


505-46

BGI/GUV-I 505-46

Information



**Verfahren zur getrennten
Bestimmung der Konzentra-
tionen von lungengängigen
anorganischen Fasern in
Arbeitsbereichen – Raster-
elektronenmikroskopisches
Verfahren**

Von den Unfallversicherungsträgern anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentrationen krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft in Arbeitsbereichen

Impressum

Herausgeber:
Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Mittelstraße 51
10117 Berlin
Tel.: 030 288763800
Fax: 030 288763808
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Arbeitsgruppe Analytik

im Sachgebiet „Gefahrstoffe“ des Fachbereichs
„Rohstoffe und chemische Industrie“ der DGUV.

Korrespondenzadresse

Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie
Prävention – Wissenschaftliche Fachreferate
Fachbereich Gefahrstoffe und biologische Arbeitsstoffe
Postfach 10 14 80, 69004 Heidelberg
E-Mail: analytik@bgrci.de

Layout & Gestaltung:
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Medienproduktion

Ausgabe Februar 2014

BGI/GUV-I 505-46 zu beziehen bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger
oder unter www.dguv.de/publikationen

Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentrationen von lungengängigen anorganischen Fasern in Arbeitsbereichen – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren

Von den Unfallversicherungsträgern anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentrationen krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft in Arbeitsbereichen

Verfahren 01

Probenahme mit Pumpe und Abscheidung der Partikel auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter, Präparation des Filters und Auswertung mit Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA)

Fasern – 01 – REM/EDXA (erstellt: Januar 1991, zurückgezogen: April 2004)

Verfahren 02

Probenahme mit Pumpe und Abscheidung der Partikel auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter, Präparation des Filters und Auswertung mit Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA)

Fasern – 02 – REM/EDXA (erstellt: April 2004, zurückgezogen: März 2013)

Verfahren 03

Probenahme mit Pumpe und Abscheidung der Partikel auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter, Präparation des Filters und Auswertung mit Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA)

Fasern – 03 – REM/EDXA (erstellt: März 2013, ersetzt Verfahren BGI 505-46-02 vom April 2004)

Teil dieses Verfahrens sind die im „Allgemeinen Teil“ (BGI/GUV-I 505-0) beschriebenen Anforderungen und Grundsätze.

Eine Übersicht über die aktuellen und zurückgezogenen Analyseverfahren der BGI/GUV-I 505 finden Sie als Download unter <http://analytik.bgrci.de>

Verfahren 03

Probenahme mit Pumpe und Abscheidung der Partikel auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter, Präparation des Filters und Auswertung mit Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA)

Erprobtes und von den Unfallversicherungsträgern anerkanntes, diskontinuierliches Verfahren zur Bestimmung anorganischer Fasern der Länge $L > 5 \mu\text{m}$, der Breite $0,2 \mu\text{m} \leq D < 3 \mu\text{m}$ und des Länge-zu-Breite-Verhältnisses $L/D > 3$ (Kriterien nach WHO [2]) in der Luft in Arbeitsbereichen.

Es sind personenbezogene oder ortsfeste Probenahmen für Messungen zur Beurteilung von Arbeitsbereichen möglich.

Die Probenahme erfolgt durch Abscheidung von Partikeln aus der mit einer Pumpe angesaugten Luft auf einem goldbeschichteten Kernporenfilter.

Die Auswertung wird mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) unter Verwendung der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDXA) durchgeführt.

Dieses Verfahren benutzt das in der VDI-Richtlinie 3492 [1] beschriebene Bestimmungsprinzip. Es ergänzt das phasenkontrastmikroskopische Verfahren BGI/GUV-I 505-31 [3] in solchen Fällen, in denen

1. verschiedene Arten von anorganischen Fasern vorhanden sind, die voneinander und gegebenenfalls von organischen Fasern unterschieden werden müssen,
2. die Nachweisgrenze des phasenkontrastmikroskopischen Verfahrens nicht ausreicht, um die Einhaltung vorgegebener Grenzwerte und Auslöseschwellen zu überwachen.

Dieses Verfahren ermöglicht den Nachweis und die Identifizierung von Asbestfasern, Calciumsulfatfasern und anderen anorganischen Fasern mit einer Breite von $D \geq 0,2 \mu\text{m}$. Faserförmige Partikel mit $D < 0,2 \mu\text{m}$ werden separat ausgewiesen, aber bei der Berechnung des Messergebnisses nicht berücksichtigt, da entsprechend den Erläuterungen (13) in TRGS 900, Abschnitt 3, die hier beschriebene Methode als Alternative zur lichtmikroskopischen Methode BGI/GUV-I 505-31 [3] eingesetzt werden kann, wenn zusätzlich zur Quantifizierung die Identifizierung der faserförmigen Partikel erforderlich ist. Mit der Methode BGI/GUV-I 505-31 sind Fasern dünner als etwa $0,2 \mu\text{m}$ nicht erkennbar. Dazu kommt, dass eine Identifizierung so dünner Fasern mit EDXA im Allgemeinen nicht gewährleistet ist.

Das infrarotspektroskopische Verfahren in Kombination mit der Phasenkontrastmikroskopie (BGI 505-30 [4]) erlaubt eine direkte quantitative Massenanteilbestimmung von Asbest im Feinstaub bzw. nach entsprechender Aufarbeitung in Materialproben und kann bei Bedarf wertvolle Zusatzinformationen in Ergänzung der Verfahren BGI/GUV-I 505-31 und BGI/GUV-I 505-46 liefern.

Messungen im Sinne der Asbest-Richtlinien der Länder [5] werden nach [1] vorgenommen. Sie sind nicht Gegenstand dieses Verfahrens.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung	9
1 Geräte, Betriebsmittel und Zubehör	10
1.1 Geräte für die Probenahme	10
1.2 Geräte für die Filterpräparation	12
1.3 Geräte für die Auswertung	13
1.4 Betriebsmittel	13
1.5 Zubehör	14
2 Probenahme	15
2.1 Vorbereiten der Messfilter	15
2.2 Durchführen der Probenahme	16
2.3 Abstimmungserfordernisse zwischen Probenahme und Auswertung	19
3 Probenvorbereitung	21
3.1 Präparation der beaufschlagten Filter	21
3.2 Vorbereitung der Referenzproben	22
4 Auswertung mit dem Rasterelektronenmikroskop	23
4.1 Allgemeine Verfahrenshinweise	23
4.2 Regeln für die Faserzählung	25
4.3 Faseridentifizierung	29
4.4 Anorganische Produktfasern	32
4.5 Splitterförmige Fasern	33
4.6 Organische Fasern	34
4.7 Berechnen der Faseranzahlkonzentration und Darstellung des Messergebnisses	35
4.8 Analysenbericht	37
4.9 Bildung von Mittelwerten	38

5 Beurteilung des Verfahrens	40
5.1 Messunsicherheit	40
5.2 Nachweisgrenze	40
5.3 Analytische Empfindlichkeit (nach VDI 3492 [1])	41
5.4 Selektivität	41
6 Literatur	42
Anhang 1 Beispiele für Spektren anorganischer Fasern	44
Anhang 2 Vertrauensbereichsgrenzen für das Zählergebnis	49
Anhang 3 Systematik anorganischer und organischer Fasern	54

Kurzfassung

Mit diesem Verfahren wird die über die Probenahmedauer gemittelte Konzentration von anorganischen Fasern der Länge $L > 5 \mu\text{m}$, der Breite $0,2 \mu\text{m} \leq D < 3 \mu\text{m}$ und des Länge-zu-Breite-Verhältnisses $L/D > 3$ [2] in der Luft im Arbeitsbereich personenbezogen oder ortsfest bestimmt.

- Messprinzip:** Mit Hilfe einer Pumpe wird ein definiertes Luftvolumen durch ein goldbeschichtetes Kernporenfilter gesaugt. Die abgeschiedenen Fasern werden mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA) gezählt und analysiert.
- Nachweigrenze:** Die Nachweisgrenze ist wesentlich vom Probeluftvolumen abhängig. Für ein Probeluftvolumen von 40l/cm^2 Filterfläche liegt die statistische Nachweisgrenze unter Standardauswertebedingungen bei $15.000 \text{ Fasern/m}^3$. Ergebnisse werden jedoch bereits oberhalb der analytischen Empfindlichkeit von 5.000 Fasern/m^3 ausgewiesen (siehe Abschnitt 5.3).
- Selektivität:** Die Unterscheidung nach Chrysotilfasern, Amphibolasbestfasern, Calciumsulfatfasern, gegebenenfalls Produktfasern (siehe Abschnitt 2.2.2), und sonstigen anorganischen Fasern ist möglich.
- Vorteile:** Die Analyse ist faserspezifisch (Morphologie) und faserartspezifisch (Material).
- Nachteile:** Dieses Verfahren ist mit einem hohen apparativen und zeitlichen Aufwand verbunden.
- Apparativer Aufwand:** Einrichtung zur Goldbeschichtung (z. B. Sputtereinrichtung)¹⁾, Probenahmeapparatur, Kaltveraschungseinrichtung, Rasterelektronenmikroskop, energiedispersives Röntgenmikroanalyssystem.

¹⁾ Nicht erforderlich, wenn für die Messung kommerziell erhältliche goldbeschichtete Kernporenfilter verwendet werden.

1 Geräte, Betriebsmittel und Zubehör

Zur Durchführung einer Messung nach dem hier beschriebenen Verfahren sind die in Abschnitt 1.1 bis 1.5 genannten Geräte, Betriebsmittel und Zubehörteile erforderlich. Es ist sicherzustellen, dass diese vor ihrer Verwendung sauber und faserfrei sind. Die Überprüfung erfolgt anlassbezogen mit Hilfe von Laborblindproben (z. B. bei neuer Filtercharge oder geänderten Betriebsmitteln). Dazu wird der komplette analytische Verfahrensgang auf ein unbeaufschlagtes Messfilter angewandt.

1.1 Geräte für die Probenahme

- **Probenahmekopf**

Dieser besteht im Wesentlichen aus einem zylindrischen Ansaugtubus, einem Filterhalter mit Messfilter und einem Absaugstutzen.

Ansaugtubus und Filterhalter sollen aus korrosionsbeständigem Material gefertigt sein. Ein dichter Sitz des eingelegten Messfilters muss gewährleistet sein. Die Länge des Ansaugtubus vor dem Filter muss das 1,5- bis 3,0-fache des effektiven Filterdurchmessers d_{eff} (Durchmesser der durchströmten kreisförmigen Filterfläche) betragen [2].

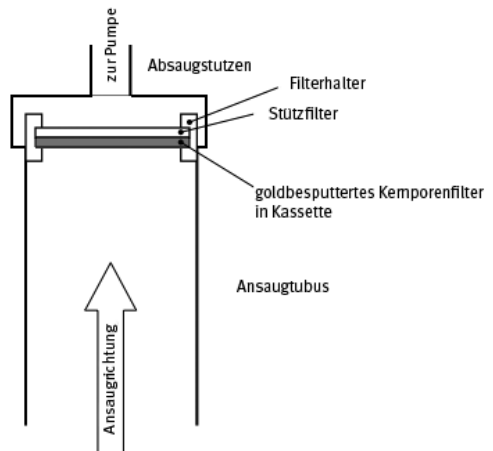


Abb. 1
Prinzipische Skizze für einen geeigneten Probenahmekopf

Geeignet sind die für Fasermessungen in Arbeitsbereichen zur phasenkontrastmikroskopischen Auswertung üblichen Probenahmeköpfe [3]. Abbildung 1 zeigt die Prinzipskizze eines geeigneten Probenahmekopfes mit einer Kassette, die als Filterhalter für das auf einem Stützfilter liegende Messfilter dient und nach der Probenahme mit Abdeckungen verschlossen und als Transportbehälter (Filterkapsel) verwendet wird (siehe beispielhaft auch Probenahmesystem PGP-FAP in Abbildung 2).

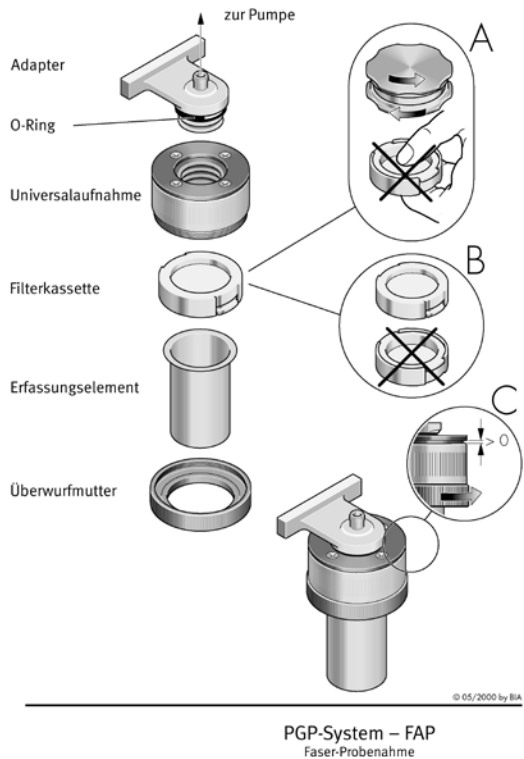


Abb. 2
 Probenahmekopf mit
 Filterkassette – System BIA [5]
 (A: Filteroberfläche nicht berühren,
 B: Kassette mit Filteroberfläche
 nach unten einlegen,
 C: Überwurfring nicht zu fest an-
 schrauben.)

