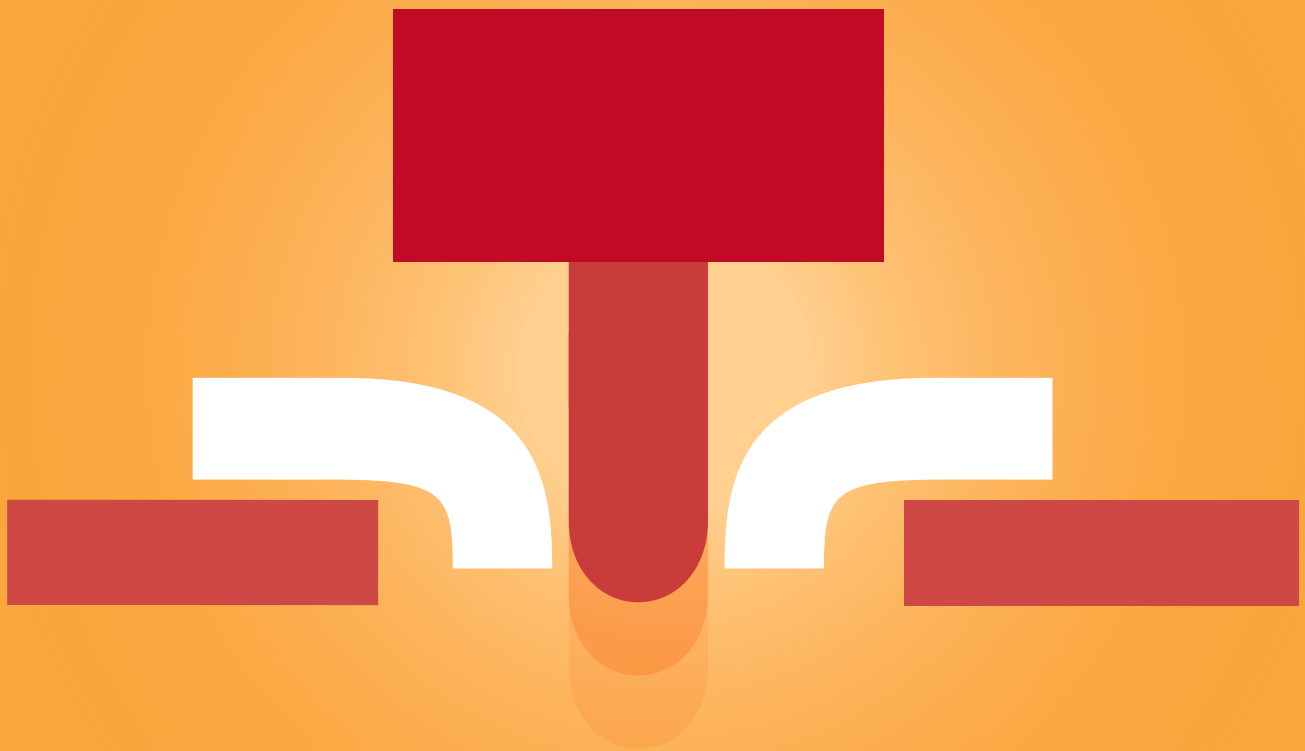


Instrumentierter Durchstoßversuch

Technische Information





- Der instrumentierte Durchstoßversuch stellt eine Zähigkeitsprüfung dar, die insbesondere für flächige Anwendungen als relativ praxisnah angesehen wird.
- Während der Prüfung wirken biaxiale Biege- und Zugspannungen im Probekörper.
- Als Ergebnis erhält man Kraft-Verformungskurven, aus denen die interessierenden Kenngrößen ermittelt werden.
- Die Resultate des Durchstoßversuches werden massiv von der Reibung zwischen Probe- und Durchstoßkörper beeinflusst. Für vergleichbare Kennwerte muss daher, wie in der Norm vorgeschrieben, die Reibung durch Schmierung verringert werden.

Der Durchstoßversuch ist eine praxisnahe Zähigkeitsprüfung, bei der flächige Probekörper stoßartig beansprucht werden. Hierbei tritt ein in erster Näherung zweiachsiger Spannungszustand mit Biege- und Zuganteilen auf.

Die Instrumentierung des Versuches erlaubt die Ermittlung von aussagekräftigen Messwerten in angemessener Zeit. Im Durchstoßversuch nach ISO 6603-2 werden Scheiben oder Platten mit 60 mm Durchmesser bzw. Kantenlänge und 2 mm nomineller Dicke von einem auf die Probe auftreffenden Dorn mit 4,4 m/s durchschlagen. Diese Prüfgeschwindigkeit entspricht dem freien Fall aus 1 m Höhe. Dabei werden über schnelle Kraftmesszellen und Weggeber Kraft-Verformungsverläufe ermittelt, die neben der Berechnung der Durchstoßarbeit über das Flächenintegral auch die Auswertung weiterer charakteristischer Kenngrößen ermöglichen (siehe Abb. 1). Häufig betrachtet werden die Maximalkraft F_M und die zugehörige Verformung I_M , die Energie E_b und Verformung I_b bei Anriss, die Energie E_p und Verformung I_p bei Abfall auf 50% der Maximalkraft sowie die Energie E_t und Verformung I_t am Ende des Verformungsweges.

