß das Fließzonenwachstum und die damit verbundene Volumenvergrößerung mit einer Auflockerung des Werkstoffs einhergeht. Obwohl die Fließzonen zunächst weiterhin lastübertragungsfähig sind, leiten sie schließlich das

Versagen des Werkstoffes ein. Als auslösend hierfür ist der mit Kerbwirkung und daraus resultierenden Spannungsspitzen verbundene Leerraumanteil anzusehen. Aus der Fließzone entsteht durch Vereinigung der mikroskopischen Hohlräume ein makroskopischer Riß, der sich schnell zum Bruch vergrößert. Die Bruchausgangszone und das Gebiet langsamen Bruchfortschritts befinden sich innerhalb einer Fließzone; ihre Bruchflächenprofilierung ist entsprechend der geringen Dicke der Fließzonen außerordentlich schwach ausgeprägt. Daher zeichnet sich das Anrißgebiet im Bruchbild meist durch eine glatte Spiegelfläche aus (Abb. 4).

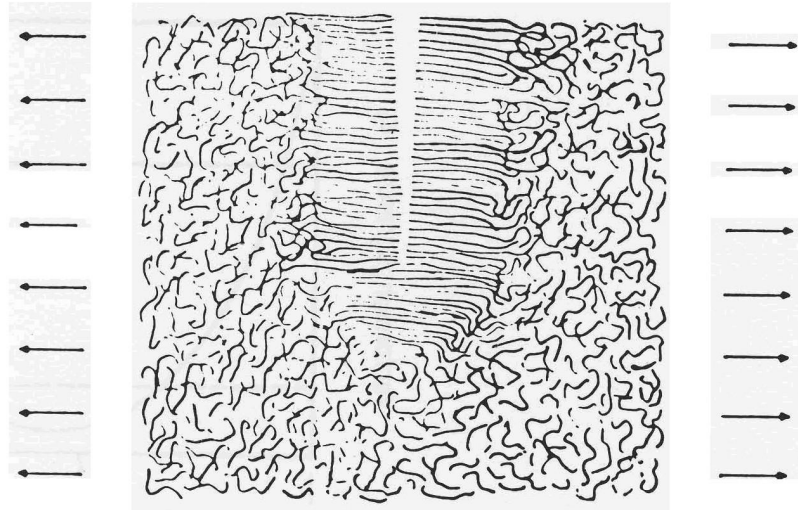


Abb. 3. Modell einer Fließzone mit nachfolgendem Riß nach BERRY ([1])

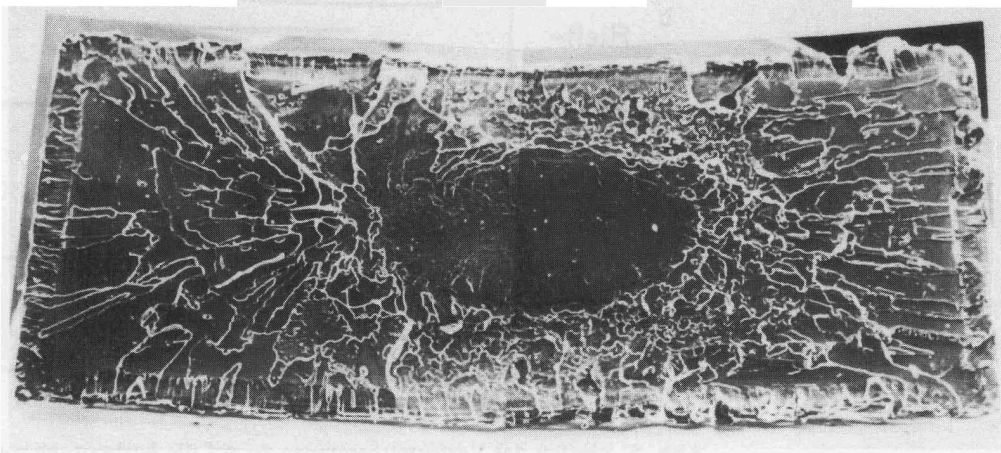


Abb. 4. Bruchfläche eines spritzgegossenen Polystyrol-Schulterstabes nach Zugbeanspruchung. Dehngeschwindigkeit 5 %/min

Die Fließzonenbildung setzt in den Materialbereichen ein, deren Fließzonen auslösende kritische Dehnung – auch Verformungsgrenze genannt – überschritten wird. Als Ursachen hierfür kommen einerseits Spannungsspitzen in der Umgebung von Fehlstellen, andererseits ein durch ortsvariable Orientierungszustände lokal unterschiedliches Verformungsverhalten in Frage. Infolgedessen gehen Fließzonen in thermisch entspannten, orientierungsfreien Proben bevorzugt von der Probenoberfläche aus, die naturgemäß eine besonders hohe Fehlstellenkonzentration aufweist.

Die Verformungsgrenze ϵ_F steigt bei amorphen Polymeren mit dem Orientierungsgrad an. Entsprechend dem in Abb. 5 schematisch dargestellten Verlauf liegt sie also in der

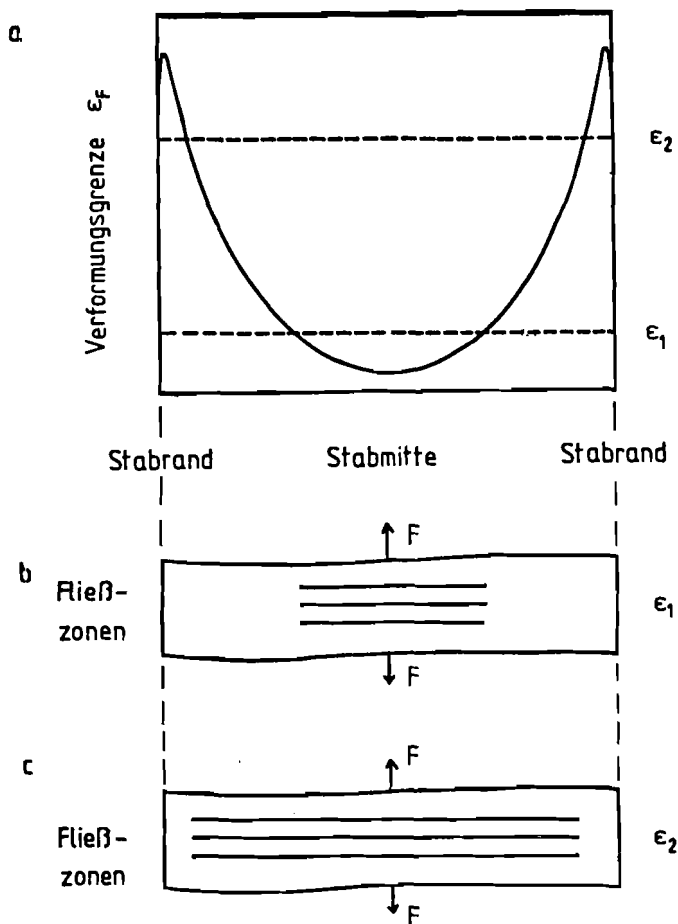


Abb. 5. Einfluß der Verformungsgrenze ϵ_F auf die Ausbreitung von Fließzonen in spritzgegossenem Polystyrol. Zugkraft F in Masseflußrichtung. ϵ_1, ϵ_2 im Zugversuch aufgebrachte Gleichmaßdehnungen

äußeren Schicht spritzgegossener Proben höher als in dem nur mäßig orientierten Probeninnern. Ferner sind in der äußeren Schicht Druckspannungen, im Inneren Zugspannungen vorhanden. Daher beginnt die Fließzonenbildung bei Spritzgußteilen aus amorphen Thermoplasten im Probeninnern. Die ebenfalls an den Oberflächen existierenden Fehlstellen tragen somit in diesem Fall nicht zur Initiierung inhomogener Deformationsprozesse bei. Die laterale Ausdehnung der Fließzonen, die sich stets orthogonal zur Zugbeanspruchung ausbreiten, resultiert gemäß Abb. 5 aus den Schnittpunkten des Verlaufs der tatsächlichen Dehnung mit dem der Verformungsgrenze.

