

Automatisierung der Bestimmung der Asbestfaserkonzentration

J. Schumann, T. Peters, H. Schiwieg, N. Dziurawitz, C. Thim, D. Bäger, M. Mattenklott, A. Meyer-Plath

ZUSAMMENFASSUNG Derzeit gilt für die nach Gefahrstoffverordnung zulässigen Ausnahmen vom Tätigkeitsverbot mit asbesthaltigen Materialien nach dem Modell der Exposition-Risiko-Beziehung (ERB-Modell) als Grenzwert eine schichtbezogene Akzeptanzkonzentration von 10 000 Fasern/m³. Die Bestimmung der Anzahlkonzentration luftgetragener anorganischer Fasern am Arbeitsplatz erfolgt nach der DGUV Information 213-546 durch das Auszählen von auf einem Filter gesammelten Fasern und ihre Identifizierung mittels Rasterelektronenmikroskopie in Verbindung mit Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDX-Verfahren). Da die Nachweisgrenze des Verfahrens unter Standardauswertebedingungen in dieser Größenordnung liegt, ist der Nachweis niedriger Asbestfaserkonzentrationen nur mit einer angepassten Probenahme und einem deutlich höheren Aufwand zur Auswertung zu erreichen. Zudem ist in den kommenden vier Jahren eine aktuelle Änderung der Asbest-Richtlinie der EU in nationales Recht zu überführen. Dabei stehen zwei Optionen zur Auswahl: Eine Absenkung auf ein Fünftel der Akzeptanzkonzentration für Asbestfasern gemäß der bisher angewendeten Faserdefinition der Weltgesundheitsorganisation (WHO) oder die Beibehaltung des bisherigen Grenzwertes unter Einbeziehung von Fasern dünner als 0,2 µm. Bei beiden Optionen wird der zumeist jetzt schon beträchtliche Auswerteaufwand erheblich steigen, da zur Erreichung der notwendigen Nachweisgrenze ein Mehrfaches an Bildern auszuwerten ist, bei der Wahl dünner Fasern zudem auch noch bei stärkerer Vergrößerung (exponentieller Anstieg des Aufwands). Die an der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) entwickelte Software AsbestosDetect wurde für eine weitgehend automatisierte Auswertung von Filterproben aus Expositionsmessungen von lungengängigen Fasern entwickelt und speziell für Asbest angepasst. Sie beinhaltet einen automatisierten Bildeinzug (TischNavigation, TiNa) mit einer weitgehend automatisierten, durch Künstliche Intelligenz (KI) gestützten Bildanalyse zur Fasererkennung und -vermessung (FibreDetect). Durch eine automatisierte EDX-Analyse detektierter Fasern wird eine automatisierte Klassierung und Auswertung mit einem reduzierten Arbeitsaufwand möglich. Ziel ist, die Software einem breiten Anwenderkreis verfügbar zu machen und damit einen Beitrag zur Verbesserung der Vergleichbarkeit von Faseranalysen sowie zur Qualitätssicherung und Ergebnisdokumentation zu leisten.

Automation of the determination of the asbestos fibre concentration

ABSTRACT Currently, the limit value for exceptions to the ban on working with asbestos-containing materials permitted under the Hazardous Substances Ordinance according to the so-called exposure-risk relationship model is an acceptable concentration of 10,000 fibres/m³ per work shift. The number concentration of airborne inorganic fibres at the workplace is determined in accordance with DGUV Information 213-546 by counting the fibres collected on a filter and identifying them using SEM/EDS methods. Since the detection limit of the method under standard evaluation conditions is in this order of magnitude, the detection of lower asbestos fibre concentrations can only be achieved with adapted sampling and significantly greater effort for evaluation. In addition, a recent amendment to the EU Asbestos Directive must be implemented into national law within the next four years. There are two options: a reduction to 1/5 of the acceptable concentration for asbestos fibres in accordance with the WHO fibre definition as previously applied, or the retention of the previous limit value but including fibres thinner than 0,2 µm into the evaluation. Both options will significantly increase the already considerable evaluation effort, as more images will have to be evaluated to achieve the reduced detection limit. If the thin fibres option is selected, the necessary increase in image magnification will increase the effort exponentially. The software AsbestosDetect developed at BAuA was designed for largely automated evaluation of filter samples from exposure measurements of respirable fibres and has been specially adapted for asbestos. It includes automated image capture (TiNa) with largely automated, AI-supported image analysis for fibres detection and measurement (FibreDetect). Automated EDS analysis of detected fibres enables automated classification and evaluation with reduced effort. It is planned to make the software available to a wide range of users and thus contribute to improving the comparability of fibre analyses as well as quality assurance and results documentation.

1 Einleitung

Trotz erster Berichte des International Labor Organization über asbestbedingte Krebserkrankungen im Jahr 1938 dauerte es mehr als 55 bzw. 67 Jahre, bis die Verwendung von Asbest in Deutschland beziehungsweise der Europäischen Union (EU) verboten wurde [1]. Aufgrund der langen Inkubationszeit asbestbe-

dingter Erkrankungen und der andauernden Freisetzung von asbesthaltigen Stäuben aus im Baubestand verwendeten Werkstoffen ist die Exposition gegenüber Asbestfasern in der Luft auch heute noch der wichtigste Faktor für berufsbedingte Krebserkrankungen und verursacht weltweit schätzungsweise 255 000 Todesfälle pro Jahr [2]. Als bisher einzige Fasermaterialklasse wurden Asbeste über eine direkt am Menschen nachgewiesene Kanzero-

genität in die Karzinogenitätskategorie 1A eingestuft [3 bis 5]. Eine mit Asbest vergleichbare karzinogene Wirkung wurde im Tiermodell inzwischen auch für eine Reihe von nanoskaligen kohlenstoffbasierten Fasern beschrieben [6], was kürzlich zu ihrer Einstufung in die Karzinogenitätskategorie 1B geführt hat [7].

Auch wenn traditionell nur Arbeitsplatzkonzentrationen von Fasern breiter als die auf Basis der Phasenkontrastmikroskopie vorgegebenen Sichtbarkeitsgrenze [8] von $0,2\ \mu\text{m}$ ermittelt wurden, bezieht sich die 1A-Einstufung auch auf dünne Asbeste, da sie stoffbezogen, nicht durchmesserbezogen ist. In Übereinstimmung hiermit wurde im Jahr 2023 eine neue Asbest-Richtlinie der EU verabschiedet, die zwei Regulierungsalternativen vorsieht [5]. Eine oder auch beide sind bis Ende 2029 in nationales Recht zu überführen.

Die erste Alternative sieht eine Absenkung des bisher geltenden Arbeitsplatzgrenzwertes für den Schichtmittelwert von $10\,000$ luftgetragenen Asbestfasern/ m^3 breiter als $0,2\ \mu\text{m}$ um einen Faktor 5 vor. Die zweite Alternative eröffnet die Möglichkeit, den bisher geltenden Grenzwert beizubehalten, sofern auch Fasern dünner als $0,2\ \mu\text{m}$ erfasst werden. Leider wurde versäumt, eine neue untere Durchmessergränze für die in der Richtlinie als „dünne Asbestfasern“ bezeichnete Fraktion zu vereinbaren. Aus diesem Grund ist unklar, welche morphologischen Fraktionen bei Faserzählungen unterhalb von $0,2\ \mu\text{m}$ tatsächlich erfasst werden und wie diese mit herkömmlichen Zählergebnissen in Beziehung zu setzen sind.

Für die derzeit in Deutschland an Arbeitsplätzen geltende Akzeptanzkonzentration für den Schichtmittelwert von $10\,000$ Asbestfasern/ m^3 erfolgt die Bestimmung der Anzahlkonzentration luftgetragener anorganischer Fasern nach der DGUV Information 213-546. Dafür werden auf einem Filter gesammelte Partikel mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) morphologisch charakterisiert und Fasern länger als $5\ \mu\text{m}$, mit einer Breite größer gleich $0,2\ \mu\text{m}$ und mit einem Aspektverhältnis größer als 3 mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) stofflich identifiziert. Die Nachweisgrenze dieses Verfahrens liegt unter den in der DGUV Information 213-546 spezifizierten Standardauswertebedingungen bei $15\,000\ \text{F}/\text{m}^3$. Niedrigere Konzentrationsgrenzen sind nur mit einer auf höhere spezifische Volumina angepassten Probenahme oder einer größeren ausgewerteten Filterfläche zu erreichen.

