

ICS 83.120

**Kurzfaserverstärkte Thermoplaste –
Zug-Druck-Schubprüfung mit einem Rohrprobekörper unter schwingender
Beanspruchung**

Short fiber reinforced thermoplastics –
Tension-compression-shear test with tube specimens under cyclic loading

Thermoplastiques renforcés des fibres discontinues –
Essai de traction-compression-cisaillement des spécimen tubulaires sous charge cyclique

Zur Erstellung einer DIN SPEC können verschiedene Verfahrensweisen herangezogen werden:
Das vorliegende Dokument wurde nach den Verfahrensregeln einer PAS erstellt.

Gesamtumfang 58 Seiten

Dieses Dokument wurde durch die im Vorwort genannten Verfasser erarbeitet und verabschiedet.

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe, Abkürzungen und Symbole	7
3.1 Allgemeines	7
3.2 Abkürzungen und Symbole	7
3.3 Begriffe	9
4 Prüfgeräte	13
4.1 Prüfmaschine und Einspannung	13
4.2 Dehnungsmessung	14
4.3 Messschraube, Dickentaster oder Messuhr	15
5 Prüfkörper	15
5.1 Geometrie und Stabilität	15
5.1.1 Allgemeines	15
5.1.2 Prüfkörper Typ A	15
5.1.3 Prüfkörper Typ B	16
5.2 Herstellung der Prüfkörper	16
5.3 Vermessung der Prüfkörper	17
5.3.1 Geometrische Vermessung	17
5.3.2 Bestimmung der Faserorientierung und des Partikelgehalts	17
5.4 Anzahl der Prüfkörper	17
5.5 Vorbehandlung der Prüfkörper	17
6 Prüfverfahren	18
6.1 Vorbereitungen	18
6.2 Prüfklima	18
6.3 Quasistatische Prüfungen	18
6.3.1 Allgemeines	18
6.3.2 Messwerterfassung	18
6.4 Schwingende Beanspruchung	18
6.4.1 Harmonische Belastung	18
6.4.2 Andere Lastfolgen	19
6.4.3 Kombinierte Beanspruchung	19
6.5 Ausfallkriterien	19
7 Berechnung und Angabe der Ergebnisse	20
7.1 Statische Messungen	20
7.1.1 Spannungsberechnung	20
7.1.2 Modulberechnung	20
7.2 Statistische Auswertung der statischen Kennwerte	21
7.2.1 Allgemeines	21
7.2.2 Mittelwerte und Standardabweichungen	21
7.2.3 Konfidenzintervall und Überlebenswahrscheinlichkeiten	22
7.3 Schwingversuche	22
7.3.1 Zielsetzung und Darstellung der Ergebnisse	22

7.3.2	Analyse der Ergebnisse	24
7.4	Tabellenwerk für die Berechnungen	29
8	Prüfbericht.....	37
8.1	Allgemeines	37
8.2	Statische Untersuchungen.....	38
8.3	Schwingversuche	38
Anhang A (informativ) Rohrförmiger Prüfkörper Typ A.....		40
Anhang B (informativ) Rohrförmiger Prüfkörper Typ B.....		44
Anhang C (informativ) Vergleich der Spannungsverteilung in den Probekörpern A und B.....		47
Anhang D (informativ) Berechnung des Konfidenzintervalls für $g > 0,05$		50
Anhang E (informativ) Rechenbeispiele		51
Anhang F (informativ) Beispiel Versuchsprotokoll.....		55
Literaturhinweise.....		57

Vorwort

Diese DIN SPEC wurde nach dem PAS-Verfahren erarbeitet. Die Erarbeitung von DIN SPEC nach dem PAS-Verfahren erfolgt in DIN SPEC (PAS)-Konsortien und nicht zwingend unter Einbeziehung aller interessierten Kreise.

Die Erarbeitung und Verfassung des Dokuments erfolgte durch die nachfolgend genannten Initiatoren und Verfasser:

- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Prof. Dr.-Ing. Volker Trappe
- Fraunhofer-Institut LBF Darmstadt, Dominik Spancken
- Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Prof. Dr. Andreas Zeiser
- inpro Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH, Dr.-Ing. Kim Kose
- Robert Bosch GmbH, Dr. Matthias DeMonte

Für dieses Thema bestehen derzeit keine Normen im Deutschen Normenwerk.

DIN SPEC (PAS) sind nicht Teil des Deutschen Normenwerks.

Für diese DIN SPEC (PAS) wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Trotz großer Anstrengungen zur Sicherstellung der Korrektheit, Verlässlichkeit und Präzision technischer und nicht-technischer Beschreibungen kann das DIN SPEC (PAS)-Konsortium weder eine explizite noch eine implizite Gewährleistung für die Korrektheit des Dokuments übernehmen. Die Anwendung dieses Dokuments geschieht in dem Bewusstsein, dass das DIN SPEC (PAS)-Konsortium für Schäden oder Verluste jeglicher Art nicht haftbar gemacht werden kann. Die Anwendung der vorliegenden DIN SPEC (PAS) entbindet den Nutzer nicht von der Verantwortung für eigenes Handeln und geschieht damit auf eigene Gefahr.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Die kostenfreie Bereitstellung dieses Dokuments als PDF-Version über den Beuth WebShop wurde im Vorfeld finanziert.

Einleitung

Kurzfaserverstärkte Kunststoffe zeigen in Abhängigkeit vom Fertigungsprozess ein anisotropes Materialverhalten. Um in Werkstoffmodellen Kennwerte für Elastizitäten, Festigkeiten unter statischer und schwingender Beanspruchung dem Konstrukteur an die Hand geben zu können, ist die Zug-Druck-Schubprüfung an rohrförmigen Probekörpern eine sehr geeignete Methode [1], [2], [3]. Rohrförmige Probekörper haben zudem den Vorteil einer hohen Stabilität bei Druck- und Schubbelastung, sodass Kennwerte auch ohne Beul-/Knickstützen ermittelt werden können. Zudem sind diese Proben insbesondere zur Messung der Schwingfestigkeit unter uniaxialer und auch kombinierter bi-axialer Beanspruchung für alle technisch relevanten Belastungsverhältnisse gut verwendbar [3], [4], [5], [6]. Das Ziel dieser DIN SPEC ist die Werkstoffprüfung von kurzfaserverstärkten Kunststoffen mittels der Zug-Druck-Schubprüfung zu formulieren und zu veröffentlichen.

