

DIN EN 843-6

ICS 81.060.30

Ersatz für
DIN CEN/TS 843-6:2004-08

**Hochleistungskeramik –
Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei
Raumtemperatur –
Teil 6: Leitlinie für die fraktographische Untersuchung;
Deutsche Fassung EN 843-6:2009**

Advanced technical ceramics –
Mechanical properties of monolithic ceramics at room temperature –
Part 6: Guidance for fractographic investigation;
German version EN 843-6:2009

Céramiques techniques avancées –
Propriétés mécaniques des céramiques monolithiques à température ambiante –
Partie 6: Guide pour l'analyse fractographique;
Version allemande EN 843-6:2009

Gesamtumfang 46 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

Nationales Vorwort

Die Europäische Norm EN 843-6:2009 wurde vom CEN/TC 184 „Hochleistungskeramik“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI (Großbritannien) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Gremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-02-91 AA „Hochleistungskeramik — Monolithische Werkstoffe“ im Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Änderungen

Gegenüber DIN CEN/TS 843-6:2004-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Neuausgabe als Europäische Norm;
- b) Inhalt redaktionell überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN CEN/TS 843-6: 2004-08

Deutsche Fassung

**Hochleistungskeramik —
Mechanische Eigenschaften monolithischer
Keramik bei Raumtemperatur —
Teil 6: Leitlinie für die fraktographische Untersuchung**

Advanced technical ceramics —
Mechanical properties of monolithic ceramics
at room temperature —
Part 6: Guidance for fractographic investigation

Céramiques techniques avancées —
Propriétés mécaniques des céramiques monolithiques à
température ambiante —
Partie 6: Guide pour l'analyse fractographique

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 16. Juli 2009 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
3.1 Allgemeine Begriffe	4
3.2 Benennungen zur Klassifizierung von Bruchursprüngen, die spezifisch im Volumen verteilt sind	4
3.3 Benennungen zur Klassifizierung von Bruchursprüngen, die in spezifischer Weise auf der Oberfläche verteilt sind	5
3.4 Benennungen zur Klassifizierung der Merkmale von Bruchflächen	6
4 Bedeutung und Anwendung	6
5 Geräte	7
5.1 Einrichtungen zur Vorbereitung und Reinigung	7
5.2 Beobachtungseinrichtungen	7
6 Empfohlenes Verfahren	9
6.1 Übersicht	9
6.2 Probenlagerung und Reinigung der Bruchflächen	9
6.3 Sichtprüfung	9
6.4 Untersuchung mit Lichtmikroskop	10
6.5 Identifizierung der wichtigsten Merkmale der Bruchflächen	11
6.6 Untersuchung mit Rasterelektronenmikroskop	12
6.7 Identifizierung des Bruchursprungs	13
6.8 Identifizierung chemischer Inhomogenitäten am Bruchursprung	13
6.9 Schlussfolgerungen	14
7 Prüfbericht	14
Anhang A (informativ) Rissmuster in keramischen Massen	15
Anhang B (informativ) Beispiele für allgemeine Merkmale von Bruchflächen	18
Anhang C (informativ) Beispiele für die Vorgehensweise bei Identifizierung des Bruchursprungs	20
C.1 Einzelne große Poren	21
C.2 Agglomerate	23
C.3 Grobkorn	25
C.4 Inhomogenitäten der Zusammensetzung	27
C.5 Schichtentrennungen	29
C.6 Handhabungsschaden	31
C.7 Bearbeitungsschaden	32
C.8 Bildung von Oxidationsgrübchen	34
C.9 Komplexe Ursprünge	36
C.10 Nicht offenkundige Ursprünge	37
Anhang D (informativ) Anwendung der Bruchmechanik zur Unterstützung fraktographischer Untersuchungen	38
D.1 Bruchspannung und Größe des Ursprungs	38
D.2 Bruchspannung und Größe des Bruchspiegelbereichs	41
Anhang E (informativ) Beispiel für die Gestaltung des Prüfberichts	43
Literaturhinweise	44

Vorwort

Dieses Dokument (EN 843-6:2009) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 184 „Hochleistungskeramik“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom BSI gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Februar 2010, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Februar 2010 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können, ohne dass diese vorstehend identifiziert wurden. CEN [und/oder] CENELEC sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt CEN/TS 843-6:2004.