- **Probenahmepumpe**

Als Probenahmepumpe wird eine Pumpe verwendet, die durch das Filter je cm^2 in der Regel wenigstens 0,24 l/min saugen kann. An staubarmen Arbeitsplätzen können auch höhere Volumenströme verwendet werden.

Der Luftstrom muss pulsationsfrei sein, so dass eine sichere Messung des Volumenstroms möglich ist. Sofern eine batteriebetriebene Pumpe verwendet wird, muss die Kapazität der Batterie für einen kontinuierlichen Einsatz während der gesamten gewählten Probenahmedauer ausreichen.

- **Strömungsmesser**

Ein geeignetes kalibriertes Messgerät, das die Messung des Luftvolumenstroms mit einer Messgenauigkeit von besser als 5 % ermöglicht.

1.2 Geräte für die Filterpräparation

- Anlage zum Goldbeschichten der Kernporenfilter ²⁾, z. B. Fa. GaLa-Instrumente, 65307 Bad Schwalbach,
- Anlage zur Kaltveraschung im Sauerstoffplasma, z. B. Fa. GaLa-Instrumente, zum Entfernen der organischen Bestandteile des beaufschlagten Messfilters. Kommerziell erhältlich sind Plasmaprozessoren zur Kalt- bzw. Tieftemperaturveraschung, bei denen die Ankopplung des Plasmas kapazitiv oder induktiv erfolgt. Bei induktiver Ankopplung muss darauf geachtet werden, dass sich das Filter nicht im Feld der Induktionsspulen befindet.

²⁾ Nicht erforderlich, wenn für die Messung kommerziell erhältliche goldbeschichtete Kernporenfilter verwendet werden.

1.3 Geräte für die Auswertung

Rasterelektronenmikroskop, z. B. Fa. Carl Zeiss Microscopy, 73447 Oberkochen, mit EDX-Analyseeinrichtung, z. B. Fa. Thermo Scientific, 63303 Dreieich, zur Faserzählung und Faseridentifizierung. Das Gerät muss den Mindestanforderungen hinsichtlich Erkennbarkeit und Identifizierung der Fasern genügen (siehe Abschnitt 4.3).

1.4 Betriebsmittel

Messfilter:

Kernporenfilter aus Polycarbonat. Filterdurchmesser je nach Probenahmesystem (üblich sind 25 mm und 37 mm), Nennporenweite 0,4 µm oder 0,8 µm, mit Gold beschichtet (Vorderseite ca. 40 nm, Rückseite ca. 20 nm), z. B. Fa. APC, 65760 Eschborn.

Stützfilter:

Membranfilter aus Celluloseester mit einem mittleren Porendurchmesser > 3 µm (kein faserhaltiges Material, wie z. B. Glasfaserfilter oder Karton).

Sauerstoff:

technisch rein, zum Betrieb der Kaltveraschungsanlage.

Goldtarget:

zum Beschichten der Kernporenfilter.

Argon:

technisch rein, zum Betrieb der Goldbeschichtungsanlage³⁾.

Kohlenstofflack, Leit-C, Kohle-Tabs oder dergleichen:

zum elektrisch leitfähigen Aufkleben des zu untersuchenden Filters auf den Probenträger des REM, z. B. Fa. Plano, 35578 Wetzlar.

³⁾ Nicht erforderlich, wenn für die Messung kommerziell erhältliche goldbeschichtete Kernporenfilter verwendet werden.

Flüssigstickstoff:

zur Kühlung des EDX-Detektors und des Feldeffekt-Transistors (FET) des EDX-Analysensystems.

1.5 Zubehör

Filterbehälter:

Die in der Filterhalterung eingespannten Filter werden staubdicht in einem Behälter (Filterkapsel) transportiert.

Pinzette:

mit abgerundeten Spitzen zur Handhabung der Filter.

Skalpell:

zum Zerteilen der beaufschlagten Filter.

Stereomikroskop:

zur visuellen Prüfung der Filterbelegung oder Feststellung von Beschädigungen, Vergrößerung ca. 20-fach.

Testpräparat:

mit Chrysotil- und Krokydolithfasern belegtes goldbeschichtetes Kernporenfilter, das zur Überprüfung der Sichtbarkeit und des EDX-Spektrums am REM auch Fasern einer Breite von $\leq 0,2 \mu\text{m}$ enthält (Präparation wie in Abschnitt 3.1).

Kalibrierstandard:

zur Kalibrierung des Abbildungsmaßstabes des REM.

Testobjekt (Elementstandard), insbesondere Cu:

zur Energiekalibrierung des EDX-Analysensystems.

Referenzmaterialien je nach Aufgabenstellung (z. B. für die Bestimmung von Produktfasern; Asbestreferenzmaterialien, erhältlich z. B. beim Institute of Occupational Medicine (IOM), Edinburgh, Schottland).

2 Probenahme

2.1 Vorbereiten der Messfilter

Die Kernporenfilter müssen vor der Probenahme mit Hilfe einer Bedampfungsanlage oder einer Sputtereinrichtung mit Gold beschichtet werden. Geeignete goldbeschichtete Kernporenfilter sind auch kommerziell erhältlich. Diese Goldbeschichtung ist eine Voraussetzung für eine aufladungsfreie Abbildung im REM und hat gegenüber einer nachträglichen Beschichtung folgende Vorteile:

- Die geometrischen Abmessungen der Fasern bleiben unverändert.
- Die Elementpeaks werden nicht geschwächt.
- Das Filter bleibt während des Kaltveraschens stabil.

Zur Minimierung von Kontrastschwankungen ist eine gleichmäßige Goldschichtdicke erforderlich. Eine ausreichende Schichtdicke kann angenommen werden, wenn die Filteroberfläche im Laufe der Beschichtung die dunkle Farbe verliert und den typischen metallischen Goldglanz annimmt sowie bei der Betrachtung im Durchlicht mit einem grünen Schimmer erscheint.

Die Dicke der Goldschicht soll auf der zu beaufschlagenden Seite des Messfilters (stärker reflektierende, glänzende Seite) ca. 40 nm betragen. Eine Beschichtung der Filterrückseite mit einer ca. 20 nm dicken Goldschicht trägt zur Stabilisierung des Messfilters bei und kann eine Verbesserung der Kontrastverhältnisse bewirken. Sofern für die Beschichtungsanlage keine integrierte Schichtdickenmessvorrichtung zur Verfügung steht, kann die Schichtdicke auf einfache Weise im REM mittels der EDX-Einrichtung kontrolliert werden. Dazu werden Filter bekannten Durchmessers mit Gold beschichtet und die Massen des aufgebracht Goldes durch Differenzwägungen bestimmt. Vergleicht man die Höhen der Goldpeaks für diese Testfilter bei konstantem Strahlstrom mit den Massen, ergibt sich ein linearer Zusammenhang, aus dem sich die Schichtdicke bestimmen lässt [1].

Kernporenfilter einer neuen Charge werden vor der weiteren Verwendung hinsichtlich ihrer Verunreinigung durch anorganische Fasern am REM überprüft. Dazu werden auf zwei goldbeschichteten Filtern der zu prüfenden Charge mit REM/EDXA unter den in Abschnitt 4 genannten Bedingungen je 0,5 mm² ausgewertet. Dabei darf insgesamt höchstens eine anorganische Faser mit $L > 5 \mu\text{m}$ gefunden werden.

Das für die Probenahme vorbereitete Messfilter wird so in die Filterhalterung eingelegt, dass es plan auf dem Stützfilter aufliegt, beim Einlegen nicht beschädigt wird und ein dichter Sitz gewährleistet ist. Die Berührung der Filteroberfläche mit bloßen Fingern ist zu vermeiden. Die Filterkassetten werden bereits im Labor mit Messfiltern und faserfreien Stützfiltern bestückt und verschlossen. Falls unterhalb des Stützfilters ein Stützgitter eingesetzt werden soll, kann das Erzielen der Leckfreiheit des Probenahmekopfes problematisch sein. Das Messfilter darf nicht direkt auf dem Stützgitter aufliegen.

2.2 Durchführen der Probenahme

2.2.1 Luftproben

Bei der Manipulation der Filter ist eine Berührung mit bloßen Fingern zu vermeiden. Der Probenahmekopf mit eingelegtem Messfilter (z. B. 25 mm Durchmesser) wird unmittelbar vor Beginn der Probenahme geöffnet. Bei Verwendung von Filterkassetten (z. B. 37 mm Durchmesser) werden diese unmittelbar vor der Probenahme geöffnet und in den Probenahmekopf eingelegt – auch hierbei ist eine Berührung der Filteroberfläche zu vermeiden. Die Probenahme erfolgt mit nach unten weisendem Ansaugtubus. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für einen Probenahmekopf mit Filterkassette.

Vor Beginn der Probenahme wird der Volumenstrom so eingestellt, dass je cm^2 effektiver Filterfläche 0,24 bis 0,3 l/min (entsprechend 4 cm/s bis 5 cm/s Filteranströmgeschwindigkeit) gefördert werden. Beispielsweise wird bei Verwendung eines Filterhalters mit 30 mm effektivem Durchmesser ein Luftvolumenstrom von 1,7 l/min bis 2,1 l/min benötigt. Der spezifische Volumenstrom soll $0,24 \text{ l}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ nicht unterschreiten. Im Einzelfall (z. B. bei hohen Staubkonzentrationen) kann die Anströmgeschwindigkeit auf bis zu 2 cm/s abgesenkt werden. Nur wenn keine Grobstaubpartikel in der Luft im Arbeitsbereich erwartet werden, kann empfohlen werden, den spezifischen Volumenstrom auf bis zu etwa $1,2 \text{ l}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ (entsprechend bis zu etwa 20 cm/s Anströmgeschwindigkeit) zu erhöhen. Die Messung des Probeluftvolumenstroms erfolgt für das komplette Probenahmesystem (mit Messfilter und Stützfilter bestückter Probenahmekopf, Schlauchverbindung und Pumpe) mit Hilfe eines geeigneten und kalibrierten Volumenstrommessgerätes.

Die Durchflussrate darf am Ende der Probenahme um nicht mehr als 10% von der anfänglichen Durchflussrate abweichen. Für die Berechnung des Probeluftvolumens wird der Mittelwert aus Anfangs- und Endvolumenstrom herangezogen. Die Dauer der Probenahme richtet sich bei gegebenem Volumenstrom nach der Staubkonzentration. Keinesfalls darf die Belegung zu dicht werden. Die goldglänzende Filteroberfläche muss mit bloßem Auge noch erkennbar sein. Sobald die Oberfläche anfängt matt zu werden, sollte die Probenahme beendet werden. Unmittelbar nach Beendigung der Probenahme wird die Probenahmepumpe abgeschaltet, die Probenahmedauer notiert und die Filterkassette mit dem beaufschlagten Messfilter entnommen und staubdicht verschlossen. Ort, Zeit und Dauer der Probenahme sind so zu wählen, dass die Exposition repräsentativ erfasst wird [7].

In der Regel gibt eine Probenahmedauer von 2 bis 3 h bei einer Filteranströmgeschwindigkeit von 5 cm/s eine auswertbare Filterbelegung. Bei nur geringen Staubkonzentrationen ohne Grobstaubpartikel ist eine Probenahmedauer auch von 8 Stunden und länger oder eine höhere Filteranströmgeschwindigkeit bis zu 20 cm/s möglich. Im Zweifelsfall können mehrere Filter mit gestaffelter Probenahmedauer (z. B. 1 h, 2 h, 4 h usw.) belegt werden, so dass darunter mindestens eine auswertbare Probe erwartet werden kann. Im Ausnahmefall kann es unvermeidlich sein, eine Probenahmedauer von weniger als 1 h zu wählen, z. B. bei hohen Staubkonzentrationen oder vielen Grobstaubpartikeln. Bei Kurzzeitexpositionen hat sich bewährt, denselben Probenträger während mehrerer Kurzzeitphasen einzusetzen. Auch wenn nur eine einzelne Kurzzeitexposition auftritt, sollte diese durch eine Probenahme von mindestens 1 h erfasst werden.

Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang zwischen der erreichbaren Nachweisgrenze und dem spezifischen Probeluftvolumen bei der Auswertung von 0,5 mm² Filterfläche. Durch Vergrößerung der Auswertefläche kann die Nachweisgrenze herabgesetzt werden (z. B. auf 300 Fasern/m³ bei 1 mm² Auswertefläche und 1.000 l/cm²). Abbildung 3 zeigt den Zusammenhang zwischen der Nachweisgrenze und dem Probeluftvolumen.