Das Verformungs- und Bruchverhalten spritzgegossener amorpher Thermoplaste wurde am Beispiel eines glasklaren Polystyrols bei zügiger Zugbeanspruchung in einem Dehngeschwindigkeitsbereich zwischen 0,2 und 10 %/min kinematographisch untersucht (GROSSKURTH [20]). Die zugehörigen Spannungs-Dehnungslinien sind in Abb. 6 zusammengestellt. Das weitgehend elastische Werkstoffverhalten ist demnach nicht durch

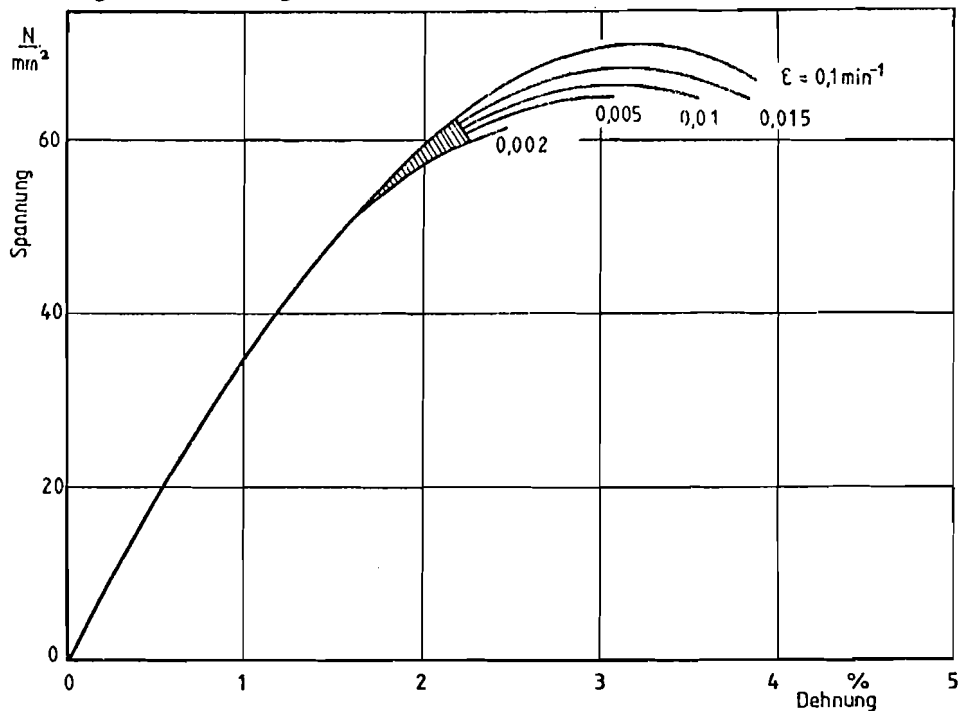


Abb. 6. Spannungs-Dehnungsverhalten von spritzgegossenem Polystyrol bei zügiger Zugbeanspruchung in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit ϵ . Prüftemperatur: 23°C; Spritztemperatur: 200°C

eine Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit gekennzeichnet. Dagegen steigen Reißdehnung sowie Reiß- und Zugfestigkeit mit zunehmender Dehngeschwindigkeit deutlich an. In dem schraffierten Gebiet von Abb. 6 lassen sich die Kurven wegen mehrfacher Überschneidungen nicht getrennt einzeichnen. Hier setzt mit der Bildung von Fließzonen ein von der bisherigen Gleichmaßdehnung abweichendes Verformungsverhalten ein.

Die Abhängigkeit der Fließzonenkonzentration, d.h. der Anzahl der Fließzonen je Zentimeter, ließ sich durch quantitative Einzelbildauswertung der Filmaufnahmen ermitteln (GROSSKURTH [8]). Abb. 7a zeigt, daß die Fließzonenkonzentration bei Zugrundlegen jeweils gleicher Spannungen im Bereich geringer Dehngeschwindigkeiten zunächst ausgeprägte Maxima aufweist. Dagegen bleibt der Verlauf der Fließzonenkonzentration bei höheren Deformationsgeschwindigkeiten nach einem anfänglichen starken Abfall weitgehend konstant. Der Vergleich der Fließzonenkonzentration mit der makroskopisch meßbaren Dehnung (Abb. 7b) ergibt eine befriedigende Übereinstimmung.

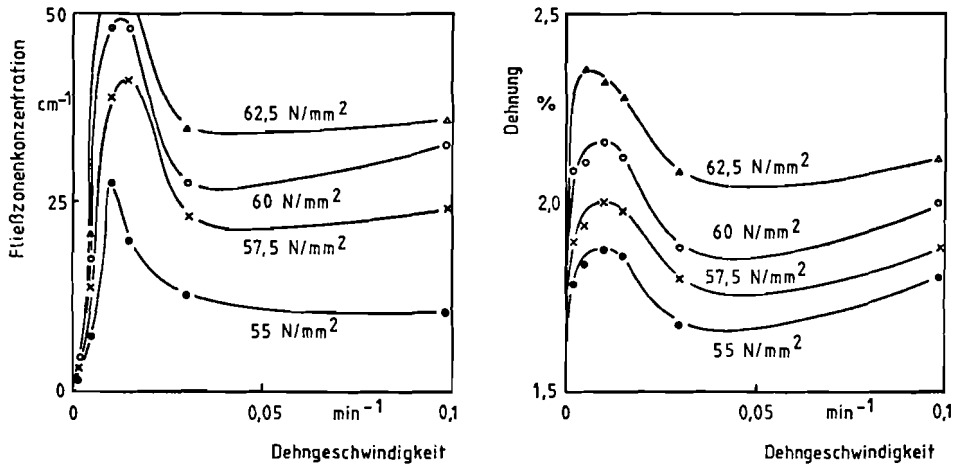


Abb. 7. Fließzonenkonzentration (a) und Dehnung (b) bei Betrachtung jeweils gleicher Spannungen in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit. Parameter wie in Abb. 6

Aus Abb. 7 b geht hervor, daß die Dehnbarkeit des spritzgegossenen Materials mit abnehmender Dehngeschwindigkeit nach Durchlaufen eines Verformungsmaximums stark nachläßt. Dies gilt jedoch nur für den Bereich normalspannungsinduzierter Verformungsprozesse, zu denen auch die Fließzonenbildung zählt. Bei sehr geringen Dehngeschwindigkeiten, wie sie sich im Zeitstand-Zugversuch realisieren lassen, tritt zunächst parallel zur Normalverformung Scherdehnung auf. Sie äußert sich in Form einer leichten Einschnürung in der Umgebung der Fließzone (Abb. 8a). Nunmehr hat eine nur geringfügige weitere Ermäßigung der Dehngeschwindigkeit eine drastische Erhöhung der molekularen Platzwechselfähigkeiten zur Folge, was sich bei der zugehörigen Zeitdehnlinie in Abb. 9 an einem deutlichen Dehnungsanstieg auf rund 8%, bezogen auf eine Meßlänge von 100 mm, äußert. Ursächlich hierfür ist die unter dem Einfluß der Scherdehnung entstehende Einschnürung des Werkstoffes (Abb. 8b); er erfährt im Bereich der Einschnürzone eine Dehnung von etwa 50%. Daß die Scherverformung im Bereich der Einschnürung starke molekulare Orientierungen zur Folge hat, verdeutlicht die polarisationsoptische Aufnahme in Abb. 10 anhand der hohen Isochromatenanzahl. Diesen ausgeprägten molekularen Orientierungszuständen verdankt die Bruchfläche ihr faseriges Aussehen.

