

DIN EN ISO 20323

ICS 81.060.30

Einsprüche bis 2021-05-05

Entwurf

**Hochleistungskeramik –
Mechanische Eigenschaften keramischer Verbundwerkstoffe bei
Umgebungstemperatur unter atmosphärischen Luftdruck –
Bestimmung der Zugeigenschaften von Röhren (ISO 20323:2018);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 20323:2021**

Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) –
Mechanical properties of ceramic composites at ambient temperature in air atmospheric pressure –

Determination of tensile properties of tubes (ISO 20323:2018);
German and English version prEN ISO 20323:2021

Céramiques techniques –

Propriétés mécaniques des composites céramiques à température ambiante et à pression atmosphérique –

Détermination des propriétés en traction de tubes (ISO 20323:2018);
Version allemande et anglaise prEN ISO 20323:2021

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-03-05 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 66 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Der Text von ISO 20323:2018 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 206 „Fine ceramics“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und vom Technischen Komitee CEN/TC 184 „Hochleistungskeramik“ als prEN ISO 20323:2021 übernommen, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-02-94 AA „Prüfung von Hochleistungskeramik - Keramische Verbundwerkstoffe“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 3611	siehe	DIN EN ISO 3611
ISO 7500-1	siehe	DIN EN ISO 7500-1
ISO 9513	siehe	DIN EN ISO 9513
ISO 17161	siehe	DIN EN ISO 17161

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 3611, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Längenmessgeräte: Bügelmessschrauben — Konstruktionsmerkmale und messtechnische Merkmale*

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

DIN EN ISO 9513, *Werkstoffe — Kalibrierung von Längenänderungs-Messeinrichtungen für die Prüfung mit einachsiger Beanspruchung*

DIN EN ISO 17161, *Hochleistungskeramik — Keramische Verbundwerkstoffe — Bestimmung der Fluchtungsfehler bei mechanischen Prüfungen mit einachsiger Beanspruchung*

<i>Titel de:</i>	Hochleistungskeramik — Mechanische Eigenschaften keramischer Verbundwerkstoffe bei Umgebungstemperatur unter atmosphärischen Luftdruck — Bestimmung der Zugeigenschaften von Röhren (ISO 20323:2018)
<i>Titel en:</i>	Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Mechanical properties of ceramic composites at ambient temperature in air atmospheric pressure — Determination of tensile properties of tubes (ISO 20323:2018)
<i>Titel fr:</i>	Céramiques techniques — Propriétés mécaniques des composites céramiques à température ambiante et à pression atmosphérique — Détermination des propriétés en traction de tubes (ISO 20323:2018)

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Kurzbeschreibung	9
5 Prüfeinrichtung	10
6 Röhrenförmige Probekörper	14
6.1 Probenspezifikationen	14
6.1.1 Allgemeines	14
6.1.2 Maße	14
6.1.3 Geometrie	14
6.1.4 Toleranzen und Variabilität	15
6.2 Probenvorbereitung	15
6.2.1 Allgemeines	15
6.2.2 Im Fertigungszustand	16
6.2.3 Anwendungsangepasste Bearbeitung	16
6.2.4 Übliche Praxis	16
6.2.5 Standardverfahren	16
6.3 Köpfe	16
6.4 Anzahl der Prüfungen und Probenahme	18
7 Prüfverfahren	18
7.1 Allgemeines	18
7.2 Prüfmodus und Prüfgeschwindigkeit	18
7.3 Prüftechnik	19
7.3.1 Messung der Probekörpermaße	19
7.3.2 Instrumentierung der Probekörper	19
7.3.3 Einbau des Probekörpers	19
7.3.4 Montage der Dehnmessgeräte	19
7.3.5 Messungen	20
7.3.6 Analysen nach der Prüfung	21
7.4 Gültigkeit der Prüfung	21
8 Berechnung der Ergebnisse	22
8.1 Herkunft der Probekörper	22
8.2 Technische Spannung und Dehnung	22
8.3 Zugfestigkeit	23
8.4 Dehnung bei Höchstzugkraft	23
8.5 Proportionalitätsverhältnis oder pseudoelastischer Modul, Elastizitätsmodul	23
8.5.1 Spannungs-Dehnungs-Kurven mit einem linearen Bereich	23
8.5.2 Nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurven	25
8.6 Poissonzahl (optional)	25
8.7 Statistik	25
9 Prüfbericht	26

9.1	Allgemeines	26
9.2	Angaben zur Prüfung	26
9.3	Probekörper und Werkstoff.....	26
9.4	Geräte und Prüfparameter.....	27
9.5	Prüfergebnisse	27
Anhang A (informativ) Einspannvorrichtungen und Lastzugkupplungen.....		28
A.1	Aktive Einspannflächen	28
A.2	Passive Einspannflächen	28
A.2.1	Allgemeines	28
A.2.2	Mechanisches Einspannen	28
A.2.3	Kleben.....	29
A.3	Lastzugkupplungen	29
Anhang B (informativ) Probekörpergeometrien		33
Literaturhinweise.....		34

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 20323:2018 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 206 „Fine ceramics“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und vom Technischen Komitee CEN/TC 184 „Hochleistungskeramik“ als prEN ISO 20323:2021 übernommen, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 20323:2018 wurde von CEN als prEN ISO 20323:2021 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsorganisationen (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Themen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Eine Erläuterung zum freiwilligen Charakter von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT) berücksichtigt, enthält der folgende Link: www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 206, *Fine ceramics* erarbeitet.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die Bedingungen für die Bestimmung der Zugeigenschaften von Röhren aus Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffen (CMC, en: ceramic matrix composite) mit Endlosfaserverstärkung bei Umgebungstemperatur in Luft-Atmosphärendruck fest. Dieses Dokument ist spezifisch für die röhrenförmigen Geometrien, da Faserarchitektur und Geometriefaktoren der Proben bei Röhren aus Verbundwerkstoffen deutlich anders sind als bei Flachproben.