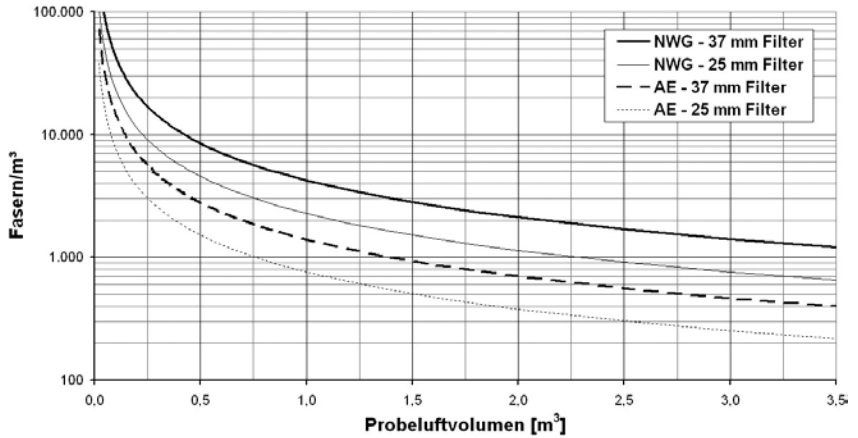


Abb. 3 Nachweisgrenze (NWG) und analytische Empfindlichkeit (AE) in Fasern/m³ in Abhängigkeit vom Probeluftvolumen in m³ für 37 mm- und 25 mm-Filter bei Auswertung von 0,5 mm² bei einer angenommenen effektiven Filterfläche von 707 mm² bzw. 380 mm², vergleiche Abschnitt 4.7 und 5.2

Nachweisgrenze [Fasern/m ³]	Absolutes Probeluftvolumen [l]	Spezifisches Probeluftvolumen [l/cm ²]	Probenahmedauer [h] bei Anströmgeschwindigkeit		
			5 cm/s	10 cm/s	20 cm/s
15.000	283	40	2,2	1,1	0,6 ^{*)}
10.000	424	60	3,3	1,7	0,8 ^{*)}
7.500	566	80	4,4	2,2	1,1
6.000	707	100	5,6	2,8	1,4
4.000	1.060	150	8,3	4,2	2,1
1.000	4.241	600	33	17	8,3
600	7.069	1.000	56	28	14

*) Die Probenahmedauer sollte 1h nicht unterschreiten.

Tabelle 1: Abhängigkeit der Nachweisgrenze vom spezifischen Probeluftvolumen bei Auswertung von 0,5 mm² (bezogen auf 37 mm-Filter mit effektiver Filteroberfläche von 707 mm²)

2.2.2 Produktfasern

Unter Produktfasern sind Fasern zu verstehen, die Materialien zuzuordnen sind, die bei dem jeweiligen Arbeitsprozess zum Einsatz kommen oder die in der Umgebung des Probenahmeortes vorhanden sind. Um feststellen zu können, wie hoch insbesondere die Konzentration von Produktfasern in einem Arbeitsbereich ist, müssen zusätzlich zu den Filterproben auch Proben der infrage kommenden Materialien entnommen und als Referenzproben zusammen mit den Filterproben dem Auswertelabor zur Verfügung gestellt werden. Die Proben sollen jeweils wenigstens ein Volumen von 1 cm³ besitzen und repräsentativ für das Material auch hinsichtlich vorhandener Kontaminationen oder der Fasern im Verbund (Kompositwerkstoffe) sein. Nach Möglichkeit sind dem Auswertelabor Kopien der Sicherheitsdatenblätter, zumindest aber vorhandene Produktinformationen (Hersteller, Produktname, Kennzeichnung usw.), zur Verfügung zu stellen.

Die analytischen Möglichkeiten des hier beschriebenen Verfahrens zur Abgrenzung von Produktfasern beschränken sich auf anorganische Fasern. Eine Unterscheidung verschiedener Arten organischer Fasern voneinander ist in der Regel nicht möglich.

2.3 Abstimmungserfordernisse zwischen Probenahme und Auswertung

Probenahme und Auswertung der Messfilter werden in der Regel entweder durch verschiedene Abteilungen und/oder verschiedene Personen innerhalb der jeweiligen Organisation oder verschiedener Firmen durchgeführt.

Ein Informationsfluss zwischen der probenehmenden und auswertenden Stelle, der über die bloße Mitteilung von Luftvolumen und Probenbezeichnung hinausgeht, ist daher im Zuge der Qualitätssicherung unerlässlich. Weitergehende Informationen umfassen neben den nachfolgend aufgeführten Punkten auch die Art der Messung. Werden bei der Auswertung Abweichungen, die möglicherweise während der Probenahme aufgetreten sind, erkannt, sind sie unverzüglich der probenehmenden Stelle oder Person mitzuteilen. Dazu gehören z. B.:

- zu geringes Luftvolumen,
- ein undichter Filtersitz,
- fehlerhaft eingelegte Filter,

- inhomogene oder unerwartete Staubbelegungen,
- Nichtauswertbarkeit wegen zu hoher Staubbelegung.

Bei der Probenahme erkennbar auftretende Veränderungen sind dem Labor mitzuteilen, z. B.:

- Staub freisetzende Arbeiten im Umfeld des Probenahmeortes,
- hohe Feuchtigkeit (Arbeiten mit Wasserdampf, -nebel, Spritzwasser),
- Ölnebel oder andere Flüssigkeitsaerosole,
- Manipulationen am Filter (z. B. Berührung der Filteroberfläche).

Im Zuge der Auswertung kann dann geprüft werden, ob am Filter Besonderheiten (Filtersitz, Partikel, Faserform und Faserart, Inhomogenitäten) auftreten.

3 Probenvorbereitung

3.1 Präparation der beaufschlagten Filter

Das beaufschlagte Messfilter wird durch Betrachtung zumindest des Filterrandes und der Filtermitte mittels Stereomikroskop und/oder REM bei geringer Vergrößerung daraufhin geprüft, ob die Partikelbelegung des Filters gleichmäßig ist. Sofern dabei eine ungleichmäßige Belegung festgestellt wird, ist das Filter für eine quantitative Auswertung nicht geeignet. Es wird empfohlen, mit dem Stereomikroskop auch den Rand, an dem das Filter in der Filterhalterung angepresst war, auf mögliche Undichtigkeiten während der Probenahme zu untersuchen. Zusätzlich muss das Stützfilter auf mögliche Verfärbungen hin kontrolliert werden, die ebenfalls auf Undichtigkeiten hindeuten. Außerdem muss die Filteroberfläche des Präparates unter streifender Beleuchtung (z. B. mit einer Halogenlampe) makroskopisch auf Wischspuren, Fingerabdrücke oder Beschädigungen hin untersucht werden.

Sofern keine organischen Fasern zu bestimmen sind, kann durch eine Kaltveraschung das organische Material auf dem Filter weitgehend entfernt werden. Dies erleichtert die Auswertung der Probe im REM wesentlich.

Hierzu wird das beladene Filter mit der Staubseite nach oben mit einem doppelseitig klebenden Kohle-Tab elektrisch leitend auf einem REM-Probenträger montiert und in das Kaltveraschungsgerät eingebracht. Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Filter und Probenträger ist der Angriff des O₂-Plasmas auf das auf dem Filter befindliche organische Material sehr wirksam. Bei Geräten mit kapazitiver Kopplung des Plasmas muss die Leistungsaufnahme so geregelt werden, dass keine Überschlüsse auftreten, die zu Löchern in der Goldschicht des Filters führen. Nach ca. 30 bis 60 min ist die Veraschung in der Regel abgeschlossen.

Die so vorbereitete Filterprobe ist nun ohne weitere Präparation (insbesondere ohne Nachbeschichten der Probe) für die Untersuchung im REM bereit.

Werden zu Beginn der Auswertung mit dem REM noch zu viele störende organische Partikel gefunden, sollte die Kaltveraschung wiederholt werden.

Es ist empfehlenswert, das ganze Filter für die REM-Auswertung zu montieren. Wenn es erforderlich ist, das Filter zu teilen, sollte dies mit einem scharfen gekrümmten Skalpell mit abrollendem (wiegendem) Schnitt geschehen. Dabei ist darauf zu achten, die Staubbelegung auf der Filteroberfläche nicht zu beeinträchtigen. Wird ein solches Teilstück verwendet, muss es sowohl den Rand- als auch den Mittelbereich des Filters beinhalten (z. B. Sektor). Bei Verwendung von Kohle-Tabs zur Montage auf dem Probenträger kann es unter Umständen nach einiger Zeit zu Veränderungen in der Oberflächenbeschaffenheit der Filter kommen, so dass es sinnvoll ist, ein Teilstück des Filters als Rückstellprobe aufzubewahren.

3.2 Vorbereitung der Referenzproben

Von den Referenzproben (Materialproben) werden Streupräparate hergestellt. Stückige Materialien werden zerkleinert (z. B. gebrochen, geschnitten, gesägt, geraspelt, geschabt), aus Fasermatten oder ähnlichen Produkten wird mit der Pinzette etwas Material entnommen. Diese so zerkleinerten Materialien werden so wie auch die Partikel von Pulvern oder Pudern auf Kohle-Tabs aufgebracht, mit einem Spatel leicht festgedrückt und der lose aufliegende Rest vorsichtig entfernt (unter dem Abzug abklopfen oder abblasen). Die Kohle-Tabs werden auf den REM-Probenträgern befestigt.

4 Auswertung mit dem Rasterelektronenmikroskop

4.1 Allgemeine Verfahrenshinweise

Vergößerung

Unter Vergrößerung wird das Verhältnis der Länge eines Objektes auf dem Bild, das ausgewertet wird, zur tatsächlichen Länge dieses Objektes verstanden. Es handelt sich demzufolge um die Ist-Vergrößerung und nicht um die am Gerät angezeigte Nenn-Vergrößerung. Die Faserzählung ist bei einer Ist-Vergrößerung von 2.000 : 1 bis 2.500 : 1 durchzuführen. Hiervon kann abgewichen werden, wenn gezeigt werden kann, dass gleichwertige Ergebnisse erzielt werden.

In regelmäßigen Zeitabständen und nach Wartungs- und Reparaturarbeiten am REM muss mit Hilfe eines geeigneten Testpräparates (z. B. Kreuzgitter) die Vergrößerung überprüft werden.

Beschleunigungsspannung

Die Anregungsspannung für die Aufnahme der EDX-Spektren soll mindestens 15 kV betragen. Sowohl der Mg-K α -Peak von Chrysotil als auch der Fe-K α -Peak von Krokydolithfasern müssen sicher detektiert werden können. Für die stabile Abbildung organischer Fasern kann es notwendig sein, mit einer Beschleunigungsspannung von 10 kV oder weniger zu arbeiten. Morphologische Details werden durch eine deutlich niedrigere Beschleunigungsspannung (z. B. 3 kV) wesentlich besser erkennbar (siehe Abbildung 4).

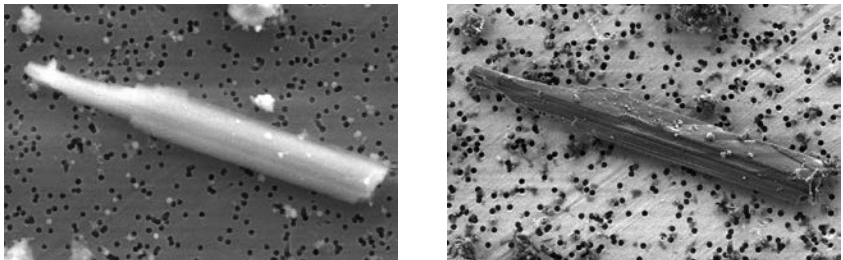


Abb. 4: Anorganische Faser auf Kernporenfilter (0,4 μ m Poren) bei 15 kV und bei 3 kV

Kippwinkel

Die Probe darf für die Auszählung nicht gekippt werden (Kippwinkel 0°).

Sichtbarkeit dünner Fasern

Alle REM-Parameter (insbesondere Vergrößerung, Beschleunigungsspannung, Strahldurchmesser, Arbeitsabstand, Rasterzeit) müssen so gewählt werden, dass auch sehr dünne und kontrastschwache Fasern noch sichtbar sind. Dazu wird bei der für die Zählung gewählten Vergrößerung eine gerade noch sichtbare Faser auf einem Testpräparat mit Chrysotilfasern nach Abschnitt 1.5 ausgesucht. Die Breite D dieser Faser wird anschließend bei einer Vergrößerung von mindestens 10.000 : 1 bestimmt. Ist sie $\leq 0,2 \mu\text{m}$, so ist die Mindestanforderung an die Sichtbarkeit von faserförmigen Partikeln erfüllt. Ist diese Mindestanforderung auch nach mehreren Versuchen nicht erfüllt, müssen die REM-Parameter entsprechend angepasst und die Sichtbarkeitskontrolle wiederholt werden. Diese Kontrolle muss einmal pro Arbeitswoche sowie nach Wartungs- und Reparaturarbeiten am REM vorgenommen werden.

EDX-Analyse

Für die Aufnahme der EDX-Spektren muss ein Detektor verwendet werden, der für die Analyse leichter Elemente geeignet ist (Linienpektrum mit Elementen der Ordnungszahl $Z \geq 11$). Die Einstellungen der Betriebsparameter müssen so gewählt werden, dass eine Chrysotilfaser von $\leq 0,2 \mu\text{m}$ Durchmesser innerhalb einer maximalen Messzeit von 100 s ein hinreichend ausgeprägtes Röntgen-Emissionsspektrum liefert (vergleiche Abschnitt 4.3). Das bedeutet, dass für die Mg- und für die Si-Linie bei Chrysotil ein Verhältnis der Intensitäten $S > U$ erreicht werden muss (S = Signalthöhe über Untergrund, U = Untergrundsignal bei dieser Energielage). Gleichzeitig ist auf die notwendige Randbedingung $S > 3 \cdot \sqrt{U}$ für die entsprechende Energielage zu achten [1]. In der Regel muss für die EDX-Analyse die Vergrößerung am REM $\geq 5.000 : 1$ eingestellt werden.