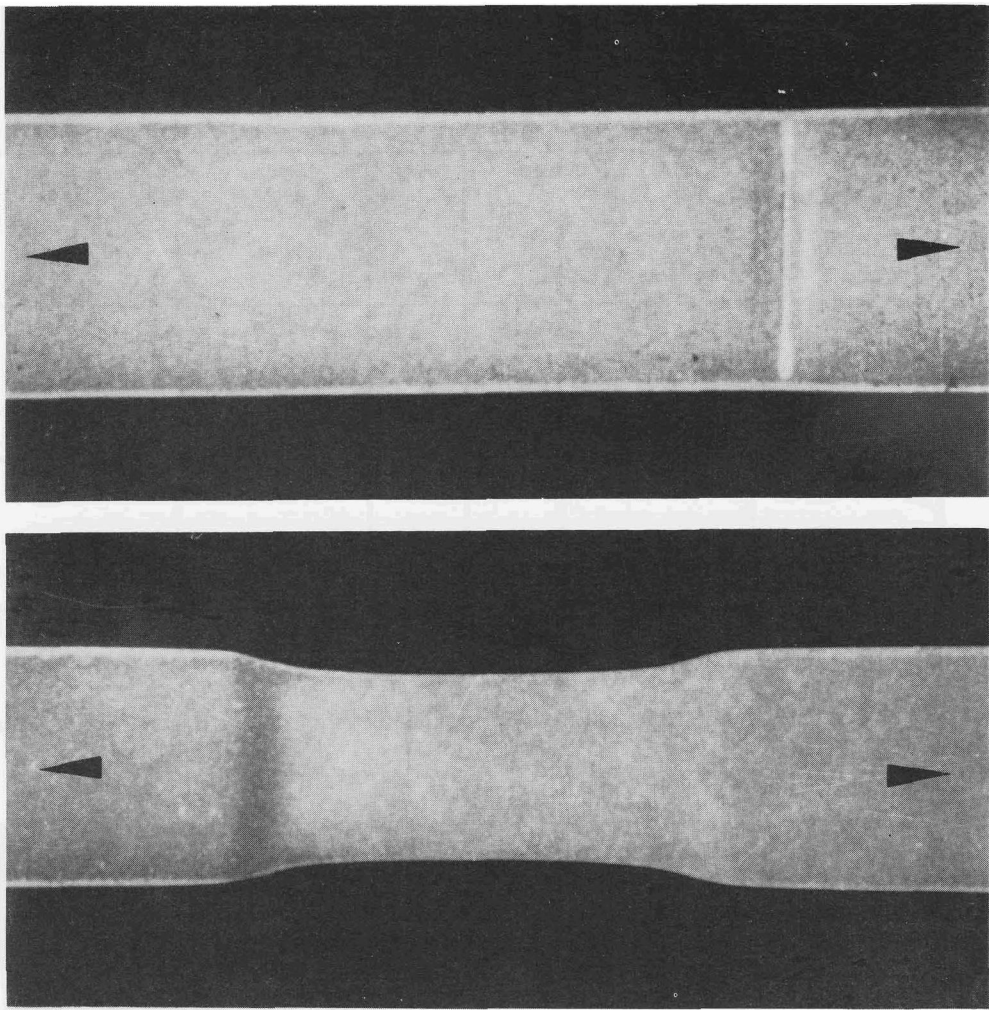


Abb. 8. Deformationserscheinungen in Polystyrol-Spritzgußstäben unter konstanter Zugbeanspruchung. Prüftemperatur: 23°C . Spritztemperatur: 200°C . Belastung in Pfeilrichtung.

(a) Fließzone. Spannung: $42,5 \text{ N/mm}^2$; Laststandzeit: 18 h

(b) Einschnürung. Spannung: 41 N/mm^2 ; Laststandzeit: 44 h

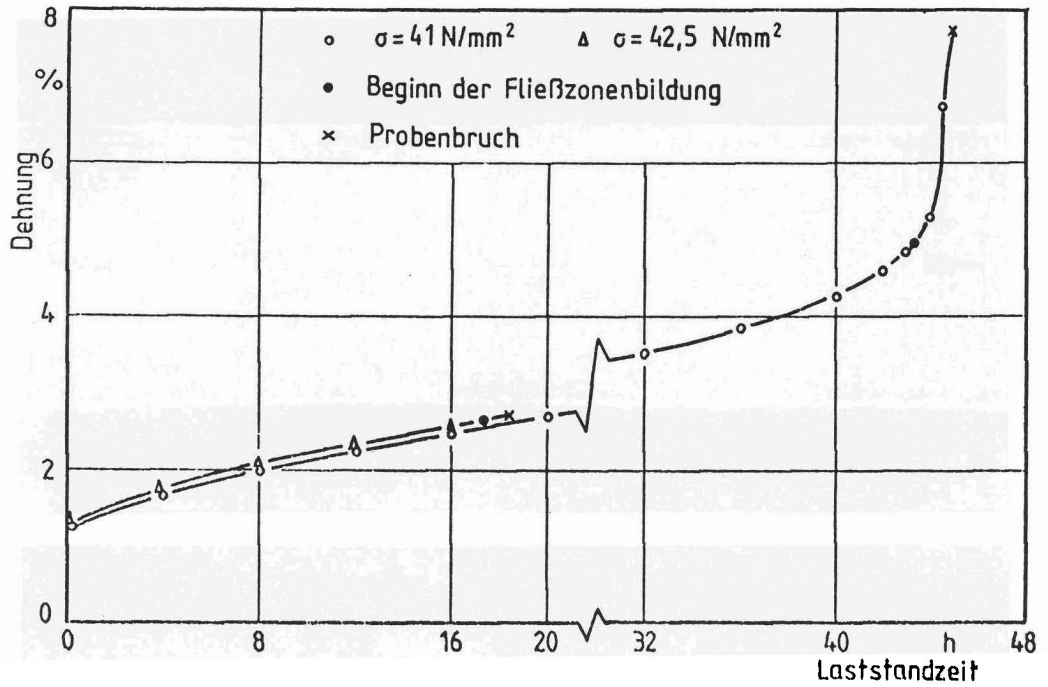


Abb. 9. Zeitdehnlinien von spritzgegossenem Polystyrol unter verschiedenen Spannungen. Parameter wie in Abb. 8

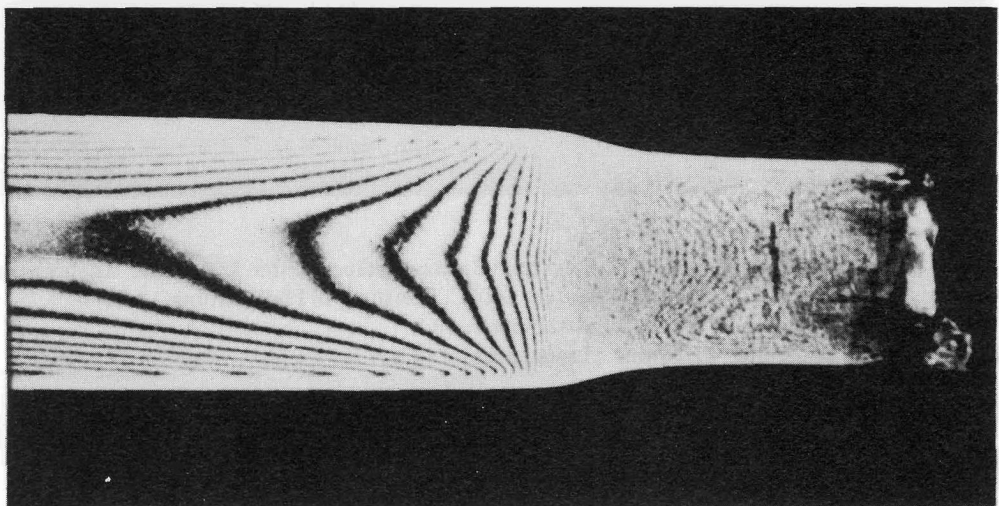


Abb. 10. Polarisationsoptische Aufnahme von Einschnürung und Bruch in spritzgegossenem Polystyrol nach 45stündiger konstanter Zugbeanspruchung. Parameter wie in Abb. 8b

Durch Einzelbildauswertung der im Film gezeigten hochfrequenzkinematographischen Aufnahmen bei schlagartiger Zugbeanspruchung lässt sich die Wachstumsgeschwindigkeit der brucheinleitenden und vor der Risßspitze durch die Probe wandernden Deformationszone ermitteln. Das Resultat ist in Abb. 11 dargestellt. Während das Wachstum zunächst