Zusätzlich liefert die Form der Kraft-Verformungskurve eine Aussage über das grundsätzliche Versagensverhalten, wie es Abbildung 2 verdeutlicht. Zähes Werkstoffverhalten (C) ist dadurch gekennzeichnet, dass der bei der Durchbiegung I_b startende Riss nicht zu einem spontanen Kraftabfall auf Null führt, sondern unterhalb eines bestimmten Kraftwertes langsamer weiterläuft. Der Werkstoff setzt dem Weiterreißen einen Widerstand entgegen. Bei sprödem Verhalten (B) ist dieser Weiterreißwiderstand nicht vorhanden, nach der Rissentstehung fällt die Kraft spontan auf Null ab. Versagt der Probekörper bereits vor dem Auftreten nennenswerter plastischer Verformungen, dann erhält man Kraft-Verformungskurven entsprechend Abbildung 2.

Bei sehr duktilem Werkstoffverhalten kann der Probekörper durch dissipierte Verformungsarbeit derart erwärmt werden, dass eine Art Tiefziehprozess zu dem in Abbildung 2 dargestellten Kraft-Verformungsverlauf führt.

Genormte Prüfverfahren

Der Durchstoßversuch wird in der Internationalen Norm ISO 6603-2 beschrieben. Diese internationale Norm ist inhaltsgleich wie DIN EN ISO 6603-2 ins deutsche Normenwerk übernommen worden und hat die frühere deutsche Norm DIN 53443-2 für den Durchstoßversuch ersetzt.

Die in Abbildung 1 angegebenen Verformungen I_b und I_t sowie die zugehörigen Energien E_b und E_t sind abhängig von der Konstruktion des Durchstoßdornes, insbesondere von der Position der Kraftmess-elemente. Sie sind daher zur Definition vergleichbarer Kennwerte nicht geeignet und wurden nicht in die Norm aufgenommen. Trotzdem eignen sich diese Kennwerte gut zur Bewertung des Materialverhaltens. Als Kompromiss wurden für die Norm die Verformung I_p , bei der die Kraft auf die Hälfte der Maximalkraft abgefallen ist, und die zugehörige verbrauchte Energie E_p als Kennwerte definiert.

Gerätetechnik

Für den Durchstoßversuch sind zwei Geräteprinzipien gebräuchlich: das mit Hilfe von fallenden Massen arbeitende kinetische System und das hydraulische Maschinenkonzept.

Kinetische Geräte bieten die Vorteile einer einfachen Funktionsweise und eines günstigen Erstherstellungspreises, lassen jedoch keine großen Variationen der Prüfgeschwindigkeit zu.

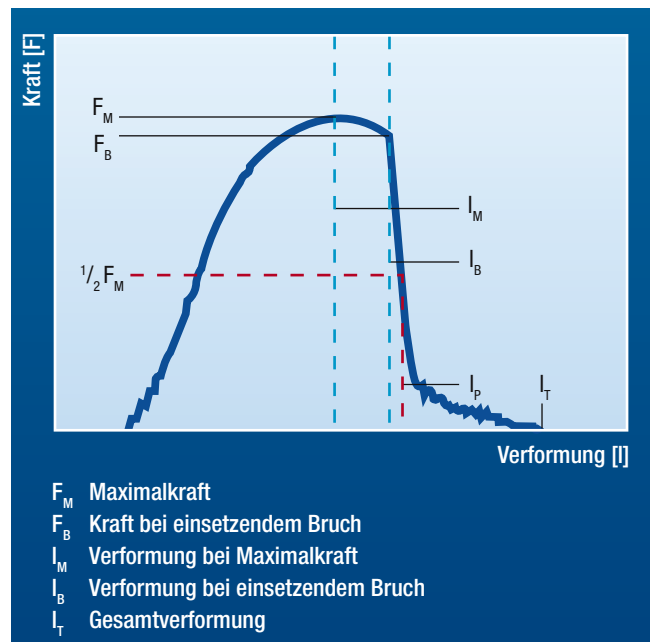


Abb. 1: Typische Kraft-Verformungskurve aus dem Durchstoßversuch mit daraus ermittelten Kennwerten