Für die EDX-Analyse ist ein möglichst großer Raumwinkel des Detektorsystems erwünscht. Die Identifizierbarkeit von Fasern einer Breite um $0,2 \mu\text{m}$ ist nur bei Raumwinkeln $> 10^{-3}$ sr gesichert.

In regelmäßigen Zeitabständen und nach Wartungs- und Reparaturarbeiten an der EDX-Anlage muss eine Überprüfung und gegebenenfalls Kalibrierung der Energielage und der Intensitätsverhältnisse der Peaks durchgeführt werden.

Auswertung

Die nach dem Test zur Sichtbarkeit dünner Fasern und zur EDX-Analyse (siehe oben) festgelegten Parameter sind für die Auswertung der Filterproben beizubehalten. Für die EDX-Analyse und für die Ermittlung der Faserabmessungen darf bei höherer Vergrößerung als der für die Faserzählung verwendeten gearbeitet werden.

Die Elementpeaks werden in die Kategorien A, B und C eingeteilt, die wie folgt definiert sind [1]:

- Kategorie A: $3U < S$
- Kategorie B: $U < S < 3U$
- Kategorie C: $S < U$ und signifikanter Nachweis des Elements (gerätespezifischer Nachweis in der Regel über Auswertesoftware⁴⁾; generell gilt für signifikanten Nachweis: $S > 3 \cdot \sqrt{U}$ mit der Signalhöhe S über dem Untergrund und der Höhe des Untergrunds U).

4.2 Regeln für die Faserzählung

Grundlage für die Faserzählung sind die Kriterien nach WHO [2].

- Als Faser im Sinne dieser Regel wird jedes Objekt gezählt, das eine Länge $L > 5 \mu\text{m}$, eine Breite $D < 3 \mu\text{m}$ und ein Länge/Breite-Verhältnis $L/D > 3 : 1$ aufweist. Als Länge gilt die rektifizierte Länge, als Breite die mittlere Breite (siehe Abbildung 5). Werden Fasern mit $D < 0,2 \mu\text{m}$ gezählt, müssen diese im Auswerteprotokoll gesondert aufgeführt werden.
- Ausbauchungen, wie sie beispielsweise durch Harz oder Binder bei künstlichen Mineralfasern (KMF) auftreten können, werden ignoriert. Im Zweifelsfall wird $D < 3 \mu\text{m}$ angenommen [2].

⁴⁾ Bei Zuordnung eines Elements zu einem Signal im Spektrum ist die mögliche Interferenz mit Linien anderer Elemente zu beachten.

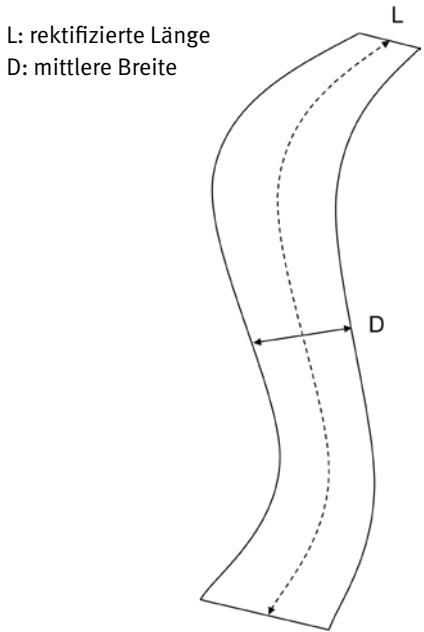


Abb. 5
Ermittlung der Länge und Breite einer Faser

- Fasern, die an nicht faserförmige Partikel angelagert sind oder angelagert zu sein scheinen, werden behandelt, als ob die nicht faserförmigen Partikel nicht vorhanden wären. Es wird jedoch nur die sichtbare Länge der Fasern berücksichtigt, es sei denn, die Fasern gehen durch die Partikel hindurch und scheinen nicht unterbrochen zu sein.
- Fasern, deren beide Enden im Inneren des Zählfeldes liegen, erhalten das Zählgewicht 1, Fasern mit nur einem Ende im Zählfeld erhalten das Zählgewicht $\frac{1}{2}$, Fasern mit beiden Enden außerhalb des Zählfeldes erhalten das Zählgewicht 0.
- Ein Faseragglomerat, das an einer oder mehreren Stellen seiner Länge kompakt und ungeteilt erscheint, sich aber an anderen Stellen in separate Fasern zu teilen scheint, wird als gesplattene Faser angesehen. Jedes andere Agglomerat, in dem Fasern sich berühren oder kreuzen, wird als Bündel angesehen.

- Eine aufgespaltene (aufgespleißte) Faser zählt als 1 Faser, sofern die oben genannten Kriterien erfüllt sind. Ihre Breite wird in dem nicht aufgespleißten Teil gemessen. Einander überlappende (überkreuzende) Fasern (Faserbündel oder -büschel) werden einzeln gezählt, wenn dies möglich ist.
- Überlappen sich so viele Fasern, dass sie nicht einzeln gezählt werden können (Faserbündel), so wird das Faserbündel nur dann als eine Faser gezählt, wenn seine Gesamtdimensionen die oben genannten Kriterien für Länge, Breite und Länge/Breite-Verhältnis erfüllen. Andernfalls bleibt das Faserbündel unberücksichtigt.
- Falls mehr als ein Achtel einer Zählfeldfläche von Fasern oder Partikeln bedeckt ist, wird dieses Zählfeld nicht berücksichtigt.
- Falls mehr als 10 % der Bildfelder einer Filterprobe als überbelegt gewertet werden, ist diese Filterprobe zu verwerfen.
- Es ist eine Fläche von mindestens 0,15 mm² auszuwerten.
- Es sind insgesamt mindestens 50 Fasern (ohne Calciumsulfatfasern) zu zählen und zu identifizieren. Sollten auf der untersuchten Filterfläche von 0,15 mm² noch nicht 50 Fasern (ohne Calciumsulfatfasern) gefunden worden sein, sind weitere Bildfelder auszuwerten, bis diese Faserzahl erreicht ist. Wird die geforderte Faserzahl nach Auswertung von mindestens 0,5 mm² Filterfläche nicht erreicht, kann die Auswertung beendet werden.
- Auszuwertende Bildfelder werden so ausgewählt, dass die gesamte Fläche des Filterabschnittes gleichmäßig berücksichtigt wird (ohne Bevorzugung der Randpartien oder des zentralen Filterbereichs) und Überlappungen der auszuzählenden Bildfelder ausgeschlossen sind. Zu empfehlen ist die mäanderförmige Verteilung der Bildfelder über die gesamte effektive Filterfläche.

Abbildung 6 zeigt schematisch Beispiele für die Anwendung der Faserzählregeln.

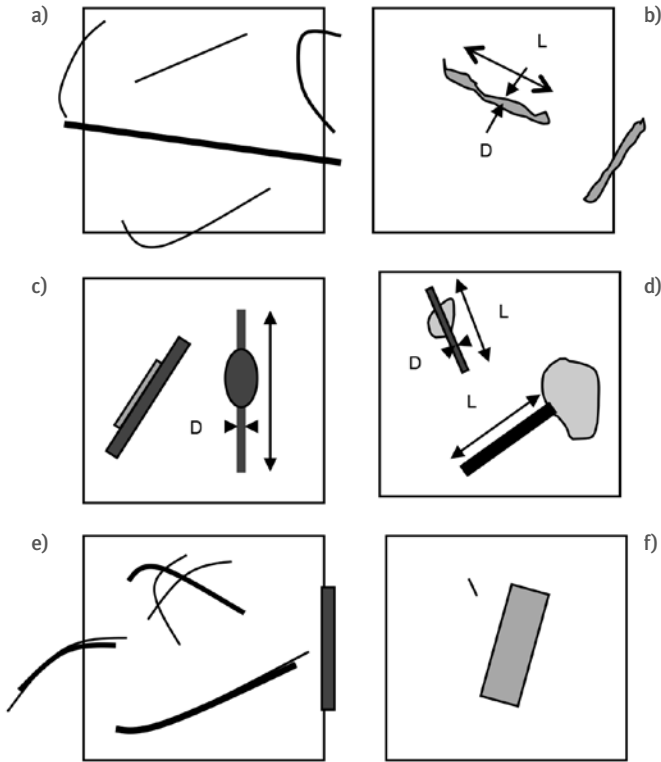


Abb. 6 Beispiele zur Anwendung der Faserzählregeln (die Länge der Bildkante entspricht 38 µm):

- a) 2 ½ Fasern: 5 Enden im Zählfeld.
- b) 1 ½ Fasern.
- c) 3 Fasern: Die beiden aneinanderliegenden Fasern sind deutlich unterscheidbar; die Ausbauchung wird für die Breitenbetrachtung ignoriert.
- d) 2 Fasern: Der sichtbare Teil der Faser wird berücksichtigt.
- e) 4 ½ Fasern: Agglomerat aus 3 Fasern, die Aufspleißungen werden ignoriert. Die Enden der an der rechten Kante liegenden Faser werden als außerhalb befindlich angesehen.
- f) 0 Fasern: Die faserförmigen Partikeln sind zu kurz oder zu dick.

4.3 Faseridentifizierung

Nach diesem Verfahren werden Chrysotilfasern, Amphibolasbestfasern, Calciumsulfatfasern, gegebenenfalls anorganische Produktfasern und sonstige anorganische Fasern unterschieden. In die Gruppe „sonstige anorganische Fasern“ werden alle Fasern eingestuft, die nicht als Asbest, Calciumsulfatfasern oder gegebenenfalls Produktfasern identifiziert werden können, jedoch ein Linienspektrum mit Elementen der Ordnungszahl $Z \geq 11$ (Ausnahme: Kohlenstofffasern) ergeben. Zu organischen Fasern siehe Abschnitt 4.5.

Eine Faseridentifizierung, bei der zwischen Chrysotil, Amphibolasbesten, Calciumsulfat, gegebenenfalls anorganischen Produktfasern und sonstigen anorganischen Fasern unterschieden wird, lässt sich anhand einer halbquantitativen Beurteilung der Elementspektren durchführen. Beispiele für Spektren anorganischer Fasern zeigen die Abbildungen im Anhang 1 (die Goldpeaks werden durch die Goldbeschichtung des Kernporenfilters verursacht). Da die Peakhöhen von dem verwendeten Detektor und den Geräteparametern abhängen, müssen unter den gegebenen Bedingungen eigene Referenzspektren von den Faserarten, z. B. unter Zuhilfenahme von Standardproben, erstellt werden.

Bei der praktischen Durchführung der Analyse ist darauf zu achten, dass der Elektronenstrahl stabil (ohne Drift) auf die Faser gerichtet ist und dabei eventuell anhaftende oder benachbarte Partikel möglichst weit von seinem Auftreffpunkt entfernt liegen.

Zur Identifizierung der Fasern sind die in den Tabellen 2 und 3 genannten Kriterien anzuwenden. Zur Benennung und Beschreibung verschiedener Faserarten wird die in Anhang 3 aufgeführte Fasersystematik empfohlen.

Bei Messungen im Bereich der Verwendung mineralischer Rohstoffe stehen ergänzende Kriterien zur Abgrenzung der Asbestminerale von anderen Mineralen ähnlicher Zusammensetzung zur Verfügung [10].

Faserart	Identifizierungskriterien	Bemerkungen
Chrysotil	<ul style="list-style-type: none"> • Mg- und Si-Peak deutlich (Kategorie A oder B) • Fe- und Mn-Peak möglich (Kategorie C) • Al-Peak fehlend oder sehr klein (Kategorie C) 	Chrysotil aus Asbestzement: zusätzlicher Ca-Peak durch Bindemittelreste möglich. Chrysotil aus Magnesiestrich: zusätzlicher Cl-Peak möglich.
Amphibolasbeste	Siehe Tabelle 3 und analytische Hinweise in [8]	Da es sich bei den Amphibolasbesten um eine Mineralgruppe handelt, unterscheiden sich die Spektren hinsichtlich detektierter Elemente und deren Peakhöhen.
Calciumsulfat	<ul style="list-style-type: none"> • Ca-Peak deutlich • S-Peak deutlich (teilweise Überlagerung durch M-Linie des Au) 	
Talk	Mg- und Si-Peak deutlich	Bei Talk ist das Verhältnis von Si- zu Mg-Signal größer als bei Chrysotil.
Aluminiumsilikatfasern	Al- und Si-Peak deutlich	Al und Si in etwa gleichen Anteilen, keine weiteren Elemente.
Produktfasern	Vergleiche Abschnitt 4.4	Bei gebrauchten Produktfasern können zusätzlich zu den typischen Peaks andere Elementpeaks, z. B. von Fe, auftreten.
Sonstige anorganische Fasern	Alle Fasern, die ein anderes Elementspektrum für mindestens ein Element mit $Z \geq 11$ ergeben (Ausnahme: Kohlenstofffasern)	Typische Hauptelemente können sein: Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, weiterhin können auftreten: Ti, Mn, Ba, Zr, B.