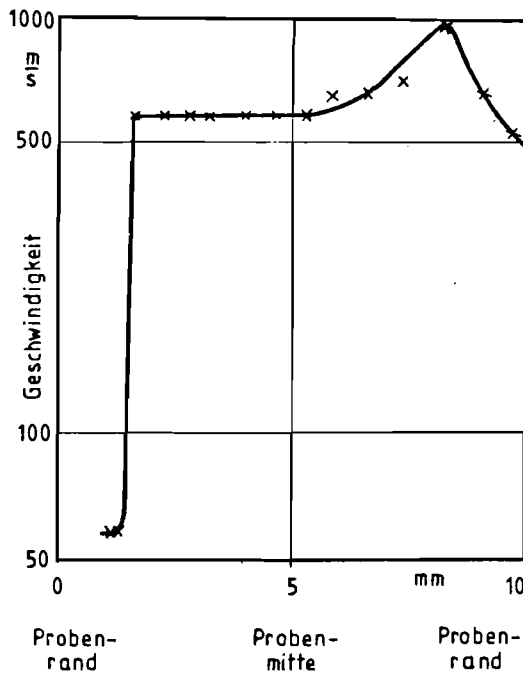


Abb. 11. Wachstumsgeschwindigkeit der brucheinleitenden Deformationszone in spritzgegossenem Polystyrol bei schlagartiger Zugbeanspruchung. Prüftemperatur: 23 °C; Spritztemperatur: 200 °C

mit relativ geringer Geschwindigkeit am Probenrand einsetzt, verzehnfacht sich die Geschwindigkeit plötzlich durch den beginnenden Bruch. Nunmehr stimmen Wachstumsgeschwindigkeit der Deformationszone und des Bruches näherungsweise überein. Nachdem der Bruch die Probe mit einer konstanten Geschwindigkeit von 595 m/s bis zur Probenmitte hin erfaßt hat, schreitet er rascher fort und erreicht bei Annäherung an die Spritzhaut eine maximale Geschwindigkeit von etwa 970 m/s. Aufgrund des günstigeren Spannungs-Dehnungsverhaltens der hochorientierten Spritzhaut verlangsamt er sich hier erheblich.

2. Zur Entstehung des Films

2.1. Untersucher Werkstoff

Für die Untersuchungen wurde ein handelsübliches, glasklares Standard-Polystyrol verwendet. Dabei handelt es sich um ein ataktisch polymerisiertes Styrol, d.h. die Phenylsubstituenten sind längs der Molekülketten räumlich unregelmäßig angeordnet. Mit Hilfe der Gel-Permeations-Chromatographie wurde das Zahlenmittel des Molekulargewichts mit $\bar{M}_n = 115\,000$ ermittelt. Das Verhältnis zwischen Gewichts- und Zahlenmittel beträgt $\bar{M}_w/\bar{M}_n = 3,1$.

Als Proben dienten 3 mm dicke, spritzgegossene Schulterstäbe, die die Form des Probekörpers Nr. 3 nach DIN 53 455 ([3]) besaßen (Abb. 12). Die Spritzrichtung stimmte mit der Stablängsachse überein. Die Masstemperatur beim Spritzgießen betrug 200°C.

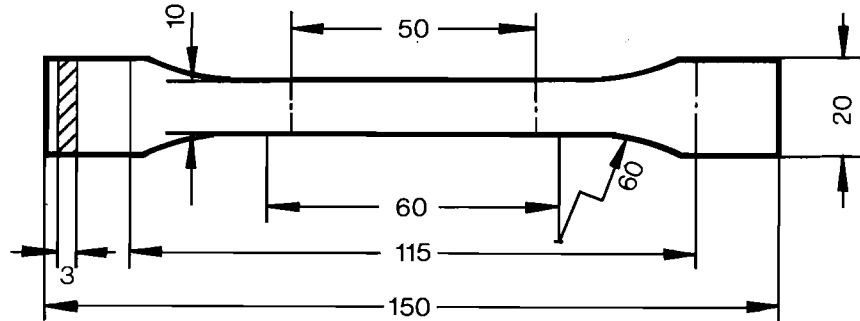


Abb. 12. Probekörper: Form und Abmessungen

2.2. Versuchs- und Aufnahmetechnik

Der Film zeigt am Beispiel eines spritzgegossenen Polystyrol-Werkstoffs den Einfluß der Dehngeschwindigkeit auf inhomogene Deformationsprozesse und Bruchvorgänge. Die Beanspruchungsskala reicht vom Schlagzugversuch, bei dem der Riß die 10 mm breite Probe in nur 15 Mikrosekunden ($15 \cdot 10^{-6}$ s) durchläuft, über den herkömmlichen Zugversuch bis zum Zeitstand-Zugversuch, der sich über eine Zeitdauer von 45 Stunden erstreckt. Neben den zugehörigen unterschiedlichen Prüfeinrichtungen sind zur kinematischen Dokumentation der während des Versuchsablaufs auftretenden sichtbaren mikro- und makrostrukturellen Werkstoffveränderungen sehr verschiedenartige Aufnahmetechniken erforderlich. Die notwendigen Zeittransformations-Maßstäbe erreichen im vorliegenden Fall sowohl bei der Zeitdehnung mit 125 000 : 1 als auch bei der Zeitraffung mit 1 : 17 000 extreme Werte.

2.2.1. Kurzzeit – Zugversuche bei mittleren Verformungsgeschwindigkeiten¹

Die Versuchseinrichtung bestand aus einer Horizontalspindelzugprüfmaschine. Bei Raumtemperatur wurden die Probekörper mit jeweils gleichbleibender Prüfgeschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt. Da bei Standard-Polystyrol nur geringe Dehnungen auftreten, kann die Dehngeschwindigkeit als konstant angesehen werden. Um ihren Einfluß auf das Verformungsverhalten zu ermitteln, wurden bei den Versuchen Dehngeschwindigkeiten von 0,2; 0,5 und 1,5%/min gewählt. Die Filmaufnahmen wurden einem Film entnommen, der den Einfluß unterschiedlicher Dehngeschwindigkeiten von 0,2 bis 10%/min auf das Verformungsverhalten von spritzgegossenem Polystyrol zum Inhalt hat (GROSSKURTH [20]). Über die Auswirkungen unterschiedlicher Orientierungszustände in den Proben als Folge der Verarbeitungsbedingungen berichtet ein weiterer Film (GROSSKURTH [21]).

¹ Die Versuche und Aufnahmen wurden im Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen (IWF) durchgeführt. Herr E. FRIXE baute die Vorrichtung für die Anzeige der Zugspannung im Objektfeld der Kamera.

Neben der kinematographischen Dokumentation der verformungsbedingten Deformationserscheinungen ist auch die jeweils herrschende Zugspannung von Interesse. Aus diesem Grund wurde eine Anzeigevorrichtung geeigneter Größe unterhalb des Probestabes angebracht und mit der Kraftmeßeinrichtung der Zugprüfmaschine verbunden. So konnten Schulterstab und Spannungsanzeige mit einer einzigen Kamera erfaßt werden.

Die Probenbreite wurde nahe der angußernen Schulter im schräg einfallenden Durchlicht aufgenommen. Dabei stand die Kamera in gleicher Höhe mit der Probe, jedoch bildete ihre optische Achse seitlich einen Winkel von etwa 30° zur Senkrechten der Probenoberfläche. Diese schräg seitliche Aufnahme richtung war erforderlich, um die Bildung von Fließzonen im Polystyrolstab besser sichtbar zu machen. Die Mattierung der Probenrückseite erfolgte mit feinem Quarzmehl. Bei den in dieser Weise mattierte Proben war die Beobachtung der Fließzonen weit besser möglich als bei den Originalproben mit formblanker Oberfläche. Eine Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften durch das Sandstrahlen wurde nicht festgestellt.