EN 843 „Hochleistungskeramik — Monolithische Keramik — Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur“ besteht aus sechs Teilen:

- *Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit*
- *Teil 2: Bestimmung des Elastizitätsmoduls, Schubmoduls und der Poissonzahl*
- *Teil 3: Bestimmung der Parameter des unterkritischen Risswachstums aus Biegefestigkeitsprüfungen mit konstanter Spannungsrate*
- *Teil 4: Härteprüfung nach Vickers, Knoop und Rockwell*
- *Teil 5: Statistische Auswertung*
- *Teil 6: Leitlinie für die fraktographische Untersuchung*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von EN 843 enthält Leitlinien zur Bewertung des Bruchflächenaussehens keramischer Hochleistungswerkstoffe. Eine Bruchflächenuntersuchung kann zu verschiedenen Zwecken durchgeführt werden, z. B. zur Werkstoffentwicklung oder zur Qualitätsbeurteilung, zum Erkennen üblicher oder anomaler Ursachen von Schadensfällen oder zur Hilfe bei der Konstruktion.

ANMERKUNG Nicht alle keramischen Hochleistungswerkstoffe sind für eine fraktographische Auswertung geeignet. Besonders bei grobkörnigen keramischen Werkstoffen können die Oberflächen so rau sein, dass der Bruchursprung möglicherweise nicht erkennbar ist. In ähnlicher Weise können auch poröse Werkstoffe eine fraktographische Auswertung erschweren, besonders dann, wenn sie eine körnige Struktur haben und dazu neigen, nicht kontinuierlich zu brechen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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).

EN ISO/IEC 17025, *Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien* (ISO/IEC 17025:2005)

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Allgemeine Begriffe

3.1.1

Riss

deutliche Trennung im Feingefüge eines Werkstoffs, die bei oder nach der Herstellung durch thermische und/oder mechanische Spannungen hervorgerufen wird und zur Erzeugung neuer Oberflächen führt, die zu einer nicht vollständigen Werkstofftrennung führen

3.1.2

Fehler

Inhomogenität, die bedingt durch Spannungskonzentration ein Merkmal darstellen kann, das die Festigkeit bestimmt

ANMERKUNG Die in diesem Sinn verwendete Benennung Fehler bedeutet nicht, dass das Bauteil fehlerhaft ist.

3.1.3

Bruch

Vorgang der Ausbreitung eines Risses durch eine Probe oder ein Bauteil

3.1.4

Bruchursprung

Stelle, von der ein Bruch ausgeht

3.2 Benennungen zur Klassifizierung von Bruchursprüngen, die spezifisch im Volumen verteilt sind

3.2.1

Agglomerat

durch Ungleichmäßigkeiten bei der Bearbeitung im Feingefüge auftretende ungewollte Inhomogenität, üblicherweise mit veränderter Dichte, z. B. Anhäufung (Cluster) anormal großer Körner, Teilchen, flacher Schichten oder Whisker

3.2.2

Inhomogenität der Zusammensetzung

örtliche Schwankungen der chemischen Zusammensetzung, die üblicherweise als Agglomerate (3.2.1), als Änderungen der Korngröße oder als ab- oder angereicherte Bereiche in dispersen Phasen in Erscheinung treten

3.2.3

Schichtentrennung

herstellungsbedingt entstandener, meist ebenflächiger Riss innerhalb eines Werkstoffs

3.2.4

Einschluss

diskrete Inhomogenität, im Allgemeinen als Folge einer anorganischen Verunreinigung durch einen Fremdkörper, der durch das Sintern nicht beseitigt wurde

3.2.5

Großkorn

anormal großes Korn, das als Folge einer unzureichenden Kontrolle der Teilchengröße oder eines beschleunigten Kornwachstums auftritt und wie ein Fehler (3.1.2) wirken kann

3.2.6

Pore

Hohlraum oder Lunker innerhalb eines Werkstoffs, der isoliert auftreten oder eine durchgehende Verbindung zu anderen Hohlräumen/Lunkern haben kann

3.2.7

poröser Bereich

meist räumlich verteilte Zone mit erhöhter Porosität, die durch Inhomogenitäten oder bei der Verarbeitung eingebrachte organische Verunreinigungen entsteht

3.2.8

poröse Formnaht

meist linear oder ebenflächig angeordnete Zone mit erhöhter Porosität, die durch Inhomogenitäten oder bei der Verarbeitung eingebrachte organische Verunreinigungen entsteht

3.3 Benennungen zur Klassifizierung von Bruchursprüngen, die in spezifischer Weise auf der Oberfläche verteilt sind

3.3.1

Abplatzung

kleines Werkstoffplättchen, das von einer Oberfläche oder Kante eines Gegenstands oder von dessen Bruchfläche abgetrennt wird

3.3.2

Handhabungsschaden

Kratzer, Abplatzungen oder sonstige Beschädigungen, die durch einen üblicherweise nicht auftretenden Kontakt zwischen Gegenständen, Proben oder Bruchflächen entstehen