Im Rahmen von Forschungsvorhaben wurden rohrförmige Prüfkörper entwickelt [6], [7], [8], deren spezifische Form den Anforderungen der Werkstoffprüfung und einer hohen Vorzugsausrichtung der Kurzfaserverstärkung in Proben-Längsrichtung genügt (siehe Bild 4). Die Prüfkörpergeometrien wurden bereits veröffentlicht [5], [8]. Mittels Spritzgussimulationen wurde ein Werkzeug entworfen, mit dem es gelingt, im Messquerschnitt eine hohe Faserorientierung zu erreichen [3]. Diese DIN SPEC baut auf den entwickelten Prüfkörpergeometrien auf, wohl wissend, dass im Sinne eines Proportionalstabes auch andere Prüfkörperabmessungen zu vergleichbar guten Ergebnissen führen würden. Die Erweiterung der DIN SPEC auf eine größere Familie an Prüfkörpergeometrien wäre ein Folgeprojekt.

Gesamtziel ist es, die Zug-Druck-Schubprüfung an Rohrprobekörpern aus der Forschung in die Anwendung zu überführen, um die Akzeptanz in der industriellen Anwendung zu erhöhen.

1 Anwendungsbereich

Diese DIN SPEC legt ein Verfahren für die Prüfung von unverstärkten und partikel- und kurzfaserverstärkten Kunststoffen mittels Zug-Druck-Schubprüfung fest. Dieses Verfahren findet Anwendung zur Bestimmung der Schwingfestigkeit im Bereich von 10^3 bis 10^7 Schwingspielen und der Nachgiebigkeiten unter statischer Belastung sowie der Zugfestigkeit. Alle Beanspruchungen und berechneten Größen sind nennspannungsbasiert.

Grundsätzlich besteht bei Rohrprobekörpern auch die Möglichkeit eine Beanspruchung in Längs- und in Umfangsrichtung durch Innendruck zu erzeugen. Dies wird in dieser Spezifikation nicht berücksichtigt, um die Anwendung überschaubar zu halten. Bei Rohrproben mit ausgeprägter Querschnittsverkleinerung (z. B. der Prüfkörper Typ B), entsteht eine Umfangsspannung auch aufgrund einer Zugkraft (siehe Anhang C). Die Umfangsspannung muss dann mittels FEA lokal berechnet werden.

Das Verfahren gilt für rohrförmige Prüfkörper deren spezifische Form den Anforderungen der Werkstoffprüfung und bei Kurzfaserverstärkung einer hohen Vorzugsausrichtung in Probenlängsrichtung genügen.

Diese DIN SPEC gilt nicht für endlosfaserverstärkte Kunststoffe. Wegen der vollkommen unterschiedlichen Fertigungstechnologien und der zu erwartenden hohen Prüflasten, sind hier die Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie gesondert zu betrachten. Es wird nicht zielführend sein, beide Werkstoffklassen in einer Norm zu behandeln.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 50100, *Schwingfestigkeitsversuch — Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*

DIN EN ISO 291, *Kunststoffe — Normalklimate für Konditionierung und Prüfung*

DIN EN ISO 527-1:2012-06, *Kunststoffe — Bestimmung der Zugeigenschaften — Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012*

DIN EN ISO 7500-1, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen — Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung*

ISO 20337, *Fibre-reinforced plastic composites — Shear test method using a shear frame for the determination of the in-plane shear stress/shear strain response and shear modulus*

ISO 23788, *Metallic materials — Verification of the alignment of fatigue testing machines*

3 Begriffe, Abkürzungen und Symbole

3.1 Allgemeines

Es wird empfohlen, die Längen in mm, die Kräfte in N, die Momente in N·mm, die Spannungen und Drücke in MPa einzusetzen. Selbstverständlich können alle SI-Einheiten konsistent verwendet werden.

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach DIN 50100 und nach DIN EN ISO 527-1.

ANMERKUNG 1 Die im Folgenden verwendeten Spannungsgrößen beziehen sich auf die jeweiligen Nennquerschnitte in unverformten Zustand und die Symbole x , φ und r beziehen sich auf das Zylinder-Koordinatensystem, wobei x in der Richtung der Rohrachse liegt, φ den Umfangswinkel beschreibt und r in radialer Richtung (in Probendickenrichtung) zeigt, (siehe Bild 5). Der Koordinatenursprung liegt auf der Rohrseele. Die Koordinatenwerte werden für x und r in mm und für φ in ° angegeben.

ANMERKUNG 2 Reine Definitionen werden in 3.2 in Tabelle 1 aufgelistet, abgeleitete Größen werden in 3.3 einzeln aufgeführt.