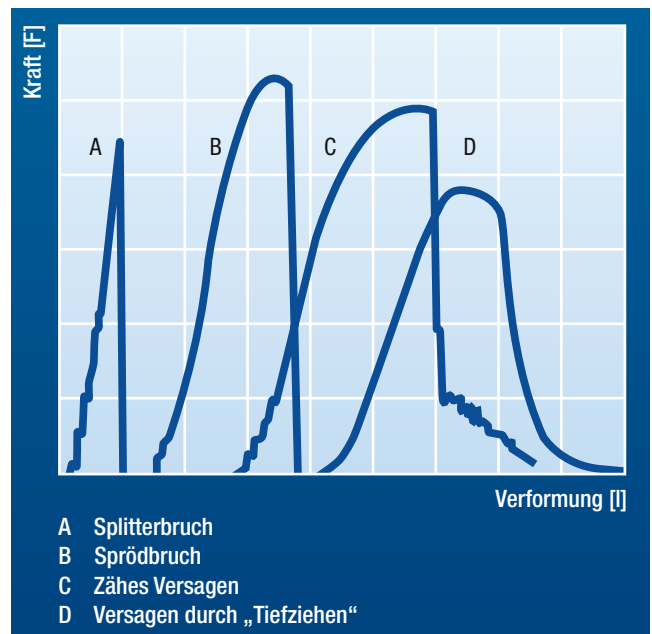


Abb. 2: Charakteristische Kraft-Verformungskurven für unterschiedliches Werkstoffverhalten

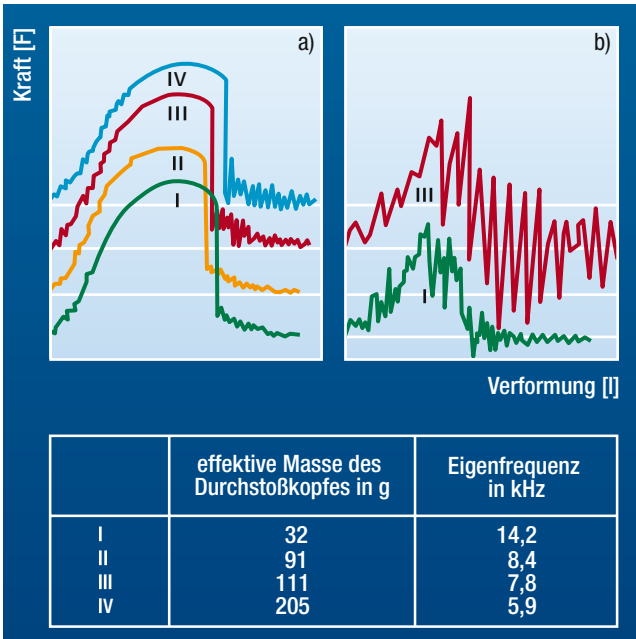


Abb. 3: Einfluss der Eigenfrequenz des Kraftmesssystems auf Kraft-Verformungskurven von Ultradur® KR 4071 (a) und Polystyrol 158 H (b)

Mit Federn oder pneumatischen Beschleunigungseinrichtungen lassen sich zwar Prüfgeschwindigkeiten bis etwa 20 m/s realisieren, bei kleinen Geschwindigkeiten reicht jedoch die Fallenergie oft nicht mehr aus. Während der Prüfung tritt prinzipbedingt stets eine Abnahme der Geschwindigkeit auf. ISO 6603-2 fordert ein Verhältnis von Auftreffenergie der beschleunigten Masse zum Arbeitsaufnahmevermögen des Probekörpers größer als drei. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsabnahme von maximal 20 %. Für diese Forderung sind bei Verwendung der in ISO 6603-2 empfohlenen Probekörper Fallmassen von 20 kg im allgemeinen ausreichend.

Bei hydraulisch arbeitenden Maschinen kann bei entsprechender Auslegung ein extrem großer Geschwindigkeitsbereich von etwa fünf Zehnerpotenzen abgedeckt werden, wobei hohe Geschwindigkeiten während des Versuches nahezu konstant bleiben und kleine Geschwindigkeiten geregelt werden können. Eine Automatisierung des Prüfablaufs ist bei hydraulisch arbeitenden Geräten einfacher zu realisieren.

Kraftmessung

Wegen der bei der Standardprüfgeschwindigkeit von 4,4 m/s im Millisekundenbereich liegenden Versuchszeiten werden an die Kraftmesstechnik besondere Anforderungen gestellt. Als Aufnehmer haben sich neben DMS-bestückten insbesondere piezo-elektrische Aufnehmer bewährt. Die zur Erfassung der Kraftverläufe notwendigen Abtastraten liegen bei mindestens 200 kHz. Um den verfälschenden Einfluss unvermeidlicher Eigenschwingungen zu vermeiden, sollte die Eigenfrequenz des Durchstoßdorn-Kraftaufnehmer-Systems so hoch wie möglich liegen. Dies lässt sich durch die Reduzierung der effektiven Masse erreichen, was bei mitbewegtem Kraftmesssystem eine Anordnung des Messelementes möglichst dicht hinter der Durchstoßspitze bedingt. Den Einfluss unterschiedlicher Eigenfrequenzen, realisiert durch unterschiedlich lange Durchstoßdorne, auf die F-I-Kurve eines Ultradur® KR 4071 zeigt Abbildung 3a. Mit abnehmender Eigenfrequenz sind dem Kurvenverlauf Schwingungen zunehmender Amplitude überlagert. Einen Einfluss auf die Interpretation des Kurvenverlaufs hat dies jedoch erst nach dem Anreißen. Bei einer Eigenfrequenz von 7,8 kHz (III) ist das zähe Weiterreißen nach dem Anriss gerade noch zu identifizieren. Bei splitternd versagenden Produkten, wie dem in Abbildung 3b gezeigten Polystyrol 158 H, reicht die Eigenfrequenz von 7,8 kHz zu einer eindeutigen Erfassung des F-I-Verlaufes nicht mehr aus. Für solche spröden wie auch für hochverstärkte Produkte stellt die Durchstoßprüfung kein sinnvolles Prüfverfahren dar.