3.3.3

Bearbeitungsschaden

Folge der bei einer abrasiven Werkstoffabtragung vorgenommenen Abtrennung kleiner Abplatzungen (siehe 3.3.1) oder Erzeugung von Kratzern auf der Oberfläche oder von Rissen in Oberflächennähe

3.3.4

offene Pore

Hohlraum mit Verbindung zur Außenfläche, im Allgemeinen bearbeitungsbedingt entstanden

3.3.5

Grübchen

Vertiefung auf der Oberfläche oder bis zur Oberfläche reichende flache Pore, im Allgemeinen durch die Bearbeitungsbedingungen oder Wechselwirkungen mit der Umgebung entstanden

3.4 Benennungen zur Klassifizierung der Merkmale von Bruchflächen

3.4.1

Bruchlinien

Riefen oder Mulden, die etwa parallel zur Ausbreitungsrichtung einer Rissfront verlaufen, im Allgemeinen innerhalb des Bereichs grober Rauheit (3.4.2)

ANMERKUNG In einigen Fällen, besonders bei Werkstoffen mit geringer Bruchzähigkeit, können auf den Bruchflächen weitere Linien gefunden werden, die auf Wechselwirkungen des Risses mit freien Flächen oder anderen Merkmalen zurückzuführen sind, einschließlich so genannter Wallner-Linien, Rastlinien, Linien im unmittelbaren Anschluss an den Bereich grober Rauheit usw. Die Definitionen für diese Benennungen können in ASTM C1256 (siehe [1]) nachgelesen werden.

3.4.2

Bereich grober Rauheit

Sprödbereich außerhalb des Bruchspiegels (3.4.3) und des Bereichs feiner Rauheit (3.4.4), häufig mit Riefen oder Mulden, die radial vom Bruchursprung (3.1.4) ausgehen

3.4.3

Bruchspiegel

im Allgemeinen annähernd kreisförmiger (oder bei einem randnahen Bruchursprung halbkreisförmiger) Bereich einer Bruchfläche in unmittelbarer Nähe des Bruchursprungs (3.1.4), der im Vergleich zu weiter vom Bruchursprung entfernten Bereichen relativ eben ist und keine besonderen Merkmale aufweist

ANMERKUNG Nicht alle Werkstoffe oder Brucharten zeigen eindeutige Bruchspiegel. Bruchspiegel sind am eindeutigsten in Brüchen sichtbar, die von kleinen Fehlern ausgehen und bei denen hohe Spannungen und Beschleunigungen auftreten.

3.4.4

Bereich feiner Rauheit

Hof um den äußeren Bereich des Bruchspiegels (3.4.3), in dem die Rauheit erhöht und eine in Bruchrichtung gestreckte Textur anzutreffen ist

ANMERKUNG Der Bereich feiner Rauheit ist am eindeutigsten in Gläsern, Glaskeramik oder Keramik mit sehr feinen Korngrößen und glatten Bruchflächen erkennbar.

4 Bedeutung und Anwendung

Die Fraktographie wird als regelmäßig anzuwendendes Untersuchungsverfahren bei der Auswertung von Bruchuntersuchungen an Proben oder von Schadensfällen an Bauteilen empfohlen. Aus der Beobachtung makroskopischer Merkmale der Bruchstücke, z. B. aus Rissen und der relativen Rissanordnung, aus Spänen und Kratzern, sind Folgerungen auf die wahrscheinlichen Beanspruchungsrichtungen möglich. Aus der Beobachtung von Bruchflächenmerkmalen der fortgeschrittenen Bruchausbreitung, z. B. aus der Form der groben Rauheit (3.4.2) und der Bruchlinien (3.4.1), sind Schlüsse auf die etwaige Lage des Bruchursprungs (3.1.4) möglich. Mikroskopische Untersuchungen liefern Angaben über die Beschaffenheit des Bruchursprungs, so dass die Bruchursachen erkannt werden können.

Die Ermittlung weiterer Angaben im Zusammenhang mit den Bruchbedingungen (Spannungen, Kräfte, Temperatur, Beanspruchungsdauer, Wahrscheinlichkeit von Schlageinwirkungen usw.) ist sehr empfehlenswert, um gesicherte Folgerungen ziehen zu können.

5 Geräte

5.1 Einrichtungen zur Vorbereitung und Reinigung

5.1.1 Trennscheibe für große Probekörper: Diamantsägeblatt.

ANMERKUNG Die Trennscheibe wird zum Abtrennen kleiner Proben benötigt, die für eine Auswertung mit einem Mikroskop, besonders mit dem Rasterelektronenmikroskop, vorgesehen sind.