Für die zeitgleichen Aufnahmen mit 24 B/s und die schwach zeitgedehnte Aufnahme mit 80 B/s wurde als Kamera eine ARRIFLEX 16 ST eingesetzt, während die Zeitdehneraufnahme mit 3400 B/s mit einer FASTAX 6000/16 mm (mit 2-Flächen-Prisma) hergestellt wurde.

2.2.2. Schlagzugversuche²

Die relativ hohe spezifische Bruchenergie amorpher Thermoplaste – sie liegt etwa drei Zehnerpotenzen über derjenigen von anorganischen Gläsern – verdeutlicht, daß dem Bruch im unmittelbar angrenzenden Material eine nicht unerhebliche irreversible Deformation vorausgeht. Sie läßt sich in der Regel mit den von Laufbildfilmkameras maximal erreichbaren Bildfrequenzen von etwa 20 000 B/s zeitlich auflösen. Die Bruchgeschwindigkeiten selbst sind jedoch so groß, daß sie für die Herstellung auswertbarer Filmaufnahmen wesentlich höhere Bildfrequenzen erfordern (GROSSKURTH [20]). Abhilfe bietet hier der Einsatz von Spezialkameras, bei denen beispielsweise mit Hilfe eines turbinenbetriebenen Drehspiegelsystems eine begrenzte Anzahl von Bildern nacheinander auf ein unbewegtes Filmstück projiziert wird (RIECK [13]).

Für die hochfrequenzkinematographischen Aufnahmen stand im Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, eine Drehspiegelkamera der Firma Beckman und Whitley, Modell 330, zur Verfügung. Sie besitzt eine Bildkapazität von 80 Einzelbildern des Formats $18 \times 24 \text{ mm}^2$ und erreicht bei Druckluftantrieb der Turbine des Drehspiegels eine Bildfrequenz von etwa 10^6 B/s, was – bezogen auf den normalen Filmablauf bei der Wiedergabe – einer Zeitdehnung von ca. 42 000 : 1 entspricht. Da der mechanische Verschuß der Kamera die Belichtungszeit nicht auf den erforderlichen Wert von $80 \mu\text{s}$ begrenzen kann, muß sie mit Hilfe einer leuchtzeitgesteuerten Blitzlampe zwecks Vermeidung von Mehrfachbelichtungen realisiert werden. Die nicht ideale Rechteckform der Lichtstrom-Zeit-Funktion bedingt aufgrund der Anstiegs- und Abklingphase der Lichtintensität den Verlust von durchschnittlich 10 bis 20 Bildern.

² Die Versuche und Aufnahmen wurden im Institut für den Wissenschaftlichen Film (IWF), Göttingen, unter Mitwirkung von Herrn R. TILKE und Herrn H. SCHRADER durchgeführt.

Wegen dieser Randbedingungen kann sich die kinematographische Aufzeichnung bei einer Bildfrequenz von 10^6 B/s nur über die sehr kurze Zeitdauer von rund $60 \mu\text{s}$ erstrecken. Folglich muß man in der Lage sein, den Beginn des Bruchvorgangs bis auf wenige Mikrosekunden genau abzuschätzen. Da hierfür beim herkömmlichen Zugversuch keine Möglichkeit besteht, bietet sich für die Untersuchung des Bruchablaufs sowie der unmittelbar brucheinleitenden Deformationsmechanismen der Schlagzugversuch an. Das verwendete Pendelschlagwerk besteht im Prinzip aus der fest mit der Schabotte verbundenen Einspannvorrichtung und einem gabelförmigen Pendelhammer, der beim Schlag das auf einer schienenförmigen Auflage ruhende Querjoch mitnimmt. Dabei wird die in Einspannvorrichtung und Querjoch befestigte Probe zerrissen. Die Auftreffgeschwindigkeit des Pendels lag bei $3,85 \text{ m/s}$.

Wie beim Kurzzeit-Zugversuch erwies sich die Betrachtung der Fließzonenkinetik bei schräg einfallendem Durchlicht als günstig; dagegen erforderte die Betrachtung des Bruchvorgangs selbst senkrecht auftreffendes Durchlicht. Während für die Dokumentation des Fließzonenwachstums Bildaufnahmefrequenzen von etwa $3 \cdot 10^5$ B/s ausreichten, mußte für die Aufzeichnung des Bruchablaufs eine Bildfolgefrequenz von rund 10^6 B/s gewählt werden.

Schon aus Formatgründen ergeben die Aufnahmen keinen vorführfähigen Film. Hierzu ist vielmehr ein formatangleichendes Umkopieren jedes einzelnen Bildes bei gleichzeitiger Justierung des Bildstandes und Durchführung eines Belichtungsausgleichs notwendig.

2.2.3. Zeitstand - Zugversuche³

Die Polystyrolproben wurden bei Raumtemperatur in einer Zeitstand-Zugvorrichtung konstanten Lasten unterworfen. Die Dehnung wurde mittels induktiver Wegaufnehmer und zugehörigem Meßverstärker auf einem Linienschreiber als Funktion der Zeit registriert. Eine Filmkamera dokumentierte verformungsbedingte Probenveränderungen im Bereich der Meßlänge. Beleuchtungs- und Aufnahmegeometrie entsprachen in etwa der beim Kurzzeit-Zugversuch gewählten Anordnung.

Die lange Versuchsdauer bedingte den Einsatz zeitraffender Aufnahmetechniken. Deformationsprozesse, die bis zum Bruch lediglich durch Gleichmaßdehnung und Fließzonenbildung gekennzeichnet sind, können bei konstanter Bildfrequenz aufgenommen werden. Als schwieriger erweist sich dagegen die Wahl der geeigneten Aufnahmefrequenz bei solchen Vorgängen, die mit einer Einschnürung der Proben verbunden sind. Hier laufen die Veränderungen zunächst solange sehr langsam ab, wie Gleichmaßdehnung vorherrscht; die anschließende scherdehnungsbedingte Einschnürung vollzieht sich dagegen wesentlich rascher. Die Aufnahme des Gesamtvorganges mit nur einer Aufnahmefrequenz hätte also am Beginn oder am Ende des Versuchs zu einer filmisch unbefriedigenden Wiedergabe des Geschehens geführt. Entsprechende Vorversuche ergaben, daß die

³ Für die Durchführung dieser Versuche und Aufnahmen wurden im Institut für den Wissenschaftlichen Film (IWF), Göttingen, spezielle Versuchseinrichtungen entwickelt und gebaut. Herr E. FRIXE übernahm den Bau einer Prüfapparatur für Zeitstand-Zugversuche.

Verwendung von zwei unterschiedlichen Aufnahme­frequenzen einen filmtechnisch günstigen Kompromiß darstellt. Die Frequenzumschaltung erfolgt über einen in die Dehnungsmeßkette eingebauten Grenzwertgeber; er wird so eingestellt, daß der Signalstrom zum Umschalten der Aufnahme­frequenz am Beginn des Einschnürprozesses freigegeben wird. Zugleich wird mit Hilfe eines Drehmagneten ein Schild mit der Angabe der neuen Aufnahme­frequenz im Objektfeld sichtbar. Bei dem gezeigten Versuch wurde die Anfangsphase mit 10 B/h aufgenommen, der Einschnürvorgang dagegen mit 8 B/min, also einer 48-fach höheren Aufnahme­frequenz.

Filmbeschreibung

Wortlaut des gesprochenen Kommentars¹

Zugstäbe Nr. 3 nach DIN 53 455

Probenbreite 10 mm; Probendicke 3 mm; Molekulargewicht $\bar{M}_n = 115\ 000$; Spritztemperatur 200°C; Zugrichtung horizontal

Für die im Film gezeigten Beanspruchungsarten wurden stets Werkstoff, Geometrie und Verarbeitungsparameter der spritzgegossenen Probekörper sowie die Prüftemperatur von 23°C beibehalten. Nur so war es möglich, ausschließlich den Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf das Deformations- und Bruchverhalten des untersuchten Werkstoffs darzustellen. Die Quarzmehl-Mattierung der Probenrückseiten erwies sich im Interesse ausreichender Bildkontraste als notwendig.