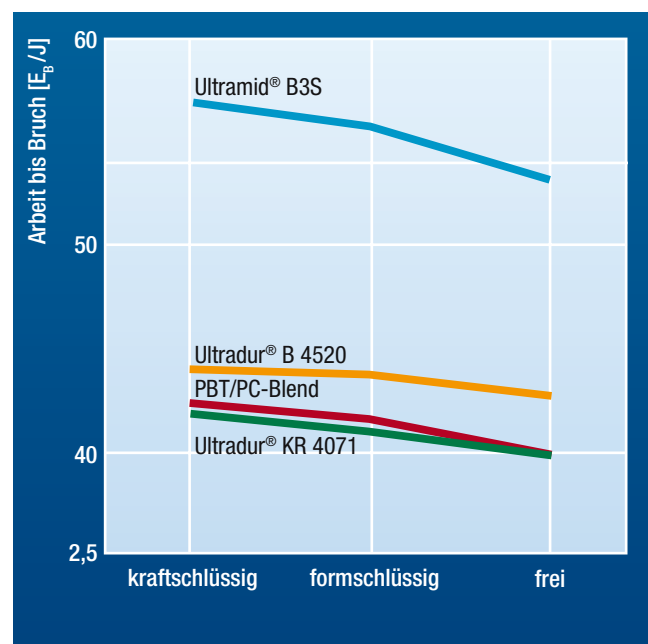
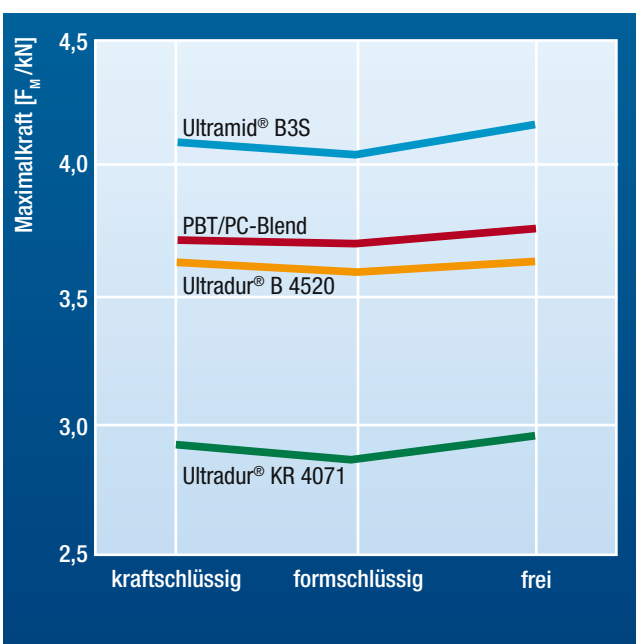


Abb. 4a/4b: Einfluss der Fixierung des Probekörpers auf Maximalkraft F_M und Bruchenergie E_T bei verschiedenen Thermoplasten

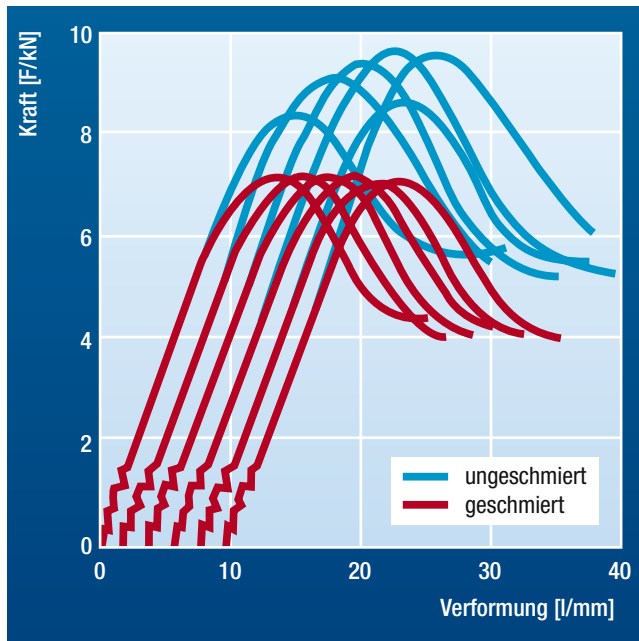


Abb. 5: Einfluss der Reibung auf Kraft-Verformungsverläufe eines hochschlagzähnen Ultramid® B

Wegmessung

Bei schwerkraftbeschleunigten Durchstoßsystemen ist eine Messung des Verformungsweges im allgemeinen nicht notwendig. Er lässt sich durch eine Zweifachintegration aus dem Kraftsignal errechnen:

$$v(t) = v_0 + g \cdot t - (1/m) \cdot \int F(t) dt$$

$$l(t) = \int v(t) dt$$

mit

v = Geschwindigkeit

v_0 = Auftreffgeschwindigkeit

g = Erdbeschleunigung

m = Masse des Fallgewichtes

F = Kraft

und

l = Weg

Durchstoßenergien lassen sich dann nach

$$E(l) = \int F(l) dl$$

errechnen, wobei die Genauigkeit des Ergebnisses allein von der Genauigkeit der Kraftmessung bestimmt wird.