5.1.2 Ultraschallbad zur Reinigung der Bruchfläche.

5.1.3 Druckluftzufuhr zum Trocknen der Proben nach dem Reinigen und zur Entfernung von Staub oder Fusseln. Die zugeführte Luft sollte trocken und ölfrei sein.

5.2 Beobachtungseinrichtungen

5.2.1 Kleine Handlupe mit 3- bis 8-facher Vergrößerung.

5.2.2 Lichtmikroskop, vorzugsweise ausgestattet mit einem Gerät zur Anfertigung von Mikrobildern und mit einer Einrichtung zur Einstellung einer 5- bis 50-fachen Vergrößerung.

ANMERKUNG Eine Alternative zu einem Gerät zur Anfertigung von Mikrobildern stellt eine Makrobild-Kamera mit einer geeigneten Optik und einem Stativ dar.

5.2.3 Beleuchtungssystem, bestehend aus einer Lichtquelle, die seitlich von der Probe angeordnet werden kann, um ein kontrastreiches Bild der Bruchfläche zu ermöglichen.

5.2.4 Rasterelektronenmikroskop (REM), vorzugsweise ausgestattet mit einer Einrichtung zur Durchführung einer energiedispersiven Röntgenstrahlanalyse (EDRS).

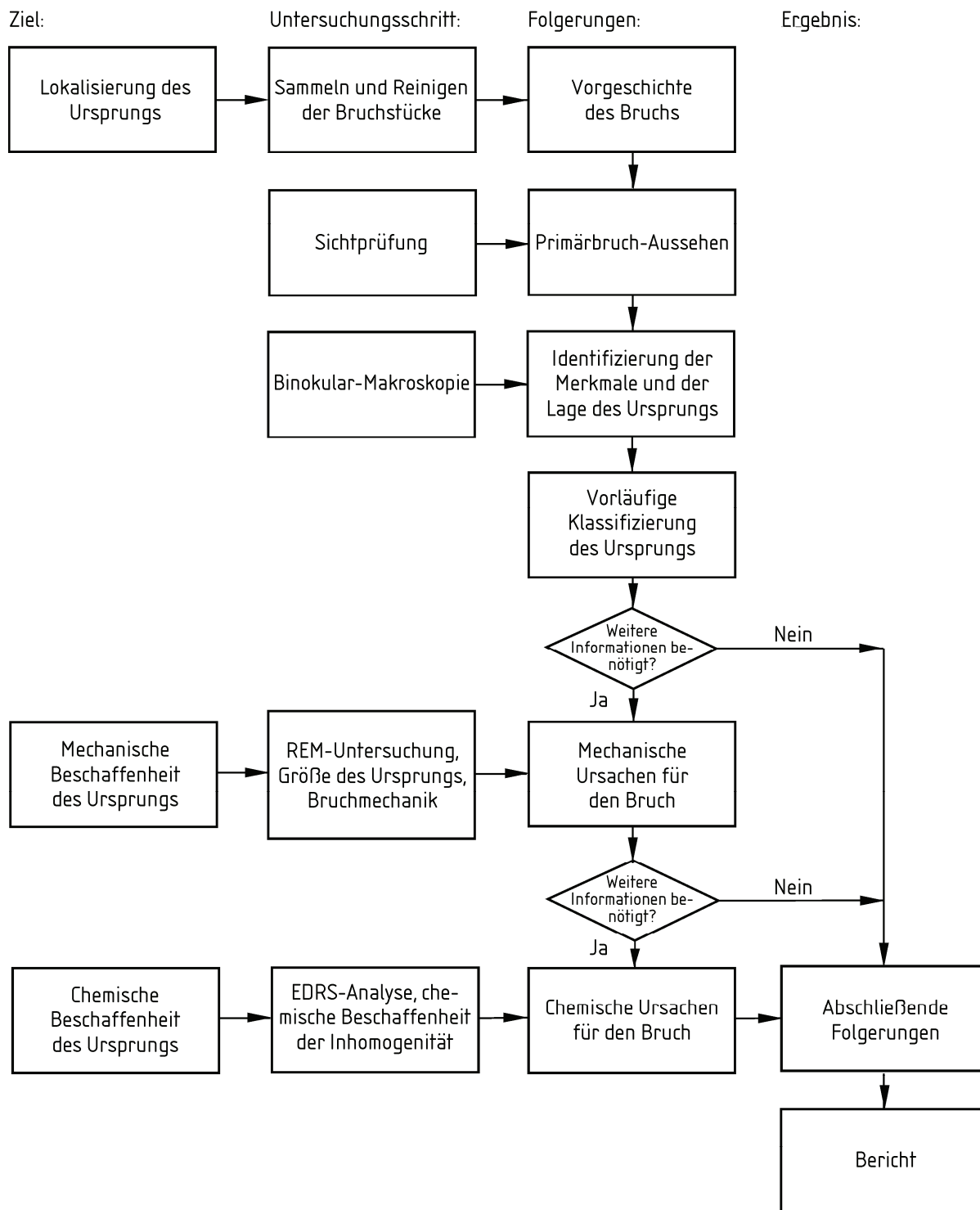


Bild 1 — Flussdiagramm für fraktographische Verfahren im Allgemeinen

6 Empfohlenes Verfahren

6.1 Übersicht

Bild 1 zeigt einen Überblick über die Schrittfolge bei der fraktographischen Untersuchung einer Probe. Es sollte angemerkt werden, dass nicht in allen Fällen alle Schritte durchgeführt werden müssen, z. B. ist zur Überprüfung der ungefähren Position der Bruchstelle im Allgemeinen kein Rasterelektronenmikroskop (REM) erforderlich. Daher sollten die folgenden Abschnitte entsprechend der jeweiligen Aufgabenstellung und der geforderten Untersuchungsart angewendet werden.

6.2 Probenlagerung und Reinigung der Bruchflächen

Bruchflächen sind rau und können durch Handhabung und Lagerung leicht verunreinigt werden. Durch Verunreinigungen sind, besonders bei der Auswertung mit einem REM, Fehlinterpretationen der beobachteten Merkmale möglich. Nach Möglichkeit sind die Bruchstücke einzeln sauber und trocken so zu lagern, dass ein Kontakt der Bruchflächen mit Fremdkörpern vermieden werden kann.