3.2 Abkürzungen und Symbole

Tabelle 1 — Formelzeichen, Abkürzungen und ihre Bedeutung

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Querschnittsfläche	mm ²
a	Achsenabschnitt der Regressionsgerade	1
b	Steigung der Regressionsgerade	1
dt	Änderung des Zeitschrittes	s
$d\gamma_\varphi$	Änderung der Schubdehnung je Zeitschritt	mm/mm oder %
$d\varepsilon_x$	Änderung der Längsdehnung je Zeitschritt	mm/mm oder %
F_x	Längskraft	N
f_x	Prüffrequenz (in Richtung der Längsachse)	Hz
f_φ	Prüffrequenz (in Drehrichtung um Längsachse)	Hz
g	Schwellwert zur Berechnung des Konfidenzintervalls	1
G_φ	Schubmodul (in Drehrichtung um Längsachse)	MPa
i	Zählvariable	1
k	Neigung der Wöhlerlinie	1
$K_{t,x}$	Formzahl (in Richtung der Längsachse)	1
$K_{t,\varphi}$	Formzahl (in Drehrichtung um Längsachse)	1
M_x	Torsionsmoment um die Längsachse	Nmm
n	Anzahl von Messgrößen, Anzahl der Proben, math. Zahl der Freiheitsgrade	1
N	Schwingspielzahl	1
$N(\sigma_a)$	Schwingspielzahl bei vorgegebener Spannungsamplitude	1
N_p	Schwingspielzahl bei Überlebenswahrscheinlichkeit p	1
N_{ref}	Referenzschwingspielzahl	1

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
p	Überlebenswahrscheinlichkeit	1
r_a	Außenradius	mm
r_i	Innenradius	mm
R_x	Belastungsverhältnis (in Richtung der Längsachse)	1
R_φ	Belastungsverhältnis (in Drehrichtung um Längsachse)	1
s	Standardabweichung	entspricht der jeweiligen Messgröße
s_{1H}	Standardabweichung auf einem Lasthorizont	1
s_b	Berechnungsgröße zur Bestimmung des Konfidenzintervalls für den Regressionsparameter k	1
$s_{\text{korrr,H}}$	korrigierte Standardabweichung auf einem Lasthorizont bei Probenanzahl $n < 10$	1
s_{korrr}	korrigierte Standardabweichung bei Probenanzahl $n < 10$	1
s_{x0}	Berechnungsgröße zur Bestimmung des Konfidenzintervalls für $\sigma_a(N_{\text{ref}})$	1
s_{xx}	Summe der quadratischen Abweichungen der Messwerte und des Mittelwertes in x -Richtung	1
s_{xy}	Summe des Produkts der Abweichungen in x - und y -Richtung vom jeweiligen Mittelwert	1
$t_{n-1,1-\alpha/2}$	$(1 - \alpha/2)$ Quantil der zentralen t -Verteilung mit $n - 1$ Freiheitsgraden	1
T_N	Streuspanne	1
$T_{N,90\%-10\%}$	Streuspanne für 90 % und 10 % Ausfallwahrscheinlichkeit	1
$T_{N,NV}$	Streuspanne auf Basis einer Normalverteilung	1
$T_{N,TI}$	Streuspanne auf Basis von Tolleranzintervallen	1
T_x	Periodendauer (in Richtung der Längsachse)	s
T_φ	Periodendauer (in Drehrichtung um Längsachse)	s
$\bar{x}$	Mittelwert von Messgrößen	entspricht der jeweiligen Messgröße
z	Quantil	1
z_p	P-Quantil der Standardnormalverteilung	1
α	gefordertes Signifikanzniveau	1 oder %
$\dot{\gamma}_\varphi$	Dehnrates (Schubdehnung)	1/s
$\gamma_{\varphi 1}$	Scherdehnung $\gamma_{\varphi 1} = 0,001$	mm/mm oder %
$\gamma_{\varphi 2}$	Scherdehnung $\gamma_{\varphi 1} = 0,005$	mm/mm oder %
δ	Phasenverschiebung	°
Δ^2	Berechnungsgröße zur Bestimmung des Toleranzintervalls	1
$\dot{\epsilon}_x$	Dehnrates (Längsdehnung)	1/s

Formel- zeichen	Bezeichnung	Einheit
ε_{x1}	Längsdehnung $\varepsilon_{x1} = 0,000\ 5$	mm/mm oder %
ε_{x2}	Längsdehnung $\varepsilon_{x2} = 0,002\ 5$	mm/mm oder %
κ_1^{reg}	Einseitiger Toleranzfaktor für Regressionsberechnung	1
κ_1^{uni}	Einseitiger Toleranzfaktor für Festigkeitsberechnung	1
κ_2^{reg}	Zweiseitiger Toleranzfaktor für Regressionsberechnung	1
κ_2^{uni}	Zweiseitiger Toleranzfaktor für Festigkeitsberechnung	1
λ	Mehrachsigkeitsverhältnis	1
σ_a	Spannungsamplitude, allgemein	MPa
σ_{qs}	quasistatische Bruchfestigkeit, Zug	MPa
σ_x	Längsspannung	MPa
$\sigma_{x,\text{max}}$	Maximale Längsspannung im Kerbgrund (in Richtung der Längsachse)	MPa
$\sigma_{x,o}$	Oberlängsspannung	MPa
$\sigma_{x,u}$	Unterlängsspannung	MPa
σ_{x1}	Längsspannung bei Längsdehnung von $\varepsilon_{x1} = 0,000\ 5$	MPa
σ_{x2}	Längsspannung bei Längsdehnung von $\varepsilon_{x2} = 0,002\ 5$	MPa
σ_{xa}	Längsspannungsamplitude	MPa
σ_y	Umfangsspannung	MPa
τ_m	Mittelspannung (Schub)	MPa
τ_{qs}	quasistatische Bruchfestigkeit, Schub	MPa
τ_φ	Schubspannung	MPa
$\tau_{\varphi,\text{max}}$	Maximale Schubspannung im Kerbgrund (in Drehrichtung um Längsachse)	MPa
$\tau_{\varphi,o}$	Oberschubspannung	MPa
$\tau_{\varphi,u}$	Unterschubspannung	MPa
$\tau_{\varphi1}$	Schubspannung bei Scherdehnung $\gamma_{\varphi1} = 0,001$	MPa
$\tau_{\varphi2}$	Schubspannung bei Scherdehnung $\gamma_{\varphi2} = 0,005$	MPa
$\tau_{\varphi a}$	Schubspannungsamplitude	MPa