Hydraulische Maschinen besitzen im allgemeinen in den Kolben eingebaute Weggeber, die auch zur Wegregelung des Kolbens herangezogen werden und üblicherweise eine zufrieden stellende Auflösung in dem kleinen für die Messung verwendeten Wegbereich von etwa 30 mm besitzen. Zwischen Kraft- und Wegsignal auftretende Laufzeitunterschiede aufgrund unterschiedlicher Verstärkung bzw. Filterung können rechnerisch korrigiert werden.

Probekörperfixierung

Neben der Prüfung frei aufliegender Probekörper ist das form- oder kraftschlüssige Klemmen während des Durchstoßversuches gebräuchlich. Beim formschlüssigen Klemmen wird der Probekörper lediglich am Aufwölben während der Prüfung gehindert, kann sich aber frei in der Klemmebene bewegen. Bei dem in ISO 6603-2 vorgeschlagenen kraftschlüssigen Klemmen wird der Probekörper zwischen zwei Platten mit einer empfohlenen Klemmkraft von 3 kN gehalten.

Untersuchungen an vier technischen Thermoplasten, in Abb. 4a/4b dargestellt, lassen geringe systematische, aber keine gravierenden Unterschiede in Maximalkraft und Bruchenergie bei unterschiedlichen Arten der Probenhalterung erkennen. Dagegen wurde an einseitig durch Bewitterung vorgeschädigten Probekörpern ein deutlich unterschiedliches Verhalten zwischen kraftschlüssiger Fixierung und freiem Aufliegen beim Schlag auf die geschädigte Seite gefunden. Die Probekörperhalterung kann also materialabhängig einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis haben und sollte stets mit den Ergebnissen angegeben werden.

Reibung

Während des Versuchsablaufes treten zwischen Durchstoßdorn und Probekörper Relativbewegungen auf. Das Ergebnis wird daher von den Kontaktbedingungen zwischen Dorn und Probe maßgeblich beeinflusst: Bei zähen Materialien tritt der Probenbruch nicht, wie die theoretisch vorliegende Beanspruchung erwarten lässt, in der Probenmitte auf, sondern man beobachtet ein deckelförmiges Aufreißen der Probekörper. Durch die reibungsbedingte Absenkung der Spannungskonzentration an der Kalottenspitze tritt die höchste Beanspruchung und damit das Versagen nun am Rand der Kontaktfläche zwischen Probekörper und Kalotte auf. Die zusätzlich während der Verformung geleistete Reibarbeit führt zu überhöhten Durchstoßenergien, Materialabrieb zu ständig wechselnden Reibverhältnissen und damit zu hohen Messwertstreuungen.

Ein Schmieren des Durchstoßdornes führt, wie Abb. 5 zeigt, durch die Verminderung der Reibung zu kleineren Kraftmaxima, zu drastisch verringerter Streuung zwischen den Einzelkurven und damit zu einer deutlich besseren Reproduzierbarkeit der Messergebnisse.

Das verwendete Schmiermittel spielt dabei praktisch keine Rolle. Dies verdeutlichen die Abbildungen 6a/6b: Hier sind an Ultramid® B3S gemessene Maximalkräfte und Brucharbeiten für folgende Schmierzustände dargestellt: ohne Schmierung, Schmierung mit einem niedrigviskosen Öladditiv (Finalgon) bzw. mit hochviskoser Vaseline. Die Unterschiede bei verschiedenen Schmiermitteln liegen im Bereich der Streuung.

Dickeneinfluss

Die im Durchstoßversuch ermittelten Kenngrößen nehmen im allgemeinen mit der Probekörperdicke zu. Die Zunahme ist dabei auch bei Werkstoffen mit linearem Verformungsverhalten nichtlinear. Während des Versuches werden biaxiale Biege- und Zugspannungen überlagert,

die mit der dritten Potenz bzw. linear mit der Probekörperdicke ansteigen. Für die Durchstoßkraft bedeutet das:

$$F(l) \sim d^{n0}, \quad 1 \leq n \leq 3,$$

wobei der Exponent n mit zunehmender Durchbiegung L der Platte abnimmt. Es ist also nicht möglich, für die ganze F - l -Kurve eine Dickenabhängigkeit anzugeben, für einzelne daraus abgeleitete Größen ist dies jedoch möglich in der Form:

$$F_M = F_M(1 \text{ mm}) \cdot (d/\text{mm})^n$$

$$E_T = E_T(1 \text{ mm}) \cdot (d/\text{mm})^n \text{ usw.}$$

Der Exponent nimmt dabei für jede der abgeleiteten Größen unterschiedliche Werte an. Dies ist in Abbildung 7a/7b für einen (PC + PBT)-Blend bei verschiedenen Prüftemperaturen anhand der Maximalkraft F_M und der gesamten Durchstoßenergie E_T dargestellt. Wie diese Abbildung zeigt, liegen die Exponenten relativ nahe an 1, so dass in grober Näherung die Kennwerte linear von der Probekörperdicke abhängen.