ANMERKUNG Eine Aufbewahrung in Papier oder Kunststoffbehältern kann die Aufnahme von Verunreinigungen nicht verhindern. Durch die Aufbewahrung in Glasgefäßen werden die Risiken verringert, Beschädigungen der Oberfläche können jedoch trotzdem auftreten, wenn sich die Probe im Glasgefäß bewegen kann. Die Anwendung von Klebeband oder Einbettungsmassen wird empfohlen zu vermeiden, weil die Entfernung des Klebstoffs von der Bruchfläche Schwierigkeiten bereitet.

Eine Berührung der Bruchflächen mit bloßen Händen ist zu vermeiden; es sind Zangen oder Schutzhandschuhe zu verwenden, um eine Verunreinigung durch Körperfett zu vermeiden.

Reinigungseinrichtungen werden benötigt, um aufgebrauchte Verunreinigungen ohne weitere Beschädigung der Bruchfläche zu entfernen. Zur Entfernung löslicher oder lose anhaftender Verunreinigungen wird die kombinierte Anwendung von Lösemitteln, z. B. Aceton oder Ethylalkohol, und einem Labor-Ultraschallbad empfohlen.

Die Proben sind mit Druckluft zu trocknen.

6.3 Sichtprüfung

6.3.1 Alle vorhandenen Bruchstücke sind visuell bei guter Beleuchtung und, wenn angebracht, mit einer Handlupe zu untersuchen.

6.3.2 Die Kennzeichnung der Bruchstücke ist mit einem Permanentmarker an Stellen außerhalb der interessierenden Flächen vorzunehmen. Um eine spätere Zuordnung zu ermöglichen, ist eine Zeichnung der gekennzeichneten Bruchstücke anzufertigen.

6.3.3 Wenn es mehrere Bruchstücke gibt, sind zur Identifizierung der ursprünglichen Bruchfläche (Primärbruch) Rissmuster anzuwenden.

ANMERKUNG 1 Im Anhang A werden einige Beispiele für Rissmuster in Proben und Bauteilen gezeigt.

ANMERKUNG 2 Es sollte kein Versuch unternommen werden, die Bruchstücke wieder zusammenzusetzen, weil dadurch weitere Beschädigungen der Bruchflächen herbeigeführt werden können, die spätere Untersuchungen beeinträchtigen.

6.3.4 Die Primärbruchfläche wird auf Hinweise zum Erkennen des Bruchursprungs untersucht. Der Ursprung kann durch Rückverfolgen radial verlaufender Riefen oder Furchen ermittelt werden.