Dieses Dokument liefert Informationen über die uniaxialen Zugeigenschaften und das Zugspannungs-Dehnungs-Verhalten wie Zugfestigkeit und Dehnung, Zug-Elastizitätsmodul und Poissonzahl. Die Informationen dürfen für die Werkstoffentwicklung, die Kontrolle der Fertigung (Qualitätssicherung), den Werkstoffvergleich, die Charakterisierung, die Zuverlässigkeit und die Generierung von Konstruktionsdaten für röhrenförmige Komponenten verwendet werden.

Dieses Dokument befasst sich mit verschiedenen vorgeschlagenen Verfahren zur Herstellung von Probekörpern, ist aber nicht darauf beschränkt. Es gilt in erster Linie für Röhren aus Keramik- und/oder Glas-Matrix-Verbundwerkstoffen mit einer Endlosfaserverstärkung: unidirektional (1D-Filamentwicklung und Tape Lay-up), bidirektional (2D-Geflecht und Weben) und tridirektional (xD, mit $2 < x < 3$), belastet entlang der Röhrenachse.

Die in diesem Dokument angegebenen Werte entsprechen dem Internationalen Einheitensystem (SI).

ANMERKUNG In den meisten Fällen sind Keramik-Matrix-Verbundwerkstoffe, die bei hohen Temperaturen an Luft eingesetzt werden, mit einer Antioxidationsschicht versehen.

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).

ISO 20507, *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Vocabulary*

ISO 7500-1, *Metallic materials — Calibration and verification of static uniaxial testing machines — Part 1: Tension/compression testing machines — Calibration and verification of the force-measuring system*

ISO 17161, *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Ceramic composites — Determination of the degree of misalignment in uniaxial mechanical tests*

ISO 9513, *Metallic materials — Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing*

ISO 3611, *Geometrical product specifications (GPS) — Dimensional measuring equipment: Micrometers for external measurements — Design and metrological characteristics*

ASTM E2208-02, *Standard Guide for Evaluating Non-Contacting Optical Strain Measurement Systems*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach ISO 20507 und die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

kalibrierte Länge

l

Bereich des Probekörpers mit gleichförmiger und kleinster Querschnittsfläche

3.2

Messlänge

L_0

Anfangsabstand zwischen den Referenzmarkierungen auf dem Probekörper innerhalb der kalibrierten Länge

3.3

Anfangsquerschnitt

S_0

Fläche des Probekörpers innerhalb der kalibrierten Länge

3.4

effektive Querschnittsfläche

$S_{0,eff}$

Gesamtfläche des Querschnitts, berichtigt durch einen Faktor, um eine Oxidationsschutzschicht zu berücksichtigen

3.5

Außendurchmesser

d_o

Außenabstand durch die Mitte einer Röhre von einer Seite zur anderen

3.6

Innendurchmesser

d_i

Innenabstand durch die Mitte einer Röhre von einer Seite zur anderen

3.7

Längenänderung

A

Verlängerung der Messlänge zwischen den Referenzmarkierungen unter der Wirkung einer Zugkraft

3.8

Längenänderung bei Höchstzugkraft

A_m

Zunahme der Messlänge zwischen Referenzmarkierungen bei Höchstzugkraft

3.9

Zugdehnung

ε_{zz}

relative Änderung der Messlänge, definiert als das Verhältnis A/L_0

3.10

Zugdehnung bei Höchstzugkraft

$\varepsilon_{zz,m}$

relative Änderung der Messlänge, definiert als das Verhältnis A_m/L_0

3.11

Umfangsdehnung

$\varepsilon_{\theta\theta}$

relative Änderung in Umfangsrichtung in der Messlänge

3.12

Zugspannung

σ

von der Probe zu jedem Zeitpunkt der Prüfung ertragene Zugkraft, dividiert durch den Anfangsquerschnitt (S_0)

3.13

effektive Zugspannung

σ_{eff}

Von der Probe zu jedem Zeitpunkt der Prüfung ertragene Zugkraft, dividiert durch die effektive Querschnittsfläche ($S_{0,\text{eff}}$)

3.14

Höchstzugkraft

F_m

höchste gemessene Zugkraft, die von der Probe bei der Zugprüfung bis zum Bruch ertragen wurde

3.15

Zugfestigkeit

σ_m

Quotient aus der Höchstzugkraft und dem Anfangsquerschnitt (S_0)

3.16

effektive Zugfestigkeit

$\sigma_{m,\text{eff}}$

Quotient aus der Höchstzugkraft und der effektiven Querschnittsfläche ($S_{0,\text{eff}}$)

3.17

Proportionalitätsverhältnis pseudoelastischer Modul

E_p

Anstieg des linearen Abschnitts der Spannungs-Dehnungs-Kurve

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Prüfung der Spannungs-Dehnungs-Kurven von Keramik-Verbundwerkstoffen ermöglicht eine Definition der folgenden Fälle:

a) Werkstoffe mit einem anfänglich linearen Bereich in der Spannungs-Dehnungs-Kurve.

Das Proportionalitätsverhältnis oder der pseudoelastische Modul wird als Elastizitätsmodul E bezeichnet, wenn die Linearität in der Nähe des Ursprungs beginnt.

b) Werkstoffe mit nichtlinearem Abschnitt in der Spannungs-Dehnungs-Kurve.

In diesem Fall können nur Wertepaare für Spannung und Dehnung festgelegt werden.