3.3 Begriffe

3.3.1

Querschnittsfläche

A

$$A = (r_a^2 - r_i^2) \pi$$

3.3.2

Längsspannung

σ_x

$$\sigma_x = F_x/A$$

3.3.3

Schubspannung

τ_φ

$$\tau_\varphi = \frac{2M_x}{\pi(r_a + r_i)^2(r_a - r_i)}$$

3.3.4

Mittelspannung [Zug]

σ_m

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{x,o} + \sigma_{x,u}}{2}$$

3.3.5

Mittelspannung [Schub]

τ_m

$$\tau_m = \frac{\tau_{\varphi,o} + \tau_{\varphi,u}}{2}$$

3.3.6

Dehnraten

$\dot{\varepsilon}_x; \dot{\gamma}_\varphi$

$$\dot{\varepsilon}_x = \frac{d\varepsilon_x}{dt}$$

$$\dot{\gamma}_\varphi = \frac{d\gamma_\varphi}{dt}$$

3.3.7

Prüffrequenz

f_x, f_φ

$$f_x = \frac{1}{T_x}$$

$$f_\varphi = \frac{1}{T_\varphi}$$

3.3.8**Belastungsverhältnisse** R_x, R_φ

$$R_x = \frac{\sigma_{x,u}}{\sigma_{x,o}}$$

$$R_\varphi = \frac{\tau_{\varphi,u}}{\tau_{\varphi,o}}$$

3.3.9**Längsspannungsamplitude** σ_{xa}

$$\sigma_{xa} = \frac{\sigma_{x,o} - \sigma_{x,u}}{2}$$

3.3.10**Schubspannungsamplitude** $\tau_{\varphi a}$

$$\tau_{\varphi a} = \frac{\tau_{\varphi,o} - \tau_{\varphi,u}}{2}$$

3.3.11**Mehrachsigkeitsverhältnis** Λ

$$\Lambda = \tau_{\varphi a} / \sigma_{xa}$$

3.3.12**Formzahl** $K_{t,x}, K_{t,\varphi}$

Grad der Inhomogenität des Spannungszustands in der Probe ausgedrückt durch den Quotienten aus maximaler örtlicher Spannung und Nennspannung

$$K_{t,x} = \frac{\sigma_{x,max}}{\sigma_x}$$

$$K_{t,\varphi} = \frac{\tau_{\varphi,max}}{\tau_\varphi}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei Zugbelastung wird die Längsspannung und bei Torsionsbelastung die Schubspannung betrachtet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für den ungekerbten Prüfkörper wie nach Typ A und Typ B beschrieben, ergibt sich die Formzahl sinngemäß aus den dargestellten Spannungsverläufen

Anmerkung 3 zum Begriff: Wenn in den Prüfkörper eine zusätzliche Kerbe eingebracht wird, ist die Formzahl nach der oben gegebenen Definition zu bestimmen. Die örtliche Spannung wird unter der Annahme von linear elastischen Materialverhalten bestimmt. Es sollte zusätzlich angegeben werden, ob das Material als isotrop oder anisotrop formuliert wurde. Im Weiteren sollte angegeben werden, an welchem Ort am Prüfkörper die maximale örtliche Spannung ausgewertet wurde.

3.3.13

Elastizitätsmodul (in Richtung der Längsachse)

E_x

$$E_x = \frac{\sigma_{x2} - \sigma_{x1}}{\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: $\varepsilon_{x1} = 0,000\ 5$ und $\varepsilon_{x2} = 0,002\ 5$, dabei sind σ_{x1} und σ_{x2} die dazugehörigen auftretenden Spannungen bei dem jeweiligen Dehnungswert von $\varepsilon_{x1} = 0,000\ 5$ und $\varepsilon_{x2} = 0,002\ 5$.

3.3.14

Schubmodul (in Drehrichtung um Längsachse)

G_φ

$$G_\varphi = \frac{\tau_{\varphi2} - \tau_{\varphi1}}{\gamma_{\varphi2} - \gamma_{\varphi1}}$$

Anmerkung 1 zum Begriff: $\gamma_{\varphi1} = 0,001$ und $\gamma_{\varphi2} = 0,005$, dabei sind $\tau_{\varphi1}$ und $\tau_{\varphi2}$ die dazugehörigen auftretenden Schubspannungen bei dem jeweiligen Scherdehnungswert von $\gamma_{\varphi1}$ und $\gamma_{\varphi2}$.

3.3.15

Konfidenzintervall

Bereich, der mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit (oder Konfidenz) $(1 - \alpha)$ den wahren Wert eines unbekannten Parameters, hier der Mittelwert der Schwingspielzahl bei einer aufgebrachten Spannungsamplitude, einschließt.

Anmerkung 1 zum Begriff: Dieses Intervall resultiert ausschließlich aus den Fehlern bei der Stichprobenziehung (en: sampling error) und reduziert sich mit zunehmender Anzahl von Proben.

Anmerkung 2 zum Begriff: Das Konfidenzintervall ist null, wenn der Stichprobenumfang exakt die Grundgesamtheit wiedergibt [9].

3.3.16

Prognoseintervall

Bereich, in dem der einzelne zu prognostizierende Wert mit der Wahrscheinlichkeit $(1 - \alpha)$ enthalten ist.

3.3.17

Toleranzintervall

Bereich, der mit Konfidenz $(1 - \alpha)$ einen Anteil p der Grundgesamtheit einschließt [15].

Dieses Intervall umfasst sowohl den Fehler bei der Stichprobenziehung als auch die tatsächliche Varianz der Grundgesamtheit. Bei unendlicher Stichprobenanzahl [9] ist es gleich der Quantile der Grundgesamtheitsverteilung.

Anmerkung 1 zum Begriff: p ist hier $0,9 - 0,1 = 0,8$

Anmerkung 2 zum Begriff: Dieses Intervall umfasst sowohl den Fehler bei der Stichprobenziehung als auch die tatsächliche Varianz der Grundgesamtheit. Bei unendlicher Stichprobenanzahl [9] ist es gleich der Quantile der Grundgesamtheitsverteilung.