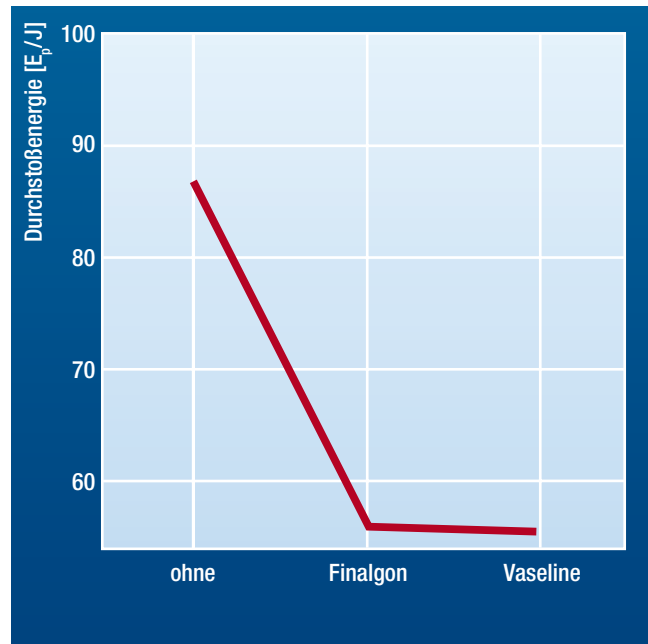
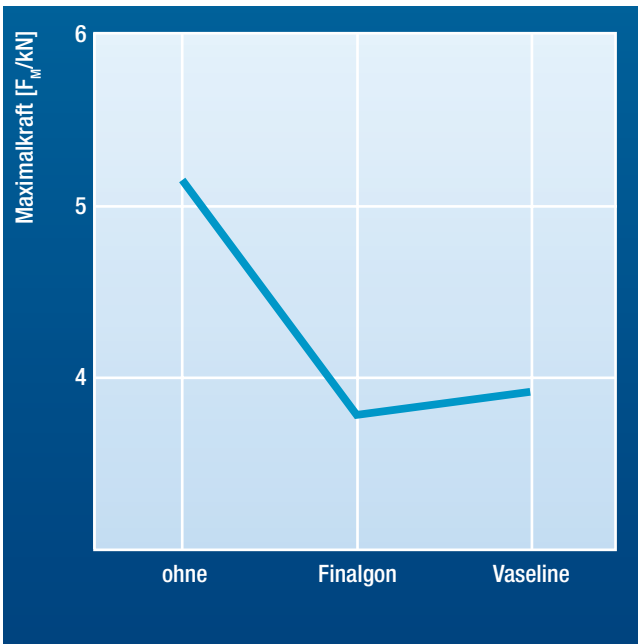


Abb. 6a/6b: Einfluss des Schmiermittels auf Maximalkraft F_M und Durchstoßenergie E_p von Ultramid® R B3S

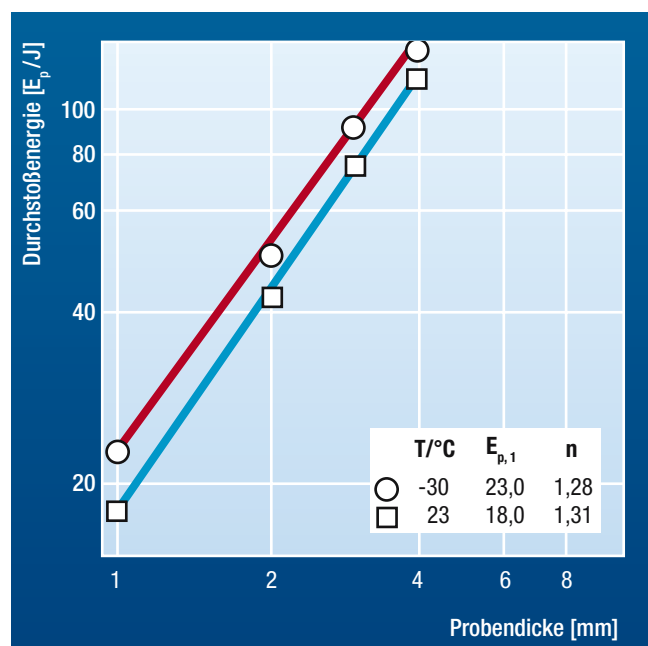
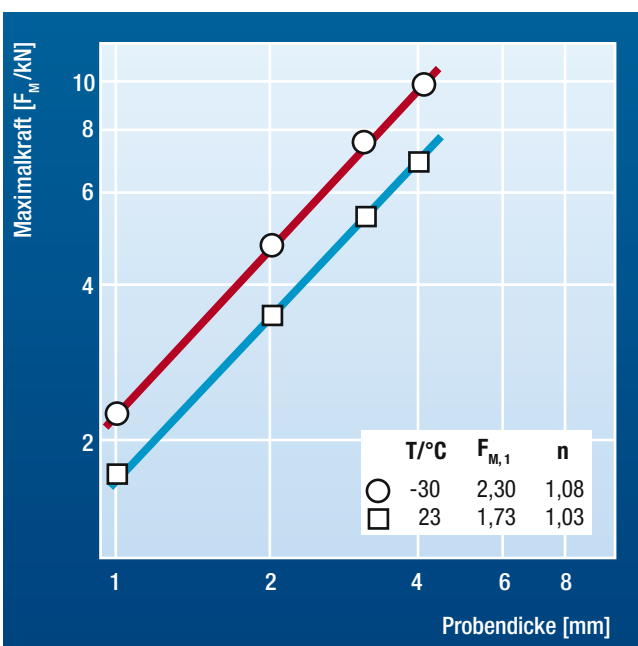


