

Gefertigt für die Ewigkeit?

Mechanisches Verhalten additiv gefertigter Bauteile unter Kurz- und Langzeitbeanspruchung

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend zur Herstellung von Endprodukten eingesetzt. Deren Auslegung erfordert die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften. In einem Forschungsvorhaben wurden diese systematisch betrachtet und die Erkenntnisse anhand industriell gefertigter Teile validiert.

Additive Fertigungsverfahren werden zunehmend relevanter für die Produktion von Kunststoffteilen, welche nicht länger nur als Anschauungs- oder Funktionsmuster dienen [1]. Von gedruckter Mode [2] über individuell angepasste Sportschuhe [3] oder Automobilinterieur [4], Luftkanäle im Automotive-Bereich [5], Ersatzteile für Busse [6] reicht das Spektrum bis hin zu Teilen für die Luft- und Raumfahrt [7]. Mit diesem Wandel ändern sich die Anforderungen an additiv gefertigte Teile, da neben Optik und Haptik nun auch die Gebrauchseigenschaften interessieren, allen voran das mechanische Verhalten.

Das SKZ, Würzburg, hat diesem Bedürfnis mit einem Forschungsvorhaben Rechnung getragen. Bei der Bauteilauslegung steht die Festigkeit besonders im Fokus. Daher wurde diese unter statischer sowie dynamisch-zyklischer Kurz- und Langzeitbeanspruchung bei 23°C systematisch betrachtet, wobei die Forscher auch die typische, verfahrensbedingte Anisotropie additiv gefertigter Teile berücksichtigten. Die Bauteile wurden liegend (Beanspruchung in x/y-Richtung), stehend (Beanspruchung in z-Richtung, d. h. Prüfung der Schichthaftung) sowie beim Lasersinterverfahren auch in einer Mischform (diagonal, 45°) hergestellt. Der Fokus lag dabei nicht auf der bestmöglichen Fertigung der Teile und anschließender Charakterisierung, sondern auf einer möglichst praxisnahen Abbildung des Standes der Technik. Das Forschungsvorhaben betrachtete deshalb die im Kunststoffbereich mit festen Ausgangsstoffen gegenwärtig dominierenden beiden Verfahren Lasersintern und Schmelzextrusion.

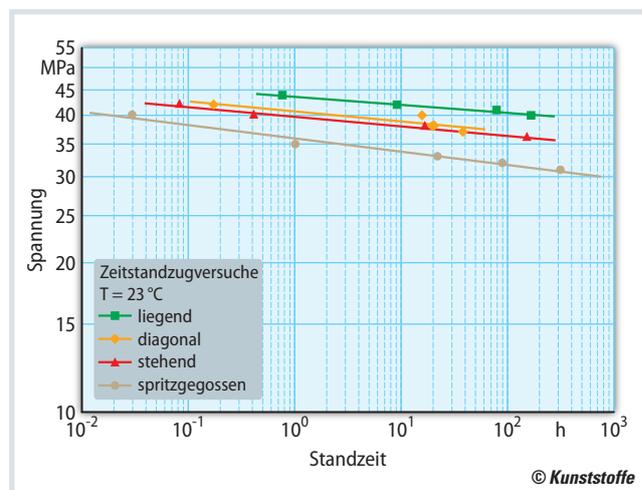


Bild 1. Zeitstandverhalten spritzgegossener und lasergesinterter Teile aus PA 12 unter statischer Langzeitbeanspruchung
(Quelle: SKZ)

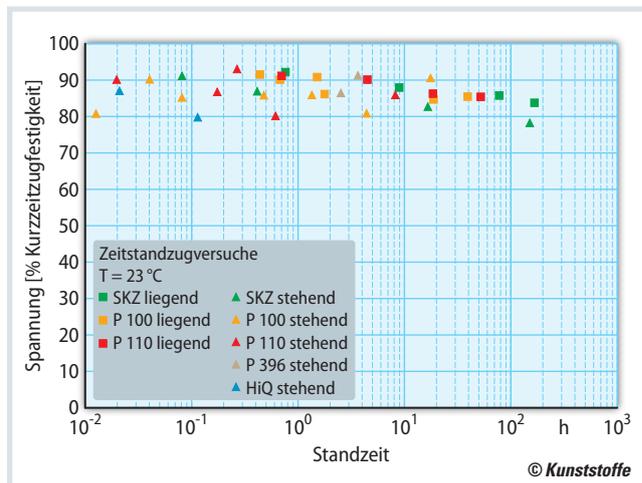


Bild 2. Vergleich des Zeitstandverhaltens lasergesinterter Teile aus PA 12 unter statischer Langzeitbeanspruchung
(Quelle: SKZ)