3.3.18

Streuspanne

Kennwert für das Maß der Streuung der Versuchsergebnisse und ermöglicht somit einen quantitativen Vergleich der Qualität von verschiedenen Versuchsreihen.

4 Prüfgeräte

4.1 Prüfmaschine und Einspannung

Es wird empfohlen Zug-Druck-Torsionsprüfmaschinen zu verwenden, die einen Kraftbereich von mindestens ± 50 kN, ein Torsionsmoment von mindestens ± 200 Nm (Literaturwerte aus [1], [2], [4]) und eine Messauflösung der Kraft- und Momentenmessungen nach DIN EN ISO 7500-1, Klasse 1 aufweisen. Die Weg- und Winkelmessungen bzw. die Längs-/Schubdehnungsmessung erfolgt in Anlehnung an ISO 5893.

Die Einspannung wird vorzugsweise durch ein Rundspannzeug (siehe Bild 1) erreicht, sodass eine gleichmäßige Kraft- bzw. Momenteneinleitung gewährleistet ist. Die Spanntiefe sollte mindestens $2/3$ der Länge der Spannzange (siehe Bild 2) betragen, damit die Spannzange zulässig belastet wird. In Rundspannzeugen wird der Prüfkörper automatisch zentriert, sodass Hinweise bezüglich der Einspannung bzw. Probenausrichtung nach DIN EN ISO 527-1:2012-06, 9.3, hier nicht zur Anwendung kommen. Sehr wohl ist im gleichen Intervall wie die Kalibrierung die Ausrichtung der Spannzeuge nach ISO 23788 regelmäßig zu prüfen.

Die Spanntiefe muss so groß gewählt werden, dass infolge des Anpressdrucks und des Reibbeiwertes eine Lastübertragung ohne Rutschen möglich ist. Der Anpressdruck ist so zu wählen, dass maximal die Hälfte der Querdruckfestigkeit des Probenwerkstoffs aufgebracht wird. Dabei ist die Anisotropie des Werkstoffes zu berücksichtigen. Ein Kollabieren des Prüfkörpers durch den aufgebrachten Aussendruck ist durch einen passend gewählten Innenstützkern zu vermeiden, dessen Außendurchmesser $0,1$ mm bzw. maximal $0,5$ % kleiner sein darf, als der Innendurchmesser des Rohrprüfkörpers. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen im Prüfkörper sollte der Innenstützkern in Richtung des Messbereichs nicht in der gleichen Ebene (normal zur Längsachse der Probe) enden, wie die Spannzange.

ANMERKUNG Über den Innenstützkern werden keine Zug-/Schubkräfte in den Prüfkörper eingeleitet. Die Kraft-/Momentenübertragung erfolgt nur über die äußere Mantelfläche.

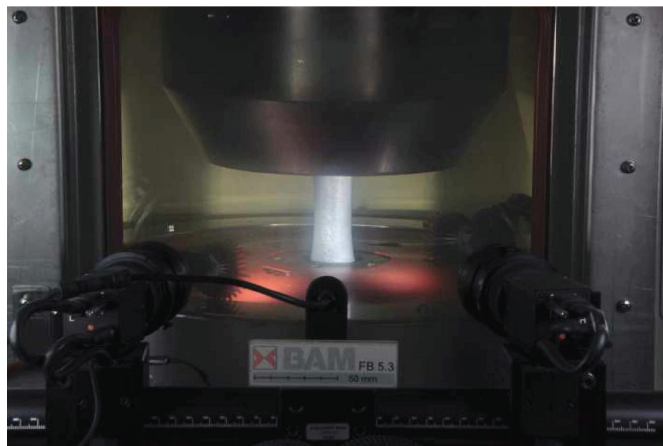
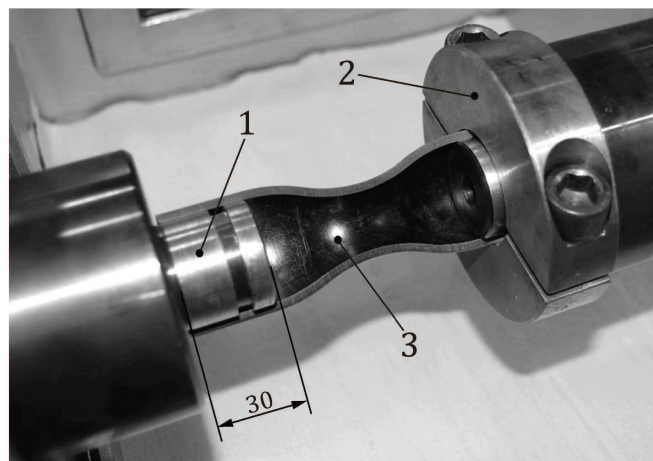


Bild 1 — Prüfkörper A eingespannt in Rundspannzeug mit Prüfmaschine



Bild 2 — Prüfkörper A mit Spannzange und aufgeschnitten mit Innenstützkern

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Spanndorn
- 2 Einspannung
- 3 Rohrprobe

Bild 3 — Beispiel für Einspannung eines Prüfkörpers Typ B

Das Ringspannsystem wie in [5] beschrieben (siehe Bild 3) bietet die Möglichkeit, den Spanndruck auf den Prüfkörper individuell anzupassen. Durch Klemmrings mit mehreren hintereinander angebrachten Spannschrauben kann der Spanndruck harmonisch eingeleitet werden. Dies verringert Spannungsspitzen am Übergang des Klemmrings in die freie Einspannlänge. Ebenfalls zur Verringerung von Spannungsspitzen muss der Klemmring am Übergang in die freie Einspannlänge mit einer sanft auslaufenden Phase von mindestens 2 mm Länge und einem Winkel von 5° versehen sein. Der Innenspanndorn sollte $1/5$ der Spannlänge des Klemmrings länger sein um eine harmonische Lasteinleitung zu gewährleisten und um Spannungsspitzen durch das Spannsystem zu verringern.