Kurzzeit-Zugversuche bei mittleren Verformungsgeschwindigkeiten Dehngeschwindigkeit 0,2 %/min

1. Das zur Erfüllung der Reflexionsbedingungen an den Fließzonen notwendige, schräg einfallende Durchlicht führt zwangsläufig zu einer ungleichmäßigen Bildausleuchtung. Dieser Effekt wird zusätzlich durch die ebenfalls schräge Aufnahmerichtung verstärkt. Sie führt zwar zu einer geringen geometrischen Verzeichnung, vermittelt aber einen räumlichen Eindruck von den Fließzonen.

Bei dieser und bei den folgenden Einstellungen wurde eine unterhalb der Probe angebrachte Kraftanzeige direkt mit aufgenommen. Ein Pfeil gibt auf der Skala synchron die jeweils herrschende Zugspannung an.

Zunächst bildet sich nur eine einzige Fließzone; weitere folgen in relativ großen zeitlichen Abständen. Die maximale Wachstumsgeschwindigkeit nimmt exponentiell mit der jeweils auslösenden Zugspannung zu. Die Fließzonenenden laufen nicht elliptisch oder gar spitz aus, sondern verbreitern sich schulterförmig. Aufgrund ihrer hohen Dehnbarkeit wird die stark orientierte Spritzhaut nicht von Fließzonen erfaßt. Die Probe bricht ohne Vorankündigung unter Bildung eines spröden Trennbruchs.

Die auf der Rückseite mattierten Schulterstäbe aus glasklarem Polystyrol werden bei Raumtemperatur zügig bis zum Bruch gedehnt. Direkt unterhalb der Probe wird die jeweils herrschende Zugspannung angegeben.

Zunächst Gleichmaßdehnung ohne auffällige Probenveränderungen. Inhomogene Deformation in Form einer Fließzone.

¹ Die *Kursiv*-Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film. – Die eingerückten Abschnitte in Kleindruck geben zusätzliche Informationen.

Weitere Fließzonen folgen in relativ großen zeitlichen Abständen. Aufgrund der beim Spritzgießen entstandenen starken molekularen Orientierungen und Druckeigenspannungen bleibt die Spritzhaut am oberen und unteren Stabrand fließzonenfrei.

Bei der vorliegenden Dehngeschwindigkeit von nur 0,2%/min ist die Fließzonenkonzentration relativ gering.

Der Sprödbruch wird bei einer Reißspannung von 610 kp/cm^2 – entsprechend 61 N/mm^2 – über dem rechten Ende der Skalenbeschriftung eintreten.

(Dauer der Einstellung: 100 s)

Dehngeschwindigkeit 0,5 %/min

2. Die erhöhte Deformationsgeschwindigkeit hat eine intensive Fließzonenbildung zur Folge. Zug- und Reißfestigkeit steigen in der bei Kunststoffen üblichen Weise an. Der spröde Trennbruch vollzieht sich wiederum ohne plastische Verformungsanteile.

Die Erhöhung der Dehngeschwindigkeit um den Faktor 2,5 führt zu einem grundsätzlich ähnlichen Verhalten. Zwar vergrößern sich Anzahl und Wachstumsgeschwindigkeit der Fließzonen, doch bleibt die Spritzhaut wiederum fließzonenfrei.

Bei einer Spannung von 670 kp/cm^2 – entsprechend 67 N/mm^2 – wird die Probe wieder über dem rechten Ende der Skalenbeschriftung spröde brechen.

(Dauer der Einstellung: 42 s)

Dehngeschwindigkeit 1,5 %/min

Zeitgleiche Aufnahme (24 B/s) und Zeitdehnung 3,3 : 1 und 140 : 1

3. Das Verformungsverhalten zeichnet sich durch spontanes Auftreten zahlreicher Fließzonen bei gleichzeitig hoher Fließzonenkonzentration aus. Die Anzahl der Fließzonen nimmt rasch zu. Auffällig ist das zum Teil gegenläufige Fließzonenwachstum.

Nunmehr wird die zunächst ebenfalls fließzonenfreie Spritzhaut bei genügend hohen Spannungen kurz vor dem Bruch partiell von Fließzonen erfaßt. Im Gegensatz zu den vorausgegangenen Einstellungen leiten ausgeprägte Deformationen den Bruchvorgang ein.

Wird diese erhöhte Dehngeschwindigkeit nochmals verdreifacht, so kommt es schließlich zu einer hohen Fließzonenkonzentration. Oberhalb von 700 kp/cm^2 – entsprechend 70 N/mm^2 – wachsen die Fließzonen dann durch die Spritzhaut hindurch.

Der Bruch weist hier im Bereich der Spritzhaut stärkere plastische Verformungsanteile auf.

(Dauer der Einstellung: 30 s)

4. Die Lupenaufnahme zeigt die Ausweitung der Fließzonen im Gebiet der Spritzhaut. Ausgehend vom mäßig orientierten Probeninneren erreichen die Fließzonen in kurzer Zeit die Spritzhaut. Mit zunehmender Annäherung an den Bereich des verarbeitungsbedingten Orientierungsmaximums verlangsamt sich die Wachstumsgeschwindigkeit. Dabei verbreitern sich die Fließzonenenden schulterförmig und wachsen schließlich auf der dem Betrachter zugewandten Seite partiell durch die Spritzhaut hindurch.

Die höhere Vergrößerung zeigt bei etwa dreifacher Zeitdehnung das Fließzonenwachstum im Gebiet der Spritzhaut.

Zunächst verbreitern sich die Enden der Fließzonen schulterförmig. Die Fließzonen wachsen langsam in die Spritzhaut hinein und durchstoßen sie schließlich partiell.

(Dauer der Einstellung: 36 s)

5. Die zeitgedehnte Aufnahme veranschaulicht das Deformationsverhalten des Zugstabes unmittelbar vor dem Bruch; auffällig sind die hohe Fließzonenkonzentration und eine leichte Einschnürung der Probe. Während der Bereich der Spritzhaut beim Bruch durch eine erhebliche plastische Verformung gekennzeichnet ist, bricht die Probe im Inneren spröde. Einige abgesprengte Polystyrolteilchen wirbeln dabei umher. Die elastische Dehnung wird durch das spontane Rückfedern der beiden Probenhälften abgebaut.

Eine zeitliche Auflösung des Bruchfortschrittes ermöglichen die mit einem 16-mm-Laufbildfilm maximal erreichbaren Zeitdehnungsmaßstäbe nicht. Aufgrund der bei Polystyrol auftretenden, außerordentlich hohen Bruchgeschwindigkeiten vollzieht sich der Bruch innerhalb eines einzigen Bildwechsels.

Das Verformungsverhalten unmittelbar vor dem Bruch in etwa 140facher Zeitdehnung. Der mit abnehmender Lichtdurchlässigkeit einhergehende Anstieg der Fließzonenkonzentration – links im Bild – führt zu einer geringfügigen Einschnürung der Probe.

Der Bruch erfolgt jetzt.

Duktiler Bruch im Bereich der Spritzhaut – Spröbruch im Probeninneren.

(Dauer der Einstellung: 40 s)

Schlagzugversuche

Fließzonenkinetik; Zeitdehnung etwa 38 000 : 1 (mit Wiederholungen)

6. Auch während der beim Schlagzugversuch auftretenden sehr hohen Deformationsgeschwindigkeiten setzt die Fließzonenbildung im mäßig orientierten Probeninneren ein. Zunächst bleibt die Spritzhaut wiederum fließzonenfrei. Da die Bildserie der Drehspiegelkamera zeitlich begrenzt ist, endet sie, bevor die Spritzhaut von den Fließzonen erfaßt wird.

Bei einer Auftreffgeschwindigkeit des Pendelhammers von 3,85 m/s treten Anfangsdehnungsgeschwindigkeiten von mehreren hunderttausend Prozent pro Minute auf.

Wachstum der Fließzonen im Probeninneren.

Die Bildserie der Hochgeschwindigkeits-Drehspiegelkamera endet hier kurz vor dem Bruch.