Tabelle 2: Identifizierungskriterien für Faserstäube

Amphibolasbest	Identifizierungskriterien	Bemerkungen
Aktinolith	<ul style="list-style-type: none"> • Si-, Fe-, Ca-Peak deutlich • Mg-Peak schwach bis deutlich • Na-Peak möglich • Al-Peak fehlend oder sehr klein 	Übergänge zu Tremolit vorhanden.
Amosit	<ul style="list-style-type: none"> • Si-, Fe-Peak deutlich • Mg-Peak und Ca-Peak möglich • Al-Peak fehlend oder sehr klein 	
Anthophyllit	<ul style="list-style-type: none"> • Si-, Mg-Peak deutlich • Fe-Peak schwach bis deutlich • Al-Peak fehlend oder sehr klein 	Eine Abgrenzung zu Fe-haltigem Talk ist mit dieser Methode in der Regel nicht möglich.
Krokydolith	<ul style="list-style-type: none"> • Si-, Fe-Peak deutlich • Na-Peak schwach • Al-Peak fehlend oder sehr klein 	
Tremolit	<ul style="list-style-type: none"> • Si-, Mg-, Ca-Peak deutlich • Al-Peak fehlend oder sehr klein 	Übergänge zu Aktinolith vorhanden.

Tabelle 3: Unterscheidungsmerkmale für Amphibolasbeste

(Anmerkung: Ist eine exakte Unterscheidung notwendig, sind die ergänzenden Identifikationskriterien [10] anzuwenden und muss die EDXA für die quantitative Elementbestimmung mit geeigneten Standards kalibriert sein.)

Fasern, welche nicht einer der in den Tabellen 2 und 3 genannten Faserarten zuzuordnen sind, werden für die Berechnung des Analysenergebnisses nicht berücksichtigt.

Die Identifizierung nach den hier genannten Kriterien ist nicht in jedem Fall eindeutig [8]. Im Zweifelsfall sind Kenntnisse über die im Arbeitsbereich verwendeten Materialien zu berücksichtigen. In allen Fällen sind die M- und L-Linien der Goldbeschichtung des Filters zusätzlich im Spektrum vorhanden und führen zu Überlagerungen unter anderem mit der K-Linie des Schwefels.

Die Identifizierungskriterien sind zu modifizieren, wenn

- die REM-EDX-Spektren von Asbest-Standards gerätebedingt abweichende Peakhöhen und/oder Signal-zu-Untergrund-Verhältnisse aufweisen,
- die speziell in dem von der Untersuchung betroffenen Produkt vorliegenden Asbestfasern bezüglich ihrer Elementzusammensetzung von den Standards abweichen (z. B. signifikanter Anteil eines nichttypischen Elements, siehe auch Abbildung A1.1 im Anhang).

Fehlen in dem Elementspektrum Peaks für Elemente mit $Z \geq 11$ (mit Ausnahme der Goldpeaks), kann dies als Hinweis auf unter Umständen nach der Veraschung verbliebenes organisches Material gewertet werden. Auch beim Vorliegen sehr dünner anorganischer Fasern ($D < 0,2 \mu\text{m}$) ist damit zu rechnen, dass keine auswertbaren oder unvollständigen Elementsignale erscheinen.

4.4 Anorganische Produktfasern

Für die Einstufung von Fasern als anorganische Produktfasern müssen die Spektren der Fasern auf dem Messfilter weitgehend (nach den im Folgenden genannten Kriterien) mit denen im Produkt übereinstimmen. Deshalb werden für das in Frage kommende Produkt Referenzproben nach Abschnitt 3.2 hergestellt und darin an unterschiedlichen Stellen Elementspektren dünner Fasern als Referenzspektren aufgenommen. Die Aufnahme dieser Referenzspektren muss – unter Umständen mit Ausnahme der verwendeten Vergrößerung – unter den gleichen Gerätebedingungen erfolgen, wie die Auswertung des Messfilters.

Zur Charakterisierung dieser Referenzspektren werden für jede Materialprobe Elementspektren für jeweils zehn dünne Fasern aufgenommen [1]. Dabei wird für das Produkt

- ein Elementpeak der Kategorie A zugeordnet, wenn er bei mindestens 9 von 10 Fasern den Kriterien der Kategorie A (siehe Abschnitt 4.1) entspricht.
- ein Elementpeak der Kategorie B zugeordnet, wenn er bei mindestens 7 von 10 Fasern den Kriterien der Kategorien A oder B entspricht und das Produkt die Bedingung für die Zuordnung zu A nicht erfüllt.

Beim Vergleich der für Fasern auf dem Messfilter gefundenen Spektren mit den Referenzspektren müssen

- Elementpeaks der Kategorie A im Referenzspektrum wenigstens in der Kategorie B auf dem Messfilter wiedergefunden werden und
- von den Elementpeaks der Kategorie B im Referenzspektrum wenigstens ein Drittel der Elemente für die Faser auf dem Messfilter wiedergefunden werden (hier nicht unbedingt als Kategorie B-Peak) sowie
- mindestens ein Elementpeak der Kategorie B im Referenzspektrum als Kategorie B oder C für die Faser auf dem Messfilter gefunden werden, wenn das Referenzspektrum weniger als drei Peaks der Kategorie B aufweist,

um die gefundene Faser als Produktfaser zu interpretieren. Bei Produktfasern aus künstlichen Mineralfasern muss zusätzlich die Morphologie (parallele Kanten) mit derjenigen der Fasern im Produkt vereinbar sein.

Zur Benennung und Beschreibung verschiedener Faserarten wird die in Anhang 3 aufgeführte Fasersystematik empfohlen. Eine Übersicht über den Chemismus anorganischer Fasern befindet sich in Anhang D der VDI-Richtlinie 3492 [1].

Bei der Identifizierung von Kohlenstoff-/Carbonfasern als Produktfasern sind zwei Aspekte zu beachten. Zum Einen handelt es sich bei den auf den Probenfiltern gefundenen Fasern dieser Art um splitterförmige Fasern (siehe Abschnitt 4.5). Zum Anderen können diese Fasern anhand des Elementspektrums nur eingeschränkt von anderen organischen Fasern oder Partikeln aus der Matrix von Kohlenstoff-/Carbonfaser-Verbundwerkstoffen unterschieden werden.

4.5 Splitterförmige Fasern

Neben den in technischen Produkten primär vorhandenen alveolengängigen Fasern können in unterschiedlichen Materialien auch splitterförmige Fasern auftreten, die erst durch mechanische Zerkleinerung aus größeren Partikeln/Stücken entstehen. Das Entstehen von Fasern der kritischen Abmessungen geschieht dabei zufällig. Neben faserförmigen Partikeln entstehen zumeist überwiegend anders geformte Partikel.

Der Anteil der alveolengängigen Fasern am zersplitterten Material liegt typischerweise bei deutlich weniger als 0,1 Masse-%. Beispiele hierfür sind körniges Siliziumcarbid und nicht alveolengängige Carbonfasern (typischer Faserdurchmesser vor Zerkleinerung: 7 bis 9 μm) oder Textilglasfasern (Durchmesser 10 bis 25 μm). Alveolengängige Fasern, die erst durch mechanische Bearbeitung aus nicht faserförmigen Materialien oder aus Fragmenten und Bruchstücken dicker Fasern entstanden sind, werden als splitterförmige Fasern bezeichnet.

Zur Identifizierung splitterförmiger Fasern wird in Analogie zu dem in Abschnitt 4.4 genannten Verfahren zur Bestimmung der Produktfaserkonzentration vorgegangen. Die Referenzspektren werden dann an den gröberen Partikeln bzw. dicken Fasern aufgenommen, aus denen die splitterförmigen Fasern generiert werden können.

4.6 Organische Fasern

Sollen bei der Untersuchung auch organische Fasern berücksichtigt werden, darf die Probe nicht verascht werden. Die optimale Beschleunigungsspannung muss anhand der Probe ermittelt werden (mitunter weniger als 10 kV), um eine stabile Abbildung zu erzielen. Dabei ist sicherzustellen, dass Fasern der Dicke 0,2 μm oder, wenn so dünne Fasern in der Probe nicht vorkommen, die dünnsten vorkommenden Fasern sicher erkannt werden können. Es sollen fensterlose Detektoren oder Detektoren mit ultradünnen Fenstern verwendet werden, mit denen leichte Elemente ab $Z = 6$ (Kohlenstoff) nachgewiesen werden können. Fasern werden dann als organische Fasern eingestuft, wenn die Hauptpeaks Elementen mit $Z < 11$ zuzuordnen sind (Ausnahme: Kohlenstofffasern). In speziellen Fällen können auch Cl oder S zu beobachten sein.

Eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Arten organischer Fasern ist mit dieser Methode nicht möglich. Unter Umständen können morphologische Charakteristiken brauchbare Hinweise liefern [11].

4.7 Berechnen der Faseranzahlkonzentration und Darstellung des Messergebnisses

Das Verfahren liefert als Analysenergebnis die Faseranzahlkonzentrationen C_i (Fasern der Gruppe i je m^3 Luft) an anorganischen Fasern in der Luft in Arbeitsbereichen mit den Kriterien $0,2 \mu\text{m} \leq D < 3 \mu\text{m}$, $L > 5 \mu\text{m}$ und $L/D > 3$.

C_1 : Chrysotilfasern

C_2 : Amphibolasbestfasern

C_3 : Calciumsulfatfasern

C_4 : Produktfasern (falls gemessen)

C_5 : sonstige anorganische Fasern

Die Faseranzahlkonzentration für die Fasergruppe i ($i = 1$ bis 5) wird wie folgt berechnet:

$$C_i = \frac{n_i \cdot A}{N \cdot a \cdot V}$$

Hierbei bedeuten:

C_i = Faseranzahlkonzentration für die Fasergruppe i in Fasern/ m^3

n_i = nach den Zählregeln ermittelte gewichtete Faserzahl für die Fasergruppe i („Zählergebnis“)

A = wirksame Filterfläche in mm^2

N = Anzahl der ausgewerteten Zählfelder

a = Fläche eines Zählfeldes in mm^2

V = Probeluftvolumen in m^3 mit $V = Q \cdot t$ (Q : Probeluftvolumenstrom in m^3/h , t : Probenahmedauer in h)

Fasern mit $D < 0,2 \mu\text{m}$ werden, falls gefunden, ohne Zuordnung zu einer Faserart gesondert aufgeführt.

Die gesonderte Erfassung der Fasern mit $D < 0,2 \mu\text{m}$ ist notwendig, da das internationale Referenzverfahren zur Bestimmung der Faserkonzentration auf einem lichtmikroskopischen Verfahren basiert, mit dem nur Fasern mit $D \geq 0,2 \mu\text{m}$ erkannt werden. Aus diesem Grund gehen auch nur Fasern mit $D \geq 0,2 \mu\text{m}$ in das Messergebnis ein.

Die Darstellung des Messergebnisses für die Bestimmung von anorganischen Fasern richtet sich nach dem Messauftrag. Umfasst dieser nicht die Bestimmung der Asbestfaserkonzentration, wird kein Analyseergebnis für Chrysotil und Amphibol-asbest ausgewiesen. Da inzwischen überwiegend Messaufträge in Arbeitsbereichen mit künstlichen Mineralfasern vorliegen, würden ansonsten die für Asbest ausgewiesenen Nachweisgrenzen zu Irritationen führen.

Werden jedoch Asbestfasern in der Probe identifiziert, müssen diese mit ausgewiesen werden.

Produktfasern sind hingegen nur dann auszuweisen, wenn der Messauftrag dies vorsieht und eine Probe vom Referenzmaterial vorliegt.

Beim Zählergebnis „0 Fasern“ ist für die Faserzahlkonzentration in der Luftprobe als Messergebnis „< analytische Empfindlichkeit“ auszuweisen (siehe Abschnitt 5.3). Ist das Zählergebnis „1/2 Faser“, so wird es als „1 Faser“ ausgewiesen.

Tabelle 4 stellt beispielhaft die Messergebnisse für Zählergebnisse zwischen 0 und 3 Fasern dar.

Wird die Summe von zwei oder mehr Faserklassen ausgewiesen, wird hierfür die Summe der berechneten Messergebnisse je Faserart addiert.

Zählergebnis	Messergebnis [Fasern/m ³]	95 %-Vertrauensbereich [Fasern/m ³]
0	< 5.000	0 – 15.000
1/2	5.000	130 – 27.860
1	5.000	130 – 27.860
2	10.000	1.200 – 36.130
3	15.000	3.090 – 43.840

Tabelle 4: Messergebnis für Zählergebnisse zwischen 0 und 3 Fasern bei Probenahme unter Standardbedingungen (NWG 15.000 Fasern/m³)

Im Analysenbericht sind grundsätzlich das Messergebnis, die Nachweisgrenze (NWG) und der 95 %-Vertrauensbereich auszuweisen.

Der relative Abstand der Ober- und Untergrenze des 95 %-Vertrauensbereichs vom Messwert hängt allein von der Zahl der gefundenen Fasern ab (siehe auch Anhang 2). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 7 dargestellt.