ANMERKUNG 1 Im Anhang B werden einige Beispiele für Bruchflächenmuster gezeigt, deren Anwendung bei diesem Arbeitsschritt hilfreich sein kann. Folgendes sollte jedoch angemerkt werden:

- 1) Nicht alle keramischen Werkstoffe eindeutige Bruchmerkmale aufweisen. Hochfeste, feinkörnige oder amorphe Werkstoffe zeigen die Bruchmerkmale am besten. Im Gegensatz dazu kann die Rauheit der Bruchfläche in grobkörnigen oder weicheren Werkstoffen möglicherweise so groß sein, dass die Bruchmarken undeutlich werden.
- 2) Bestimmte Merkmale, wie z. B. der Bereich der feinen Rauheit oder der Bereich der groben Rauheit, können, bedingt durch die Größe der Probe oder die Größe der Bruchspannung, fehlen. Diese Merkmale entwickeln sich nur, wenn der Riss innerhalb des Probenquerschnitts eine ausreichende Ausbreitungsgeschwindigkeit erreicht. Ein Beispiel ist das unterkritische Risswachstum oder der Bruch kleiner Probestäbe.

ANMERKUNG 2 Es kann hilfreich sein, die Bruchfläche zur Lichtquelle so anzuordnen, dass ein streifender Lichteinfall zustande kommt, und es sind alle Veränderungen der scheinbaren Rauheit zu beobachten, bei Bedarf unter Anwendung einer Handlupe. Der Bereich in der Umgebung des Bruchursprungs kann glatter sein als die übrige Oberfläche.

Alle an den Bruchstücken gewonnenen Hinweise sind zu protokollieren.

6.4 Untersuchung mit Lichtmikroskop

6.4.1 Unter Anwendung einer schrägen Beleuchtung zur Hervorhebung der Rauheit der Bruchfläche und damit der Bruchmarken werden die Bruchstücke unter einem Lichtmikroskop mit geringer Vergrößerung (3-fach bis 10-fach) untersucht, um die bei der Sichtprüfung ermittelten Ergebnisse hinsichtlich der etwaigen Lage des Ursprungs zu bestätigen. Tabelle 1 weist auf die Erkennbarkeit der Ursprünge unter Anwendung der Lichtmikroskopie hin.

ANMERKUNG 1 Viele keramische Werkstoffe sind durchscheinend, und bedingt durch Streuung oder schräge Beleuchtung der Oberflächenschicht können Bruchmarken verdeckt werden. Es wird empfohlen:

- 1) eine höhenverstellbare Lichtschranke parallel zur Bruchfläche anzubringen, um die Probenseiten abzuschirmen;
- 2) die Probe, falls durchführbar, so zu drehen, dass unter einer Beleuchtung aus allen Richtungen ein eindeutiger Eindruck der Bruchmarken erhalten wird;
- 3) die Bruchfläche, falls durchführbar, mit einem dünnen Überzug aus einem lichtundurchlässigen Stoff, z. B. mit Gold oder einem anderen Metall, zu versehen. Die Beschichtung sollte jedoch mit Vorsicht angewendet werden, falls später eine REM/EDRS-Analyse durchzuführen ist.

ANMERKUNG 2 Zum Erkennen des Bruchursprungs kann es hilfreich sein, die beiden Hälften der Bruchfläche so zusammenzulegen, dass die zusammengehörenden Hälften des Bruchursprungs benachbart angeordnet sind. Dadurch ist es mitunter leichter, das radiale Muster der Marken zu erkennen.

6.4.2 Falls durchführbar, sind die Gefügebilder zu skizzieren oder zu photographieren.

6.4.3 Unter stufenweise zunehmender Vergrößerung ist eine Untersuchung des mutmaßlichen Ursprungs durchzuführen. Nach Möglichkeit sind alle Merkmale am Ursprung einschließlich der detaillierten Muster von lokalen oder sonstigen Marken oder Beschädigungen auf der Außenfläche zu identifizieren, die möglicherweise durch den Bruch verursacht sein können. Falls durchführbar, sind Mikrobilder anzufertigen.

ANMERKUNG 1 Bei einer mehr als etwa 200-fachen Vergrößerung sind die Bruchflächen im Allgemeinen für eine effektive Untersuchung unter einem Lichtmikroskop nicht eben genug; eine ausreichende seitliche Beleuchtung ist schwierig zu realisieren. In diesen Fällen können wesentliche Merkmale dadurch aufgezeigt werden, dass eine kombinierte normale und schräge Beleuchtung angewendet wird.

ANMERKUNG 2 Das strahlenförmig verlaufende Bruchmarkenmuster kann häufig bis zum Ursprung zurückverfolgt werden, aber nur, wenn die Marken eindeutig zu erkennen sind.