Abb. 7a/7b: Dickenabhängigkeit der Maximalkraft F_M und der Durchstoßenergie E_p bei einem (PC + PBT)-Blend

Zäh-Spröd-Übergang

Das Verformungs- und Versagensverhalten von Thermoplasten wird durch Bewegungsmechanismen der Polymerkette bestimmt. Die Wirkung dieser Mechanismen hängt sowohl von der Prüftemperatur als auch von der Beanspruchungsgeschwindigkeit (Zeit) ab. Auf das mechanische Verhalten wirkt sich dabei zunehmende Verformungsgeschwindigkeit vergleichbar wie abnehmende Prüftemperatur aus und umgekehrt.

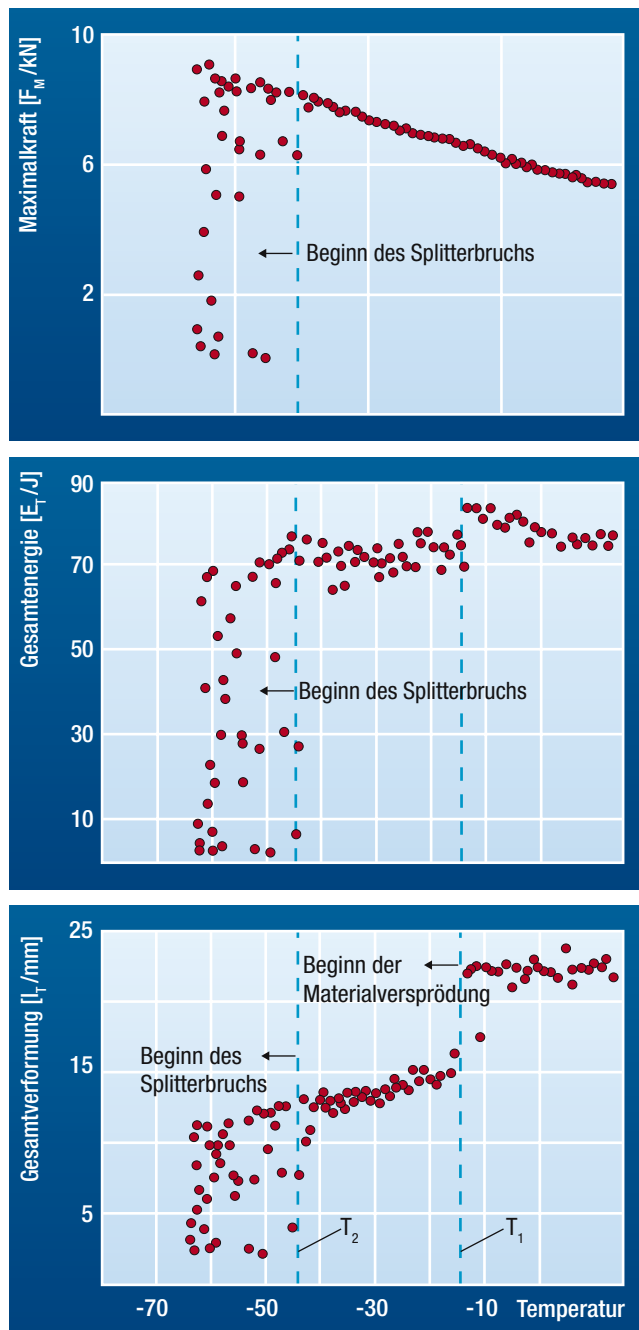


Abb. 8: Verläufe der Maximalkraft F_M , der Gesamtenergie E_T und der Gesamtverformung l_T als Funktion der Prüftemperatur bei einem (PC + PBT)-Blend

Häufig ist die Temperatur, unterhalb der bei einer stoßartigen Beanspruchung sprödes Versagen auftritt, von besonderem anwendungstechnischem Interesse. Die Ermittlung dieser Übergangstemperaturen erfolgt mit Hilfe temperaturabhängiger Durchstoßprüfungen.