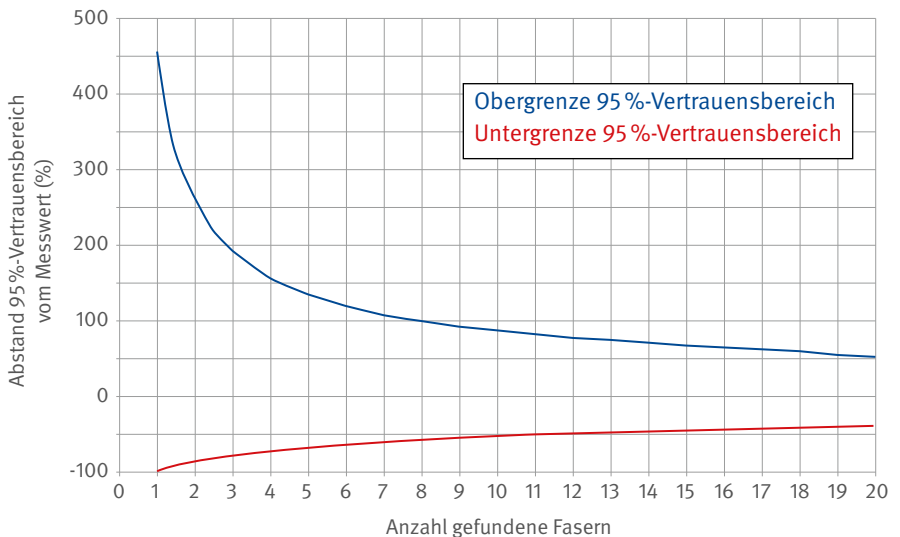


Abb. 7 95 %-Vertrauensbereich in Abhängigkeit von der Zahl der gefundenen Fasern (siehe auch Anhang 2)

4.8 Analysenbericht

Die Grundlage für die Erstellung des Analysenberichtes ist das in Anlehnung an [1] und [2] während der Auswertung geführte Auswerteprotokoll (Urprotokoll), bei dem zu allen gefundenen Fasern die Elemente aufzuführen sind.

Neben den bereits in DIN EN 17025 aufgeführten Angaben muss der Analysenbericht mindestens folgende Informationen enthalten:

- Daten zur Auswertung (effektive Filterfläche, Fläche und Anzahl der ausgewerteten Bildfelder, Bildfeldvergrößerung, Name des Sachbearbeiters),
- Angabe der verwendeten REM/EDXA-Systeme,
- Hinweis auf das angewandte Analysenverfahren (hier: BGI/GUV-I 505-46),
- Analyseergebnis, bestehend aus Faseranzahlkonzentrationen, Zahl der gefundenen Fasern (unterteilt nach Faserart Chrysotil, Amphibolasbest, Calciumsulfat, gegebenenfalls Produktfasern, sonstige anorganische Fasern und, wenn gewünscht, auch organische Fasern), Nachweisgrenze und 95 %-Vertrauensbereich;
- gegebenenfalls Bemerkungen (z. B. zu Fasern mit $D < 0,2 \mu\text{m}$, Faserbüscheln und Fasern mit $D > 3 \mu\text{m}$).

Zusätzlich können Abbildungen und Spektren der untersuchten Fasern zweckdienlich sein.

4.9 Bildung von Mittelwerten

In bestimmten Situationen kann es erforderlich sein, aus zwei oder mehreren Messwerten einen Mittelwert zu bilden (\bar{C}). Hierzu benötigt man die Faserzahl n_i (gefundene Fasern) und das ausgewertete Probeluftvolumen V_i jeder einzelnen Probe. Dafür werden mehrere Einzelwerte zusammengefasst, indem die Faserzahlen n_i und die ausgewerteten Probeluftvolumina V_i aufsummiert werden.

Das ausgewertete Probeluftvolumen V_i einer Probe berechnet sich anhand der ausgewerteten Fläche einer Probe (siehe auch Abschnitt 4.7).

$$V_i = \frac{V \cdot N \cdot a}{A}$$

Es gilt dann

$$\bar{C} = \frac{\sum n_i}{\sum V_i}$$

und für die Nachweisgrenze

$$E = \frac{3}{\sum V_i}$$

Zur Berechnung des 95%-Vertrauensbereiches werden die Werte $\sum n_i$ und $\sum V_i$ verwendet.

5 Beurteilung des Verfahrens

5.1 Messunsicherheit

Abweichungen der Messgröße (Faseranzahlkonzentration) vom wahren Wert können außer bei der Probenahme entstehen bei:

- der Probenpräparation (beim Hantieren und Schneiden der Filter, bei der Kaltveraschung),
 - der Auswertung (Geräteeinstellung, Auswahl der Zählfelder, Faserzählung und -identifizierung),
 - der Erfassung und Elementanalyse dünner Fasern mit $D < 0,2 \mu\text{m}$,
 - der Bewertung von Aggregaten aus Fasern und isometrischen Partikeln bei der Faserzählung,
 - der Interpretation der Spektren.
- Zufallsbedingte Streuungen der Messergebnisse aufgrund der Zählstatistik werden mit Hilfe der Poisson-Statistik abgeschätzt [9], vergleiche Anhang 2.

Die optimale Faserbelegungsdichte liegt im Bereich von etwa 100 bis 1.000 Fasern/mm². Auch hohe Anteile nicht faserförmiger Partikel beeinträchtigen die Auswertung, da sie diese stören und Fasern überdecken können. Dadurch ist sowohl die Erkennbarkeit als auch die Elementanalyse behindert.

Der 95 %-Vertrauensbereich für die Faseranzahlkonzentration aufgrund der Zählstatistik kann mittels der Poisson-Verteilung abgeschätzt werden (siehe Tabelle im Anhang 2). Zur Berechnung des Vertrauensbereiches werden in der in Abschnitt 4.7 angegebenen Formel die zu der gefundenen Faserzahl n_i gehörenden Vertrauensgrenzen λ_U und λ_0 eingesetzt.

5.2 Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze des Zählverfahrens ist unterschritten, wenn bei der REM-Auswertung keine Faser gefunden wurde. Unter Verwendung der Poisson-Statistik ergibt sich aus der oberen Vertrauensgrenze des 95 %-Vertrauensbereiches zu $x = 0$ mit $\lambda_0 \approx 3,0$ die Nachweisgrenze aus der Formel in Abschnitt 4.7 (als Zählergebnis wird $n = 3$ eingesetzt). Sie ist somit probenabhängig und abhängig vom Auswerteaufwand und beträgt beispielsweise für ein spezifisches Probenvolumen von 40 l/cm²

bei einer Auswertefläche von $0,5 \text{ mm}^2$ ca. $15.000 \text{ Fasern/m}^3$. Für ein spezifisches Probenvolumen von $1 \text{ m}^3/\text{cm}^2$, das nur unter optimalen Bedingungen bei sehr geringen Staubkonzentrationen auswertbare Proben liefert, wäre die Nachweisgrenze ca. 300 Fasern/m^3 für 1 mm^2 und ca. 600 Fasern/m^3 für $0,5 \text{ mm}^2$ Auswertefläche. Unter den oben genannten Probenahmebedingungen (Anströmgeschwindigkeit etwa 5 cm/s) würde dies eine Probenahmedauer von etwa 56 h bedeuten.

5.3 Analytische Empfindlichkeit (nach VDI 3492 [1])

Unter der analytischen Empfindlichkeit versteht man im Sinne dieses Verfahrens die berechnete Faseranzahlkonzentration in der Luftprobe, die *einer* einzelnen auf der Filterprobe gezählten Faser entspricht (siehe auch VDI 3492 [1] und ISO 14966 [13]). Der Wert der analytischen Empfindlichkeit ergibt sich, indem in die Formel aus Abschnitt 4.7 für das Zählergebnis der Wert 1 eingesetzt wird.

5.4 Selektivität

Das Verfahren ist selektiv nach den in den Abschnitten 4.2 und 4.3 genannten Kriterien für Chrysotilfasern, Amphibolasbestfasern, Calciumsulfatfasern, gegebenenfalls Produktfasern und sonstige anorganische Fasern.

Fehlinterpretationen, insbesondere bei der Identifizierung von Asbestfasern, sind möglich, wenn

- in den Arbeitsbereichen Silikatfasern mit einer asbestähnlichen Elementzusammensetzung Verwendung finden,
- die Fasern kontaminiert sind (z. B. bei Mörtel, Farb- und Anstrichmassen, Asbestzement, Magnesiumestrich und somit zusätzliche Peaks auftreten können),
- nicht faserförmige Partikel in unmittelbarer Nähe der Fasern liegen (dichte Belegung, Grobstaubpartikel, kettenförmige Rauchpartikel, insbesondere Schweißrauche, Tabakrauch),
- durch ungleichmäßige Partikelbelegung des Filters (hervorgerufen durch z. B. hohe Luftfeuchtigkeit bei der Probenahme, Anwesenheit von Nebel bzw. Tröpfchenaerosolen in der Probenluft).

6 Literatur

- [1] VDI 3492
Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Immissionen – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren
Beuth Verlag, Berlin 2013
- [2] Determination of airborne fibre number concentrations
A recommended method, by phase-contrast optical microscopy (membrane filter method)
World Health Organisation (WHO), Genf 1997
- [3] BGI/GUV-I 505-31
Verfahren zur Bestimmung von lungengängigen Fasern – Lichtmikroskopisches Verfahren
DGUV, Berlin 2013
- [4] BGI 505-30
Verfahren zur Bestimmung der Massenanteile von Chrysotilasbest und Amphibolasbesten
Carl Heymanns Verlag, Köln 1991
- [5] Richtlinie für die Bewertung und Sanierung schwach gebundener Asbestprodukte in Gebäuden (Asbest-Richtlinie)
Mitteilungen DIBt, 3/1996, S. 88
- [6] Messung von Gefahrstoffen
BIA-Arbeitsmappe, Kennzahl 3030
Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1997
- [7] TRGS 402
Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen
BArbBl 11/1997, S. 27
- [8] Messung von Gefahrstoffen.
BIA-Arbeitsmappe, Kennzahl 7487
Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1997

- [9] Sachs, L.
Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden
Springer-Verlag, Berlin 1984
- [10] Mattenklott, M.
Identifizierung von Asbestfasern in Stäuben, Pulvern und Pudern mineralischer Rohstoffe
Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 58, 1998, S. 15 – 22
- [11] Latzke, P.M., Hesse, R.
Textile Fasern. Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern
Deutscher Fachverlag, Frankfurt 1988
- [12] TRGS 521
Faserstäube
BArbBl 5/2002, S. 96
- [13] ISO 14966
Atmosphärische Luft – Bestimmung der Faserzahlkonzentration anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren,
Beuth Verlag, Berlin 2002, geändert durch ISO 14966 Technical Corrigendum 1, 2007
- [14] DIN EN 1094-1
Feuerfeste Erzeugnisse für Wärmedämmzwecke – Teil 1: Terminologie, Klassifizierung und Prüfverfahren für Erzeugnisse aus Hochtemperaturwolle zur Wärmedämmung
Beuth Verlag, Berlin 2008

Anhang 1

Beispiele für Spektren anorganischer Fasern

Alle Spektren:

- Abszisse in keV
- Filter goldbeschichtet
- 20 kV Beschleunigungsspannung

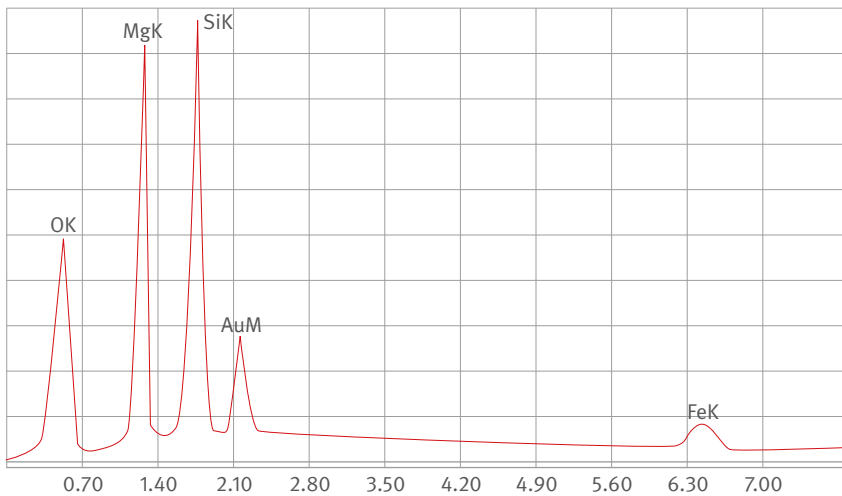


Abb. A1.1 Chrysotilspektrum (hier Beispiel eines Fe-haltigen Chrysotils, Verhältnis S/U ca. 1 für Fe)