4.2 Dehnungsmessung

Die Dehnungsmessung kann über Dehnmessstreifen, Felddehnungsmesssystem, Videoextensometer und Setzdehnungsaufnehmer erfolgen. Aufgrund der Geometrie der Probe ist eine gradientenfreie Dehnung nur im Bereich der Messstrecke (Prüfkörper Typ A) gegeben. Die relative Messauflösung der Dehnungsmesseinrichtung sollte mindestens $\pm 1\%$ des jeweiligen Dehnungswertes oder besser betragen (siehe auch DIN EN ISO 527-1:2012-06, 5.1.5)

4.3 Messschraube, Dickentaster oder Messuhr

Für die Messung der Wandstärke und des Durchmessers des Prüfkörpers sind Messschraube, Dickentaster oder Messuhr zu verwenden, deren Fehlergrenze $\leq 0,01$ mm beträgt.

5 Prüfkörper

5.1 Geometrie und Stabilität

5.1.1 Allgemeines

Die Geometrie des rohrförmigen Prüfkörpers wird so gewählt, dass sich im Bereich der Messstrecke eine sehr hohe, dem Zugstab vergleichbare, Orientierung der Fasern ergibt. Genauere Informationen über Ausführungsbeispiele sind im Anhang A und Anhang B aufgeführt.

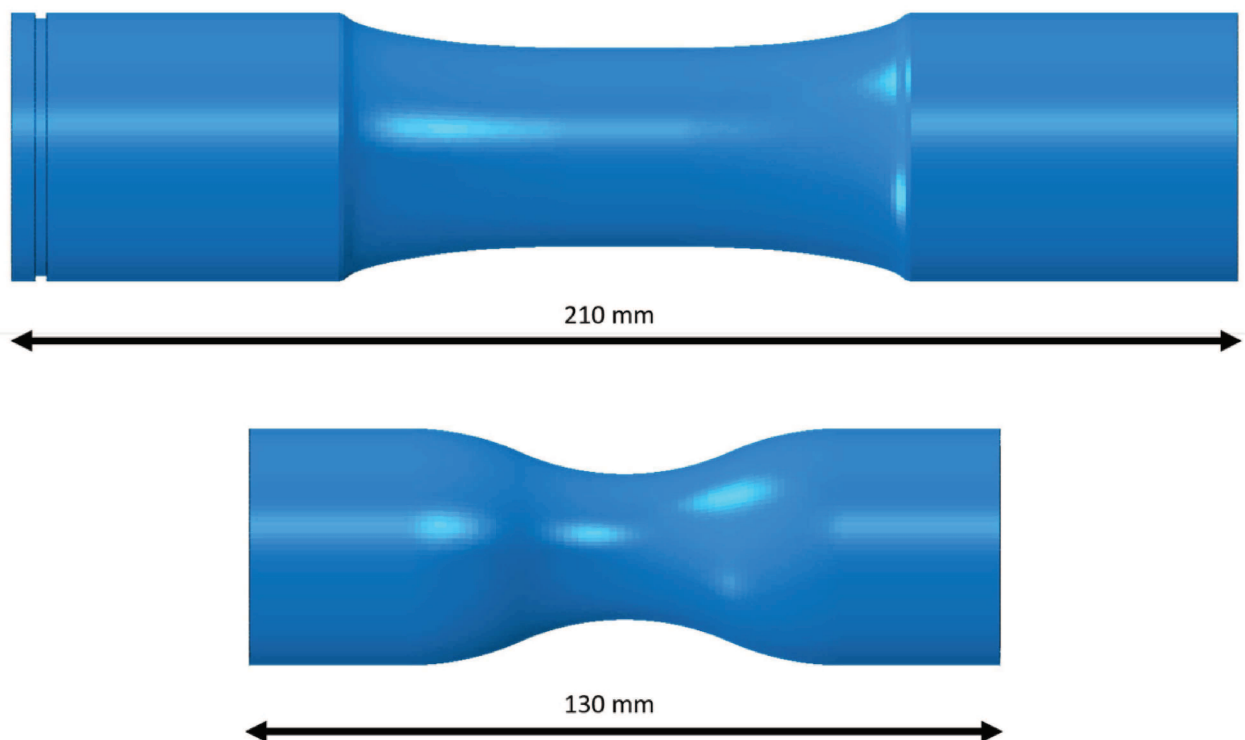


**Bild 4 — Skizze der beiden in diesem Dokument näher beschriebenen Prüfkörper.
Nähere Ausführungen in Anhang A und B**

5.1.2 Prüfkörper Typ A

Der Prüfkörper besteht aus einem Einspannbereich, einem Verjüngungsbereich und einer Messstrecke mit konstantem Radius. Im letzteren ist die Wanddicke am geringsten. Eine Optimierung der Geometrie hinsichtlich hochorientierter Fasern im Messbereich führt zu einem Prüfkörper, der sich unter Zugbelastung vergleichbar zu einem Zugstab verhält. Hingegen liegt die geometrische Stabilitätsgrenze unter Druck- und Schubbelastung sehr dicht bei der physikalischen Festigkeit. Somit können unter quasistatischer Beanspruchung der Längs-E-Modul, die zugehörige Querdehnzahl und das Schubmodul bestimmt werden. Im Weiteren eignet sich der Prüfkörper insbesondere zur Ermittlung der anisotropen Schwingfestigkeiten im Zeitfestigkeitsbereich (etwa 10^3 bis 10^7 Lastwechsel). Der Prüfkörper wurde ursprünglich als Gebrauchsmuster [8] angemeldet, dieses Schutzrecht wird nicht weiter verfolgt.