Verarbeitung im Lasersinterverfahren

Für die Untersuchungen mit dem Lasersinterverfahren wurden auf einer Anlage vom Typ Formiga P110 (Hersteller: EOS GmbH, Krailing) mit einem häufig eingesetzten Polyamid-12-Pulver (PA 12; Typ: PA 2200, Hersteller: EOS) Zugstäbe nach DIN EN ISO 527-2 vom Typ 1A gefertigt.

Wie in der Praxis üblich wurde mit einer Neu/Altpulvermischung von 50/50 gearbeitet. Als Referenz wurde die additiv gefertigte Bauteilgeometrie konventionell spritzgegossen, wobei PA-12-Neupulver der gleichen Charge zum Einsatz kam. Möglich wurde die Direktverarbeitung des pulverförmigen Werkstoffs durch eine deutlich erhöhte Schneckenumfangs-

geschwindigkeit sowie verringertem Nachdruck. Teile für Validierungsversuche fertigten 3D-Druck-Dienstleister additiv auf Maschinen des Herstellers EOS mit dem gleichen Material sowie auf einem Drucker HiQ von 3D Systems Inc., Rock Hill (Material: PA 650, Hersteller: 3D Systems).

Kurzzeitbeanspruchung

Das Verhalten unter mechanischer Kurzzeitbeanspruchung wurde über quasi-statische Zugversuche nach DIN EN ISO 527 bewertet. Der Einfluss der Baurichtung auf Festigkeit und Zähigkeit (Bruchdehnung) lasergesinteter Teile ist in **Tabelle 1** dargestellt. Die Streckspannung nimmt von liegend über diagonal bis hin zu stehend leicht ab. Die auffallend niedrigere Festigkeit der spritzgegossenen Referenz ist der schwierigen Verarbeitung des Pulvers sowie der geringeren Kristallinität aufgrund der schnellen Abkühlung im Werkzeug geschuldet. Der Einfluss der Baurichtung auf die Zähigkeit (Bruchdehnung) der Lasersinterteile ist wesentlich größer als auf die Festigkeit.

Die Zähigkeit (Bruchdehnung) liegend gefertigter Bauteile ist wesentlich größer als die Zähigkeit stehend gefertigter Teile. Im Unterschied zu den Spritzgießteilen versagten alle lasergesinterten Teile unabhängig von der Baurichtung spröde und mit geringer plastischer Verformung.

Statische Langzeitbeanspruchung

Das Verhalten unter statischer Langzeitbeanspruchung wurde über Zeitstandzugversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 899 untersucht. Sowohl die lasergesinterten als auch die spritzgegossenen PA-12-Teile zeigen das thermoplast-typische Zeitstandverhalten mit Abnahme der Festigkeit über die Zeit (**Bild 1**). Das Ranking der Kurzzeitbeanspruchung bleibt dabei erhalten. Eine Normierung mit der jeweiligen Kurzzeit-Zugfestigkeit erwies sich als