3.18 effektives Proportionalitätsverhältnis effektiver pseudoelastischer Modul

$E_{P,eff}$

Anstieg des linearen Abschnitts der Spannungs-Dehnungs-Kurve, falls vorhanden, wenn die effektive Zugspannung eingesetzt wird

3.19 Poissonzahl

$\nu_{\theta z}$

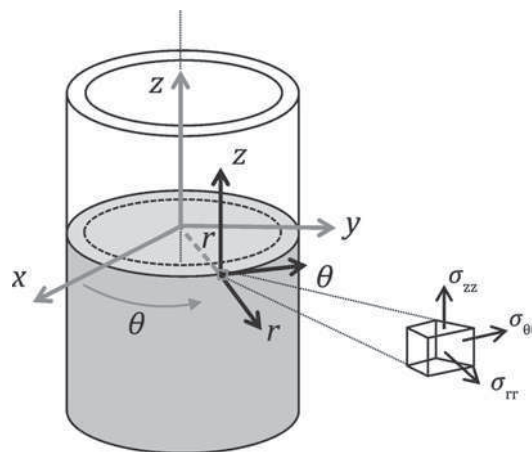
negativer Quotient aus Umfangsdehnung und axialer Dehnung

3.20 Koordinatensystem

System zur Bestimmung der Position im Raum

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument werden zylindrische Koordinaten verwendet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für die Raumdarstellung gelten die in Bild 1 dargestellten Notationen.



Legende

z axial
 r radial
 θ tangential

Bild 1 — Zylindrisches Koordinatensystem, das für die CMC-Röhren verwendet wird

4 Kurzbeschreibung

Ein vorbereiteter röhrenförmiger Probekörper mit festgelegten Maßen wird monoton uniaxial auf Zug bis zum Bruch belastet. Die Prüfung wird bei konstanter Traversenverschiebung oder konstanter Dehnung (oder konstanter Belastungsrate) durchgeführt. Die aufgebrachte Kraft und die resultierende Längsdehnung werden gleichzeitig gemessen und aufgezeichnet. Die uniaxiale Zugfestigkeit und Dehnung werden aus der maximal aufgebrachten Kraft bestimmt, während die verschiedenen anderen Zugeigenschaften aus den Daten des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens bestimmt werden.

Im Allgemeinen wird die Prüfung unter Umgebungsbedingungen durchgeführt.

ANMERKUNG 1 Bei uniaxialer Belastung wird die Kraft parallel zur Röhrenachse aufgebracht. Monoton bedeutet kontinuierliche, ununterbrochene Prüfrate ohne Umkehrungen vom Beginn der Prüfung bis zum endgültigen Bruch.

ANMERKUNG 2 Die Verwendung einer konstanten Belastungsrate ergibt nur dann eine gültige Zugkurve, wenn das Verhalten bis zum Bruch linear ist.

5 Prüfeinrichtung

5.1 Prüfmaschine.

Die Prüfmaschine muss mit einem System zur Messung der auf den röhrenförmigen Probekörper aufgetragenen Kraft ausgestattet sein, das ISO 7500-1, Klasse 1 oder besser entspricht.

5.2 Einspannen des Probekörpers.

Zur Übertragung der von der Prüfmaschine auf den röhrenförmigen Probekörper aufgetragenen Kraft dürfen verschiedene Arten von Einspannvorrichtungen verwendet werden. Diese müssen verhindern, dass der Probekörper verrutscht.

Die Sprödigkeit der Matrizen endlosfaserverstärkter Keramik-Verbundwerkstoffe (CFCC, en: continuous fibre ceramic composites) erfordert einen gleichmäßigen und kontinuierlichen Kontakt zwischen den Einspannkomponenten und dem Einspannabschnitt des röhrenförmigen Prüfkörpers, um Rissbildung und Bruch in diesem Bereich zu minimieren.

Einspannvorrichtungen können allgemein eingeteilt werden in Vorrichtungen mit aktiver Einspannfläche und Vorrichtungen mit passiver Einspannfläche, zu denen Einspannsysteme mit Klebeverbindung oder bolzenbelastete Vorrichtungen gehören. In Anhang A werden Beispiele, Beschreibungen und Konstruktionen für diese beiden Arten von Einspannvorrichtungen erläutert.

Wenn ein System mit aktiver Einspannfläche verwendet wird, muss der Einspannabschnitt lang genug sein, um ausreichend Reibungskraft zu entwickeln, um die Zugkräfte auf den röhrenförmigen Probekörper zu übertragen. In der Regel werden die Einspannlängen mindestens 1,5 mal größer als der Außendurchmesser des Probekörpers definiert. Wenn sich der röhrenförmige Probekörper aus den Einspannungen herauszieht und somit der Einspanndruck nicht erhöht werden kann, sind eventuell größere Einspannlängen erforderlich.

Um zu verhindern, dass der röhrenförmige Probekörper durch den seitlichen Druck und das anschließende Brechen der Röhrenwand zerdrückt wird, ist es ratsam, einen Endstopfen in das Innere des Einspannabschnitts des röhrenförmigen Probekörpers einzusetzen oder eine geeignete Geometrie für Köpfe vorzusehen (siehe 6.3).

5.3 Lastzugkupplungen.

Um Baugruppen mit aktiver oder passiver Einspannfläche an der Prüfmaschine zu befestigen, dürfen verschiedene Arten von Vorrichtungen verwendet werden. Die Lastzugkupplungen spielen in Verbindung mit der Art der Einspannvorrichtung eine wichtige Rolle bei dem Ausrichten des Lastzugs und der im röhrenförmigen Probekörper auftretenden Fremdbiegung; sie können im Allgemeinen als beweglich und nicht beweglich klassifiziert werden und sind in Anhang A behandelt.