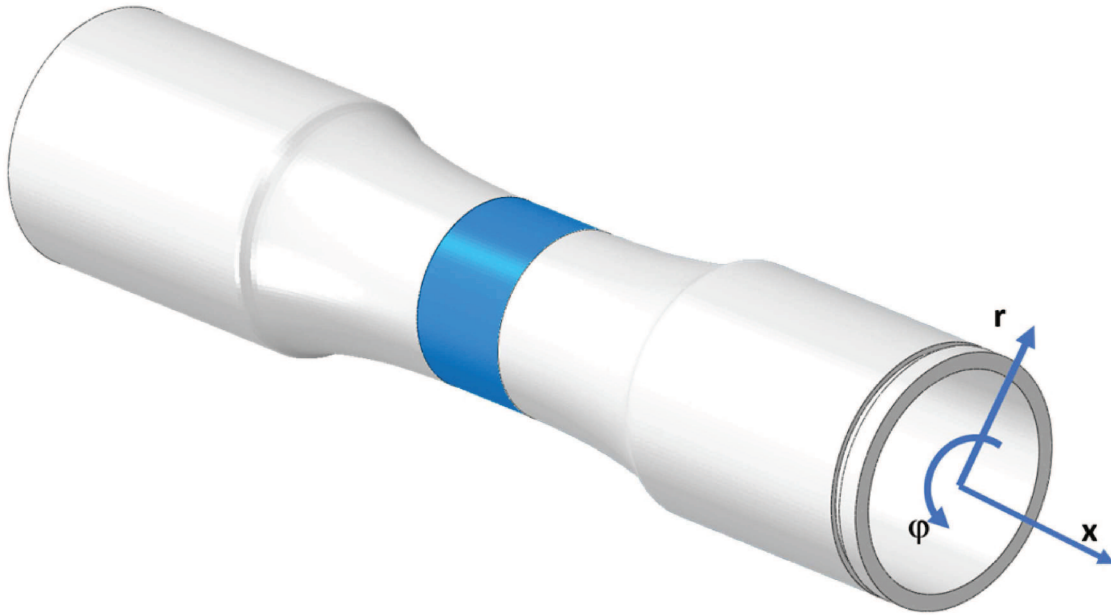


Bild 5 — Skizze des Prüfkörpers Typ A mit Prüfstrecke (blau charakterisiert) und Koordinaten

5.1.3 Prüfkörper Typ B

Dieser Prüfkörper ist durch eine konstante Wanddicke von 3 mm und eine analytische Konturbeschreibung anhand Kreisbögen gegeben. Anders als Typ A besitzt Typ B keinen mittleren Bereich mit konstantem Radius. Für weitere Details zu diesem Prüfkörper siehe Anhang B.

5.2 Herstellung der Prüfkörper

Die Prüfkörper werden in der Regel im Spritzgießverfahren hergestellt (andere Verfahren sind auch möglich). Dabei kann durch eine ausreichend lange bei ausreichend hohem Druck ausgeführte Nachdruckphase ein hochgradig reproduzierbares Ergebnis erreicht werden und ein ungleichförmiger Schrumpf vermieden werden.

Das Angusssystem spielt zur homogenen Füllung der Kavität eine entscheidende Rolle. Der Anguss muss so gestaltet sein, dass das Fließwegende der Schmelze auf allen Fließpfaden möglichst gleichzeitig das Kavitätseende erreicht, um ein homogenes Füllen der Kavität zu gewährleisten. Technisch am einfachsten umsetzen lässt sich an rohrförmig hinterschnittenen Probekörpern ein Punktanguss. Dabei gilt es einen Einlaufbereich vorzusehen, in dem sich die Schmelze in Umfangs- und Längsrichtung homogen ausbilden kann. Der Einlaufbereich muss vor der mechanischen Prüfung mit einem geeigneten Verfahren abgetrennt werden. Ein zusätzlich angebrachter Staubalken im Übergang des Einlaufbereiches zum Prüfkörper kann den homogenen Schmelzefluss begünstigen. Das gesamte Angusssystem muss rheologisch so ausgelegt sein, dass es keinesfalls zu einem Einfrieren der Schmelze kommen kann und die Nachdruckphase vollständig wirken kann. Weiterhin ist bei der rheologischen Auslegung des Spritzgießwerkzeuges darauf zu achten, das Werkzeug nicht auf eine Materialvariante in einem zu engen Prozessfenster einzuschränken. Das Angusssystem kann dahingehend verändert werden, dass der Prüfkörper beidseitig angespritzt wird, um im Bereich höchster Belastung Bindahtfestigkeiten zu untersuchen.

Die zur Herstellung der Prüfkörper notwendigen Unterlagen wie z. B. Maschinenparameter, -typ, Anguss- und Werkzeugkonstruktion sollten für den Prüfbericht und nachgelagerte Simulationsprozesse bereitgestellt werden.

5.3 Vermessung der Prüfkörper

5.3.1 Geometrische Vermessung

Die Prüfkörper müssen rotationssymmetrisch sein und eine lineare Rohrseele aufweisen. Der Höhengschlag in der Mitte der Probe muss $\leq 0,5$ mm sein (Vermeidung von Zusatzspannung durch überlagerte Biegung). Die Wandstärke im Messquerschnitt darf innerhalb des Prüfkörpers und zwischen zwei Prüfkörpern einer Messung um nicht mehr als 2,5 % variieren. Jeder Prüfkörper ist auf diese Forderungen hin zu vermessen.

An drei Schnitten in Längsrichtung des Messbereichs (Prüfkörper Typ A) oder am minimalen Querschnitt (Prüfkörper Typ B), sind mindestens drei Messstellen gleichverteilt über den Umfang Innen- und Außendurchmesser zu bestimmen.

Die Schnitte sind mit Längsmessungen mit den Zeichnungen abzugleichen, um sicherzustellen, dass die Messungen in den Messbereichen liegen. Zudem sind Innen- und Außendurchmesser im Einspannbereich des Prüfkörpers zur Anpassung der Stützkerne zu bestimmen.

Die Nullposition ist geeignet zu wählen und auf der Probe zu kennzeichnen. Es wird empfohlen, sich am Anguss oder Formtrennebene zu orientieren.

Die Einspannlänge ist festzuhalten.