Unabhängig von der für die nationale Umsetzung der neuen EU-Richtlinie gewählten Regulierungsalternative wird der jetzt schon beträchtliche Aufwand für die Bestimmung von Anzahlkonzentrationen luftgetragener Fasern erheblich steigen. Für das zum Erreichen der Bestimmungsgrenze zu analysierende Luftvolumen muss für die erste Alternative im Vergleich zu bisher fünfmal mehr Filterfläche bei gleicher Vergrößerung ausgewertet werden. Für die zweite Alternative muss die bisher analysierte Fläche mit einer höheren Vergrößerung analysiert werden. Diese muss es erlauben, dünnere Asbestfasern bis zu einer festzulegenden Mindestbreite zu erkennen. Der Analyseaufwand steigt dabei mit dem Quadrat des Verhältnisses von alter zu neuer Sichtbarkeitsgrenze. Für eine auf $50\ \text{nm}$ festgelegte Sichtbarkeitsgrenze wären beispielsweise 16-mal mehr Bildpunkte zu analysieren als für $0,2\ \mu\text{m}$ [9].

Aus diesem Grund erscheint es als notwendig, die REM-Analyse durch softwarebasierte Verfahren zu unterstützen. Die hier vorgestellte Software AsbestosDetect erlaubt, den Messaufwand durch eine Automatisierung ausgewählter Analyseschritte zu re-

duzieren. Diese vermag nicht nur eine signifikante Effizienzsteigerung zu erreichen, sondern – durch größere analysierte Filterbereiche – auch die statistische Signifikanz herkömmlicher Analysen zu erhöhen und damit den 95 %-Vertrauensbereich der Zählergebnisse deutlich zu verkleinern (Bild 1).

2 Asbestfasern

2.1 Morphologie

Nach dem fasertoxikologischen Prinzip verfügen lange, alveolengängige biopersistente Fasern über ein karzinogenes Potenzial [10; 11]. Für die Bestimmung ihrer Anzahlkonzentration in der Luft wurden international verschiedene Messstrategien, Kategorisierungskonzepte und Zählregeln entwickelt, die sich an der Verfügbarkeit analytischer Techniken und der industriellen Relevanz der Faserart orientieren [9]. Die für Asbest wichtigste, da weltweit am meisten verwendete Zählkonvention wurde von der Internationalen Labour Organisation (ILO) und der Weltgesundheitsorganisation (WHO) vorgelegt [12]. Fasern, die den in dieser Regel festgelegten Abmessungen entsprechen, werden umgangssprachlich als WHO-Fasern bezeichnet. Zu zählende Fasern müssen in zweidimensionaler Projektionsansicht im Mikroskop eine Breite von weniger als $3\ \mu\text{m}$, eine Länge größer als $5\ \mu\text{m}$ und ein Länge-zu-Breite-Verhältnis größer als 3 aufweisen. Der Wert von $3\ \mu\text{m}$ resultiert aus der Forderung nach Alveolengängigkeit und einer angenommenen Stoffdichte von $2,6\ \text{g}/\text{cm}^3$. Ein die Durchmesserverteilung der Fraktion der WHO-Fasern maßgeblich bestimmendes Kriterium ist neben der oberen Breitenbegrenze die in der Zählvorschrift spezifizierte Sichtbarkeitsgrenze von $0,2\ \mu\text{m}$, die aus der Sichtbarkeit von Asbest und anderen Mineralfasern in der optischen Phasenkontrastmikroskopie (PCM) resultiert [13]. Sie legt die Untergrenze für die Breite der zu zählenden Fasern fest und schafft eine Vergleichbarkeit von mit PCM oder im REM ermittelten Faserzählergebnissen.

Mit den in der neuen Asbest-Richtlinie in der EU nun alternativ zu berücksichtigenden „dünnen“ Asbestfasern mit Breiten unterhalb von $0,2\ \mu\text{m}$ tritt die Situation ein, dass ermittelte Anzahlkonzentrationen von Asbestfasern nun nicht der WHO-Zählkonvention entsprechen, da abweichende Sichtbarkeitsgrenzen verwendet werden. Es sollte in einem solchen Fall daher nicht nur konsequent von WHO-analogen Fasern gesprochen werden, sondern zukünftig immer die für die jeweilige Faserzählung verwendete Sichtbarkeitsgrenze angegeben werden, beispielsweise in der Form $1\,000\ \text{WHO}_{0,2\ \mu\text{m}}/\text{m}^3$ für WHO-Fasern beziehungsweise $1\,000\ \text{WHO}_{0,05\ \mu\text{m}}/\text{m}^3$ für WHO-analoge Fasern, für die eine Sichtbarkeitsgrenze von $0,05\ \mu\text{m}$ zum Einsatz kam [9; 14].

Um eine Vergleichbarkeit zu historischen Asbestexpositionsdaten zu ermöglichen, sollte zusätzlich zur Konzentration WHO-analoger Fasern auch noch die Konzentration der WHO-Faserfraktion ermittelt werden. Dies ist mit einem automatisierten Zählverfahren wie dem hier vorgestellten, das für jede gefundene Faser ihre Länge und Breite dokumentiert, in einfacher Weise möglich.

Metrologische Fehler der Faserlänge resultieren aus der Pixelauflösung des verwendeten digitalisierten Bildes und dem Fehler der Bestimmung des Verlaufs des Rückgrats einer Faser. Für gewundene Fasern ist dieser Verlauf prinzipiell weniger genau bestimmbar als bei geraden Fasern. Der absolute Fehler einer Breitenmessung entspricht mindestens der Pixelauflösung des digitalisierten Bildes. Hinzu kommt der statistische Fehler der Standard-

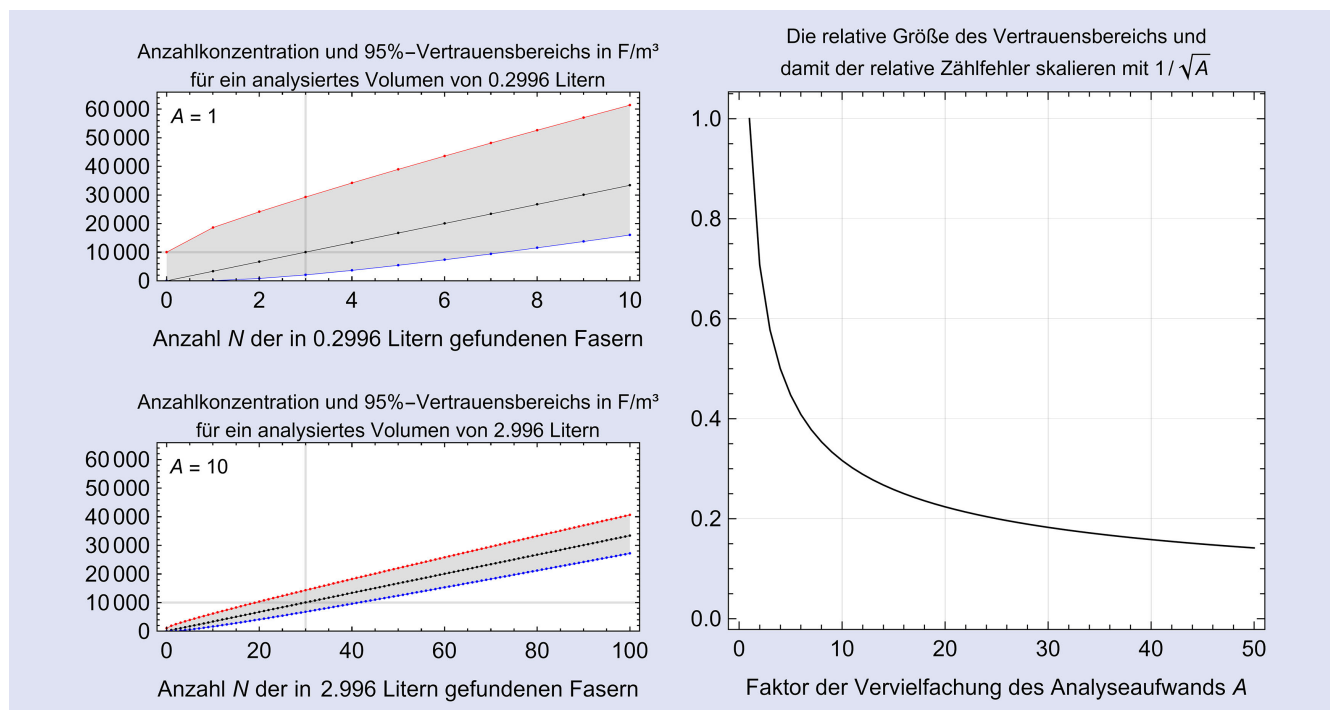


Bild 1 Abnahme der Größe des Vertrauensbereichs und des relativen Zählfehlers für die Messung der Faseranzahlkonzentration. Bei einer Konzentration von $10000 F/m^3$ entsprechen 0,2996 l dem analysierten Volumen, bei dem drei Fasern erwartet werden. Wird keine Faser gefunden, kann mit 95 % Konfidenz ausgeschlossen werden, dass die Konzentration von $10000 F/m^3$ überschritten wurde. Links: Beispiel einer Verzehnfachung des Auswerteaufwands beim Übergang von 0,2996 auf 2,996 l. Rechts: Entwicklung für einen variablen Faktor der Vervielfachung. Grafik: Autoren

abweichung mehrerer senkrecht zum Faserrückgrat bestimmter und gemittelter Breiten. Wie genau eine Faserbreite gemessen werden kann, hängt daher kritisch von der gewählten Auflösung ab. Für eine hinreichend verlässliche Überprüfung des Faserdurchmesser sollte die die Faserbreite mit mindestens 4 Pixel abgebildet werden, damit der relative Breitenfehler 25 % oder weniger beträgt [15]. Für die aus der PCM abgeleiteten Sichtbarkeitsgrenze von 200 nm erfordert dies eine Pixelauflösung im REM von 50 nm.

Zukünftig sollten diese unvermeidbaren Messfehler bei der morphologischen Klassifizierung berücksichtigt werden, da sie das Zählergebnis und seine statistische Unsicherheit direkt beeinflussen. So weist beispielsweise eine Faser mit einer Länge von $4,9 \pm 0,20 \mu m$ und Breite von $1,7 \pm 0,2 \mu m$ ein Aspektverhältnis von $2,9 \pm 0,4$ auf und damit eine nicht vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit, eine WHO-Faser zu sein. Es wurde vorgeschlagen, für die Faserklassifizierung statt der Länge die Länge zuzüglich Messfehler und statt der Breite die Breite abzüglich Messfehler zu verwenden, auch für die Berechnung des Aspektverhältnisses [16]. Für gerade Fasern sollte zudem die längste Strecke innerhalb ihrer Projektionsfläche als Länge genommen werden, nicht die parallel zu den Außenkanten verlaufende Länge. Dies stellt sicher, dass gewertete Länge besonders bei Fasern von geringem Aspektverhältnis nicht unterschätzt wird. Ohne Fehler und Fehlerfortpflanzung ergäben sich für eine rechteckige Projektionsfläche mit den Abmessungen a und b die zu wertende Länge $l = \sqrt{a^2 + b^2}$ und die mittlere Breite $w = a \cdot b/l$.

Dies verdeutlicht, dass eine detaillierte morphologische Charakterisierung jeder einzelnen gefundenen Faser die statistische Sicherheit von Faserzählergebnissen weiter zu verbessern vermag. Die zu konkret zu verwendenden morphologischen Zählkriterien,

Fehlermodelle und Sichtbarkeitsgrenzen sind detailliert zu spezifizieren, damit sie in den automatisierten Verfahren regeltreu implementiert werden können.

2.2 Chemische Zusammensetzung

Bei den in der Gefahrstoffverordnung [17] in § 2 (4a) mit CAS-Nummern benannten Asbestarten handelt es sich in der Praxis um recht breite Produktklassen, die zudem aus unterschiedlichen Lagerstätten stammen. Zu den sechs regulierten Asbesten gehören zum einen der Chrysotil, ein röllchenförmiges Schichtsilikat mit der Stöchiometrie $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, zum anderen die Amphibole (Bandsilikate) mit der Stöchiometrie $A_{0-1}B_2C_5T_8O_{22}(OH)_2$ [18]. Von der großen Mineralgruppe der Amphibole werden fünf als Asbeste gewertet:

- Grunerit, der auch als Amosit (Asbestos Mines Of South Africa) oder Braunasbest bezeichneten wird, ist das monokline Fe-Endglied der Li-Mg-Fe-Mn-haltigen Amphibole mit $Li < 1$ Atom-%, dem Mg zugemischt wird,
- Anthophyllit ist das orthorhombische Mg-Endglied der Li-Mg-Fe-Mn-Amphibole mit $Li < 1$ Atom-%, dem Fe zugemischt wird und der Na und Al enthalten kann,
- Krokydolith wird auch Blauasbest genannt und ist das Fe-Endglied der Na-Amphibole, mineralogisch auch als Riebeckit bezeichnet,
- Tremolit ist das Mg-Endglied der Ca-Amphibole, bei dem Mg durch Fe ersetzt wird und der Mg-reicher als Aktinolith ist,
- Aktinolith ist ein Ca-Amphibol, der Fe-reicher als Tremolit ist.

In Abhängigkeit von ihrer geologischen Genese und ihrem Wirtsgestein weisen die Asbeste auch innerhalb einer Art variierende Elementzusammensetzungen auf. Es ist daher nicht immer

möglich, einen technischen Asbest mineralogisch korrekt zu identifizieren. Aus diesem Grund wird in der Praxis eine Konvention verwendet, mit der technische Asbeste anhand der Übereinstimmung ihrer Elementkonzentrationen und Elementkonzentrationsverhältnisse mit festgelegten Konzentrationsintervallen beziehungsweise Konzentrationsverhältnisintervallen kategorisiert werden [19].

Die Elementkonzentration wird mittels Wellenlängen- oder Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (WDX bzw. EDX) bestimmt. Während WDX Elementstandards verwendet, finden für EDX auch standardfreie Quantifizierungsverfahren Anwendung, die weniger genau sind, dafür aber lediglich eine Kalibrierung der Energieskala erfordern. In beiden Fällen sind der Bremsstrahlungshintergrund sowie Absorptions- und Fluoreszenzbanden zu korrigieren. Diese können, wenn nicht korrekt durchgeführt, zu systematischen Quantifizierungsfehlern Anlass geben. Nicht zuletzt entscheiden auch die Intensität des Signals und das Signal-zu-Rauschverhältnis über die erreichbare Verlässlichkeit einer Quantifizierung [20].

In der Praxis werden detektorherstellereigene Verfahren für die Interpretation der EDX-Spektren verwendet. Daneben gibt es die freie DTSA-II-Software des National Institute of Standards and Technology (NIST) [21], die allerdings keine standardfreie Quantifizierung ermöglicht, während das Software-Framework HyperSpy [22] derzeit nur STEM/EDX [23], aber noch keine REM/EDX-Quantifizierung beherrscht.

3 Methoden

Die Software AsbestosDetect ermöglicht eine weitgehend automatisierte Bestimmung von Konzentrationen lungengängiger Fasern auf Filterproben aus Expositionsmessungen. Die Software vermag Rasterelektronenmikroskope verschiedener Hersteller zu kontrollieren und verbindet einen automatisierten Bildeinzug mit einer weitgehend automatisierten Erkennung und Vermessung von Fasern. Für Filterbereiche, auf denen Fasern kritischer WHO-Fasermorphologie gefunden werden, schließen sich eine automatisierte EDX-Analyse und stoffliche Klassierung an, deren Ergebnisse protokolliert und zur Nachkontrolle durch sachkundige Personen aufbereitet werden.

3.1 Automatisierungskonzept

Für eine automatisierte Probenauswertung müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Funktionsmodule implementiert werden und über geeignete Softwareschnittstellen zusammenwirken. Dazu gehören:

- Dateneingabemodul für Details der Probenahme,
- Bibliotheksmodul für das Vorhalten verschiedener Analyseabläufe,
- Modul zur Steuerung des Analyseablaufs,
- Tischsteuerungsmodule für die REM- und EDX-Schnittstellen,
- Modul für Steuerung, Akquise und Optimierung von Sekundärelektronen-Bildern (SE),
- Bildanalysemodul für die Bildsegmentierung, Erkennung und Vermessung von Fasern,
- Modul für die Positionierung, Steuerung und Akquise faserbezogener EDX-Analysen,

- Modul für die Klassierung von Faserobjekten,
- Modul für die Prüfung und Freigabe von Analyseergebnissen,
- Modul für die Auswertung, Datenablage und Rohdatendokumentation.

Die Software AsbestosDetect implementiert diese Module in zwei separaten Programmteilen. Das Programm TiNa steuert die Probenpositionierung und Datenakquise mit REM und EDX, während das Programm FibreDetect die Bildsegmentierung, Fasermorphologie-Erkennung und Ergebnisdarstellung übernimmt. Die Software ist in der Programmiersprache C++ geschrieben und ist über nachladbare Softwarebibliotheken um zusätzliche Hardware-schnittstellen erweiterbar. Dies erlaubt TiNa, andere REM-EDX-Kombinationen zu kontrollieren und für die Probenanalyse zu nutzen, sofern diese die für den Betrieb von TiNa notwendigen Funktionalitäten bereitstellen. Durch die simultane Ausführung der beiden Programme werden von TiNa akquirierte Daten im Hintergrund von FibreDetect prozessiert. Speziell die Bildsegmentierung und Segmenterkennung und -vermessung mit FibreDetect sind rechenzeitintensiv. Durch die Parallelisierung und Ausführung von FibreDetect auf einem separaten, mit einer leistungsstarken Grafikkarte ausgestatteten Rechner kann erreicht werden, dass der Ablauf der Bildaufnahme in TiNa durch die Bildauswertung mit FibreDetect im Vergleich zur Bildeinzugszeit nur gering verzögert wird. Dies ist wichtig, um kritische Fasermorphologien quasi in Echtzeit erkennen und direkt einer EDX-Analyse unterziehen zu können.

3.2 Analysesteuerung und Datenverwaltung

Für die Durchführung verschiedener Analyseprozeduren und standardisierter Messvorschriften verfügt die Automatisierungslösung AsbestosDetect über eine flexible Ablaufsteuerung. Sie verwendet dafür in einer Datenbank hinterlegte Parametersätze, die eine Standardarbeitsanweisung (SAA) repräsentieren, indem sie nicht allein die Art der Bildfeldzahl und -verteilung, Bildaufnahme- und EDX-Analysebedingungen detailliert beschreiben, sondern auch die Art der mit EDX auszuwertenden Partikelmorphologien sowie die Kriterien der stofflichen Klassifizierung.

Im Analyseablauf werden dann für jede auszuwertende Filterposition eine Reihe definierter Analyseschritte bestehend aus REM-Bildeinzug, Bildanalyse, Objektklassifizierung, EDX-Analyse und stofflicher Klassifizierung sukzessive abgearbeitet. Auf diese Weise können Analysen reproduzierbar, aber dennoch flexibel durchgeführt werden.

Für die dabei in vielfältigen Formaten anfallenden Daten und Metadaten wurde an der BAuA, unterstützt durch Mittel des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) aus dem Deutschen Aufbau- und Resilienzplan (DARP), die unter dem Akronym FAMOSH (Fibres and Advanced Materials in Occupational Safety and Health) firmierende MySQL-Datenbank entwickelt. Diese implementiert eine auf die jeweiligen Nutzerrechte abgestufte Verwaltung der Analyseaufträge und der aus ihnen resultierenden Daten und erlaubt Parametereingaben und Ergebnisabfragen über eine graphische Bedienoberfläche.

Die von den jeweiligen Analysezeitschritten erzeugten Daten werden mit ihren Analyseparametern verknüpft in der FAMOSH-Datenbank gespeichert, damit für jeden Datensatz detailliert nachvollziehbar wird, wie er entstanden ist.

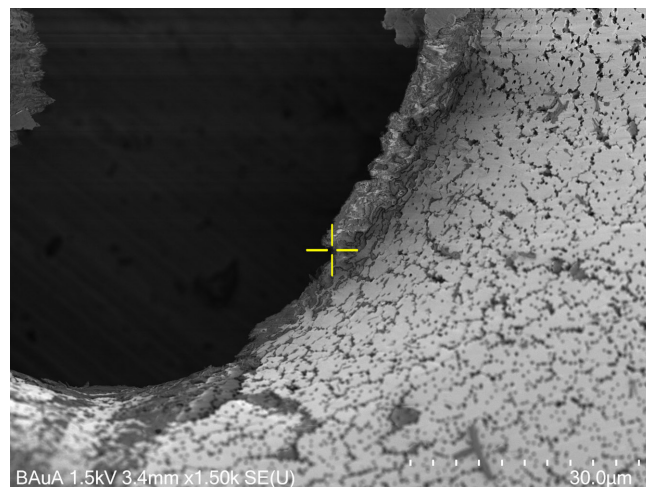
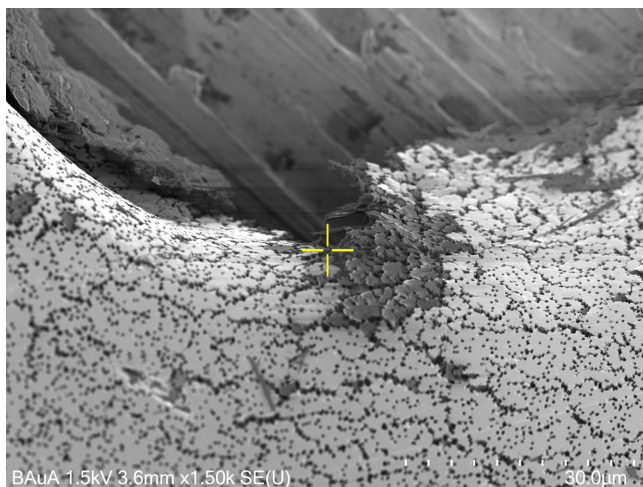


Bild 2 Beispiele für zwei von vier Nadeleinstichlöchern in einem Kernporenfilter mit – im Zentrum des gelben Kreuzes – ausgewählten Referenzpunkten zur Definition des von der Tischnavigation benötigten probenbezogenen Koordinatensystems. Foto: Autoren

3.3 Probennavigation und Bildeinzug

Der mit TiNa automatisierte Bildeinzug ermöglicht es, auch große Zahlen von Bildfeldern anzufahren und einzuziehen. Voraussetzung ist nicht nur eine automatische Schärf- und Belichtungskorrektur, sondern auch eine Dokumentation der exakten Position der abgebildeten Filterbereiche.

Nur mit einer exakten Position versehene Bilder erlauben, eine umstrittene Faserklassifizierung von menschlichen Experten durch Wiederanfahren ihrer Position zu klären, oder – bei Bedarf – die vollständige Länge von Randfasern, also Fasern, die aus dem Bildfeld ragen, zu bestimmen. In **Bild 2** ist dargestellt, wie drei oder mehr in einen Kernporenfilter mit einer Nadel gestochene Löcher dazu dienen, einen Filter mit einem probenbezogenen Koordinatensystem zu versehen, das zur Lokalisierung von Filterpositionen verwendet wird, indem es in TiNa mathematisch mittels einer Affinen Transformation auf das jeweilige Koordinatensystem der Bühne des REMs abgebildet wird (**Bild 3**).

Für die Automatisierung der Asbestfasererkennung stellt neben der Fasererkennung selbst das Softwaremodul für die Positionierung der Probe mit dem Mikroskopisch vor REM- und EDX-Analysen die kritischste Komponente des Systems dar [24; 25]. Es muss automatisiert leisten, was bisher nur ein menschlicher Experte vermag, nämlich sicherzustellen, dass der Ort einer Faser und der Ort der EDX-Analyse garantiert deckungsgleich sind. Hierfür kommen Bildkorrelationsverfahren zum Einsatz, die zwei oder mehr mit unterschiedlichen Bildaufnahmeparametern oder SE- beziehungsweise EDX-Signalen erzeugte Bilder anhand des Musters der Kernporen relativ zueinander zu orientieren vermögen. Auf diese Weise wird es möglich, einen durch eine ungenaue Tischsteuerung verursachten Bildversatz zu detektieren und mit hoher Auflösung zu korrigieren.

3.4 Bildsegmentierung

Zur Erkennung von auf dem Filter liegenden Objekten wird eine sogenannte binäre semantische Segmentierung des Bildes vorgenommen. Im Unterschied zu homogenen und glatten Substraten sind Fasern, Partikeln und ihre Agglomerate und Aggregate auf der Oberfläche von Kernporenfiltern viel schwieriger zu

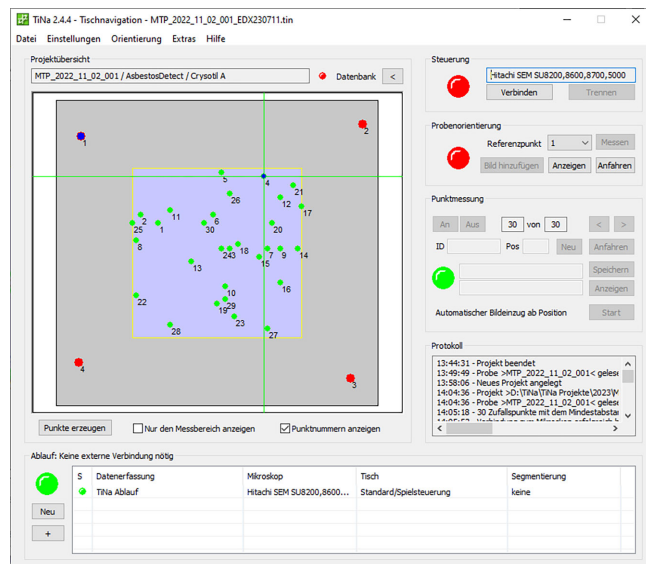


Bild 3 Bedienoberfläche der Software TiNa mit aus der FAMOSH-Datenbank importierten Analyseabläufen, 35 zufällig ausgewählten Bildfeldern (grün) und den vier Referenzpunkten (rot und blau) für das probenbezogene Koordinatensystem. Foto: Autoren

segmentieren, da schon die Filter in der Abbildung den gesamten Grauwertbereich umfassen. Traditionelle automatische Bilderkennungsverfahren scheitern bereits daran, da sie in der Regel auf dem Prinzip der Graustufendiskriminierung basieren. Aus diesem Grund kommen in AsbestosDetect Künstliche Neuronale Netze (KNN) mit sogenannter U-Net-Architektur zum Einsatz. Das verwendete Faltungs-Autoencoder-Modell wurde anhand eines großen Datensatzes von etwa 1 000 REM-Bildern von jeweils 5 120 x 3 840 Pixeln Größe trainiert, die mit niedrigen Beschleunigungsspannungen im Bereich von 2 bis 3 keV aufgenommen wurden. Sie zeigten Kohlenstofffasern und Kohlenstoffnanoröhren auf Kernspurmembranfiltern, deren Verläufe und Breiten mit einem selbst entwickelten Editortool manuell auf separate Bildebenen eingezeichnet wurden. Diese sogenannte Annotierung stellt das zum Training eines KNN benötigte Referenzwissen

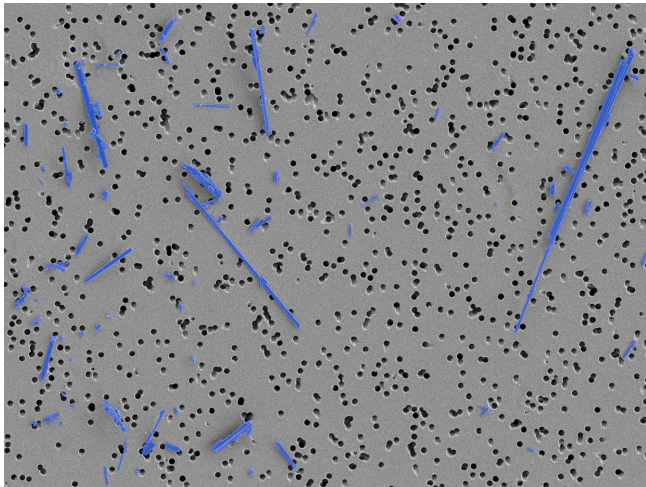


Bild 4 Erkennung von Bildpunkten, markiert in blau, an denen Krokydolith-Fasern auf dem Kernporenfilter liegen, mit KNN. Mikroskopaufnahme und Overlay: Autoren

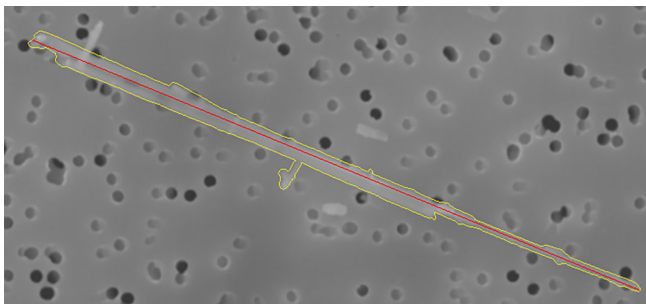
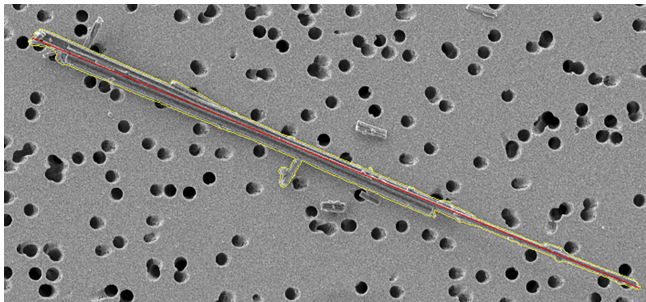


Bild 5 Beispiel für die auf einer Auswertefläche mittels KNN und FibreDetect registrierten Partikelstrukturen mit in rot eingezeichnetem Faserrückgrat; Niedervolt SE-Bild (oben) mit gelbem Segmentierungsrand, der im Bild unten nach Bildkorrelation auf das Hochvolt-SE-Bild appliziert wurde. Mikroskopaufnahme und Overlay: Autoren

(ground truth) bereit, das definiert, ob ein Bildpunkt einen Teil einer Faser zeigt oder nicht.

Dieser Datensatz wurde im Verhältnis 7 : 1 in zwei Teilmengen unterteilt: eine für das Training, die andere für die Validierung des Trainingserfolgs. Zur Vergrößerung des Trainingsdatensatzes wurden sowohl rotierte als auch gespiegelte Bildkopien erstellt, deren Helligkeit und Kontrast zudem zufällig variiert wurden. Das Training wurde beendet, wenn innerhalb von 40 Iterationen (Epochen) der Anpassung der Parameter des KNN keine weitere Verbesserung der Segmentierungsqualität für den Validierungssatz erzielt wurde. Der Trainingsprozess des KNN wird im Detail in Referenz [26] beschrieben. Ein Beispiel eines KNN-Segmentierungsergebnisses ist in **Bild 4** dargestellt.

Ein auf diese Weise optimiertes KNN ist in der Lage, Objekte in REM-SE-Bildern verlässlich zu erkennen, sofern das Netz mit Bildern vergleichbarer Qualität trainiert wurde. Auch KNNs, die mit Niedervolt-REM-SE-Bildern trainiert wurden, waren prinzipiell auch zur Erkennung von Objekten auf Hochvolt-REM-SE-Bildern geeignet, die mit 10 bis 15 keV Beschleunigungsspannung aufgenommen wurden und daher kontrastärmer sind. Für die Asbestanalyse ist eine faserbezogene EDX-Analyse zwingend erforderlich, weshalb faserförmige Objekte auf Hochvolt-SE-Bildern verlässlich erkannt werden müssen. Um die Erkennungsleistung auf Hochvolt-REM-SE-Bildern entsprechend zu verbessern, ist ein sogenanntes Transfer-Learning des KNN notwendig. Dabei wird das für Niedervolt-REM-SE-Bilder optimierte Netz mit einem Datensatz, in dem Fasern in Hochvolt-REM-SE-Bildern markiert wurden, nachtrainiert.

Im Fall einer nicht ausreichenden Verlässlichkeit für asbestförmige Fasern kann die Erkennungsleistung eines KNN durch die Einbeziehung möglichst pixelgenau händisch korrigierter KNN-Segmentierungen solcher Fasern in ein Transfer-Learning erreicht werden. Dies reduziert den Arbeitsaufwand signifikant, da nicht mehr ganze Bilder, sondern lediglich als fehlerhaft erkannte Bildbereiche händisch nachgebessert werden müssen. Sofern eine (fast) pixelgenaue Überlagerung von einem Nieder- mit einem Hochvolt-SE-Bild desselben Filterbereichs erreicht wird, kann die ggf. verlässlichere Segmentierung des Niedervolt-SE-Bildes als Annotierung des Hochvolt-SE-Bildes für ein Nachtraining verwendet werden.

Wichtig ist, dass auch bei routinemäßiger Verwendung eines KNN die Qualität der Bildsegmentierung kontinuierlich durch die die Software Nutzenden bewertet wird, damit – sofern als erforderlich erkannt – ein Nachtraining anhand identifizierter Problemfälle angestoßen werden kann. Für AsbestosDetect wird dazu ein auch von nicht KI-Experten nutzbares Trainingstool verfügbar gemacht werden, mit dem ein KNN mit ausgewählten annotierten Bildern nachtrainiert und der erreichte Trainingserfolg quantifiziert werden kann.

3.5 Objekterkennung

Die in AsbestosDetect derzeit implementierte binäre semantische Bildsegmentierung unterscheidet lediglich Vordergrundbildpunkte, die zu auf einem Kernporenfilter liegenden Objekten gehören, von Hintergrundbildpunkten des Kernporenfilters. Um in den Vordergrundbildpunkten faserförmige Objekte zu kennen, werden die zusammenhängenden Bildpunkte zu Segmenten gruppiert, deren Morphologie algorithmisch interpretiert wird.

In **Bild 5** ist eine solche Suche nach faserförmigen Objekten in einem Segment beispielhaft dargestellt. Der Erkennungsalgorithmus in FibreDetect beherrscht die Erkennung von Bestandteilen einander überlagernder Objekte und ihre Trennung in separate Partikel und/oder Fasern (**Bild 6**).

Das Faserrückgrat wird dabei aus einer Schar von Mittelpunkt von Verbindungslinien rekonstruiert, die aus einer Umrundung eines Segments an das in Bild 6 gelb dargestellte Umrisspolygon orthogonal konstruiert werden und bis zum gegenüberliegenden Teil des Umrisspolygons reichen. Dabei werden nur solche Verbindungslinien berücksichtigt, deren Länge im Rahmen einer Toleranzvorgabe einer für das Segment sogenannten charakteristischen Breite entspricht, die aus dem Hauptpeak des Breitenhistogramms des Segments ermittelt wird. Das Faserrückgrat

wird dann mit einer Kurve parametrisiert, die eine Bestimmung der Faserbreite und Krümmung entlang des Rückgrats sowie der mittleren Faserbreite und ihrer Standardabweichung erlaubt.

Auf diese Weise erfolgreich separierte Objekte können anschließend auf eine kritische Fasermorphologie hin überprüft werden, für die dann nachfolgend EDX-Analysen initiiert werden.

3.6 EDX-Analyse

WHO-analoge Fasermorphologien automatisch hinsichtlich ihrer Asbestartigkeit zu überprüfen erfordert, eine Reihe neuer Konzepte auf ihre praktische Tauglichkeit hin zu validieren.

Prinzipiell kann auf Basis einer verlässlichen KNN-basierten Fasererkennung ein ähnlich interaktives (Online-)Vorgehen praktiziert werden, wie derzeit nach einer Fasererkennung durch einen menschlichen Asbestexperten: Wird in einem Bildfeld eine Faser erkannt, werden eine oder mehrere Punkte entlang des Faserrückgrats mit EDX analysiert. Bei einem automatisierten Vorgehen besteht jedoch das Risiko, das Faserrückgrat beim Positionieren des Elektronenstrahls aufgrund von Bild- oder Tischdrift zu verfehlen. Dagegen kann eine erneute Lokalisierung der kritischen Faser in einem neuen SE-Bildausschnitt helfen oder – vorzugsweise – eine rasternde EDX-Analyse (Mapping). Diese weist nicht nur eine höhere Ortstoleranz auf, sondern generiert zusätzlich Informationen über die Filterumgebung der Faser. Mit diesen kann die Auswertung der Spektren auch nach Abschluss des automatischen EDX-Analyselaufrs „nach den Regeln der Kunst“ also ggf. durch einen menschlichen Experten erfolgen. Durch Integration des Signals der gesamten gerasterten Fläche einer interessierenden Faser und der sie umgebenden Filterbereiche können Elementzusammensetzungen von Fasern und Filtern verglichen und eventuelle Kontaminationen erkannt und studiert werden (**Bild 7**).

Um die für eine solche rasternde EDX-Analyse erforderliche Akquisitionsdauer in einem vertretbaren Rahmen zu halten, wur-

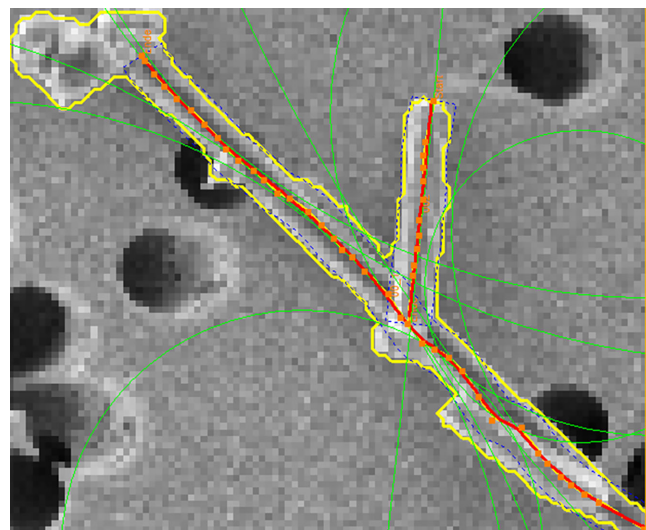


Bild 6 Identifizierung von zwei einander überlagernden faserförmigen Objekten mit anhängendem Partikel durch eine algorithmische Bestimmung des Verlaufs ihrer rot dargestellten Rückgrate, deren Länge, der mittleren Breite des gelb dargestellten Umrisspolygons senkrecht zum Rückgrat sowie der Rückgratkrümmungen, parametrisiert durch stetig anschließende, grün dargestellte Krümmungskreise.

Mikroskopaufnahme und Overlay: Autoren

de für AsbestosDetect ein Mapping-Modus implementiert, mit dem eine Faser innerhalb eines Saums, der in etwa die doppelte bis dreifache Fläche der Faser abdeckt, analysiert wird (**Bild 8**). Da für jede kritische Faser ihre Pixelfläche bekannt ist, kann die für eine ausreichende Signalstärke notwendige Integrationsdauer flächen- und gegebenenfalls faserdurchmesserbezogen adjustiert werden. Für verlässlich auswertbare EDX-Spektren werden sowohl beim Mapping als auch bei der faserrückgratbezogenen Punktmessung vergleichbare Summen an Röntgenquanten notwendig sein. Der Zeitbedarf sollte für diesen Saum-Modus daher

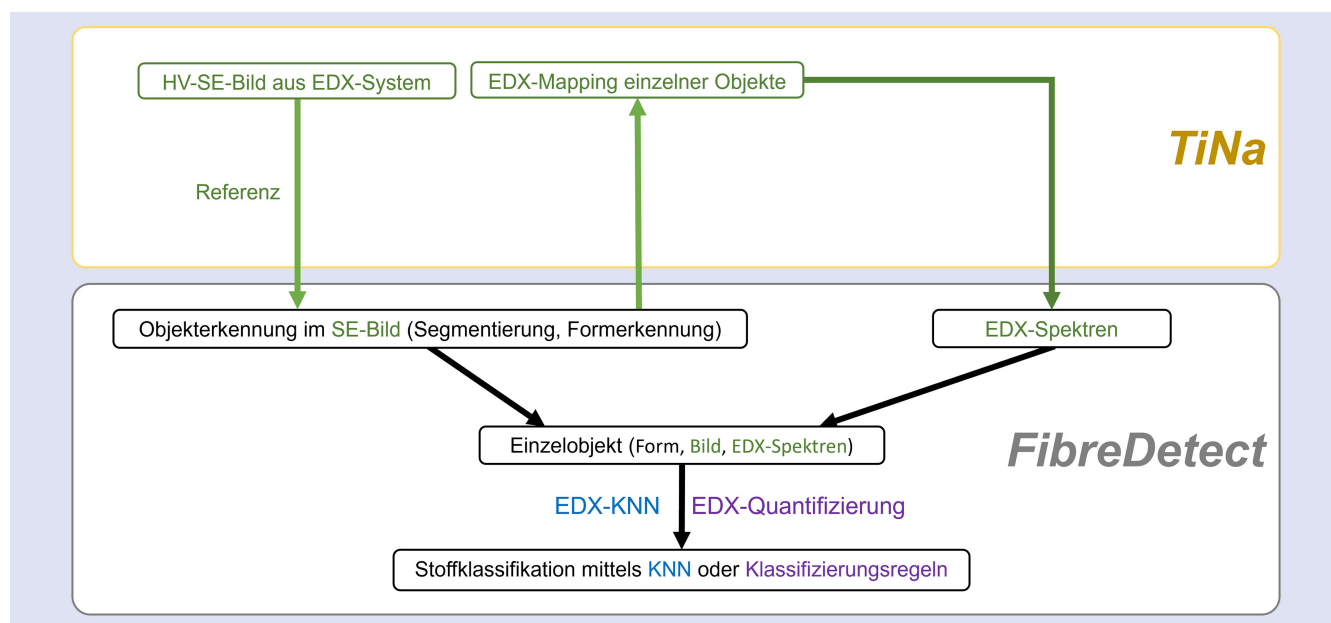


Bild 7 Schema einer Objektklassifikation auf Basis eines Hochvolt (HV)-SE-Bildes des EDX-Systems. Für die im HV-SE-Bild erkannten Objekte werden Bereiche definiert, für die EDX-Mapping oder eine Einzelmessung durchgeführt werden. Die Klassifizierung faserförmiger Objekte kann mittels KNN oder auf den Elementkonzentrationen basierenden Klassifizierungsregeln erfolgen. Grafik: Autoren

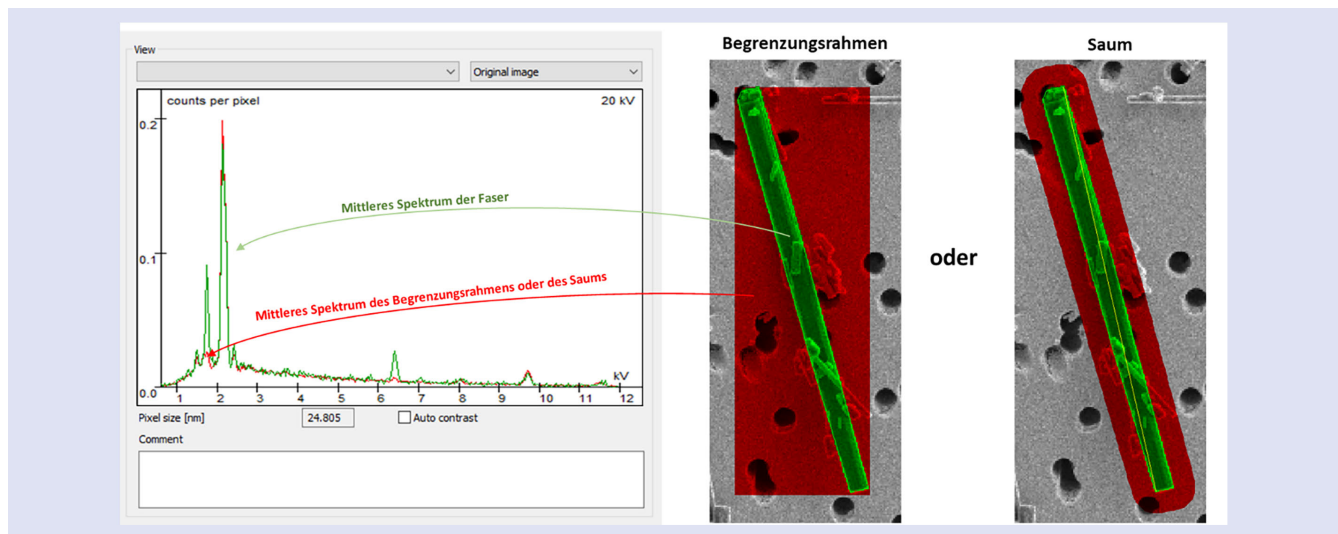


Bild 8 Auf der Fläche der ausgewählten Faser akkumuliertes EDX-Spektrum (grün) im Vergleich zum Spektrum der Filterumgebung innerhalb des Begrenzungsrahmens der Faser oder eines die Faser umgebenden Saums (rot). Grafik/Foto: Autoren

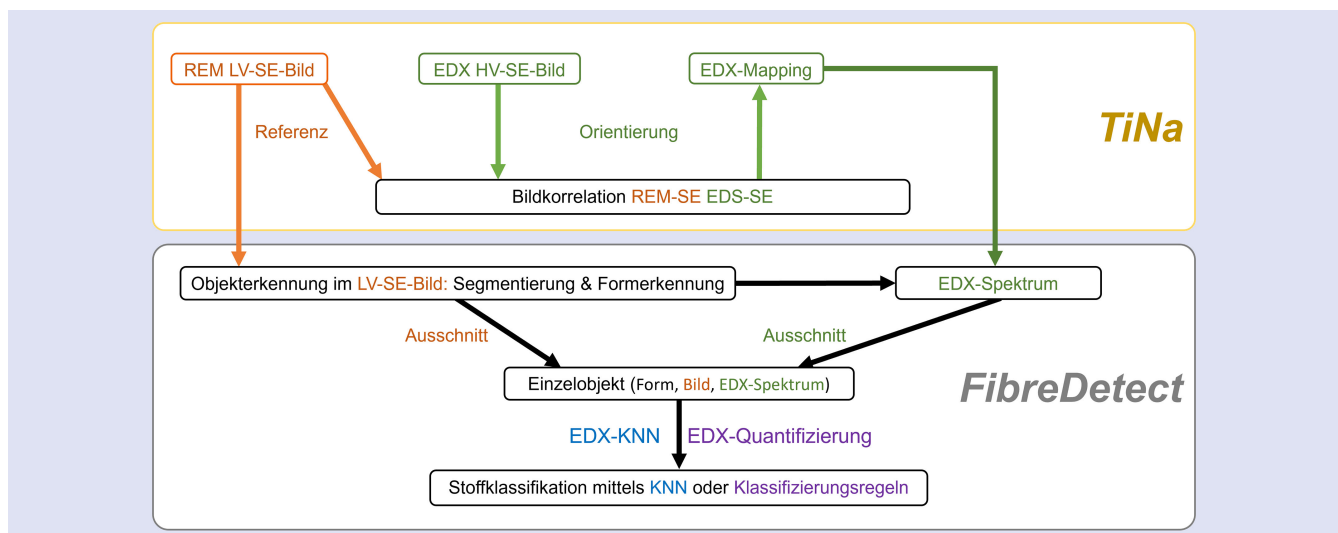


Bild 9 Schema einer Objektklassifikation auf Basis sowohl eines Niedervolt (LV)-SE-Bildes des REM als auch eines (HV)-SE-Bildes aus einer flächenhaften EDX-Analyse (Mapping). Das hochauflösende, auch dünne Fasern zeigende LV-SE-Bild wird mit dem HV-SE-Bild korreliert, um die EDX-Spektren der zu analysierenden Objekte zu akkumulieren. Die Klassifizierung faserförmiger Objekte kann mittels KNN oder auf den Elementkonzentrationen basierenden Klassifizierungsregeln erfolgen. Grafik: Autoren

prinzipiell nur um einen Faktor 2 bis 3 gegenüber der herkömmlichen Punktanalyse ansteigen. Die technische Umsetzung des Saum-Mapping-Modus erfordert eine entsprechende Kontrolle der Elektronenstahlführung und wurde bisher über die Software-schnittstelle der Fa. Bruker realisiert.

Die Erfolgsquote eines solchen interaktiven Online-Verfahrens hängt kritisch von der Verlässlichkeit der Fasererkennung und Faserlokalisierbarkeit und damit von Faserdurchmesser und verwendeter Beschleunigungsspannung ab. Dünne Asbestfasern mit weniger als 0,2 µm Durchmesser können in Hochvolt-SE-Bildern sehr kontrastarm erscheinen. Sollen sie sicher erkannt werden, kann in AsbestosDetect vor der EDX-Analyse mit hoher Beschleunigungsspannung zunächst eine Niedervolt-SE-Bildnahme vorgeschaltet werden. Für erkannte kritische Fasern ist dann das Hoch-Niedervolt-Bildpaar örtlich anhand des Musters der Kernporen des Filters zu korrelieren, um den Analyseort auch ohne

klares Faserbild relativ zu den umgebenden Kernporenpositionen lokalisieren zu können (**Bild 9**).

Für den objektbezogenen Zugriff auf die riesigen Datensätze eines EDX-Mappings legt AsbestosDetect speicheroptimierte Bilder- und Spektrenstapel an. Mit diesen können Spektren punktweise, beispielsweise entlang eines Faserrückgrats, oder integriert über ausgewählte Flächenbereiche, beispielsweise die Fläche einer Faser oder eines daran angrenzenden Filterbereichs, für weiterführende Berechnungen und die Ergebnisdokumentation bereitgestellt werden. Derart vielfältige Auswertemöglichkeiten sind bei lediglich punktueller EDX-Messung nachträglich nicht möglich.