6.5 Identifizierung der wichtigsten Merkmale der Bruchflächen

Die wichtigsten Bruchflächenmerkmale sind mit Hilfe der Bruchlinien (3.4.1) festzustellen, die von einem Ausgangspunkt auf beiden Bruchflächenhälften in äquivalenter Weise ausgehen. Es sind alle Bereiche grober Rauheit sowie alle Bruchspiegelbereiche und Bereiche feiner Rauheit zu bestimmen. Ferner sind Position und vorläufige Beschaffenheit des Bruchsprungs unter Berücksichtigung der geometrischen Merkmale des Bauteils oder der Probe sowie die wahrscheinlichen Spannungen festzustellen. Diese Beobachtungen sind mit allen weiteren Beobachtungen des Oberflächenzustands in Wechselbeziehung zu setzen.

ANMERKUNG 1 Es kann sein, dass Sichtprüfungen nicht ohne Weiteres auszuwerten sind und dass die Lichtmikroskopie keine ausreichend aufgelösten oder deutlichen Bilder liefert, so dass die Schadensursache eindeutig erkannt werden kann. Falls eine höhere Vergrößerung oder eine Bestätigung der chemischen Beschaffenheit des Ursprungs gefordert wird, sollte eine REM/EDRS-Untersuchung angewendet werden (6.6, 6.8). Eine Anzahl möglicher Arten von Bruchflächenmerkmalen (nicht immer alle), die im Prüfbericht angegeben werden sollten, kann jedoch erkannt werden.

ANMERKUNG 2 Im Rahmen der Bruchmechanik werden der Radius des Bruchspiegels, falls er vorhanden ist, und die Bruchspannung an der Bruchstelle empirisch miteinander verknüpft. Falls Bruchspannung und Bruchspiegelkonstante bekannt sind (siehe Anhang D), ist die Berechnung der Größe des Bruchspiegels möglich, die eine Leitlinie zur Interpretation des Bruchsprungs darstellt. Alternativ kann eine Abschätzung der Bruchspannung durchgeführt werden, wenn Bruchspiegelradius und Bruchspiegelkonstante bekannt sind.

ANMERKUNG 3 Besonders bei einer lichtmikroskopischen Betrachtung ist es wichtig, den Ursprung nach seiner physikalischen Form zu beschreiben und nicht, wie er unter bestimmten Beobachtungsbedingungen erscheint.

Tabelle 1 — Erkennbarkeit der Bruchsprünge

Benennung des Ursprungs	Erklärung	Erkennbar im Lichtmikroskop oder im REM	Beispiele im Anhang C oder Anhang D
Pore (3.2.6)	Einzelne große Poren haben häufig eine unregelmäßige Form und können als Bruchsprünge wirken, besonders dann, wenn sie dicht an der Oberfläche liegen oder eine Verbindung zu ihr haben, z. B. durch Bearbeitung freigelegte Poren.	Lichtmikroskop, für durchscheinende Werkstoffe besser REM	C.1.1, C.1.2
Poröser Bereich (3.2.7)	Ein Bereich von Poren, die dreidimensional und dicht beieinander angeordnet sind, kann außer bei hoher Vergrößerung schwierig zu identifizieren sein.	REM, wenn nicht groß	
Poröse Formnaht (3.2.8)	Ein Bereich von Poren, die ebenflächig oder nahezu ebenflächig dicht beieinander angeordnet sind, kann von einer unvollständigen Kompaktierung oder von unbeabsichtigt eingebrachten organischen Stoffen oder einer geschlossenen Schichtentrennung herrühren.	REM, wenn nicht groß	
Schichtentrennung (3.2.3) oder Riss im Grünkörper (3.1.1)	Ein ebenflächiger oder nahezu ebenflächiger offener Hohlraum, der durch einen Bruch während des Pressens des Grünkörpers oder während des Auswerfens aus der Pressform entsteht und beim Brennen nicht vollständig zu beseitigen ist; üblicherweise dadurch erkennbar, dass er unter einem Winkel zur üblichen Bruchebene verläuft und gegenüber dem Bruchbereich eine andere Topographie der Innenfläche aufweist.	Lichtmikroskop oder REM	C.5.2
Einschluss (3.2.4)	Eine Inhomogenität, die eine andere chemische Zusammensetzung als der keramische Werkstoff hat und häufig mit einer Pore oder einem Korn mit lokal modifizierter Größe verbunden ist, jedoch nur mit einem REM unter Anwendung rückgestreuter Elektronen oder EDRS sichtbar gemacht werden kann.	REM für chemische Angaben, Lichtmikroskop nur, wenn groß und nicht gefärbt	C.4.2