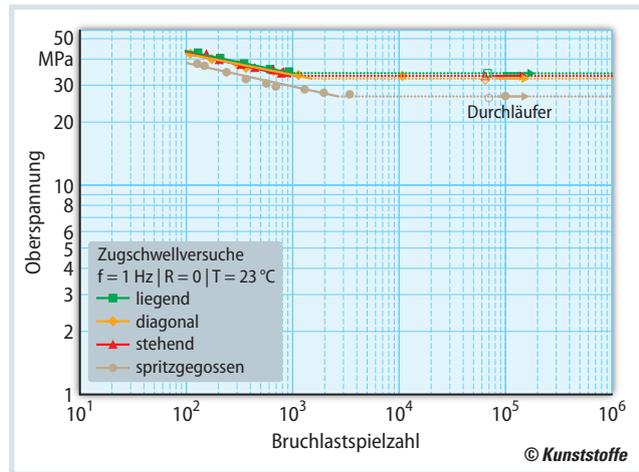


Bild 3. Ermüdungsverhalten spritzgegossener und lasergesinteter Teile aus PA 12 unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

näherungsweise unabhängig von Baurichtung und Herstellverfahren und auch für industriell gefertigte Teile als valide (**Bild 2**).

Analog zu konventionell gefertigten Teilen erscheint die Berücksichtigung der zeitabhängigen Festigkeitsabnahme durch Abminderungsfaktoren bei der Auslegung möglich. Kann eine Beanspruchung entsprechend den stehend gefertigten Teilen nicht vermieden werden, so ist die auftretende größere Streuung durch einen größeren Sicherheitsfaktor zu kompensieren.

Dynamisch-zyklische Langzeitbeanspruchung

Das Verhalten unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung (Zugschwellbelastung, Lastverhältnis $R=0$) wurde über Dauerschwingversuche nach dem Wöhler-Verfahren bewertet. In allen betrachteten Fällen nimmt die Festigkeit mit steigender Beanspruchungsdauer bzw. Lastspielzahl ab (**Bild 3**). Dabei zeigten sich sowohl ein Zeit- als auch ein Dauerfestigkeitsbereich, und auch das Ranking der Kurzzeit-Zugversuche blieb erhalten. Die Normierung mit der Kurzzeit-Zugfestigkeit ergab ein Bauteilverhalten, das nahezu unabhängig von der Baurichtung und dem Herstellverfahren ist und durch industriell gefertigte Teile bestätigt

werden konnte (**Bild 4**). Werden Abminderungsfaktoren berücksichtigt, erscheint auch bei dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung eine Auslegung additiv gefertigter Teile möglich. Eine Beanspruchung entsprechend den stehend gefertigten Teilen ist nach Möglichkeit zu vermeiden oder über einen größeren Sicherheitsfaktor zu berücksichtigen.

Schmelzextrusionsverfahren

Für die Untersuchungen mittels dem Schmelzextrusionsverfahren wurde eine Acrylnitril-Butadien-Styrol-Spritz- »

Die Autoren

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Britta Gerets ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am SKZ, Würzburg, und arbeitet in der Gruppe Bauteileigenschaften des Bereichs Produkte und Prozesse; b.gerets@skz.de

Dr.-Ing. Kurt Engelsing ist Leiter der Gruppe Bauteileigenschaften im Bereich Produkte und Prozesse des SKZ.

Dr. rer. nat. Thomas Hochrein ist Geschäftsführer der Bildung & Forschung des SKZ.

Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian ist Institutsdirektor des SKZ und Professor für das Fachgebiet „Technologie der polymeren Werkstoffe“ an der Universität Würzburg.

Service

Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/2019-11

	Streckspannung (MPa)	Bruchdehnung (%)
liegend	47,8	35
diagonal	46,9	19
stehend	46,2	13
spritzgegossen	41,9	316

Tabelle 1. Streckspannung und Bruchdehnung spritzgegossener und lasergesinteter Teile aus PA 12 unter uniaxialer Kurzzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

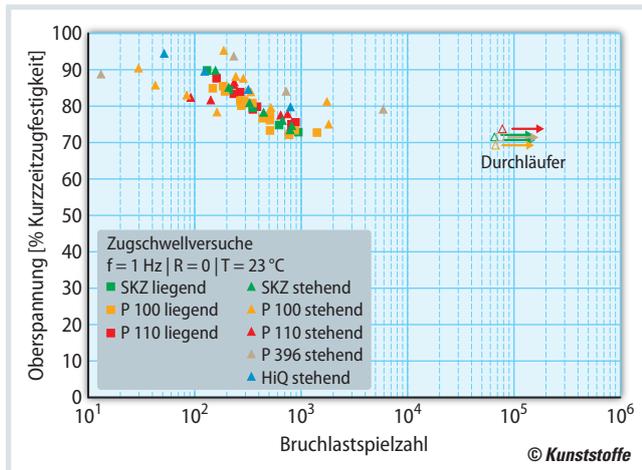


Bild 4. Vergleich des Ermüdungsverhaltens lasergesinterter Teile aus PA 12 unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

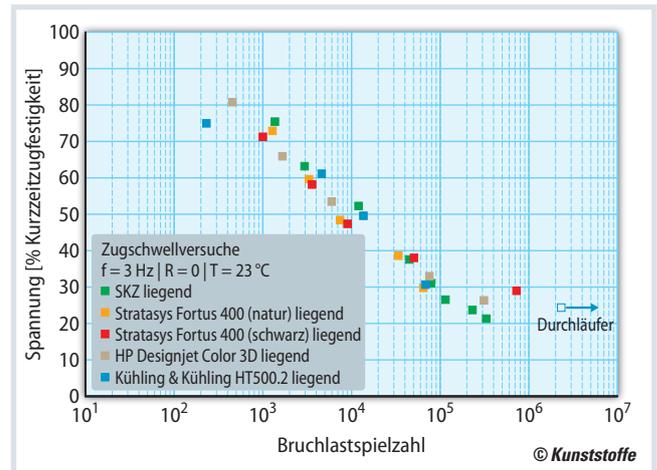


Bild 5. Vergleich des Ermüdungsverhaltens mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellter Teile aus ABS unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

Ausführlicher Bericht

Der Fachartikel fokussiert auf Ergebnisse zur Festigkeitsbetrachtung unter mechanischer Kurz- und Langzeitbeanspruchung. In dem Forschungsvorhaben wurden zahlreiche weitere Aspekte, z.B. innere / äußere Struktur, Feuchteaufnahme, Kriechverhalten, Verhalten unter Schlagbeanspruchung, betrachtet. Eine Beschreibung aller durchgeführten Arbeiten und erzielten Resultate sind dem ausführlichen Forschungsbericht zu entnehmen, der kürzlich als Buch im Shaker Verlag, Düren, erschienen ist (ISBN 978-3-8440-6481-0).

Dank

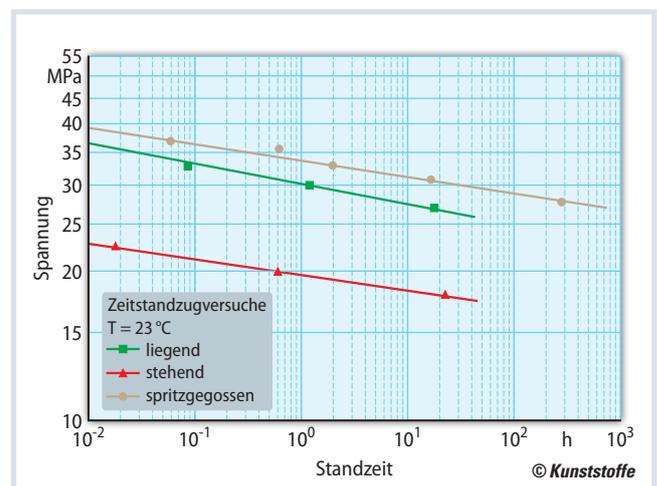
Die Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des IGF-Vorhabens 19020N der Forschungsvereinigung FSKZ e.V. durchgeführt und über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Darüber hinaus sei allen Unternehmen gedankt, die das Forschungsvorhaben durch die Bereitstellung von Material oder additiv gefertigten Teilen unterstützt haben.

gießtype (ABS) ausgewählt (Typ: Cycolac MG94, Hersteller: Sabic, Sittard-Geleen/Niederlande), aus der auf einem Einschnuckenextruder zunächst Filamente mit 1,75 mm Durchmesser hergestellt wurden. Die additive Fertigung erfolgte auf einem selbst entwickelten 3D-Drucker (Typ: TripleF, Hersteller: SKZ – KFE gGmbH, Würzburg) unter Verwendung einer $\pm 45^\circ$ -Kreuzschraffur mit einem Füllgrad von 100 %. Als Referenz wurden aus demselben Granulat Zugstäbe konventionell spritzgegossen. Während die dabei hergestellten Spritzgussteile der DIN EN ISO 527-2 Typ 1A Geometrie entsprachen, wurden bei den additiv gefertigten Teilen die Länge des parallelen Bereichs und die Schulterbreite reduziert. Zur Validierung fertigten mehrere Dienstleister Teile mit derselben Geometrie aus handelsüblichen ABS-Filamenten auf verschiedenen Druckern.