Wenn beide Arten von Systemen verwendet werden können, muss die Anordnung des Lastzugs sicherstellen, dass die von der Kraftmessdose angezeigte Last und die Last am röhrenförmigen Probekörper übereinstimmen. Das Ausrichten muss z. B. nach dem in ISO 17161 beschriebenen Verfahren, angepasst an die röhrenförmige Geometrie des Probekörpers, überprüft und dokumentiert werden.

Die maximale relative Biegung darf bei einer mittleren Dehnung von $5,10^{-4}$ 5 % nicht überschreiten.

5.4 Dehnungsmessung.

5.4.1 Allgemeines

Die Dehnung sollte lokal gemessen werden, um nicht die Nachgiebigkeit der Maschine berücksichtigen zu müssen. Dies darf mit geeigneten Extensometern, aufgeklebten Dehnungsmessstreifen oder mit digitaler Bildkorrelation (DIC, en: digital image correlation) erfolgen. Wenn die Poissonzahl bestimmt wird, muss der röhrenförmige Probekörper so instrumentiert sein, dass die Dehnung in Längs- und Umfangsrichtung gemessen werden kann.

5.4.2 Extensometer

Extensometer, die für die Zugprüfung von röhrenförmigen CFCC-Proben verwendet werden, müssen in der Lage sein, die Längsdehnung bei Prüftemperatur kontinuierlich aufzuzeichnen. Sie müssen ISO 9513, Klasse 1 entsprechen.

Es werden Dehnungsmessgeräte mit der größten Messlänge empfohlen (mindestens 25 mm erforderlich), die mittig im mittleren Bereich der axialen Richtung des Messabschnitts des röhrenförmigen Probekörpers angeordnet sein müssen.

Werden mechanische Dehnungsmessgeräte verwendet, sollte die gewählte Befestigung keine Schäden an der Probenoberfläche verursachen. Außerdem sollte das Gewicht der Dehnungsmessgeräte so getragen werden, dass keine größeren Biegespannungen in den röhrenförmigen Probekörper eingeleitet werden, als nach 5.3 zulässig sind.

Die Extensometer sollten vorzugsweise so beschaffen sein, dass die Dehnung an zwei Stellen des röhrenförmigen Probekörpers gemessen werden kann, um eine Mittelwertbildung der Dehnung und/oder die Bestimmung der relativen Biegung in situ zu ermöglichen. Es sollte darauf geachtet werden, dass Änderungen in der Kalibrierung des Extensometers, die durch den Betrieb unter von der Kalibrierung abweichenden Bedingungen auftreten können, korrigiert werden.

5.4.3 Dehnungsmessstreifen

5.4.3.1 Allgemeines

Obwohl Extensometer üblicherweise zur Messung der Dehnung im Zugversuch an CFCC-Röhren verwendet werden, kann die Dehnung auch mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen und geeigneten Dehnungsaufzeichnungsgeräten bestimmt werden. Die Dehnungsmessstreifen, die Oberflächenvorbereitung und die Klebemittel sollten so gewählt werden, dass sie für die zu prüfenden Werkstoffe geeignet sind.

Im Folgenden sind einige Richtlinien für die Verwendung von Dehnungsmessstreifen auf CFCC-Röhren aufgeführt.

5.4.3.2 Dehnungsmessstreifen-Auswahl

Sofern nicht nachgewiesen werden kann, dass die Messwerte der Dehnungsmessstreifen nicht übermäßig durch örtlich begrenzte Dehnungsereignisse, wie z. B. Faserüberkreuzungen, beeinflusst werden, sollten die Dehnungsmessstreifen eine Länge von mindestens 9 mm bis 12 mm für die Längsrichtung und von mindestens 6 mm für die Umfangsrichtung aufweisen.

Bei der Prüfung von geflochtenen oder gewebten Verbundwerkstoffen sollten die Dehnungsmessstreifen eine aktive Messlänge haben, die mindestens so groß ist, wie die charakteristische Einheitszelle (Wiederholungseinheit) der Verstärkung; dadurch werden die lokalisierten Dehnungseffekte der Faserüberkreuzungen gemittelt.

Bei uniaxialer Beanspruchung wird üblicherweise ein Linear-DMS mit einem Messmuster verwendet, wobei dessen Achse so ausgerichtet ist, dass sie mit der Längsrichtung des röhrenförmigen Probekörpers übereinstimmt.

ANMERKUNG Die Poissonzahl kann mit biaxialen DMS-Rosetten mit 2 Elementen (0–90) bestimmt werden, die die Dehnung in Längs- und Umfangsrichtung messen.

5.4.3.3 Oberflächenvorbereitung

Die relativ raue Oberfläche von Verbundwerkstoffen erfordert in der Regel eine gewisse Vorbereitung vor dem Aufkleben der Dehnungsmessstreifen. Die grundlegenden Schritte umfassen Lösemittelentfettung, Abschleifen oder Spachteln und Reinigung.

Matrixreiche Oberflächen können in der Regel mit Siliciumcarbid-Papier der Körnung 320 (SCP-2) geschliffen werden, um eine zufriedenstellende matte Oberfläche zu erhalten. Sofern die Oberflächen nicht maschinell bearbeitet oder geglättet wurden, sind bei röhrenförmigen Probekörpern aus Verbundwerkstoffen mit geringem Matrixgehalt oder mit strukturierter Oberfläche jedoch alternative Techniken erforderlich.

ANMERKUNG Ein typisches Verfahren ist das Auftragen einer dünnen Epoxid-Vorbeschichtung zum Glätten der Oberflächenunregelmäßigkeiten und abschließendes Polieren.

Verstärkende Fasern sollten während der Oberflächenvorbereitung nicht freigelegt oder beschädigt werden. Insbesondere sollte der Abrieb auf ein Minimum beschränkt werden, um eine mögliche Beschädigung der Fasern in der Außenfläche des Verbundwerkstoffs zu vermeiden.

5.4.4 Digitale Bildkorrelation (DIC, en: digital image correlation)

5.4.4.1 Allgemeines

Das DIC-Verfahren kann auch zur Bestimmung der lokalen Dehnung von zugbelasteten röhrenförmigen CFCC-Probekörpern aus der Verschiebungsfeldmessung verwendet werden. Das allgemeine Verfahren zur Bewertung der Dehnung muss der ASTM E2208-02 entsprechen.

Im Folgenden sind einige Richtlinien für die Anwendung des DIC-Verfahrens für CFCC-Röhren aufgeführt.

5.4.4.2 Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau für DIC-Messungen erfordert eine digitale CCD-Kamera, die mit einem optischen Makroobjektiv gekoppelt ist, um Mikroaufnahmen mit hoher räumlicher Auflösung zu erhalten (empfohlen werden mindestens 20 µm je Pixel). Im vorliegenden Fall ist die Verwendung eines telezentrischen Objektivs erforderlich, um den Krümmungseffekt der röhrenförmigen Probekörper zu kompensieren.

Die Abbildungsbedingungen für DIC-Messungen müssen so gewählt werden, dass die gesamte Probenoberfläche in der besten Brennebene der Kamera liegt und eine möglichst hohe Vergrößerung erreicht werden kann. Eine ringförmige Beleuchtung mit weißem oder monochromatischem Licht wird empfohlen, um ein korrektes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten.

Die Kamera muss in der Lage sein, Schliffbilder mit einer geeigneten Bildrate aufzunehmen, um eine ausreichende zeitliche Auflösung der Prüfung zu erreichen. Je nach Gerät ist eine spezielle Zeit- und Auslösesteuerung erforderlich, um die Aufnahme der Kamera mit der aufgebrachten Last zu synchronisieren.

Bei mechanischen Zugversuchen begrenzt die maximale Bildrate der Kamera die maximale Geschwindigkeit der Verschiebung, die auf die Probe ausgeübt werden kann. Im Allgemeinen sollte die Bildrate der Kamera mindestens das Doppelte der Verformungsrate betragen.

5.4.4.3 Oberflächenvorbereitung

Die Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung hängen sowohl von der Vergrößerung des Aufnahmesystems als auch von den Oberflächeneigenschaften des Verbundwerkstoffs ab. Im Allgemeinen erfordert die Technik scharfe Graustufeninformationen in der Größenordnung von 1 Pixel am CCD-Aufnahmegesetz.

Die gängigste Methode zur Vorbereitung einer geeigneten Oberfläche ist die Verwendung von kontrastreichen Speckle-Mustern. Diese können durch Aufbringen einer matten, zufälligen Beschichtung, wie z. B. gesprenkelte schwarze Punkte auf einem homogenen weißen Hintergrund, erzielt werden. Bei Verbundwerkstoffen mit ausgeprägtem arithmetischem Mittenrauwert sind naturgemäß stark mikrotexturierte Bilder zu erwarten.

5.4.4.4 Berechnung

Die Korrelation darf dann mit kommerzieller DIC-Software durchgeführt werden. Hinsichtlich der Maße sollte die Auswahl des Korrelationsbereichs so erfolgen, wie die Berechnungen zur Bestimmung der Längsdehnung geführt haben.

Bei der Durchführung und Auslegung dieses Schrittes muss die Anleitung des Softwareanbieters beachtet werden.

ANMERKUNG Die Poissonzahl kann mit Hilfe einer ähnlichen Berechnung bestimmt werden, um die Umfangsdehnung in einem engen Bereich zu messen.

5.5 Datenerfassungssystem

Es sollte ein kalibriertes Aufzeichnungsgerät verwendet werden, um die aufgebrachte Zugkraft und die Verlängerung (oder Dehnung) des Messabschnitts über die Zeit aufzuzeichnen. Für diesen Zweck wird die Verwendung eines digitalen Datenerfassungssystems empfohlen.

Die Aufzeichnungsgeräte müssen eine Fehlergrenze von $\pm 0,1\%$ für das gesamte Prüfsystem, einschließlich Ausleseinheit, aufweisen und eine Datenerfassungsrate von mindestens 10 Hz haben, wobei ein Ansprechverhalten von 50 Hz mehr als ausreichend gilt.

Die Traversenverschiebung der Prüfmaschine darf ebenfalls aufgezeichnet werden, darf aber nicht die Verschiebung oder Dehnung im Messquerschnitt definieren, insbesondere wenn selbstausrichtende Kupplungen im Lastzug verwendet werden.

5.6 Messung der Maße

Die für die Messung der Maße des Probekörpers verwendeten Mikrometer müssen ISO 3611 entsprechen. Der Innen- und der Außendurchmesser des röhrenförmigen Probekörpers sollten auf 0,02 mm oder 1 % des gemessenen Maßes bestimmt werden, je nachdem, welcher Wert höher ist. Für die Messung der Gesamtlänge des Probekörpers und der definierten Messlänge dürfen Messschraube mit flacher Messfläche oder Messschieber mit ähnlicher Auflösung verwendet werden.

Kugelmikrometer oder Messschrauben mit scharfen Spitzen werden für röhrenförmige CFCC nicht empfohlen, da die resultierenden Messungen durch die Spitzen und Täler des Gewebes beeinflusst werden können.

In einigen Fällen ist es wünschenswert, aber nicht erforderlich, die Maße des röhrenförmigen Probekörpers abzüglich der Oberflächenrauheit (Innen- und Außendurchmesser) zu bestimmen. Zu diesem Zweck dürfen Verfahren wie die (berührende) optische Profilometrie oder die Bildanalyse an einem polierten Querschnitt angewendet werden.

6 Röhrenförmige Probekörper

6.1 Probenspezifikationen

6.1.1 Allgemeines

CFCC-Röhren werden in vielen Größen und Geometrien, aus verschiedenen Verstärkungsfasern und charakteristischen Keramik-Matrixwerkstoffen und nach unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt. Auch die Faserarchitektur für CFCC-Röhren weist verschiedene Konfigurationen mit unterschiedlichen Faserbeanspruchungen und Richtungsvariationen auf. Daher ist es derzeit nicht praktikabel, eine einzige Probekörpergeometrie zu definieren, die für alle CFCC-Röhren geeignet ist.

Die Auswahl und Definition einer röhrenförmigen Probekörpergeometrie hängt vom Zweck des Zugversuchs ab. Darüber hinaus können Einspannvorrichtungen und Lastzugkupplungen (wie in 5.2 und Anhang A beschrieben) die Auslegung der Probekörpergeometrie beeinflussen.

6.1.2 Maße

Das beschriebene Prüfverfahren gilt für CFCC-Röhren mit Außendurchmesser über 7 mm und einer Wandstärke von mindestens 0,5 mm, was etwa mindestens einer einzelnen Schicht entspricht. Der Quotient aus Außendurchmesser und Wandstärke ($\varnothing/h$) liegt üblicherweise im Bereich von 5 bis 30.

Die Gesamtlänge des Probekörpers hängt von der gewählten Versuchsanordnung für die Prüfung ab, aber das Volumen in der Messlänge muss repräsentativ für den Verbundwerkstoff sein. Als allgemeine Regel sollte die kalibrierte Länge (l) so gewählt werden, dass der Quotient ($l/\varnothing$) zwischen 2 und 3 liegt, wobei ein Wert von mindestens 30 mm empfohlen wird.

Unter Umständen können Abweichungen außerhalb der empfohlenen Bereiche je nach dem zu bewertenden CFCC notwendig sein.

6.1.3 Geometrie

Für die Durchführung der Prüfungen wird eine gerade Röhrengometrie empfohlen, die oft keine Bearbeitung erfordert, um die richtigen Maße zu erhalten. Sie kann mit aktiven und passiven Einspannungen verwendet werden. Bei dieser Geometrie dürfen die Innen- und Außenflächen der Probekörper rau und ungleichmäßig sein.

In Bild 2 ist ein röhrenförmiger Probekörper mit gerader Geometrie dargestellt. In Tabelle 1 sind die Maßanforderungen für zulässige Probekörper angegeben.

In einigen Fällen kann eine andere Geometrie der CFCC-Röhre zulässig sein. Anhang B enthält ein Beispiel für die Röhrengometrie eines taillierten Probekörpers mit Maßanforderungen.

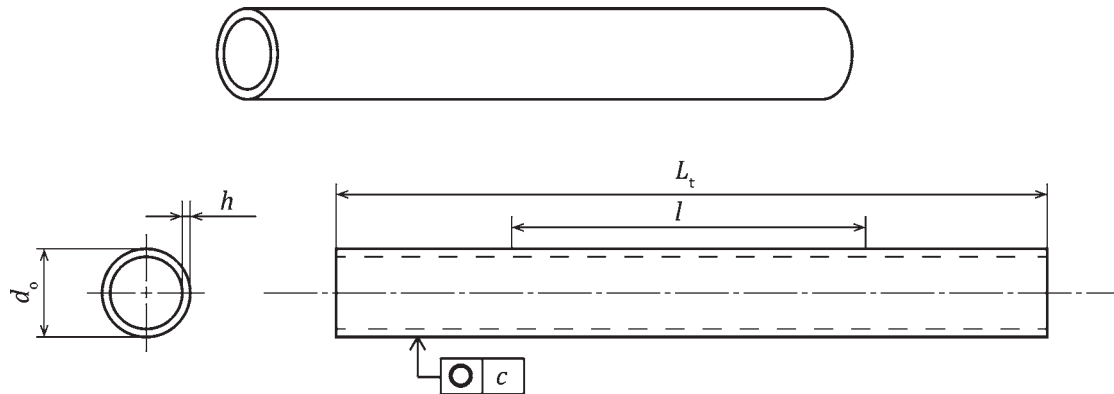


Bild 2 — „Typischer“ gerader röhrenförmiger Probekörper

Tabelle 1 — Maßanforderungen für gerade röhrenförmige Probekörper

Maße in Millimeter

Größe	Symbol	Mindestwert	Grenzabweichung
Gesamtlänge	L_t	≥ 60	± 2
Kalibrierte Länge	l	≥ 30 für eine Messlänge von mindestens 25 mm	$\pm 0,2$
Außendurchmesser	d_o	≥ 7	$\pm 0,2$
Wandstärke	h	$\geq 0,5$ und entsprechend mindestens einer einzelnen Schicht	$\pm 0,2$
Rundheit	c	—	0,1

6.1.4 Toleranzen und Variabilität

Die Maßtoleranzen hängen von der spezifisch gewählten Probengeometrie, dem Fertigungsverfahren und den Leistungsanforderungen der CFCC-Anwendung ab. CFCC-Röhren weisen häufig eine relative diametrale Variabilität auf, insbesondere Röhren mit größerem Durchmesser.

Der Messquerschnitt darf, braucht aber nicht, mit einer bestimmten Toleranz bearbeitet werden (siehe Tabelle 1). Die Differenz der kalibrierten Durchmesser aus 3 Messungen für alle Arten von Proben (in der Mitte und an beiden Enden der kalibrierten Länge) darf jedoch nicht mehr als 2 % des Mittelwerts der 3 Messungen betragen.

ANMERKUNG Messungen der Innendurchmesser von CMC-Röhren können mit geeigneten Geräten, z. B. „3-Punkt Innenmessschraube“ oder „Stab-Innenmessschraube“, durchgeführt werden.

6.2 Probenvorbereitung

6.2.1 Allgemeines

Zur Vorbereitung der Proben dürfen beliebige Verfahren, einschließlich der hier erläuterten, angewendet werden, solange das Verfahren ausreichend detailliert beschrieben wird, um Reproduzierbarkeit zu ermöglichen.

Aus 2 Gründen kann es unter Umständen notwendig sein, den röhrenförmigen Probekörper maschinell zu bearbeiten oder zu schleifen: (i) um einen kontrollierten Durchmesser im Messabschnitt zu erzeugen

und/oder (ii) um einen gleichmäßigen Durchmesser im Einspannabschnitt zum Befestigen in der Einspannvorrichtung herzustellen. Abhängig von der beabsichtigten Verwendung der Daten zum Zugverhalten wird eines der folgenden Verfahren zur Probenvorbereitung angewendet.

6.2.2 Im Fertigungszustand

Die röhrenförmige Zugprobe sollte die Oberflächenbeschaffenheit und den Bearbeitungsweg simulieren, bei dem keine Bearbeitung erfolgt. Zusätzliche Bearbeitungsvorgaben sind nicht relevant. Unter Umständen können die unbearbeiteten-Probekörper raue Oberflächentexturen und ungleichmäßige Wandstärken aufweisen und können daher zu übermäßigem Versatz führen oder anfällig für Brüche in nicht kalibrierten Abschnitten sein oder beides.

6.2.3 Anwendungsangepasste Bearbeitung

Die Oberfläche der röhrenförmigen Zugprobe sollte genauso bearbeitet sein, wie die Oberfläche des Bauteils. Sofern es sich nicht um ein patentiertes Verfahren handelt, sollte der Bericht genaue Angaben zu den Phasen des Materialabtrags, den Schleifscheibenkörnungen, der Schleifscheibenbindung, der Menge abgetragenes Material je Durchgang und die Art des verwendeten Schmiermittels enthalten.

6.2.4 Übliche Praxis

Falls ein übliches Bearbeitungsverfahren entwickelt und definiert wurde, das für eine bestimmte Werkstoffklasse vollkommen zufriedenstellend ist (d.h. das keine unerwünschten Oberflächen- und Untergrundschäden oder Eigenspannungen hervorruft), kann dieses Verfahren angewendet werden und sollte berichtet werden.

6.2.5 Standardverfahren

Falls die zuvor genannten Verfahren nicht geeignet sind, gelten die Grundregeln für das Schneiden und Schleifen zur Vorbereitung der röhrenförmigen Probekörper.

Alle Schleif- oder Trennvorgänge müssen mit einer ausreichenden Menge an geeignetem Schmiermittel durchgeführt werden, damit die Probe und Schleifscheibe ständig gekühlt und überspült und Partikel fortgespült werden. Es kann rundherum geschliffen werden, mindestens in 2 Schleifschritten von grobem zu feinem Materialabtrag. Mit Diamantwerkzeugen sollte die Abtragsleistung in der Größenordnung von höchstens 0,03 mm je Schleifdurchgang liegen. Alle Schnitte können in einer Stufe durchgeführt werden, die der Schnitttiefe entspricht. Der Probekörper sollte nach dem Nassschleifen vollständig getrocknet werden.

Unter Umständen können für bestimmte CFCC-Systeme detailliertere und strengere Verfahren notwendig sein.

6.3 Köpfe

Um eine konforme Schicht für das Einspannen des röhrenförmigen CFCC-Probekörpers zu schaffen, sind Köpfe (oder Hülsen) erforderlich. Bei der Verwendung einer passiven Einspannfläche mit einer Klebeverbindung dürfen die Köpfe den Einspannvorrichtungen entsprechen.

Die Köpfe bestehen in der Regel aus Stahl oder Aluminium. Sie müssen mit einem hoch scherfesten Klebstoff (z. B. Epoxid) an den Probekörper geklebt werden, bevor er in der Prüfmaschine befestigt wird. Der röhrenförmige Probekörper muss genau in die Klebevertiefung passen und einen dünnen Zwischenraum (0,1 mm bis 0,2 mm) für den Klebstoff freilassen, um einen gleichmäßigen Klebekontakt zwischen dem eingespannten Abschnitt und der Klebevertiefung sicherzustellen.

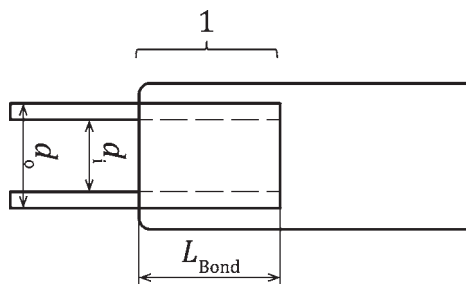
Die Köpfe müssen über die gesamte Einspannlänge reichen. Reicht die Klebefläche in den Einspannungen nicht aus, kann es vorkommen, dass der Probekörper vor dem Bruch verrutscht oder dass die Klebung versagt. Als Faustregel gilt, dass die Scherkräfte des Klebers, die sich aus der Höchstzugkraft entwickeln,