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Benennung des Ursprungs	Erklärung	Erkennbar im Lichtmikroskop oder im REM	Beispiele im Anhang C oder Anhang D
Grobkorn/ Grobkörner (3.2.5)	Ein einzelnes Korn oder eine Gruppe anomal großer Körner wird im Allgemeinen durch eine Inhomogenität der Zusammensetzung, eine zu hohe Brenntemperatur oder gelegentlich durch unzureichende Zerkleinerung des Pulvers verursacht.	REM oder Lichtmikroskop, falls groß	C.3.1
Agglomerat (3.2.1)	Ein dichter Cluster aus Körnern, der vom Rest des Feingefüges zu unterscheiden ist, aber häufig von einem porösen Saum umgeben ist, der durch unterschiedliche Schrumpfung beim Sintern erzeugt wird.	REM	C.2.1, C.2.2
Inhomogenität der Zusammen- setzung (3.2.2)	Ein Bereich mit einer lokalen Veränderung der Zusammensetzung, die eine Modifizierung des Feingefüges bewirkt oder einen Lunker erzeugt.	REM für chemische Angaben	C.4.1
Oberflächen- Abplatzungen (3.3.1)	Eine Beschädigung der äußeren Fläche, häufig entlang einer Kante, kann Rissbildung auslösen und wird im Allgemeinen durch eine weitere lokale Schädigung identifiziert. Der Bruch kann zunächst außerhalb der Endbruchebeine liegen.	Lichtmikroskop oder REM	D.2
Oberflächenriss (3.1.1)	Ein bereits vorhandener Riss, der von einer mechanischen oder thermischen Schädigung oder von der Handhabung bei der Herstellung herrühren kann, ist möglicherweise schwierig zu identifizieren, liegt üblicherweise jedoch außerhalb der Endbruchebeine.	Lichtmikroskop oder REM	C.9
Oberflächen- grübchen (3.3.5)	Ein Hohlraum an der Oberfläche, der auf äußere Einflüsse zurückzuführen ist, z. B. Oxidation, erfordert eine Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Bruchsprung und der äußeren Oberfläche.	Lichtmikroskop oder REM	C.8.1, C.8.2
Offene Pore (3.3.4)	Ein Hohlraum an der Oberfläche, der von dem bei der Vorbereitung des Bauteils oder der Probe verwendeten Bearbeitungsverfahren herrührt, kann üblicherweise von einem Grübchen durch seine Tiefe oder durch die Oberflächenmorphologie von der üblichen Oberfläche unterschieden werden.	Lichtmikroskop oder REM	D.1
Bearbeitungs- schaden (3.3.3)	Eine flache Beschädigung der Oberfläche oder unterhalb der Oberfläche, z. B. eine Abplatzung oder Riss, kann bearbeitungsbedingt entstehen und zu scheinbar gestreckten Bruchsprüngen führen, die häufig eine halbelliptische Form haben.	REM	C.7.1, C.7.2
Handhabungs- schaden (3.3.2)	Kratzer oder andere anomale Beschädigungen, die von einer unüblichen Handhabung während der Bearbeitung herrühren.	Lichtmikroskop oder REM	C.6

6.6 Untersuchung mit Rasterelektronenmikroskop

6.6.1 Falls detaillierte Untersuchungen des Bruchsprungs (3.1.4) gefordert werden, ist ein Rasterelektronenmikroskop (REM) zu verwenden. Tabelle 1 gibt Empfehlungen, in welchen Fällen zur Erkennung der Bruchsprünge ein REM benötigt wird.

6.6.2 Falls notwendig, sind für die zur Betrachtung verfügbare Einrichtung Bereiche der Probe in einer ausreichenden Größe auszuwählen. Mit einer Diamant-Trennscheibe, die mit sauberem Wasser gespült wird, sind diese Bereiche von der Probe abzutrennen, im Ultraschallbad zu reinigen und mit Druckluft zu trocknen. Sie sind, vorzugsweise unter benachbarter Anordnung der beiden Bruchhälften, mit einem geeigneten Klebstoff auf einem REM-Probenträger zu befestigen. Die Probe sollte so abgetrennt und befestigt werden, dass eine Betrachtung sowohl der Bruchfläche als auch der übrigen äußeren Probeflächen möglich ist. Staub und Fusseln sind mit Druckluft zu entfernen. Die Proben sind so zu kennzeichnen, dass ihre Identifizierung auch später noch möglich ist. Bei einem elektrisch nicht leitenden Werkstoff ist ein **dünnere** leitfähiger Überzug, z. B. aus Kohlenstoff oder einem Metall, z. B. Gold, aufzubringen.