Kurzzeitbeanspruchung

Tabelle 2 zeigt den Einfluss der Baurichtung sowohl auf die Festigkeit als auch auf die Zähigkeit (Bruchdehnung) der mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellten Teile unter Kurzzeitzugbeanspruchung. Die Festigkeiten der liegend gedruckten (**Bild 5**) und spritzgegossenen Teile sind ähnlich, die der stehend gedruckten Zugstäbe wiederum deutlich geringer. Im Hinblick auf Zähigkeit und Bruchverhalten sind die Unterschiede sogar noch deutlicher: Die spritzgegossenen und liegend gedruckten Teile versagen duktil, die stehend gefertigten hingegen spröde. Das belegt, dass die Verbindung der abgelegten Stränge innerhalb einer Bauebene wesentlich besser ist als die zwischen den Schichten, was im Belastungsfall berücksichtigt werden muss.

Bild 6. Zeitstandverhalten spritzgegossener und mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellter Teile aus ABS unter statischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)



Statische Langzeitbeanspruchung

Unter statischer Langzeitbeanspruchung sinken die Festigkeiten bei allen untersuchten ABS-Teilen mit der Zeit deutlich, wobei die aus den Kurzzeit-Zugversuchen bekannte Reihenfolge hier ebenfalls bestehen bleibt (**Bild 6**). Die Normierung mit der Kurzzeit-Zugfestigkeit liefert ein näherungsweise verfahrensunabhängiges Verhalten (**Bild 7**). Somit kann bei der Bauteilauslegung das Verhalten unter Langzeitbeanspruchung über Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden. Eine Beanspruchung wie bei den stehend gedruckten Teile sollte vermieden werden. Die Ergebnisse der industriell gefertigten Teile weisen zum Teil eine größere Streuung auf, die über einen größeren Sicherheitsfaktor berücksichtigt werden sollte.

Dynamisch-zyklische Langzeitbeanspruchung

Unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung nimmt die Festigkeit sowohl der spritzgegossenen als auch der im Schmelzextrusionsverfahren hergestellten Teile mit der Beanspruchungsdauer bzw. der steigenden Lastspielzahl deutlich ab (**Bild 8**). Dabei bleibt abermals das Ranking aus den Kurzzeit-Zugversuchen erhalten. Anders als bei PA 12 konnte für ABS hingegen kein ausgeprägter Dauerfestigkeitsbereich beobachtet werden.

Die stehend gedruckten Teile haben auch in der normierten Darstellung eine verringerte Festigkeit. Möglicherweise ist dies durch eine zusätzliche Kerbwirkung infolge des Schichtaufbaus begründet. Neben dem Abminderungsfaktor für die dynamisch-zyklische Langzeitbeanspruchung ist daher auch ein Faktor für die Baurichtung erforderlich. Grundsätzlich sollte diese Beanspruchungsrichtung jedoch vermieden werden. Die industriell gefertigten Teile bestätigten die erzielten Ergebnisse.