Scherspannungen $< 50 \%$ der Nennscherfestigkeit des Klebstoffs erzeugen müssen. Die Länge der Klebefläche (L_{Bond}) für eine Röhre kann nach Gleichung (1) berechnet werden (siehe Bild 3).

$$L_{\text{Bond}} = K \times \frac{\sigma_{\text{CFCC}}}{\sigma_{\text{Ad}}} \times \frac{d_o^2 - d_i^2}{4D_{\text{Bond}}} \quad (1)$$

Dabei ist

- K der gewählte Sicherheitsfaktor (2 bei 50 % Reduktion);
- σ_{CFCC} die erwartete Zugfestigkeit des Verbundwerkstoffs;
- σ_{Ad} die Scherspannungsfestigkeit des Klebers;
- d_o der Außendurchmesser des röhrenförmigen Probekörpers;
- d_i der Innendurchmesser des röhrenförmigen Probekörpers;
- D_{Bond} der effektive Durchmesser der Klebezone [d_o für Klebung am Außenumfang; $(d_o + d_i)$ für Klebungen am Außen- und Innenumfang].



Legende

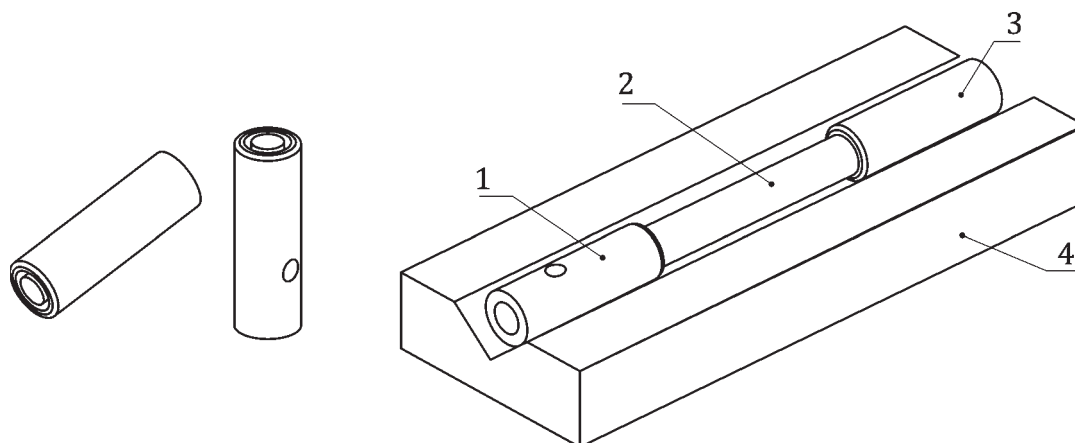
1 Klebezone

Bild 3 — Klebezone mit Bemaßung für einen röhrenförmigen CFCC-Probekörper

Es wird empfohlen, die Klebung in einer stabilen V-förmigen Halterung vorzunehmen, um sicherzustellen, dass der röhrenförmige CFCC-Probekörper zwischen den beiden Köpfen konzentrisch ausgerichtet ist.

Bild 4 zeigt ein Beispiel für die gelungene Gestaltung von Köpfen und V-förmiger Halterung zur Unterstützung des röhrenförmigen Probekörpers während der Klebephase.

ANMERKUNG In den meisten Fällen können die Köpfe recycelt werden, indem der Klebstoff nach der Prüfung durch chemische oder thermische Einwirkung, abhängig von der Art des Klebstoffs, entfernt wird. Hülsen (wie die in Bild 5) lassen sich leicht von den röhrenförmigen Probekörpern abziehen und nach der Reinigung wiederverwenden.



Legende

- 1 Kopf (unterer)
- 2 röhrenförmiger Probekörper
- 3 Kopf (oberer)
- 4 V-förmige Halterung

Bild 4 — Beispiel für Köpfe und V-förmige Halterung während der Klebphase

6.4 Anzahl der Prüfungen und Probenahme

Für jeden Zustand sind mindestens 3 gültige röhrenförmige Probekörper nach Abschnitt 7 erforderlich, um einen Mittelwert oder Durchschnitt zu berechnen. Wenn Beurteilungen über die Form der Festigkeitsverteilung erforderlich sind, kann möglicherweise eine größere Anzahl gültiger Probekörper notwendig sein.

Die Probekörper sollten aus repräsentativen CFCC-Proben, die die angegebenen Prüfziele und Anforderungen erfüllen, ausgewählt und vorbereitet werden. Das Probenahmeverfahren muss angegeben werden.

7 Prüfverfahren

7.1 Allgemeines

Das empfohlene Prüfverfahren besteht aus den folgenden drei Schritten. Jede Abweichung von diesem Verfahren muss im Prüfbericht detailliert beschrieben werden.

7.2 Prüfmodus und Prüfgeschwindigkeit

Beim Prüfmodus kann es sich um eine Kraft-, Weg- oder Dehnungskontrolle handeln. Die empfohlene Prüfrate muss ausreichend schnell sein, um die mögliche Höchstzugfestigkeit beim Bruch des Werkstoffs zu erhalten. Üblicherweise sollte der Bruch innerhalb von 60 Sekunden nach Beginn der Prüfung auftreten.

Der Prüfmodus und die Verschiebungsrate müssen angegeben werden.

Der Prüfmodus kann sich stark auf das Bruchverhalten von Hochleistungskeramiken auswirken. Um einen „Runaway“-Zustand (z. B. eine schnelle unkontrollierte Verformung) zu verhindern, der bei einem kraft- oder spannungsgesteuerten Prüfmodus aufgrund des kumulativen Schädigungsprozesses der CFCC auftreten kann, wird eine Verschiebungs- oder Dehnungskontrolle bevorzugt.