Die Temperierung der Probekörper kann direkt in einer die Prüfanordnung umschließenden Kammer ablaufen, was jedoch außer unökonomischem Prüfablauf den Nachteil einer erschwerten Schmierung mit sich bringt. Günstiger ist eine externe Temperierung, wobei kurze Übergangszeiten sichergestellt sein müssen. Mit kontinuierlich veränderter Temperatur lassen sich Zähigkeit-Temperatur-Kurven in sehr kleinen Temperaturabstufungen realisieren.

Abbildung 8 zeigt als Beispiel Temperaturverläufe von Maximalkraft F_M , Gesamtenergie E_T und Gesamtverformung l_T für ein zähmodifiziertes (PC + PBT)-Blend. Die Übergangstemperaturen T_1 und T_2 kennzeichnen den Wechsel des Versagens von zähem zu sprödem bzw. zu splitterndem Probenversagen. Den Zäh-Spröd-Übergang kann allein die Gesamtverformung hinreichend detektieren, alle anderen Größen erweisen sich als zu unempfindlich. Die Gesamtverformung ist also ein geeignetes Maß zur Beschreibung von Übergängen im Werkstoffverhalten.

Vergleich mit anderen Zähigkeitsprüfverfahren, Anwendungsbereich

Der Durchstoßversuch unterscheidet sich in einigen Aspekten von den zur Zähigkeitsbeschreibung häufiger verwendeten Schlagbiegeversuchen. Hierzu gehört vor allem der Beanspruchungszustand: Beim Schlagbiegeversuch wird eine vorwiegend einachsige, inhomogene Biegebeanspruchung in Orientierungsrichtung mit Maximum in der Randschicht aufgebracht. Bei Verwendung gekerbter Stäbe liegt unterhalb des Kerbgrundes im Kernmaterial ein dreiachsiger Spannungszustand mit maximaler Beanspruchung vor.

Bei ausreichend dünnen Probekörpern tritt im Durchstoßversuch dagegen ein zweiachsiger, anfänglich inhomogener Spannungszustand auf. Die Probenhaut wird im Unterschied zum Schlagbiegeversuch gleichermaßen parallel und senkrecht zur Orientierungsrichtung belastet: Der Bruch verläuft damit immer senkrecht zur schwächsten Richtung, also normalerweise parallel zur Fließrichtung. Aufgrund dieser unterschiedlichen Beanspruchungsarten können die genannten Versuche auch stark unterschiedliche Ergebnisse liefern, also z.B. verschiedene Übergangstemperaturen oder eine andere Reihenfolge beim Vergleich verschiedener Materialien.

Im Vergleich zu dem Fallbolzentest nach ISO 6603-1 stellt der instrumentierte Durchstoßversuch die „schärfere“ Prüfung dar: Während im ersten Fall zur Ermittlung einer 50 %-Schädigungsarbeit der Prüfdorn jeweils auf Geschwindigkeit Null abgebremst wird, darf die Geschwindigkeitsabnahme beim Durchstoßversuch nicht mehr als 20 % betragen. Dies kann insbesondere bei weniger zähen Werkstoffen zu drastischen Unterschieden zwischen den Ergebnissen der beiden Prüfverfahren führen.

Ausgewählte Produktliteratur:

- Ultramid® – Hauptbroschüre
- Ultramid® – Sortimentsübersicht
- Ultradur® – Hauptbroschüre
- Ultradur® – Sortimentsübersicht
- Ultraform® – Hauptbroschüre
- Ultraform® – Sortimentsübersicht
- Ultrason® – Hauptbroschüre
- Ultrason® – Sortimentsübersicht
- Ultramid®, Ultradur® und Ultraform® – Verhalten gegenüber Chemikalien
- Ultrason® – Verhalten gegenüber Chemikalien

Zur Beachtung

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei Verarbeitung und Anwendung unseres Produktes nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine Garantie bestimmter Eigenschaften oder die Eignung des Produktes für einen konkreten Einsatzzweck kann aus unseren Angaben nicht abgeleitet werden. Alle hierin vorliegenden Beschreibungen, Zeichnungen, Fotografien, Daten, Verhältnisse, Gewichte u. Ä. können sich ohne Vorankündigung ändern und stellen nicht die vertraglich vereinbarte Beschaffenheit des Produktes dar. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Empfänger unseres Produktes in eigener Verantwortung zu beachten. (Mai 2014)

Besuchen Sie auch unsere Internetseiten:

www.plasticsportal.com (Welt)
www.plasticsportal.eu (Europa)

Die einzelnen Produktauftritte finden Sie unter:

www.plasticsportal.eu/Produktname
z. B. www.plasticsportal.eu/ultradur

Broschürenanforderung:

PM/K, F 204
Fax: +49 621 60-49497

Bei technischen Fragen zu den Produkten
wenden Sie sich bitte an den Ultra-Infopoint:

