

Nachweisgrenzen der Bestimmung von Asbestfaserkonzentrationen und -massengehalten in Bezug auf Grenzwerte

M. Mattenklott

ZUSAMMENFASSUNG In Deutschland gibt es ein risiko-basiertes Grenzwertkonzept für Asbest mit einer Akzeptanz- ($10\,000\text{ F/m}^3$) und einer Toleranzkonzentration ($100\,000\text{ F/m}^3$). Da das spezifische Auswertekonzept für Fasermessungen eine vergleichsweise große Messunsicherheit (Poisson-Statistik) mit sich bringt, stellt die Überwachung der Einhaltung der Akzeptanzkonzentration an den Arbeitsplätzen schon bisher eine besondere Herausforderung dar. Insbesondere in staubigen Arbeitsbereichen, z. B. der Bauindustrie und beim Einsatz von (potenziell) asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen, stößt die Bestimmung der Asbestfaserkonzentration aufgrund der nur kurzen Probenahmezeiten an ihre Grenzen. Ein möglicher Ausweg kann hier die (Teil-)Automatisierung der Faserzählung sein. Erste Ansätze dazu werden derzeit in Forschungsprojekten entwickelt. Neben der reinen Zählung werden auch Konzepte zur automatisierten Identifizierung von anorganischen Fasern entwickelt. Unter Berücksichtigung der Möglichkeiten und Grenzen der Automatisierung sollten bestehende Analyseverfahren angepasst werden. Da auch die Bestimmung sehr geringer Asbest-Massengehalte mit einer großen Messunsicherheit behaftet ist, sind Grenzwerte (z. B. für das Inverkehrbringen), die sich an sehr geringen Massenanteilen orientieren, infrage zu stellen.

1 Einleitung

Die Bestimmung von Asbestfaserkonzentrationen erfolgt typischerweise mit mikroskopischen Analyseverfahren, in Deutschland zumeist mittels Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDXA). Die Verfahren zur Bestimmung von Arbeitsplatzexpositionen [1] und Innenraum- beziehungsweise Außenluftkonzentrationen [2] basieren dabei auf den Vorgaben der ISO-Richtlinie 14966 [3].

Im Unterschied zu gängigen Analyseverfahren zur Bestimmung von z. B. Metallen oder organischen Stoffen in Luft- und Materialproben, für die dezidierte Bestimmungsgrenzen ermittelt werden können, basiert die Ableitung von Verfahrenskenngrößen für die angewandten mikroskopischen Verfahren aufgrund der Art der Auswertung auf der Poisson-Statistik. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass die Messergebnisse mit einer zum Teil sehr großen Messunsicherheit verbunden sind.

Da die Grenzwerte für Asbest in Bezug auf die Möglichkeiten der Analyseverfahren sehr niedrig sind und Rahmenbedingungen der Messungen in Arbeitsbereichen in der Regel nur kurze Messdauern zulassen (siehe Abschnitt 4), werden Aussagen zur

Detection limits of the determination of asbestos fiber concentrations and mass contents in relation to limit values

ABSTRACT In Germany, there is a risk-based limit concept for asbestos with an acceptance ($10\,000\text{ F/m}^3$) and a tolerance ($100\,000\text{ F/m}^3$) concentration. At the European legislative level, a binding limit value of $10\,000\text{ F/m}^3$ for asbestos is currently being discussed. Monitoring compliance with the acceptance concentration at workplaces has been a particular challenge to date. One reason for this is the specific evaluation concept for fibre measurements, which is established due to the comparatively large measurement uncertainty (Poisson statistics). Especially in dusty working areas of the construction industry and when (potentially) asbestos-containing mineral raw materials are used, the determination of the asbestos fibre concentration reaches its limits due to the only short sampling times (overload of filters!). A possible way out here can be the (partial) automation of fiber counting. Initial approaches to this are currently being developed in research projects. In addition to pure counting, concepts for automated identification of inorganic fibers are also being developed. Taking into account the possibilities and limitations of automation, existing analytical procedures should be adapted.

Exposition häufig mit Messergebnissen im Bereich der Nachweisgrenze ermittelt. Gerade in Arbeitsbereichen, in denen vergleichsweise hohe Staubkonzentrationen auftreten, kann die Einhaltung des bestehenden Grenzwertes nur schwer kontrolliert werden.

Ein Umgang mit Asbest ist in den Ländern der Europäischen Union zwar grundsätzlich untersagt, aber neben dem Bereich der Asbestsanie rung, der strengen Auflagen unterliegt, können noch in zwei anderen Bereichen Asbestexpositionen auftreten. Zum einen beim Umgang mit mineralischen Rohstoffen, von denen bestimmte Arten Spuren von Asbest enthalten können. Zum anderen ist aber auch ein großer Bereich der Bauindustrie betroffen, der Umbauten im Gebäudebestand vornimmt. Dabei geht es nicht um Asbestsanierungen, sondern um Arbeiten an Wänden und Decken. In der Vergangenheit (etwa 1960 bis 1990, in Ausnahmen bis 1993) wurde Asbest als Zusatzstoff in unterschiedlichsten bauchemischen Produkten wie Spachtelmassen, Putzen und Fliesenklebern verwendet. Somit sind alle Arbeiten von Handwerkern an Wand- und Decken-Beschichtungen von Gebäuden, die bis Anfang der 1990er-Jahre errichtet bzw. saniert/umgebaut wurden, potenziell asbestexponiert.

2 Probleme mit der Definition von Asbest

Bei Diskussionen um die Nachweisgrenze der Bestimmung von Asbest in Luft- oder Materialproben ist zunächst ein signifikanter Unterschied der Definition von Asbest in Deutschland und anderen Ländern wie beispielsweise den USA zu beachten. In den USA werden Asbestfasern anhand ihrer Morphologie von Nicht-Asbestfasern (Cleavage Fragments usw.) unterschieden. Es besteht eine Einteilung in „asbestiforme“ und „non-asbestiforme“ Fasern. Nur asbestiforme Fasern werden als Asbest bewertet. In Deutschland hat eine derartige Unterscheidung immer wieder zu Problemen bei der Bewertung von Expositionen geführt, da die Einteilung in asbestiforme und non-asbestiforme Fasern zum Teil auch auf subjektiven Kriterien beruht. Betrachtet man die Länge-zu-Durchmesser-Verteilung von Fasern aus einem asbestiformen und einem non-asbestiformen Auftreten von Asbestmineralen, so überschneiden sich diese Verteilungen zumeist. Für die Fasern in der Schnittmenge gilt demnach, dass diese sowohl asbestiform als auch non-asbestiform sein können. Ist die Herkunft eines Partikelkollektivs bekannt, würde man dieses pauschal einer der beiden Gruppen zuordnen. Beim Antreffen einzelner Partikel bei der Auswertung von Luftproben ist dies jedoch nicht möglich. Demnach könnte ein Partikel mit einer bestimmten Morphologie, je nach Herkunft oder Begleitinformation, sowohl als Asbest bewertet werden als auch als non-asbestiformes Partikel unberücksichtigt bleiben. Derart unterschiedliche Interpretationen führen bei der Klärung möglicher Gefährdungen von Beschäftigten zu Widersprüchen.

Diskussionen zur Unterscheidung von asbestiformen und non-asbestiformen Fasern sind in Deutschland vermehrt in Bezug auf die Verwendung potenziell asbesthaltiger mineralischer Rohstoffe (z. B. Talkum, Schotter) in den 1990er-Jahren aufgekommen. Um eine einheitliche Beurteilungsgrundlage zu haben, hat man sich in Deutschland entschieden, die Definition von Asbest in Bezug auf mineralische Rohstoffe in der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 517 [4] zu konkretisieren:

Massengehalt an Asbest

Der Massengehalt an Asbest im Sinne dieser TRGS entspricht nicht zwangsläufig dem Massenanteil der Asbestminerale, da erst durch eine mechanische Zerkleinerung erkennbar wird, in welchem Ausmaß Asbestfasern aus den Asbestmineralen entstehen. Der Massengehalt an Asbest kann sich deshalb durch weitere Be- oder Verarbeitung verändern. Entscheidend für die Bestimmung des Massengehalts an Asbest sind die Auswerteregeln der in der Anlage 2 Teile 1 bis 4¹⁾ beschriebenen Analyseverfahren.

Asbestfasern

Als Asbestfasern werden solche Fasern bezeichnet, die nach ihrer chemischen Zusammensetzung den sechs Asbestmineralen zuzuordnen sind [5] und die Abmessungen nach World Health Organization (WHO; Länge > 5 µm, Durchmesser < 3 µm, Länge-zu-Durchmesser-

Verhältnis > 3:1) aufweisen. Es ist dabei unerheblich, ob eine Asbestfaser aus einem faserförmigen oder nicht-faserförmigen Vorkommen eines Asbestminerals freigesetzt wurde. Eine solche Unterscheidung kann an einem einzelnen Partikel in der Regel analytisch nicht sicher erfolgen.

Asbesthaltiges Material

Asbesthaltiges Material im Sinne dieser TRGS sind mineralische Rohstoffe und daraus hergestellte Gemische und Erzeugnisse, in denen Asbest nachgewiesen wurde.

Diese Definition bedeutet, dass bei der Analyse von Luft- und Materialproben aus Arbeitsbereichen mit Gewinnung, Bearbeitung oder Verwendung mineralischer Rohstoffe grundsätzlich alle Fasern, die ihrer chemischen Zusammensetzung nach den sechs Asbestmineralen entsprechen und in ihren Abmessungen den WHO-Kriterien genügen, als Asbestfasern bewertet werden. Ob in einem mineralischen Rohstoff Asbest enthalten ist, wird üblicherweise nicht an dem Produkt in kompakter Form ermittelt, sondern anhand des Staubes, der in Bereichen der höchsten Staubbelastung bei der Aufbereitung in den Gewinnungsbetrieben entsteht. Der ermittelte Asbest-Massegehalt wird dann aus den im entstehenden Staub festgestellten Asbestfasern abgeleitet. Sobald gemäß dieser Definition Asbestfasern gefunden werden, gilt das Material als asbesthaltig. Eine Grenze, unterhalb der ein Material als nicht mehr asbesthaltig gilt, besteht derzeit nicht. Diese Festlegung erfolgt aus präventiver Sicht, da auch geringste Asbest-Massegehalte noch zu relevanten Expositionen führen können.

Da die Definition auch auf konkrete, in der TRGS 517 aufgeführte Analysenverfahren verweist, sind diese somit Bestandteil der Definition. Die Bestimmung der Asbestfaserkonzentration wird dabei mit rasterelektronenmikroskopischen Verfahren durchgeführt, die den Auswertevorgaben der Richtlinie ISO 14966 [3] entsprechen. Für die Bestimmung des Asbest-Massegehalts wird die Probe als Pulver in einer Kornfraktion < 100 µm analysiert (liegt entweder als Pulver vor, z. B. Staub aus der Zerkleinerung im Betrieb oder Talkumpulver, oder wird durch Mahlung zerkleinert). Mittels Suspension wird ein Aliquot der Probe auf den Filter überführt. Für alle als Asbestfasern mit WHO-Abmessungen detektierten Fasern wird anhand der bekannten Länge, des Durchmessers und der Dichte die Masse berechnet. Somit kann mit Bezug auf die Gesamtmasse der Partikel auf dem Filter der Asbest-Massengehalt berechnet werden [4].

Als wesentlicher Unterschied im Hinblick auf die Asbestanalytik bleibt festzuhalten, dass in Deutschland als Asbestfasern betrachtete Partikel je nach Herkunft von Stäuben eine deutlich größere Variationsbreite in Bezug auf die Partikelmorphologie aufweisen als beispielsweise in den USA. Da auch splitterförmige Amphibolpartikel der Asbestminerale als Fasern erfasst werden, ist auch die Variationsbreite der Masse einzelner Asbestfasern groß. Bei der Bestimmung sehr geringer Asbest-Massegehalte (z. B. im Kontext von Putzen und Spachtelmassen) ist dies von Bedeutung (siehe Abschnitt 7).

Aktuell geht von der Vereinigung Forum Asbest Schweiz (FACH) aus eine neue Initiative der Frage nach, ob anhand spezifischer morphologischer Kriterien Asbestfasern differenziert in Klassen eingeteilt werden können, die dann möglicherweise unterschiedlich bewertet werden [6].

¹⁾ Verweis auf Analysenverfahren in der TRGS 517 [4].

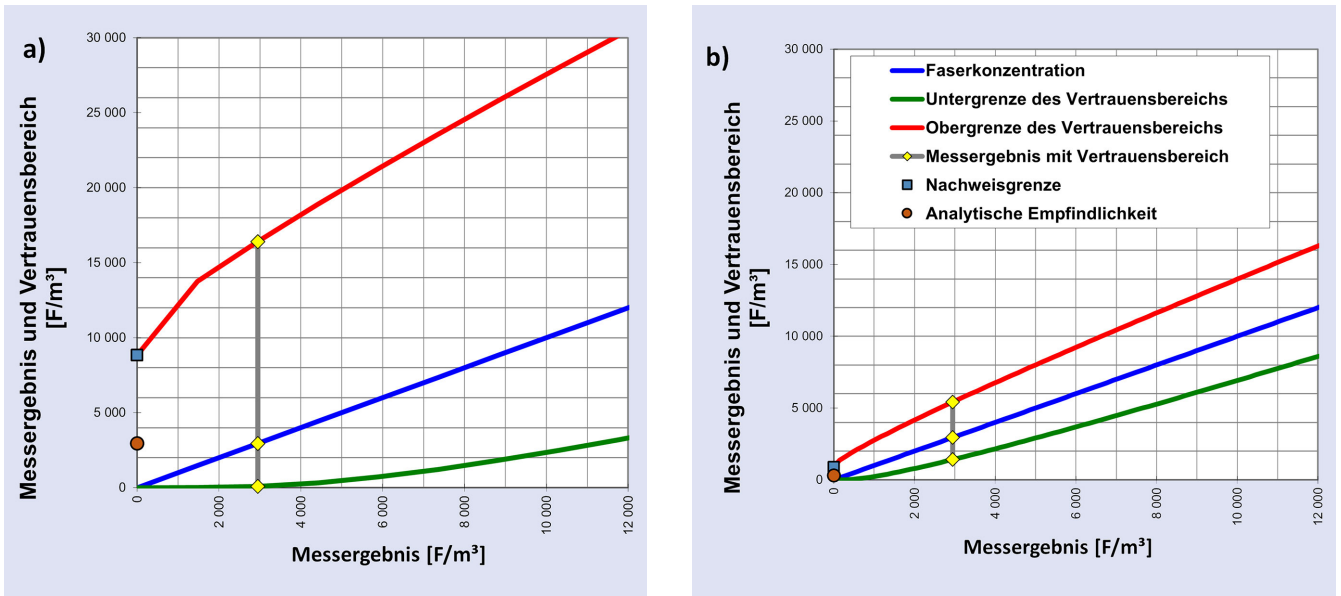


Bild 1 Zusammenhang zwischen Messwert, 95 %-Vertrauensbereich, Nachweisgrenze und analytischer Empfindlichkeit bei der Auswertung von Faserexpositionsmessungen. Dargestellt ist das Beispiel einer Fasermessung mit Probenahmedauer 1 h, Volumenstrom 2 l/min und effektivem Filterdurchmesser 37 mm. a) Es wurden 2 mm² ausgewertet und dabei eine Asbestfaser gezählt. b) Es wurden 20 mm² ausgewertet und dabei zehn Fasern gezählt. Grafik: Autor

3 Nachweisgrenzen bei der Auswertung von Luftproben

Bei der Bewertung von Messergebnissen von Fasermessungen wird teilweise außer Acht gelassen, mit welcher Unsicherheit die ermittelten Faserkonzentrationswerte behaftet sein können. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Auswertevorgaben der etablierten Verfahren [1 bis 3].

Die Nachweisgrenze der Bestimmung der Faserkonzentration wird aus der Poisson-Statistik abgeleitet. Sie stellt dabei die Faserkonzentration dar, unter der die tatsächliche Asbestfaserkonzentration mit z. B. 95%iger Wahrscheinlichkeit liegt, wenn keine Asbestfasern bei der Auswertung der Probe festgestellt werden. Vereinfacht gesagt, bezieht sich die Höhe der Nachweisgrenze dabei auf drei Fasern, die gemäß dem zugrunde liegenden statistischen Modell (kleine Stichprobe aus großer Gesamtheit) aufgrund des nur sehr kleinen ausgewerteten Flächenanteils der Probe nicht gefunden wurden.

Zu beachten ist jedoch, dass bei der Ausweisung von Messergebnissen nicht direkt auf die Nachweisgrenze Bezug genommen wird. Stattdessen wird die sogenannte „analytische Empfindlichkeit“ herangezogen. Die analytische Empfindlichkeit besagt, dass eine vorhandene Faser bei der Auswertung erkennbar ist und damit die Empfindlichkeit des Verfahrens definiert. Tatsächlich wird demnach, wenn keine Faser bei einer Auswertung festgestellt wird, als Ergebnis „< analytische Empfindlichkeit“ ausgewiesen. Faktisch beträgt der in Analysenberichten ausgewiesene Wert mit <-Vorzeichen ein Drittel der Nachweisgrenze!

Zum besseren Verständnis zeigt **Bild 1a** den Zusammenhang zwischen Messwert, Vertrauensbereich, Nachweisgrenze und ana-

lytischer Empfindlichkeit beispielhaft für eine typische Arbeitsplatzmessung. An einem Arbeitsplatz wird bei einem Volumenstrom von 2 l/min für 1 h eine Probenahme mit einem 37 mm-Filter (effektiver Filterdurchmesser 30 mm) durchgeführt. Bei einer Auswertung von 2 mm² Filterfläche ergibt sich, wenn eine Asbestfaser gezählt wird, eine Faserkonzentration von 2 900 F/m^{3,2}). Dieses Ergebnis hat einen 95 %-Vertrauensbereich von 75 bis 16 000 F/m³. Die Nachweisgrenze beträgt unter den Probenahme- und Auswertebedingungen 8 800 F/m³. Das Messergebnis liegt zwar unter der Nachweisgrenze, der Vertrauensbereich zeigt aber auch deutlich, wie groß die Unsicherheit des Ergebnisses ist. Nur in Kombination mit dem Vertrauensbereich kann das Ergebnis sinnvoll bewertet werden. Wenn bei der Auswertung der Probe keine Faser gefunden wird, wird die analytische Empfindlichkeit, also „< 2 900“ als Messergebnis ausgewiesen. Da die Nachweisgrenze aber nach wie vor 8 800 F/m³ beträgt, ist die Aussagekraft des ausgewiesenen Messergebnisses (< 2 900 F/m³) kritisch zu hinterfragen. Diese Vorgehensweise bei der Ausweisung von Messergebnissen ist zwar seit Jahren etabliert, kann im Hinblick auf die Bewertung der Qualität von Messergebnissen aber nicht zufriedenstellend sein.

Der wesentliche Grund für das geschilderte Dilemma ist die Zahl der bei der Auswertung gefundenen Fasern. Diese Zahl ist maßgeblich für die Größe des Vertrauensbereichs (**Bild 2**). Bei nur einer gefundenen Faser umfasst der 95 %-Vertrauensbereich den Bereich von -97 bis +457 % des Messergebnisses. Werden z. B. zehn Fasern gezählt, verkleinert sich der Bereich auf -52 bis +84 % des Messergebnisses (bei 50 gefundenen Fasern: -26 bis +32 %). Bild 1b zeigt die Situation für die oben geschilderte Probe, wenn bei zehnfacher Auswertefläche (20 mm²) zehn Fasern gezählt werden. Bei gleichem Zählergebnis (2 900 F/m³) reduziert sich der 95 %-Vertrauensbereich auf 1 400 bis 5 400 F/m³. Zudem ist der Abstand des Messergebnisses und der Untergrenze des Vertrauensbereichs von der Nachweisgrenze (880 F/m³) signifikant.

²⁾ Alle Angaben von Faserkonzentrationen erfolgen mit zwei signifikanten Stellen.

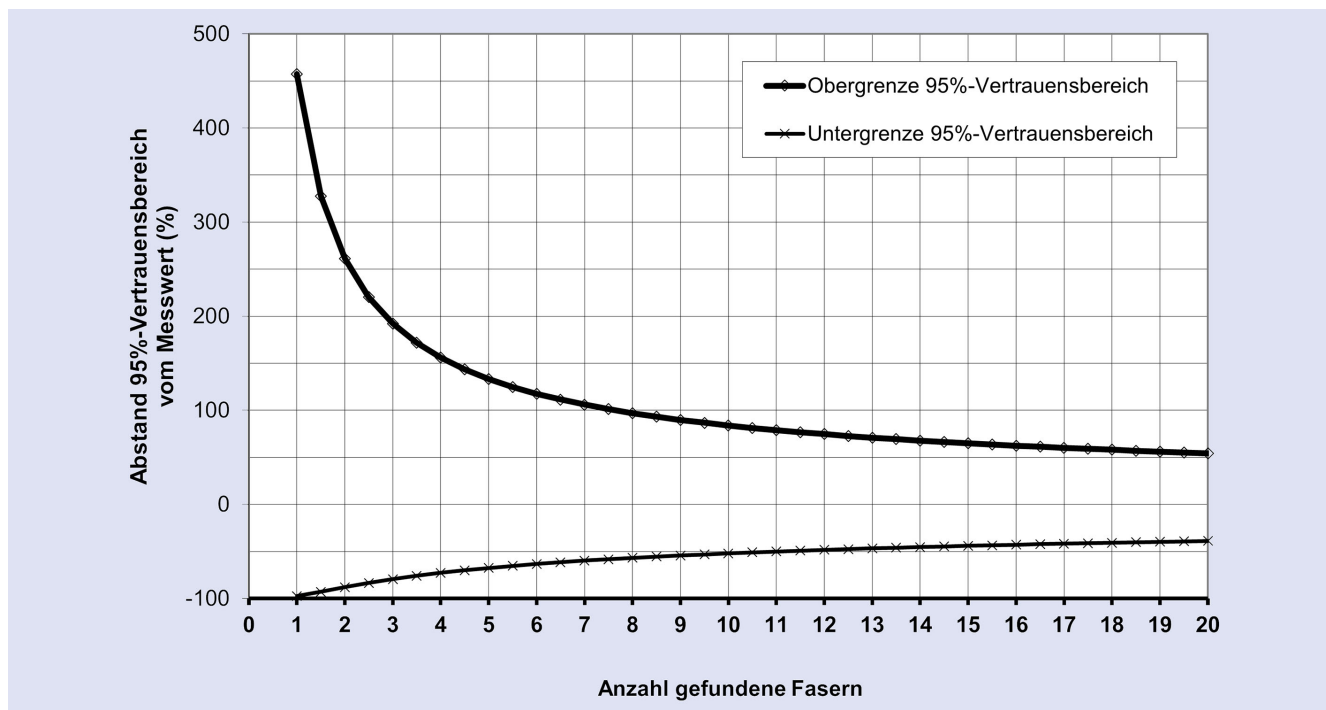


Bild 2 Zusammenhang zwischen Anzahl der gefundenen Fasern bei der mikroskopischen Auswertung einer Luftprobe und der Größe des 95 %-Vertrauensbereichs (berechnet mit Daten aus [1]. Grafik: Autor

An dem geschilderten Beispiel ist klar erkennbar, dass die wesentliche Problematik bei der Bewertung von Messergebnissen darin besteht, dass bei nur kleinen Zahlen gefundener Fasern die Messergebnisse nicht signifikant in Bezug auf die Nachweisgrenze sind. Die derzeitige Art der Ergebnisdarstellung erscheint für die Anwender zwar schlüssig. Trotzdem zeigen die Vertrauensbereiche um die Ergebnisse, dass diese z.B. im Hinblick auf die Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten ein besonderes Bewertungskonzept erfordern.

Der einzige Ausweg aus dieser Situation liegt in der (Teil-)Automatisierung der Bestimmung der Asbestfaserkonzentration (siehe Abschnitt 5). Damit würde nicht nur der zum Teil heute schon sehr große Aufwand bei der Auswertung von Luftproben aus Arbeitsbereichen reduziert (siehe Abschnitt 4). Durch eine (Teil-)Automatisierung der Zählung könnte mit vertretbarem Aufwand auch eine mehr als mindestnotwendige Zählung von Fasern erfolgen. Wie zuvor diskutiert, hätte dies den Vorteil, dass bei einer ausreichend großen Zahl gefundener Fasern in einer Probe die dargestellte problematische Bewertung von Zählergebnissen im Bereich der Nachweisgrenze in vielen Fällen vermieden werden könnte.

4 Anforderungen an Messungen zur Überprüfung der Grenzwerteinhaltung

Die in Abschnitt 3 dargestellte Situation mag als überkritisch geschildert angesehen werden. Bei der Bewertung der Außenluft- und Innenraumsituation in staubarmen Bereichen sind durch große Volumenströme und lange Messdauern problemlos valide Messergebnisse mit niedriger Nachweisgrenze zu erzielen (**Tabelle**). Die Situation an Arbeitsplätzen im industriellen Bereich ist jedoch eine völlig andere. Schon relativ niedrige Staubkonzentrationen können bei der Probenahme zu überbelegten

Filtern und damit einer Nichtauswertbarkeit von Luftproben führen. Die Erfahrung zeigt, dass eine Auswertung von Luftfiltern (37 mm Durchmesser) im Hinblick auf Fasern bis zu einer Massebeladung der Filter von etwa 0,5 mg gut möglich ist. Eine derartige Beladung des Filters ist bei einer 2,35-stündigen Probenahme mit 2l/min erreicht, wenn im Arbeitsbereich eine Konzentration einatembaren Staubes von 1,7 mg/m³ besteht.

Aus der Praxis der Probenahme zur Bestimmung der Asbestfaserkonzentration bei den Messtechnischen Diensten der Unfallversicherungsträger gehen im Labor des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) immer wieder Proben ein, die selbst bei kurzen Probenahmedauern zum Teil deutliche Überbelegungen aufweisen. Zur Abschätzung des nötigen Aufwands bei der Auswertung von Luftproben aus Arbeitsplätzen mittels REM-EDXA sind in der **Tabelle** Beispiele zusammengestellt. Unter Standardbedingungen (0,5 mm² Auswertefläche) wird dabei eine Nachweisgrenze von 15 000 F/m³ erreicht. Mit der Verdopplung des Auswerteaufwandes kann die für die Bewertung von Asbestfaserkonzentrationen in Deutschland notwendige Nachweisgrenze von 7 500 F/m³ eingehalten werden (gemäß TRGS 519 [7] und TRGS 517 [4] müssen zur Bewertung der Exposition in einem Arbeitsbereich mindestens drei Ergebnisse von Messungen mit einem Messergebnis von < 2 500 F/m³ vorliegen). In der Tabelle ist erkennbar, dass bei sehr kurzen Probenahmedauern, die Auswertung von Proben einen bis zu rund 30-fachen Aufwand erfordert, der kaum noch verhältnismäßig ist.

In Deutschland gibt es ein risikobasiertes Grenzwertkonzept für Asbest mit einer Akzeptanz- (10 000 F/m³) und einer Toleranzkonzentration (100 000 F/m³). Die zuvor genannten Bewertungskriterien beziehen sich auf die Akzeptanzkonzentration in Höhe von 10 000 F/m³. Auf europäischer Ebene wird derzeit im Rahmen der Überarbeitung der Richtlinie 2009/148/EG über

Tabelle Nachweisgrenzen bei der Bestimmung der Asbestfaserkonzentration in Abhängigkeit von der Messaufgabe und den Messbedingungen (alle Angaben von Faserkonzentrationen erfolgen mit zwei signifikanten Stellen).

Messaufgabe	Probenahmebedingungen	Effektiver Filterdurchmesser in mm	Ausgewertete Filterfläche in mm ²	Nachweisgrenze in F/m ³	„Analytische Empfindlichkeit“ in F/m ³
Innenraum-/ Außenluftmessungen	7,6 l/min 8 h	22	1	300	100
Arbeitsplatzmessungen (Standardbedingungen)	2 l/min 2,35 h	30	0,5	15 000	5 000
			1	7 500	2 500
			10	750	250
Arbeitsplatzmessungen (in staubbelasteten Bereichen)	2 l/min 10 min*	30	0,5	210 000	71 000
			14	7 500	2 500
			140	750	250

* Kurze Probenahmedauer zur Vermeidung der Überbelegung des Filters

den Schutz der Beschäftigten gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz (sogenannte Asbestrichtlinie) ebenfalls ein verbindlicher Grenzwert von 10 000 F/m³ für Asbest diskutiert. Unabhängig davon ist in Deutschland eine Absenkung der Akzeptanzkonzentration für Asbest auf 1 000 F/m³ vorgesehen. Da die Messdauer und der Volumenstrom durch die genannten Bedingungen an Arbeitsplätzen limitiert sind, kann die dann notwendige Nachweisgrenze von 750 F/m³ nur erreicht werden, wenn der Auswerteaufwand noch einmal um den Faktor 10 erhöht wird. Selbst im idealen Standardfall (2 h Probenahme) wäre dann zumindest der 20-fache Auswerteaufwand im Labor notwendig. Für Proben mit sehr kurzer Probenahmedauer könnte der notwendige Aufwand dann bis zum rund 300-fachen ansteigen (Tabelle). Es ist erkennbar, dass eine wirtschaftlich tragbare Analyse von Proben aus Arbeitsbereichen dann kaum mehr möglich ist.

5 Möglichkeiten der Automatisierung

Die Automatisierung der Bestimmung der Asbestfaserkonzentration mittels REM-EDXA wird schon seit vielen Jahren angestrebt. Ein solches System sollte nicht nur die Zählung, sondern auch die Identifizierung von Fasern erlauben. Erste erfolgreiche Versuche in den 1990er-Jahren haben die Machbarkeit zwar demonstriert [8], ein etabliertes System besteht aktuell jedoch nicht. Mit den sich zunehmend entwickelnden Möglichkeiten der digitalen Bearbeitung von Bilddateien sollte dies aber in absehbarer Zeit realisierbar sein.

Ein sinnvoller Ansatz dazu könnte sein, die einzelnen für die Zählung und Identifizierung notwendigen Prozesse getrennt, aber in einer seriellen Kopplung ablaufen zu lassen. Der erste Schritt wäre das Einlesen von Bildfeldern (statistisch auf dem Filter verteilt oder einem systematischen Muster folgend), wobei für jedes Bild Schärfe und Kontrast automatisch eingestellt werden müssten [9]. Aus dem Konvolut von Bildern müssten dann diejenigen ausgewählt werden, auf denen faserförmige Partikel zu finden sind. Diese wären einer Bewertung zu unterziehen. Die dafür notwendige Software müsste automatisch die Abmessungen der Fasern prüfen und auch alle Zählkriterien anwenden, z. B. im Hinblick auf sich überlagernde oder aufspießende Fasern und angelagerte Partikel. Gerade im Hinblick auf die Porenstruktur der Filteroberfläche und die unterschiedlichen Kontrastverhält-

nisse von Fasern und Partikeln dürfte dies eine besondere Herausforderung sein. Jedes der einzelnen als WHO-Faser identifizierten Objekte müsste dann einer Identifizierung unterzogen werden. Für die Identifizierung von Asbest anhand der von Fasern mittels EDX-Analyse bestimmten semiquantitativen chemischen Zusammensetzung besteht in Deutschland ein bereits seit mehr als 20 Jahren etabliertes Identifizierungsschema [5].

Bevor eine vollständig automatisch ablaufende Auswertung von Filtern erfolgen kann, erscheint es sinnvoll, Module eines solchen Systems zu nutzen, sobald diese verfügbar sind. Ein wesentlicher Teil des Auswerteaufwands besteht darin, alle Bildfelder auf das Vorhandensein von Fasern zu prüfen. Wenn allein schon dieser Schritt automatisiert werden könnte, wäre das bereits ein großer Gewinn, da gerade die Fasersuche eine monotone und kognitiv belastende Arbeit ist, die viel Zeit in Anspruch nimmt. Die Analytiker könnten sich ohne diese Suche vor allem der differenzierten Zählung und Identifizierung der Fasern widmen.

Um die Kriterien zur Zählung von Fasern sicher auf digitale Bildinformationen anwenden zu können, sind mathematische Routinen nötig, die anhand bestimmter geometrischer Parameter Zuordnungen treffen. Beispielsweise müssen bestimmte Parameter vereinbart werden, damit eine Software entscheiden kann, ob sich eine Faser, die eine andere Faser überlagert oder von einem Partikel überlagert wird, nach diesem Objekt fortsetzt. Das gilt z. B. auch für die Bewertung von Krümmungsradien. Im Unterschied zum menschlichen Auswerter müssen hier über die in den Analysenverfahren dokumentierten Auswertekriterien hinaus weitere spezifische Parameter in der Software festgelegt werden. Um vergleichbare Ergebnisse mit verschiedenen automatischen Systemen zu erzielen, scheint es sinnvoll, dass zumindest das Modul, das die Anwendung der Zählkriterien am digitalen Bild vollzieht, allgemein verwendet wird und damit auch allgemein verfügbar ist. Die Erstellung eines solchen Moduls auf internationaler Ebene wäre denkbar, da ein Konsens über die erweiterten Zählkriterien erzielt werden sollte. Durch eine solche gemeinsam abgestimmte Vorgehensweise dürfte auch die Akzeptanz automatisierter Auswertesysteme durch die Regelwerksgeber zunehmen.

Ein erster wesentlicher Schritt in diese Richtung ist die Festlegung von Parametern für die digitale Erstellung und Bearbeitung von REM-Bildern bei der Auswertung mittels REM-EDX.

Die bisherigen Angaben zu notwendigen Vergrößerungen in den bestehenden Analysenverfahren sind aus der Zeit gefallen und müssen bei Überarbeitungen der Verfahrensbeschreibungen dringend aktualisiert bzw. erweitert werden. *Plitzko et al.* [9] weisen auf die Notwendigkeit hin, für die Erkennbarkeit faserförmiger Strukturen mit mikroskopischen Verfahren Festlegungen in Bezug auf die Punktauflösung, genauer gesagt auf die Bildpunkt-kantenlänge, zu treffen.

Eine grundsätzliche Herausforderung besteht aber auch darin, dass Anwender solche softwaregestützten Systeme zur automatischen Auswertung auf ihrer jeweiligen Gerätekonstellation von REM und EDX installieren können. Der Zugriff auf die Steuerung des jeweiligen REM- und EDX-Gerätes ist nicht immer einfach zu erreichen. Da die Auswertung von Luftproben auf Asbest eine gängige Anwendung ist, sollte bei Verfügbarkeit einer Software zur automatischen Auswertung auch bei den Geräteherstellern eine ausreichende Motivation bestehen, diese Softwaremodule anwenden zu können.

Zuletzt ist aber auch darauf hinzuweisen, dass die Automatisierung nicht nur die Erreichung der Mindestnachweisgrenzen bei der Auswertung von Fasermessungen sicherstellen sollte. Darüber hinaus kann sie auch die Qualität der Messergebnisse entscheidend verbessern. Durch die Auswertung eines größeren Teils der Filterfläche kann eine ausreichende Zahl von Fasern gezählt werden, um Ergebnisse mit signifikantem Abstand von der Nachweisgrenze zu erzielen (siehe auch Abschnitt 3).

6 Identifizierung anorganischer Fasern

Die Identifizierung von Asbestfasern mittels REM-EDXA kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Häufig erfolgt der Vergleich der EDX-Spektren zu bestimmter Fasern mit Spektren von Referenzasbesten. In Deutschland hat sich ein System etabliert, bei dem die semiquantitative chemische Zusammensetzung der Fasern herangezogen wird, die mittels EDX-Analyse bestimmt wird (standardlose Quantifizierung der Zusammensetzung in Form von Oxiden). Zum Vergleich wird eine Datenbank verwendet, in der die typische chemische Zusammensetzung der Asbestminerale und die von insgesamt 40 wesentlichen weiteren Mineralen, die in mineralischen Rohstoffen vorkommen und potenziell mit Asbest verwechselt werden können, enthalten sind. Die Daten wurden im Hinblick sowohl auf die natürliche Variabilität oder das Mischkristallwachstum bestimmter Minerale als auch auf die relativ ungenauen Ergebnisse von EDX-basierten Analysen der chemischen Zusammensetzung unter diesen speziellen Messbedingungen erhoben. In die Datenbank können weitere Mineralphasen integriert werden. Anhand einer Excel-Tabelle können der Vergleich der gefundenen chemischen Zusammensetzung mit der Referenzdatenbank halbautomatisch verglichen werden und eine Zuordnung zu Asbest oder gegebenenfalls einem der anderen Minerale erfolgen [5]. Die Excel-Tabelle und die Datengrundlage sind frei verfügbar [10].

Für eine einheitliche Identifizierung von Asbest bei der Auswertung von Luft- und Materialproben wäre eine Konsensfindung in Bezug auf die Identifizierungskriterien wünschenswert. In Deutschland ist dies durch die bestehenden Regelwerke bereits umgesetzt.

Zurzeit wird im IFA an einer erweiterten Form einer teilautomatisierten Faseridentifizierung gearbeitet, die ebenfalls auf der mittels EDX-Analyse bestimmten semiquantitativen chemischen

Zusammensetzung von Fasern basiert. Ziel ist es, nicht nur Asbest, sondern alle gängigen industriell eingesetzten anorganischen technischen Faserarten, aber auch prozessbedingt entstehende Fasern (z. B. Whisker), identifizieren zu können. Geplant ist eine Erweiterung der bisher bereits etablierten Produktfaserbestimmung [1], bei der bestimmte Faserarten anhand von mitgeschickten Referenzmaterialien identifiziert werden.

7 Ermittlung des Asbest-Massengehalts von Materialproben

Klassische Verfahren zur Bestimmung des Asbest-Massengehalts in Materialproben zielen auf Gehalte von 1 % oder mehr ab. Für die Identifizierung von Asbest in technischen Materialien oder Produkten, die typischerweise deutlich mehr als 1 % Asbest enthalten, sind diese Verfahren hinreichend. Problematisch wird es dagegen, Proben im Hinblick auf Spuren von Asbest zu analysieren. Gerade in mineralischen Rohstoffen oder Proben aus Wandbeschichtungen aus Gebäuden liegen die Asbestgehalte zum Teil bei deutlich unter 0,1 Masse-%.

Da die Feststellung sehr geringer Asbest-Massengehalte mikroskopische Verfahren erfordert, basiert die Ermittlung der Nachweisgrenze auf dem gleichen Prinzip wie die Bestimmung der Faserkonzentration (Poisson-Statistik, siehe Abschnitt 3). Die Anwendung dieses Prinzips zur Festlegung der Nachweisgrenze der Bestimmung des Asbest-Massengehalts führt jedoch zu einem Dilemma. Das wesentliche Problem dabei ist, dass über die Abmessungen der nicht gefundenen Fasern keine Informationen vorliegen können. Somit kann die Nachweisgrenze für die Bestimmung des Asbest-Massengehalts, z. B. bei REM-Analysenverfahren, nur geschätzt werden. Bei dieser Schätzung legt man typische Abmessungen von Asbestfasern zugrunde und berechnet eine Nachweisgrenze, die aber eben nur einen Schätzwert darstellt. Ob diese Nachweisgrenze im Einzelfall die richtige ist, wenn in einem Material kein Asbest festgestellt wurde, bleibt unbestimmt. Sie kann tatsächlich höher oder niedriger sein. Für den konkreten Einzelfall kann die richtige Nachweisgrenze an sich nur dann ermittelt werden, wenn in dem Material bei der Analyse eine ausreichende Zahl von Asbestfasern gefunden wurde, um die mittleren Abmessungen der dort vorliegenden Asbestfasern zu bestimmen.

Da diese Fragestellung bei mineralischen Rohstoffen wie z. B. Talkumpudern oder Schottern aus basischen Gesteinen relevant ist, wurde, basierend auf den empirischen Erfahrungen der Auswertung einer großen Zahl von Proben, eine typische Amphibolfaserabmessung herangezogen, um für die Analyse solcher Materialien eine Nachweisgrenze abzuleiten (Chrysotil tritt in Deutschland in mineralischen Rohstoffen nur selten auf). Der dadurch ermittelte Schätzwert der Nachweisgrenze beträgt 0,008 Masse-% [11]. Bezogen auf Chrysotil könnte eine Nachweisgrenze von 0,001 Masse-% oder noch darunter abgeschätzt werden.

Dieser Umstand führt dazu, dass die Analyse von Proben mineralischer Rohstoffe auch nachweisbare Asbestgehalte ergeben kann, die unter der geschätzten Nachweisgrenze liegen. Werden in einer Probe nur wenige Fasern gefunden, deren Abmessungen tatsächlich kleiner sind als die typische Amphibolfaser (die für die Schätzung der Nachweisgrenze herangezogen wurde), kann das Ergebnis der Bestimmung z. B. 0,002 Masse-% Asbest ergeben. **Bild 3** zeigt beispielhaft das Ergebnis der Bestimmung mit-

tels REM-EDXA für eine Probe einer Wandbeschichtung (durch Mahlung aufbereitet; Analyse gemäß [12]). Das Analysenverfahren gibt eine mehrstufige Analyse bei mehreren Vergrößerungen vor (beginnend mit 40 mm² Auswertung bei 50-facher Vergrößerung, dann gefolgt von 2,5 mm² bei 200-facher, 0,15 mm² bei 1 000-facher und 0,04 mm² bei 2 000-facher Vergrößerung). Da die Massengehaltsbestimmung im Vordergrund steht, werden unabhängig von der WHO-Definition alle Partikel der Asbestminerale mit einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von > 3:1 gezählt. Wenn bei einer bestimmten Vergrößerung Asbestfasern festgestellt wurden, kann auf die Analyse bei weiteren Vergrößerungen verzichtet werden. Da im Beispiel hier bei 50-facher Vergrößerung kein Asbest gefunden wurde, zeigt das Bild den Auswertefortschritt bei 200-facher Vergrößerung. Der notwendige Auswerteaufwand war bereits nach dem zweiten Zählfeld und dem Fund einer Amphibolfaser erreicht. Es ist aber beispielhaft dargestellt, was eine darüber hinaus gehende Auswertung ergeben hat. Dabei ist zu erkennen, dass bei weiterer Auswertung das Analyseergebnis, das zunächst über der geschätzten Nachweisgrenze gelegen hat (0,02 Masse-%), letztendlich etwas unterhalb dieser liegt (0,007 Masse-%). Zudem stellt das Bild den fiktiven Fall dar, dass anstelle der Amphibolfasern (Faser 1: L = 22,4 µm, D = 7,32 µm; Faser 2: L = 11,7 µm, D = 2,4 µm) Chrysotilfasern gefunden worden wären (Faser 1: L = 16 µm, D = 1 µm; Faser 2: L = 12 µm, D = 0,5 µm). Der Asbest-Massengehalt liegt für Chrysotil (0,0005 bzw. 0,0002 %) um den Faktor 16 bis 40 unter der für Amphibol geschätzten Nachweisgrenze.

Dieses Beispiel zeigt exemplarisch die Probleme bei der Bewertung sehr niedriger Asbest-Massengehalte. Auch hier ist das Ergebnis mit einer großen Unsicherheit behaftet, die durch den in Abschnitt 3 dargestellten großen Vertrauensbereich der Ergebnisse bei nur kleiner Anzahl gezählter Fasern charakterisiert ist. Dazu kommt noch die sehr große Variabilität der Masse der einzelnen Asbestfasern. Bei gleicher Anzahl an gefundenen Fasern unterscheidet sich der auf Grundlage der Auswertung berechnete Massengehalt allein in dem hier dargestellten Beispiel für Amphibol und Chrysotil um etwa den Faktor 35. In diesem Zusammenhang ist auch noch darauf hinzuweisen, dass die Aufbereitung von Materialproben, speziell die Aufmahlung, einen signifikanten Einfluss auf die Größe der im Material enthaltenen Asbestfasern hat. Somit kann auch die durchgeführte Aufbereitung der Probe das Ergebnis erheblich beeinflussen.

Bei den in Analysenberichten ausgewiesenen Massengehalten ist in aller Regel kein Vertrauensbereich des Ergebnisses angegeben, obwohl dieser die gleiche Größenordnung erreicht wie bei der Bestimmung von Faserkonzentrationen!

8 Begrenzungen mit Bezug auf den Asbest-Massengehalt

Die Feststellung der Material- und analytisch bedingten Unsicherheit und Variabilität von sehr niedrigen Asbest-Massegehalten führt zwangsläufig zur Hinterfragung der Sinnhaftigkeit von Grenzwerten auf dieser Basis. In Deutschland wird z. B. aktuell über die Wiederverwendung von potenziell asbesthaltigen Materialien wie Bauschutt, Schotter, abgefrästen Straßenbelägen, Beton usw. diskutiert. Aus abfallrechtlicher Sicht dürfen asbesthaltige Abfälle nicht wiederverwendet oder in Recyclingprozesse überführt werden. Ab wann aber ein Abfall asbesthaltig ist, ist schwer zu bestimmen. Bereits eine Asbestfaser in einem Haufwerk macht

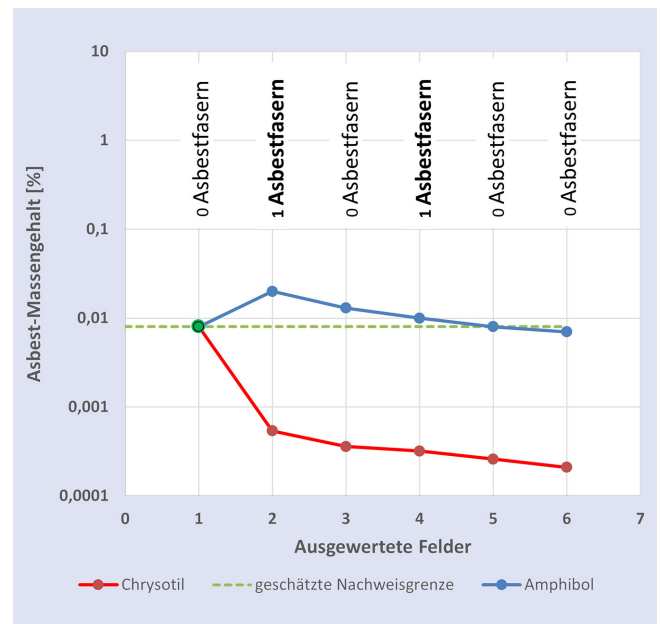


Bild 3 Asbestmasse einer pulverförmigen Materialprobe bei der Auswertung mittels REM-EDXA gemäß VDI-Richtlinie 3866 [12]. Dargestellt ist der berechnete Asbest-Massengehalt in Bezug auf die geschätzte Nachweisgrenze, berechnet jeweils nach Auswertung eines weiteren Zählfeldes (Details siehe Text). Grafik: Autor

dieses asbesthaltig, auch wenn der Massegehalt kaum auszudrücken ist. Um ein unteres Abschneidekriterium zu finden, werden in aktuellen Diskussionen maximal zulässige Asbest-Massengehalte in der Größenordnung der oben genannten geschätzten Nachweisgrenze erwogen. Im Hinblick auf das zuvor geschilderte Beispiel ist jedoch erkennbar, dass die Ergebnisse in bestimmten Fällen eher zufällig über oder unter einem solchen Entscheidungswert liegen werden.

Da die gesundheitliche Gefährdung durch Asbest nicht von der Masse, sondern maßgeblich von der Konzentration von Asbestfasern abhängt, sollte überlegt werden, ob nicht andere Beurteilungsmaßstäbe, die sich z. B. am Faserfreisetzungspotenzial orientieren, zielführender wären. Bei der Beurteilung potenziell asbesthaltiger mineralischer Rohstoffe wird dieses Potenzial gemäß TRGS 517 mitberücksichtigt, da neben dem Asbest-Massengehalt grundsätzlich auch die Zahl gefundener Asbestfasern pro mg Probe zu dokumentieren ist.

Eine Reduzierung der Unsicherheit der Massegehaltsbestimmung für eine bestimmte Probe kann nur durch eine deutliche Erhöhung des Auswerteaufwands erfolgen. Die grundsätzlich bestehende materialabhängige Variation der Dimension einzelner Asbestfasern kann damit aber nicht kompensiert werden. Somit würden zwei unterschiedliche Materialien, die bei der Verwendung die gleiche Asbestfaserkonzentration abgeben, in Bezug auf den Asbest-Massengehalt unterschiedlich bewertet, je nachdem, welche Abmessungen die Asbestfasern haben. Aus Arbeitsschutzsicht ist zudem darauf hinzuweisen, dass Materialien, die dünne Asbestfasern enthalten, eher eine bestimmte Grenze des Asbest-Massegehalts unterschreiten als solche mit dicken Fasern (siehe Bild 3). Vereinfacht gesagt würde der Umgang mit Materialien, die eine große Zahl dünner und als kritisch betrachteter Fasern freisetzen können, dann eher zulässig sein als ein Umgang mit Materialien, die eine nur geringe Zahl relativ dicker Fasern abgeben.

Das Problem der Bewertung von Asbest in Putzen, Spachtelmassen und Fliesenklebern bei Arbeiten im Baubestand treibt auch Gutachter um, die auf Grundlage einer Beprobung von Wänden und Decken in Gebäuden Beurteilungen abgeben sollen. Zum einen bedingt jede Beprobung, abhängig vom Umfang der untersuchten Proben, nur eine bestimmte Aussagesicherheit (z. B. 50, 70 oder 90 %) [13]. Eine sichere Ja/Nein-Entscheidung, ob in den Wandbeschichtungen eines Gebäudes Asbest enthalten ist, ist daher nicht möglich. Zum anderen besteht bislang kein eindeutiges unteres Abschneidekriterium beziehungsweise eine Vorgabe, mit welchem Aufwand und welcher Aussagesicherheit eine Erkundung stattzufinden hat. Damit besteht der unbefriedigende und rechtsunsichere Zustand, dass letztlich die Handelnden vor Ort in Einzelfällen die Notwendigkeit und den Umfang von Maßnahmen nach Ermessen – und damit uneinheitlich – festlegen müssen. ■

Literatur

- [1] DGUV Information: Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentrationen von lungengängigen anorganischen Fasern. Von den Unfallversicherungsträgern anerkannte Analysenverfahren zur Festlegung der Konzentrationen krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft in Arbeitsbereichen (212-546). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. Berlin 2014.
- [2] VDI 3492:2013-06: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Immissionen – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. Berlin, Beuth 2013.
- [3] ISO 14966:2019-12: Ambient air – Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles – Scanning electron microscopy method. Berlin, Beuth 2019.
- [4] Technische Regel für Gefahrstoffe: Tätigkeiten mit potenziell asbesthaltigen mineralischen Rohstoffen und daraus hergestellten Gemischen und Erzeugnissen (TRGS 517) GMBI 2013 S. 382-396 vom 09.04.2013 [Nr. 18], zuletzt geändert. GMBI 2015 S. 137-138 [Nr. 7] vom 02.03.2015.
- [5] *Mattenklott, M.*: Identifizierung von Asbestfasern in Stäuben mineralischer Rohstoffe, Teil 1: Grundlagen, Kriterienkatalog. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 58 (1998) Nr. 1/2, S. 15-22.
- [6] Positionspapier FACH: Kriterien zur Beurteilung der Asbestformität von Amphibolpartikeln in Materialproben. Forum Asbest Schweiz (FACH). Luzern 2022.
- [7] Technische Regel für Gefahrstoffe: Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten (TRGS 519), GMBI 2014 S. 164-201 vom 20.03.2014 [Nr. 8/9], zuletzt geändert. GMBI 2022 S. 269-272 [Nr.12] vom 31.3.2022.
- [8] *Riediger, G.; Thomas, P.*: Entwicklung eines Verfahrens zur Automatisierung der Faserauswertung mittels REM/EDXA. VDI-Berichte Nr. 1417, S. 221-235. Düsseldorf, VDI-Verlag 1998.
- [9] *Plitzko, S., A.; Meyer-Plath, N.; Dziurawitz, B.; Simonow, P.; Steinle et al.*: Messung nano- und mikroskaliger faserförmiger Materialien an Arbeitsplätzen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 78 (2018) Teil 1: Nr. 5, S. 187-192, Teil 2: Nr. 6, S. 251-256.
- [10] *Mattenklott, M.*: Excel-Tabelle zur teilautomatisierten Identifizierung von Asbestfasern in Stäuben. <https://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-gefahrstoffe/software-faseridentifizierung-in-staeuben/index.jsp>
- [11] Verfahren zur analytischen Bestimmung geringer Massengehalte von Asbestfasern in Pulvern, Pudern und Stäuben mit REM/EDX (Code 7487). In: IFA-Arbeitsmappe „Messung von Gefahrstoffen“ 18. Lieferung. IV/97. Hrsg.: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz, Sankt Augustin. Berlin: Erich Schmidt 1989 – Losebl.-Ausg.
- [12] VDI 3866 Blatt 5: Bestimmung von Asbest in technischen Produkten – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. Berlin, Beuth 2017.
- [13] Asbesthaltige Putze, Spachtelmassen und Fliesenkleber in Gebäuden. Diskussionspapier zu Erkundung, Bewertung und Sanierung. Verein Deutscher Ingenieure e.V. und Gesamtverband Schadstoffsanierung e.V. (Hrsg.). 2016. https://www.gesamtverband-schadstoff.de/media/z04-diskussionspapier_asbest_web_2015_06_16.pdf.

Dr. rer. nat. Markus Mattenklott

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.