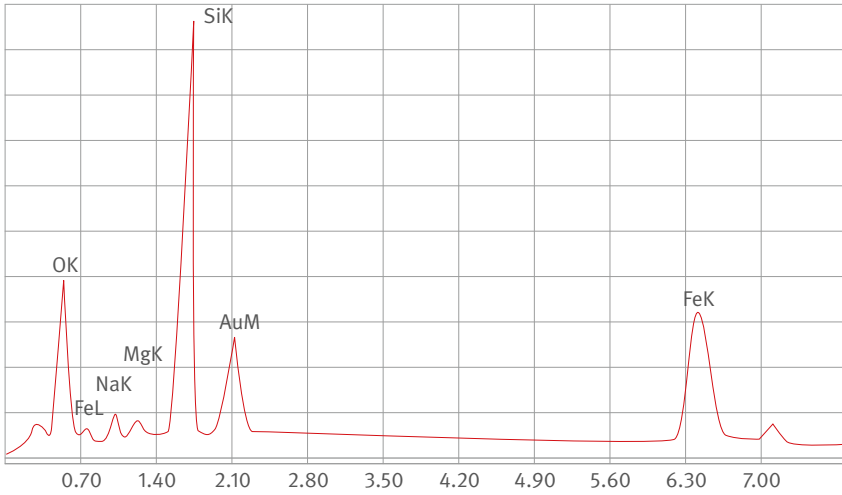


Abb. A1.2 Krokydolithspektrum

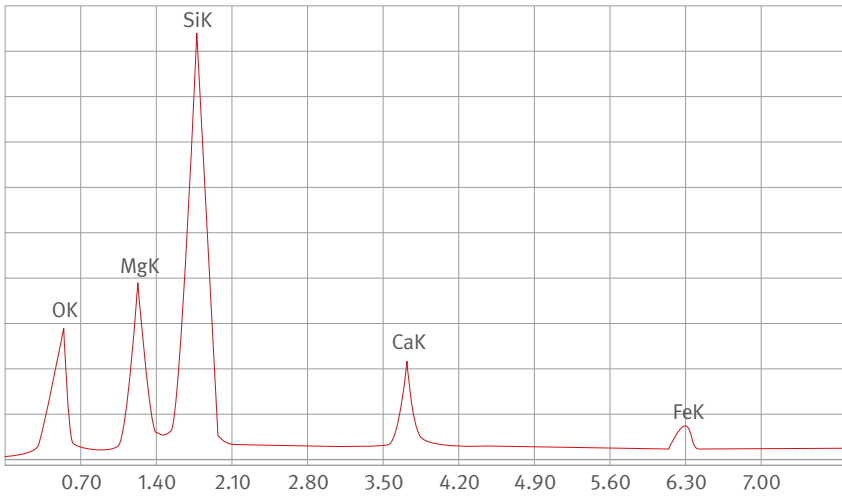


Abb. A1.3 Aktinolithspektrum

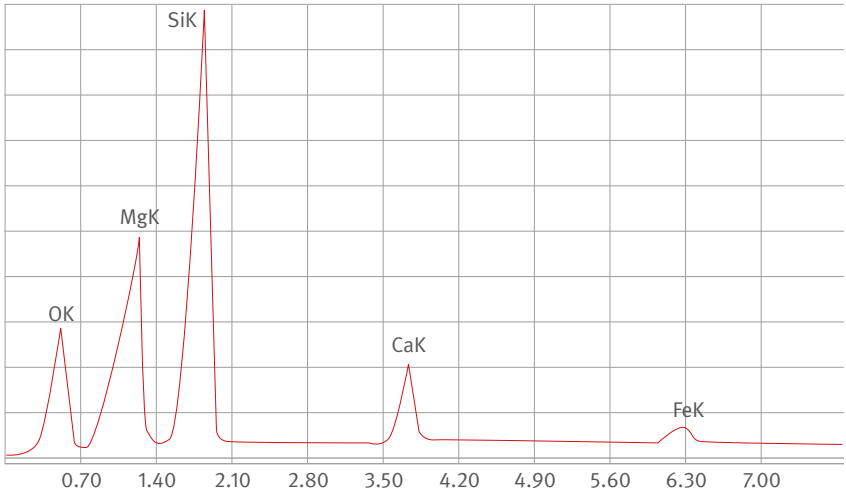


Abb. A1.4 Tremolitspektrum

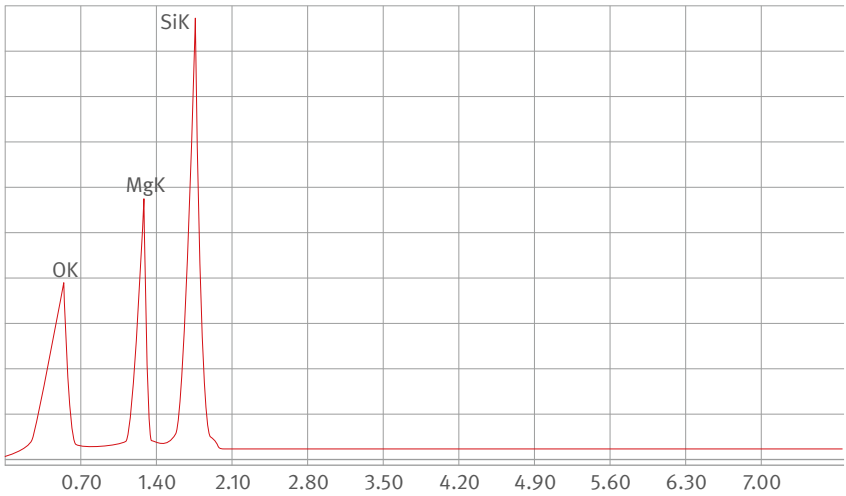


Abb. A1.5 Talkspektrum

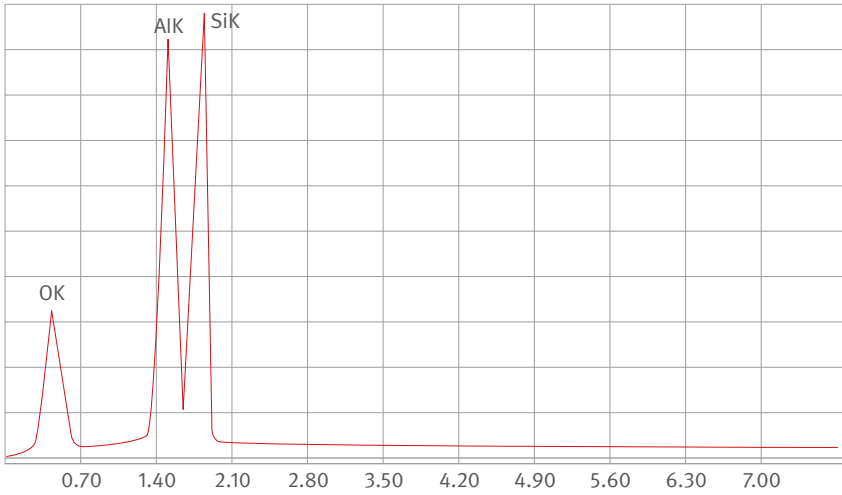


Abb. A1.6 Spektrum einer Aluminiumsilikatfaser

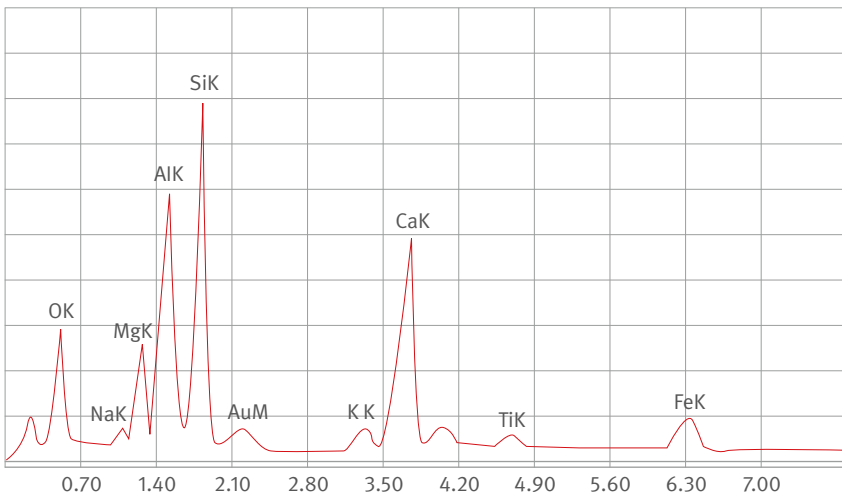


Abb. A1.7 Spektrum einer Steinwollfaser

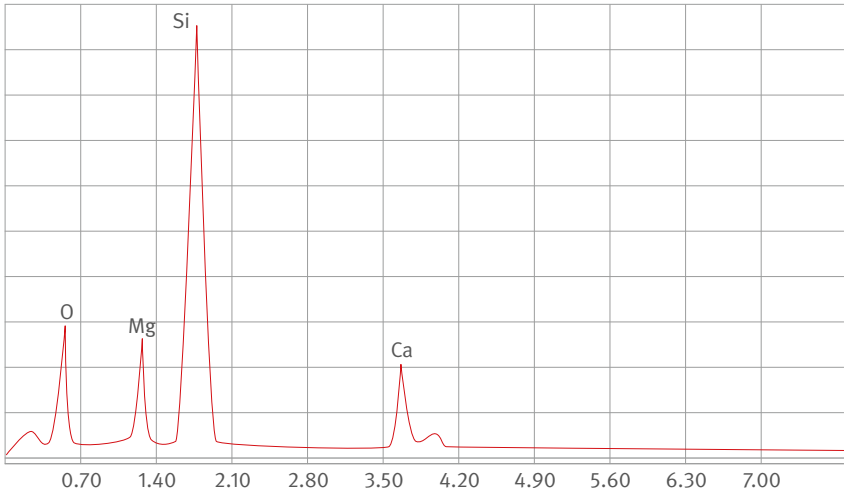


Abb. A1.8 Spektrum einer Hochtemperaturglasfaser

Anhang 2

Vertrauensbereichsgrenzen für das Zählergebnis

Tabelle: Untere und obere Grenzen λ_U und λ_O des 95%-Vertrauensintervalls eines Zählergebnisses x bei Anwendung der Poisson-Statistik

x	λ_U	λ_O	x	λ_U	λ_O
1	0,025	5,572	11,5	5,844	20,323
1,5	0,108	6,416	12	6,201	20,962
2	0,242	7,225	12,5	6,560	21,597
2,5	0,416	8,006	13	6,922	22,230
3	0,619	8,767	13,5	7,287	22,861
3,5	0,845	9,511	14	7,654	23,490
4	1,090	10,242	14,5	8,024	24,116
4,5	1,350	10,960	15	8,395	24,740
5	1,623	11,668	15,5	8,769	25,363
5,5	1,908	12,368	16	9,145	25,983
6	2,202	13,059	16,5	9,523	26,602
6,5	2,504	13,744	17	9,903	27,219
7	2,814	14,423	17,5	10,285	27,834
7,5	3,131	15,095	18	10,668	28,448
8	3,454	15,763	18,5	11,053	29,060
8,5	3,782	16,426	19	11,439	29,671
9	4,115	17,085	19,5	11,827	30,280
9,5	4,453	17,739	20	12,217	30,888
10	4,795	18,390	20,5	12,607	31,495
10,5	5,141	19,038	21	12,999	32,101
11	5,491	19,682	21,5	13,393	32,705

x	λ_U	λ_O
22	13,787	33,308
22,5	14,183	33,910
23	14,580	34,511
23,5	14,978	35,111
24	15,377	35,710
24,5	15,777	36,308
25	16,179	36,905
25,5	16,581	37,501
26	16,984	38,096
26,5	17,388	38,690
27	17,793	39,284
27,5	18,199	39,876
28	18,606	40,468
28,5	19,013	41,059
29	19,422	41,649
29,5	19,831	42,238
30	20,241	42,827
30,5	20,652	43,415
31	21,063	44,002
31,5	21,475	44,589
32	21,888	45,174
32,5	22,301	45,760
33	22,716	46,344

x	λ_U	λ_O
33,5	23,130	46,928
34	23,546	47,512
34,5	23,962	48,094
35	24,379	48,676
35,5	24,796	49,258
36	25,214	49,839
36,5	25,632	50,420
37	26,051	51,000
37,5	26,471	51,579
38	26,891	52,158
38,5	27,312	52,736
39	27,733	53,314
39,5	28,154	53,892
40	28,577	54,469
40,5	28,999	55,045
41	29,422	55,621
41,5	29,846	56,197
42	30,270	56,772
42,5	30,694	57,346
43	31,119	57,921
43,5	31,545	58,495
44	31,970	59,068
44,5	32,397	59,641

x	λ_U	λ_O
45	32,823	60,214
45,5	33,250	60,786
46	33,678	61,358
46,5	34,106	61,929
47	34,534	62,500
47,5	34,962	63,071
48	35,391	63,641
48,5	35,821	64,211
49	36,250	64,781
49,5	36,681	65,350
50	37,111	65,919
50,5	37,54	66,49
51	37,97	67,06
51,5	38,40	67,62
52	38,84	68,19
52,5	39,27	68,76
53	39,70	69,33
53,5	40,13	69,89
54	40,57	70,46
54,5	41,00	71,02
55	41,43	71,59
55,5	41,87	72,16
56	42,30	72,72

x	λ_U	λ_O
56,5	42,74	73,29
57	43,17	73,85
57,5	43,61	74,41
58	44,04	74,98
58,5	44,48	75,54
59	44,91	76,11
59,5	45,35	76,67
60	45,79	77,23
60,5	46,22	77,79
61	46,66	78,36
61,5	47,10	78,92
62	47,54	79,48
62,5	47,97	80,04
63	48,41	80,60
63,5	48,85	81,17
64	49,29	81,73
64,5	49,73	82,29
65	50,17	82,85
65,5	50,60	83,41
66	51,04	83,97
66,5	51,48	84,53
67	51,92	85,09
67,5	52,36	85,65

x	λ_U	λ_O
68	52,80	86,21
68,5	53,25	86,77
69	53,69	87,32
69,5	54,13	87,88
70	54,57	88,44
70,5	55,01	89,00
71	55,45	89,56
71,5	55,89	90,11
72	56,34	90,67
72,5	56,78	91,23
73	57,22	91,79
73,5	57,66	92,34
74	58,11	92,90
74,5	58,55	93,46
75	58,99	94,01
75,5	59,44	94,57
76	59,88	95,13
76,5	60,32	95,68
77	60,77	96,24
77,5	61,21	96,79
78	61,66	97,35
78,5	62,10	97,90
79	62,55	98,46

x	λ_U	λ_O
79,5	62,99	99,01
80	63,44	99,57
80,5	63,88	100,12
81	64,33	100,68
81,5	64,77	101,23
82	65,22	101,78
82,5	65,66	102,34
83	66,11	102,89
83,5	66,56	103,44
84	67,00	104,00
84,5	67,45	104,55
85	67,89	105,10
85,5	68,34	105,66
86	68,79	106,21
86,5	69,24	106,76
87	69,68	107,31
87,5	70,13	107,87
88	70,58	108,42
88,5	71,03	108,97
89	71,47	109,52
89,5	71,92	110,07
90	72,37	110,63
90,5	72,82	111,18

x	λ_U	λ_0
91	73,27	111,73
91,5	73,72	112,28
92	74,16	112,83
92,5	74,61	113,38
93	75,06	113,93
93,5	75,51	114,48
94	75,96	115,03
94,5	76,41	115,58
95	76,86	116,13
95,5	77,31	116,68
96	77,76	117,23
96,5	78,21	117,78
97	78,66	118,33
97,5	79,11	118,88
98	79,56	119,43
98,5	80,01	119,98
99	80,46	120,53
99,5	80,91	121,08
100	81,36	121,63