Die gleiche Aufnahme noch einmal.

Und eine weitere Wiederholung.

Die Zeitdauer des Verformungsablaufes, den die Bildserie wiedergibt, umfaßt jeweils 170 μ s, also $170 \cdot 10^{-6}$ s.

(Dauer der drei Einstellungen: 61 s)

Bruchvorgang

Zeitdehnung etwa 125 000 : 1 (mit Wiederholungen)

7. Die Bildserie beginnt kurz vor dem Bruch; sie zeigt die bruceinleitenden Verformungen und den Bruchablauf selbst. Aufgrund des im Gegensatz zu den übrigen Einstellungen direkt einfallenden Durchlichts absorbieren die Fließzonen nunmehr Licht und erscheinen deshalb im Bild dunkel.

Man erkennt, daß die hochorientierte Spritzhaut bereits zu Beginn der Einstellung von den Fließzonen durchdrungen ist. Im Bereich des späteren Anrisses herrscht eine enorm hohe

Fließzonenkonzentration, die schließlich mit einer geringfügigen Einschnürung verbunden ist. Nach dem Anriß eilt der Rißspitze eine Zone starker lokaler Deformation voraus. Im Bereich der entlasteten Rißufer stellt sich die elastisch gespeicherte Verformung spontan zurück; hieraus resultiert ein Aufweiten des Risses und schließlich ein leichtes Einknicken des Probestabes. Während der Bruch der Spritzhaut von deutlichen plastischen Deformationsprozessen begleitet ist, weisen einige abgesprengte Werkstoffpartikel auf den im Probeninneren stattfindenden Sprödbruch hin.

Bei gleichen Versuchsbedingungen sind kurz vor Bruchbeginn auch in die Spritzhaut Fließzonen eingedrungen. Starke Fließzonenkonzentration und geringe Lichtdurchlässigkeit im Gebiet des späteren Anrisses. Von hier ausgehend Rißbildung am unteren Probenrand in Bildmitte.

Wiederholung dieser Aufnahme.

Vor der Rißspitze wandert eine Zone starker örtlicher Verformung durch die Probe hindurch.

Durch Auswertung der mit einer Frequenz von einer Million Bildern pro Sekunde aufgenommenen Einzelbilder konnte die maximale Bruchgeschwindigkeit mit etwa 970 m/s ermittelt werden.

Nochmalige Wiederholung.

Die Zeitdauer des Rißdurchlaufs durch die 10 mm breite Probe betrug $15 \mu\text{s}$, also $15 \cdot 10^{-6}$ s.

(Dauer der drei Einstellungen: 85 s)

Zeitstand-Zugversuche

Zugspannung 42,5 N/mm²; Belastungsdauer bis zum Bruch 18 Stunden; Zeitraffung etwa 1 : 17 000 (mit Wiederholungen)

8. Bei einer konstanten Zugbelastung von $42,5 \text{ N/mm}^2$ zeigt die spritzgegossene Polystyrolprobe nach einer langen Phase der Gleichmaßdehnung inhomogene Verformung in Form einer einzigen Fließzone. Parallel zu dieser normalspannungsbedingten Deformation tritt kurz vor dem Bruch in unmittelbarer Nachbarschaft der Fließzone Scherdehnung auf, die zu einer geringfügigen Einschnürung des Werkstoffs führt. Fließzone und Einschnürung leiten schließlich das Versagen ein.

Äußerst geringe Dehngeschwindigkeiten lassen sich im Zeitstand-Zugversuch erzielen.

Wiederholung.

Die Fließzone leitet den Bruch ein.

Wiederholung. — Nach dem Bruch zeigt das rechte Stabende eine leichte Einschnürung.

Nochmalige Wiederholung der Aufnahme.

(Dauer der vier Einstellungen: 32 s)

Zugspannung 41 N/mm²; Belastungsdauer bis zum Bruch 45 Stunden; Zeitraffung etwa 1 : 8 600 und 1 : 180 (mit Wiederholungen)

9. Reduziert man die konstante Zugbeanspruchung um nur $1,5 \text{ N/mm}^2$, so lassen sich normalspannungsbedingte inhomogene Deformationsprozesse unter Bildung von Fließzonen nicht mehr beobachten. Stattdessen setzt nach etwa 44stündiger Gleichmaßdehnung Scherdehnung ein, die eine makroskopische Einschnürzone zur Folge hat. Dieses für spröde amorphe Thermoplaste ungewöhnliche Verformungsverhalten wird durch die Kombination von niedriger Deformationsgeschwindigkeit und verarbeitungsbedingter molekularer Orientierungen hervorgerufen.

Bei einer nur um $1,5 \text{ N/mm}^2$ verringerten konstanten Zugbelastung entsteht keine mikroskopische Fließzone.

Nach einer langen Phase der Gleichmaßdehnung, die mit einer 8 600fachen Zeitraffung aufgenommen wurde, wird die Zeitraffung auf 180fach verringert, um die folgenden Veränderungen (beginnend mit einer leichten Querschnittsverminderung) zeitlich besser aufzulösen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Belastungsfällen setzt nunmehr nach einer Laststandzeit von etwa 44 Stunden in der Probenmitte — nach Bildung von Scherbändern — eine deutliche Scherdehnung ein. Sie führt zur Bildung einer makroskopischen Fließzone, zu Normalspannungs-Anrissen und zum Bruch.

In dieser Teilwiederholung der Aufnahme nochmals die wichtigsten Phasen der inhomogenen Deformation:

- Leichte Querschnittsverminderung
- Scherbänder
- Scherdehnung
- laterales Wachstum der makroskopischen Fließzone
- Normalspannungs-Anrisse — und duktiler Bruch.

(Dauer der zwei Einstellungen: 89 s)

English Version of the Spoken Commentary¹

Zugstäbe Nr. 3 nach DIN 53 455

Probenbreite 10 mm; Probendicke 3 mm; Molekulargewicht $\bar{M}_n = 115\ 000$; Spritztemperatur 200°C ; Zugrichtung horizontal.

(Standard dumb-bell test pieces. Width 10 mm; thickness 3 mm; injection temperature 200°C ; stress direction horizontal.)

Kurzzeit-Zugversuche bei mittleren Verformungsgeschwindigkeiten. Dehngeschwindigkeit $0,2\%/min$

(Short time tensile tests at medium strain rate $0,2\%/min$.)

At room temperature the dumb-bell shaped test pieces are strained up to breaking point. They consist of transparent polystyrene dilled on the reverse side.

Directly below the specimen, an analogue display informs about the actual tensile stress.

At first, uniform deformation without any structural changes.

Inhomogeneous deformation by crazing.

Other crazes follow at relatively long time intervals.

Because of process-initiated internal stress and molecular orientation distributions, the highly oriented material near the surface remains still uncrazed.

The chosen strain rate of only $0.2\%/min$ effects relatively low craze concentration.

The brittle fracture will take place at a stress of 610 kp/cm^2 — that is 61 Newton/mm^2 — just over the right end of the analogue display.

¹ The passages in *italics* correspond with the subtitles in the film.

Dehngeschwindigkeit 0,5%/min
(Strain rate 0,5%/min.)

In general, raising the strain rate by the factor 2.5 does not change the deformation behaviour. Craze concentration and growth velocity increase slightly. However, the oriented surface material remains uncrazed.

Again the sample will break over the right end of the analogue display, but now at a fracture stress of about 670 kp/cm^2 – that is 67 Newton/mm^2 .

Dehngeschwindigkeit 1,5%/min

Zeitgleiche Aufnahme (24 B/s) und Zeitdehnung 3,3 : 1 und 140 : 1

(Strain rate 1.5%/min; normal shots (24 f/s) and slow motion rate 3,3 : 1 and 140 : 1)

A triplication of this higher strain rate effects an enormous craze concentration.

At stresses higher than 700 kp/cm^2 – that is 70 Newton/mm^2 – the crazes grow partially through the oriented regions near the surface.

In the area near the surface, the fracture shows significant plastic deformations.