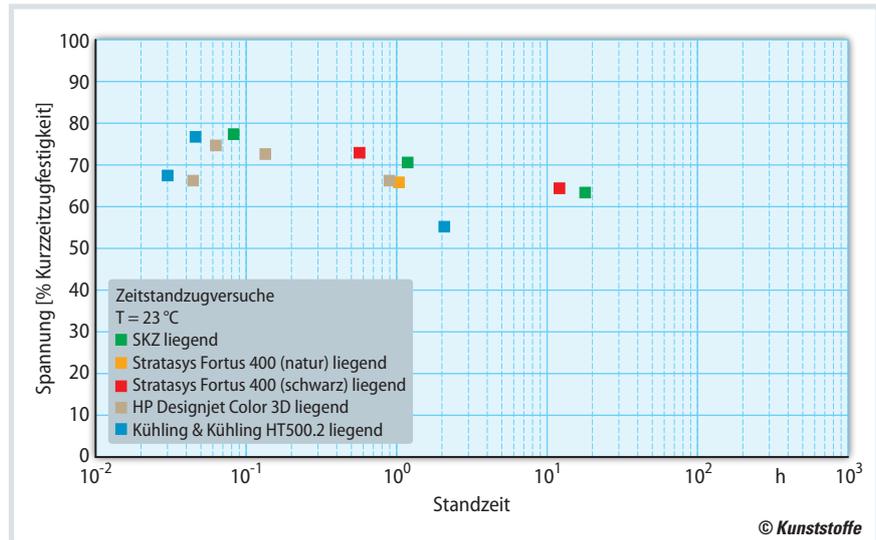


Bild 7. Vergleich des Zeitstandverhaltens mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellter Teile aus ABS unter statischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

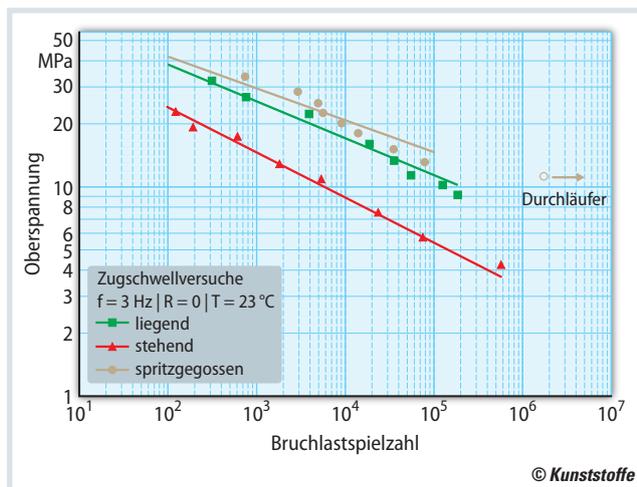


Bild 8. Ermüdungsverhalten spritzgegossener und mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellter Teile aus ABS unter dynamisch-zyklischer Langzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

Fazit und Ausblick

Die systematisch durchgeführte Untersuchung konventionell und additiv gefertigter Probekörper hat gezeigt, dass das mechanische Langzeitverhalten unter Zugbeanspruchung in allen betrachteten Fällen vom Material dominiert wird. Für die Dimensionierung erscheint somit sowohl für statische als auch dynamisch-zyklische Lastfälle die etablierte Auslegung anhand der Kurzzeitzugfestigkeit in Kombination mit

Abminderungsfaktoren für die Langzeitbeanspruchung möglich. Die Faktoren sind dabei immer für den konkreten Anwendungsfall (Werkstoff, Zeit, Temperatur etc.) zu ermitteln.

Eine Beanspruchung, die die Verbindung der einzelnen Schichten belastet, ist zu vermeiden. Überdies sind die zum Teil deutlich geringeren Festigkeiten und das veränderte Versagensverhalten additiv gefertigter Teile zu bedenken.

Zukünftig erfolgt die Übertragung der Erkenntnisse auf weitere Materialien und Verfahren. Da in der Praxis auch mehraxiale Beanspruchungen auftreten, ist die Erprobung weiterer mechanischer Belastungsfälle ebenso interessant wie der Einfluss von abweichenden Umgebungsbedingungen. Zudem erscheint die Erarbeitung konstruktiver Regeln, vor allem in Kombination mit der Baurichtung, sinnvoll. ■

Tabelle 2. Streck- bzw. Maximalspannung und Bruchdehnung spritzgegossener und mittels Schmelzextrusionsverfahren hergestellter Teile aus ABS unter uniaxialer Kurzzeitbeanspruchung (Quelle: SKZ)

	Streck- bzw. Maximalspannung (MPa)	Bruchdehnung (%)
liegend	42,8	13,4
stehend	29,1	1,5
spritzgegossen	44,6	25,1