5.3.2 Bestimmung der Faserorientierung und des Partikelgehalts

Im Falle von faser- oder partikelverstärkten Materialien sollte die Faserorientierung oder der Partikelgehalt an versagungsrelevanten Orten experimentell bestimmt werden. Dies kann beispielsweise mittels eines 3D-Computertomograph mit nachgelagerter Auswertung oder durch Auswertung von 2D-Schliffbildern experimentell ermittelt werden.

5.4 Anzahl der Prüfkörper

Die Anzahl der Prüfkörper je Messpunkt für statische bzw. quasistatische Beanspruchung sollte nicht weniger als fünf betragen. Die Anzahl der Prüfkörper für Ermüdungslinien hängt von der Versuchsmatrix (z. B. Zug, Druck, Torsion, Klima, Belastungsverhältnis, Mehrachsigsigkeitsverhältnis) sowie vom Auswertungsverfahren und von der gewünschten statistischen Absicherung je Ermüdungslinie ab. Die Anzahl der Proben pro Wöhlerlinie sollte mindestens sechs betragen. In Abhängigkeit der Streuspanne und der gewünschten Treffsicherheit wird empfohlen den Probenumfang zu erhöhen.

ANMERKUNG Nach Erfahrungswerten und unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit liegt der Probenumfang je Wöhlerlinie typischerweise zwischen 6 und 12.

5.5 Vorbehandlung der Prüfkörper

Die Probekörper sind nach den Festlegungen der Internationalen Produktnorm je nach Anwendungsbereich für den untersuchten Werkstoff zu konditionieren, sofern solche gegeben sind. Fehlt diese Information, so ist die beste zutreffende Bedingung aus DIN EN ISO 291 auszuwählen, falls von den Beteiligten keine abweichende Vereinbarung getroffen wird. Ebenso sind entsprechend der jeweils ausgewählten Produktnorm die Prüfkörper vor Beginn der jeweiligen quasistatischen bzw. schwingenden Prüfungen unter definierten Klimata bzw. Umweltbedingungen auszulagern.

ANMERKUNG Typische Konditionierungszustände sind z. B. spritztrocken, Normklima, feuchte Lagerung.

6 Prüfverfahren

6.1 Vorbereitungen

Alle Prüfkörper sind wie unter 5.3 beschrieben zu vermessen. Alle nachfolgend beschriebenen Prüfungen werden nennspannungsbasiert (Definition und Berechnung siehe Abschnitt 3) geplant und durchgeführt. Die lokalen Spannungen können infolge der Prüfkörpergeometrie (siehe Anhang C), oder der lokalen Faserorientierung und anderer Fertigungsschwankungen sowie eingebrachter Kerben von der jeweiligen Nennspannung abweichen. Die Prüfkörper sind, wie unter 4.1 beschrieben, einzuspannen. Vor der Herstellung der kraftschlüssigen Verbindung durch Schliessen der zweiten Spannbacke ist ein Nullabgleich von Kraft-, Moment- und Dehnungsaufnehmern durchzuführen.

6.2 Prüfklima

Das Prüfklima ist durch den Anwender festzulegen. Das gewählte Prüfklima ist während der Versuchsdurchführung konstant zu halten, um Überlagerungen mit Lasten aus thermischer Dehnung bzw. Quellung infolge Medieneinflusses zu vermeiden.

ANMERKUNG Für das Quellen einer Probe aus Polyamid bei veränderter Feuchte siehe DIN EN ISO 1110.

Auf- und Abkühlvorgänge sind lastfrei durchzuführen.

6.3 Quasistatische Prüfungen

6.3.1 Allgemeines

Die Dehnraten unter uniaxialer und auch kombinierter bi-axialer Beanspruchung sind vor der Versuchsreihe festzulegen. Zur Bestimmung der von den Traversen-/Winkelgeschwindigkeiten abhängigen Dehnraten sind Vorversuche durchzuführen und mit Hilfe geeigneter Messsysteme die Dehnraten im Messbereich aufzeichnen.

6.3.2 Messwerterfassung

Die Datenrate der Messkanäle zur Aufzeichnung der jeweilig aufgebrachten Kräfte bzw. der sich ergebenden Wege und Dehnungen sind so zu wählen, dass sich etwa 100 bis 1 000 Datentupel in der Messzeit ergeben. Die empfohlene Dehnrates liegt bei $d/dt(\epsilon_x) = 0,000\,2\,s^{-1}$ bzw. $d/dt(\gamma_\varphi) = 0,000\,2\,s^{-1}$. Dies ist bei kombinierten Beanspruchungen in gleicher Weise für jede Beanspruchungsachse zu verwenden. Zum Optimieren der Regelparameter der Prüfmaschinen kann es notwendig sein, höhere Datenraten zu wählen.

Die Dehnungsmessung ist nach 4.2 durchzuführen (für weiterführende Informationen siehe auch DIN EN ISO 527-1:2012-06, 5.1.5).

6.4 Schwingende Beanspruchung

6.4.1 Harmonische Belastung

Die Probe wird harmonisch, schwingend mit einer Spannungsamplitude beaufschlagt. Vor Versuchsbeginn ist das Belastungsverhältnis festzulegen (siehe 3.3.8). Über die Probengeometrie ergibt sich die untere und obere Versuchskraft, bzw. das untere und obere Torsionsmoment, mit dem der Probekörper beaufschlagt werden muss. Zudem ist die Grenzlastspielzahl festzulegen, bei der der Schwingversuch abgebrochen werden sollte. Es wird als Richtwert 10^6 bis 10^7 empfohlen. Die gewählte Referenzschwingspielzahl sollte mindestens eine halbe Dekade kleiner als die Grenzlastspielzahl sein. Die Lastober- und -untergrenze ist mit einer Genauigkeit von 1 % des jeweiligen Wertes oder besser über die Schwingspielzahl bis zum Abbruchkriterium oder Erreichen der Grenzlastspielzahl konstant zu halten. Hierzu sind die vom Prüfsystem