Anhang 3

Systematik anorganischer und organischer Fasern (Abbildungen geändert und aktualisiert nach Anlage 1 der TRGS 521 vom Mai 2002 [12])

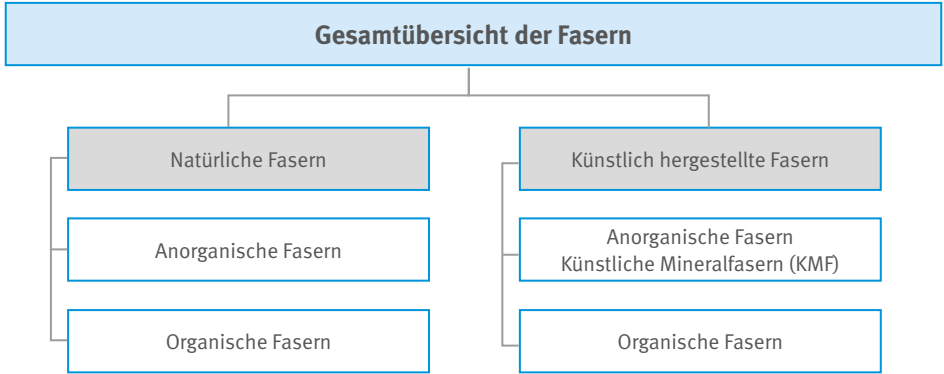


Abb. A3.1 Gesamtübersicht der Fasern

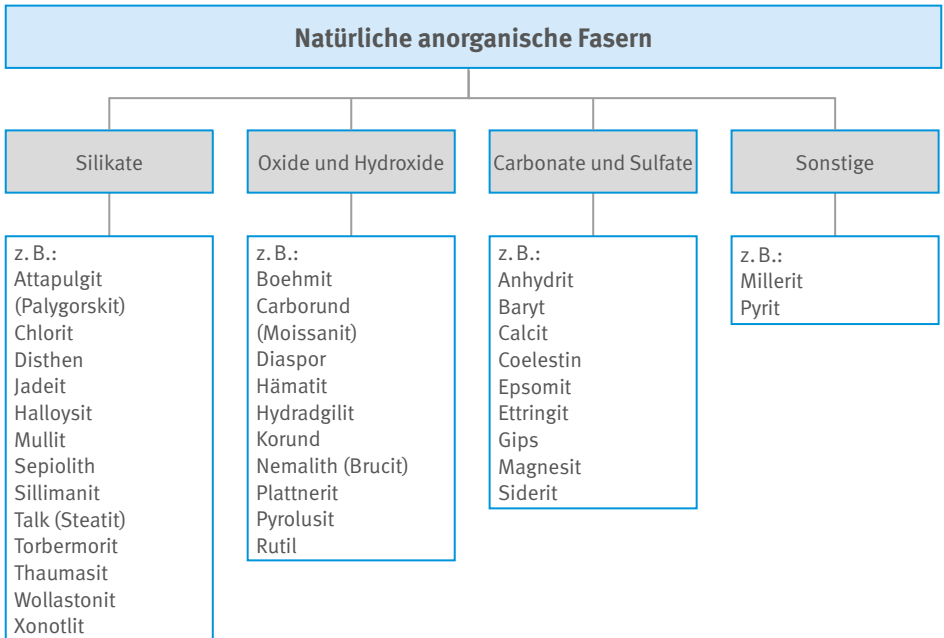


Abb. A3.2 Systematik der natürlichen anorganischen Fasern

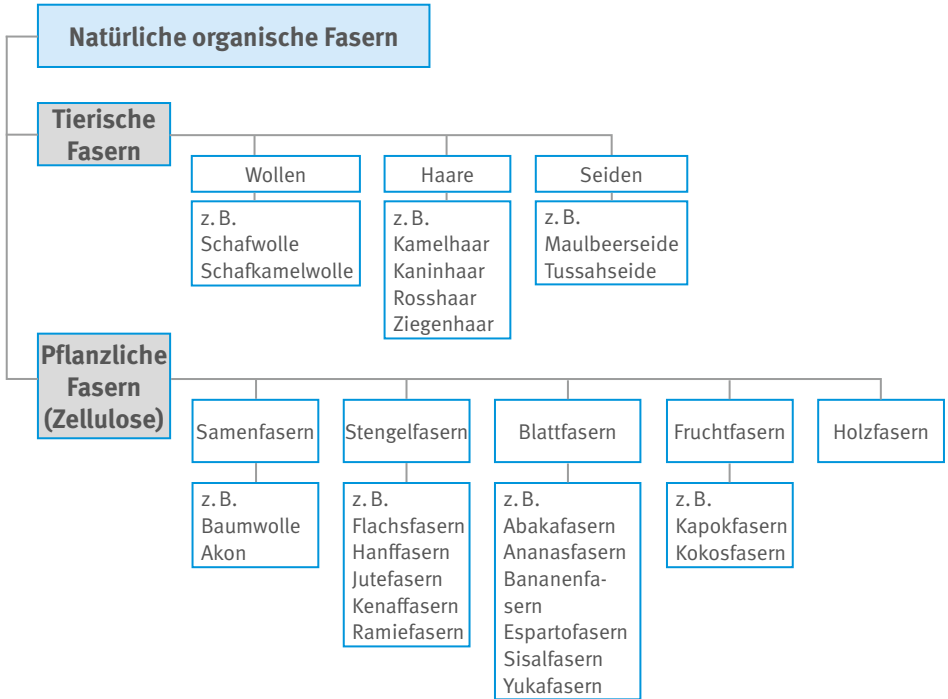


Abb. A3.3 Systematik der natürlichen organischen Fasern

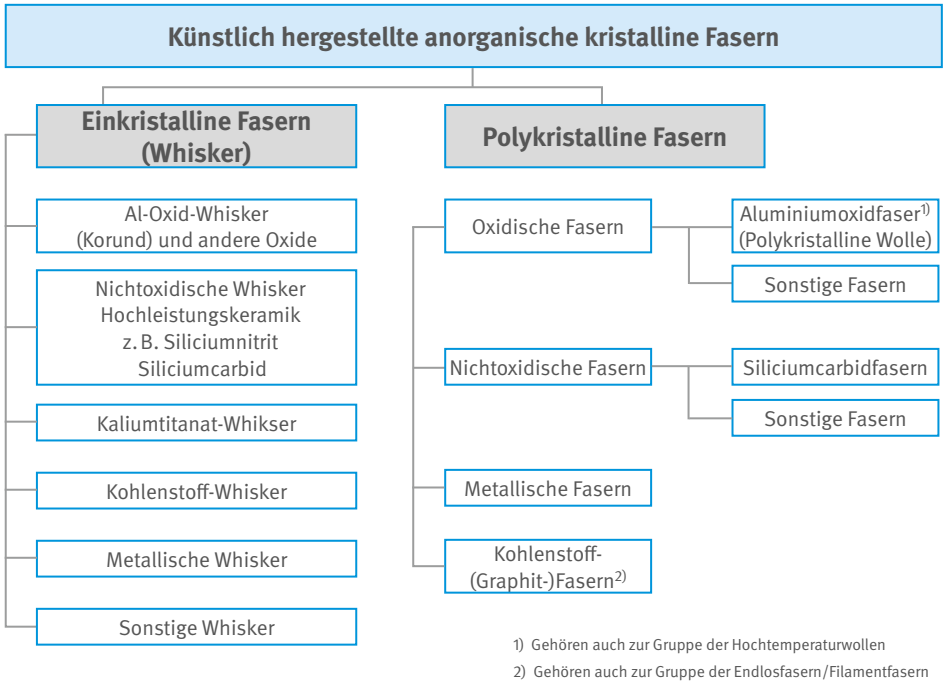
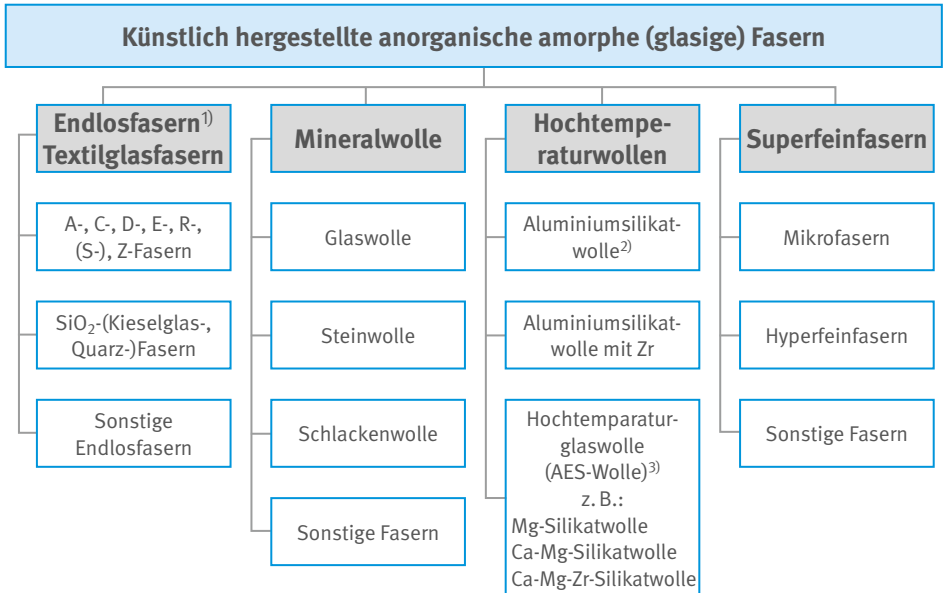


Abb. A3.4 Systematik der künstlich hergestellten anorganischen kristallinen Fasern



1) Endlosfasern: Begriff bezieht sich auf den Herstellungsprozess.

Hierzu gehören auch Kurz- und Stapelfasern (entstanden durch Zerhacken); weitere Bezeichnung: Filamentfasern.

2) Aluminiumsilikatfaser, frühere Bezeichnung: Keramikfaser oder Refractory ceramic fibre (RCF) [14]

3) AES: Alkaline Earth Silicate

Abb. A3.5 Systematik der künstlich hergestellten anorganischen amorphen (glasigen) Fasern

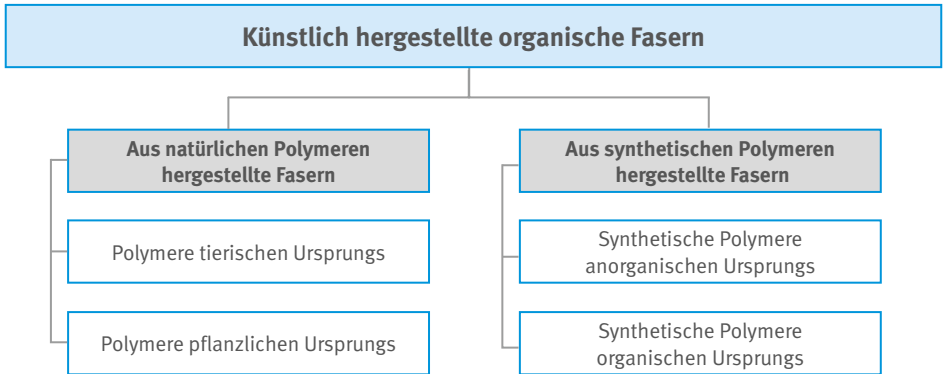


Abb. A3.6 Systematik der künstlich hergestellten organischen Fasern

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Mittelstraße 51
10117 Berlin
Tel.: 030 288763800
Fax: 030 288763808
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de