The growth of crazes in the surface region can be observed at higher magnification and roughly triple slow motion frequency.

At first, the ends of crazes become dumb-bell shaped.

The crazes grow slightly into the highly oriented regions and finally penetrate them in places.

The fracture-initiating deformation processes in slow motion at about 140 : 1.

On the left, the increasing craze concentration causes decreasing transparency and slight necking of the sample.

Fracture now takes place.

Ductile fracture in the oriented surface regions – brittle type fracture internally.

Schlagzugversuche

Fließzonenkinetik; Zeitdehnung etwa 38 000 : 1 (mit Wiederholungen)

(Impact tensile tests. Kinetics of stress-crazing; slow motion rate about 38.000 : 1 (with repetitions).)

The pendulum impact velocity of 3.85 meters per second generates initial strain rates in the range of some 100,000 percent per minute.

Craze-formation internally.

Here the frame series of the high speed rotating mirror camera ends just before breaking.

Once more, the same scene.

And a further repetition.

In real time the deformation process shown takes 170 mikroseconds, that is: 170×10^{-6} seconds.

Bruchvorgang

Zeitdehnung etwa 125 000 : 1 (mit Wiederholungen)

(Fracture processes. Slow motion rate about 125.000 : 1 (with repetitions).)

Some moments before cracking under the same experimental conditions the crazes penetrated into the surface region.

Enormous craze concentration and small transparency in the area of the expected crack. Here crack-formation at the lower sample surface in the middle of the picture.

Repetition of this scene.

Ahead of the crack front, an area of strongly deformed material moves across the sample.

By measurements on the original single frames shot at a frequency of one million frames per second the maximum crack velocity amounts to approximately 970 meters per second.

A further repetition.

In real time, crack-propagation through the 10 mm wide sample takes 15 microseconds, that is: 15×10^{-6} seconds.

Zeitstand-Zugversuche

Zugspannung 42,5 N/mm²; Belastungsdauer bis zum Bruch 18 Stunden; Zeitraffung etwa 1 : 17 000 (mit Wiederholungen)

(Creep tests. Tensile stress 42.5 N/mm²; fracture time 18 hours; time lapse rate about 1 : 17.000 (with repetitions).)

Extremely low strain rates are verified in creep tests.

Repetition.

Cracking is announced by only one craze.

Repetition. — After breaking, the right end of the specimen shows slight necking.

A further repetition of the same scene.

Zugspannung 41 N/mm²; Belastungsdauer bis zum Bruch 45 Stunden; Zeitraffung etwa 1 : 8 600 und 1 : 180 (mit Wiederholungen)

(Tensile stress 41 N/mm²; fracture time 45 hours; time lapse rate about 1 : 8.600 and 1 : 180 (with repetitions).)

After stress reduction of only 1.5 Newton/mm² a microscopic craze does not occur. After a long period of homogeneous deformation shot at a time lapse rate of 1 : 8.600, the motion rate is reduced to 1 : 180 in order to get a better time resolution of deformation changes, starting with slight diminution of section.

Instead of microscopical crazing after 44 hours under load in the middle of the specimen, there appears — after formation of shear bands — a clearly visible shearing strain.

It leads to macroscopical necking, to normal stress-initiated small failures, and finally to the crack.

In this partial repetition, the main points of inhomogeneous deformation seen again:

- slight diminution of section,
- shear bands,
- shearing strain,
- lateral growth of the macroscopic necking zone,
- normal stress-initiated failures, and ductile fracture.

Literatur

- [1] BERRY, J.P.: Fracture processes in polymeric materials. III. Topography of fracture surface of PMMA. *J. Appl. Phys.* **33** (1962), 1741-1744.
- [2] CHATAIN, M.: *Ind. Plastiques Modernes* **10**, 5 (1958), 45 und **10**, 6 (1958), 37.
- [3] DIN 53 455: Prüfung von Kunststoffen; Zugversuch. Beuth-Verlag, Berlin, August 1981.
- [4] GROSSKURTH, K.P.: Strukturuntersuchungen zum Deformationsverhalten von Polypropylen mit Hilfe der Raster-Elektronenmikroskopie. *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe* **27** (1974), 324-328.
- [5] GROSSKURTH, K.P.: Deformationserscheinungen in zugbeanspruchten Thermoplasten. *Gummi, Asbest, Kunststoffe* **27** (1974), 703-708.
- [6] GROSSKURTH, K.P.: Mechanisches Verhalten von einachsig warmgerecktem Polystyrol bei zügiger und schlagartiger Zugbeanspruchung. *Kautschuk, Gummi, Kunststoffe* **29** (1976), 392-398.
- [7] GROSSKURTH, K.P.: Elektronenmikroskopische Untersuchung der molekularen Orientierung. *Industrieanzeiger* **100**, 30 (1978), 58-60.
- [8] GROSSKURTH, K.P.: Kinetics of stress-crazing and fracture processes in moulded polystyrene at different strain rates. *Advances in Fracture Research Vol. 1*, Pergamon Press, Oxford, New York 1981, 457-464.
- [9] GROSSKURTH, K.P.: Morphologie und Wachstumskinetik von Crazes in amorphen Polymeren. *Colloid & Polymer Sci.* **259** (1981), 163-170.
- [10] KAMBOUR, R.P.: Structure and properties of crazes in polycarbonate and other glassy polymers. *Polymer* **5** (1964), 143-155.
- [11] KAMBOUR, R.P.: Refractive indices and compositions of crazes in several glassy polymers. *J. Polymer Sci.* **A2**, 2 (1964), 4159-4163.
- [12] KAUSCH, H.-H.: Kunststoffschädigung: Molekulare Betrachtung. In EHRENSTEIN, G.-W.: Schadenanalyse an Kunststoff-Formteilen. VDI-Verlag, Düsseldorf 1981, 17-32.
- [13] RIECK, J.: Technik der Wissenschaftlichen Kinematographie. München 1968.
- [14] SCHREYER, G.: Konstruieren mit Kunststoffen Bd. 1, Hanser Verlag, München 1972, S. 160.
- [15] SPURR, O.K., and W.D. NIEGISCHE: Stress crazing of some amorphous thermoplastics. *J. Appl. Polymer Sci.* **6** (1962), 585-599.
- [16] WIEGAND, H., und H. VETTER: Molekulare Orientierung in Spritzgußteilen als Folge der Verarbeitung. *Kunststoffe* **56** (1966), 761-769.
- [17] WINTERGERST, S.: Orientierungen und Spannungen in Spritzgußteilen. *Kunststoffe* **63** (1973), 636-642.
- [18] WOEBCKEN, W., und H. SEUS.: Die Schwindung von Polyäthylen und ihre Abhängigkeit von den Verarbeitungsbedingungen. *Kunststoffe* **57** (1967), 637-644, 719-723.
- [19] WÜBKEN, G.: Einfluß der Verarbeitungsbedingungen auf die innere Struktur thermoplastischer Spritzgußteile unter besonderer Berücksichtigung der Abkühlverhältnisse. Dissertation TH Aachen 1974.

Filmveröffentlichungen

- [20] GROSSKURTH, K.P.: Zugbeanspruchung von spritzgegossenem Standard-Polystyrol. Bildung von Fließzonen, Einschnürung und Bruch. Variation der Spritztemperatur. Film E 2246 des IWF, Göttingen 1976. Publikation von K.P. GROSSKURTH, *Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw.*, Bd. 2, H.5 (1976), 531-539.

- [21] GROSSKURTH, K.P.: Zugbeanspruchung von spritzgegossenem Standard-Polystyrol. Bildung von Fließzonen, Einschnürung und Bruch. Variation der Dehngeschwindigkeit. Film E 2247 des IWF, Göttingen 1976. Publikation von K.P. GROSSKURTH, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Bd. 2, H. 5 (1976), 531–539.

Abbildungsnachweis

Abb. 1: Nach M. CHATAIN ([2]), ref. von G. SCHREYER ([4]); Abb. 3: J.P. BERRY; Abb. 2,4 bis 11: K.P. GROSSKURTH; Abb. 12: J. THIENEL.