Die Objekterkennung und Klassifizierung auf der Basis von SE-Bildern und zugehörigen EDX-Mappings kann nicht nur online, sondern auch offline nach Abschluss einer Analyse und auf einem anderen als dem REM-Steuercomputer durchgeführt werden. Im Fall unklarer Analyseergebnisse erlaubt die Markierung

durch ein probenbezogenes Koordinatensystem auch nach dem Ausschleusen der Probe ein Wiedereinschleusen und wiederholtes Anfahren interessierender Filterpositionen zu einem späteren Zeitpunkt.

Für die Online-Analyse wird während eines TiNa-Laufes nach Einzug jedes SE-REM-Bildes von einer parallel laufenden FibreDetect-Instanz, die den Bildspeicherordner überwacht, automatisch eine Bildsegmentierung und Objekterkennung durchgeführt. Vor dem Einzug eines weiteren Bildes wartet TiNa auf die dabei erkannten und anhand der WHO-Kriterien selektierten Fasern. Form und Position der Fasern werden jeweils als sogenannte Region-of-Interest (ROI) zurückgegeben und genutzt, um – je nach Modus – an den spezifizierten Filterpositionen Punkt-, Saum- oder Flächen-EDX-Messungen durchzuführen. Jedes Objekt kann so individuell in Abhängigkeit von seiner Form und Fläche analysiert werden. Für kleine Partikel und dünne Fasern, deren Bilder nur aus wenigen Pixeln bestehen, können höhere Integrationszeiten gewählt werden als für größere/dickere und Datenmenge, Aufnahmedauer und Spektrqualität optimiert werden.

3.7 EDX-Quantifizierung

Ein Beispiel für ein mit TiNa akquiriertes und in FibreDetect dargestelltes EDX-Spektrum, das auf der Fläche eines auf dem Niedervolt-SE-Bild segmentierten Objektes akkumuliert wurde, ist in Bild 8 im Vergleich zum Spektrum seiner Filterumgebung gezeigt.

Da den Autoren zurzeit keine quelloffene EDX-Methode für eine standardfreie Quantifizierung bekannt ist, verwendet AsbestosDetect, sofern dafür am Gerät eine Lizenz verfügbar ist, derzeit die Softwareschnittstelle der Firma Bruker zur Akquise und Auswertung von EDX-Spektren. Perspektivisch wäre es wünschenswert, eine quelloffene, einheitliche und allgemein zugängliche Quantifizierungssoftware zu entwickeln, um für die Spektrenauswertung kommerzielle Lizenzmodelle und nicht offengelegte herstellerspezifische Algorithmen vermeiden zu können. Selbstverständlich wird für die Durchführung von EDX-Messungen die Schnittstelle des jeweiligen Detektorherstellers genutzt werden müssen.

3.8 Faserklassifizierung

Alle akquirierten Rasterdaten werden zu einem „Informationsstapel“ zusammengefasst. Er enthält neben dem initialen SE-Bild und den Segmentierungen auch die Spektren der zur EDX-Analyse ausgewählten Punkte. Diese Ebenen mit Rasterdaten können wechselseitig anhand ihrer Koordinatensysteme oder – sofern erkennbar – lokaler Strukturmerkmale örtlich korreliert werden. Für die in diesen Ebenen identifizierten Segmente werden ihre morphologischen Eigenschaften algorithmisch bestimmt. Mit Segmenten örtlich korrelierte EDX-Spektren werden akkumuliert und Element-Quantifizierungsergebnisse berechnet. Für die darauf basierenden stoffliche Klassifizierung wurden in AsbestosDetect zwei unterschiedliche Methoden implementiert.

3.8.1 Etabliertes Stoffklassifizierungsschema

Im Anschluss an die Quantifizierung eines EDX-Spektrums werden die Elementkonzentrationen an ein Softwaremodul in Fi-

bredetect übergeben, dass die von Mattenklott [19] beschriebene Methode implementiert. Für die Klassifizierung gemäß dieser Konvention wird überprüft, ob die Konzentrationen der Elemente Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Mn und Fe, der Elementkonzentrationsverhältnisse Si/Mg, Si/Al, Si/Ca und Si/Fe sowie der Verunreinigungen Li, B, F, P, Cr, Zr, Ba, Pb eines Stoffes innerhalb der festgelegten Konzentrationsintervalle und Konzentrationsverhältnisintervalle liegen. Im Fall keiner eindeutigen Klassifizierung können für die Intervallgrenzen relative Toleranzen zugelassen werden und die dann resultierenden Stoffkandidaten entsprechend geordnet werden.

3.8.2 KI-basierte Stoffklassifizierung

Zusätzlich zu der zuvor beschriebenen etablierten Vorgehensweise wurde für FibreDetect ein weiteres KNN-basierendes Softwaremodul entwickelt, das eine Stoffklassifizierung auf Basis von EDX-Rohdaten durchführt. Für sein Training wurden rund 4 500 EDX-Spektren von Asbestreferenzproben und anderen faserförmigen Materialien verwendet. Für die Etablierung dieser alternativen Methode – deren Anwendung vergleichbar mit dem in der Praxis üblichen „geschulten Expertenblick“ ist, bei dem nur in strittigen Fällen eine Elementquantifizierung durchgeführt wird – als akzeptiertes Klassifizierungsverfahren wird seine Verlässlichkeit rigoros zu prüfen sein. Die detaillierte Vorgehensweise und die erreichte Klassifizierungsqualität werden daher in einem separaten wissenschaftlichen Artikel publiziert werden.

4 Datenbank

Bei den in der FAMOSH-Datenbank verwalteten Daten handelt es sich zunächst um die einen Analyseauftrag definierenden Projekt- und Probeninformationen. Für diese können Parametersätze abgelegt werden, die der Steuerung der automatischen Analysevorgänge dienen. Dazu zählen Parameter, die beschreiben, wie die Mikroskope zu steuern und Bilder oder Spektren einzuziehen sind. Auch müssen die vorzunehmenden Klassifizierungsschritte beschrieben und – konkret – Informationen über die zu verwendenden KNN oder Klassifizierungsregeln hinterlegt werden. Über einen Webbrowser ist es Nutzern möglich, die von TiNa zur automatischen Analyse benötigten Parametersätze in die Datenbank einzustellen, entweder als replizierbare Schemata oder als Analyseablauf für eine konkrete Probe.

Für die in der Datenbank zur Auswahl angebotenen KNN wird zudem detailliert dokumentiert, mit welchen Daten und welchen Parametern sie trainiert wurden. Durch Vergleich der Datenqualität der für ein Training eines KNN verwendeten Bilder oder Spektren mit den von ihm zu prozessierenden Daten kann sichergestellt werden, dass ein KNN für deren Interpretation prinzipiell geeignet ist.

Die bei der Durchführung einer Analyseabfolge entstehenden Ergebnisdaten werden mit ihren Analyseparametern verknüpft in der FAMOSH-Datenbank gespeichert. Auf diese Weise ist für jedes gespeicherte Datum nachvollziehbar, wann, auf welcher Probe, in welchem Analyseschritt und mit welchen Parametern es entstanden ist. Hierzu zählen neben den aufgenommenen Bildern und Spektren auch deren Metadaten und Interpretationen, wie die auf der Bildsegmentierung oder Spektrinterpretation basierenden morphologischen und stofflichen Informationen gefundener Partikel und Fasern. Somit ermöglicht die Datenbank, alle zu

einem Objekt zusammengestellten Informationen abzufragen und, sofern nicht während des Analyselaufs geschehen, nachträglich zu sichten und auszuwerten.

Zum Webinterface der FAMOSH-Datenbank gehören eine Softwareschnittstelle (API) sowie ein Frontend für den Zugriff im Browser. Das API umfasst die Authentifizierung des Nutzers und ermöglicht es ihm, seine Daten sowohl einzupflegen als auch für ihn freigegebene Daten abzurufen und zu filtern. Mit der Datenbank wird dabei über https-Anfragen kommuniziert. Für AsbestosDetect wurde eine Programmbibliothek entwickelt, über die TiNa mit der Datenbank kommuniziert, um Analyseaufträge entgegenzunehmen und Analyseergebnisse zu übermitteln. Durch einen Server kann eine ortsunabhängige Erreichbarkeit der Datenbank durch mehrere gleichzeitige Nutzer gewährleistet werden. Durch eine Zwei-Faktor-Authentifizierung der Nutzer und die Vergabe von Rollen und Rechten können zudem die für einen Nutzer verfügbaren Funktionen individuell festgelegt und abgesichert werden. Datensätze gehören per Default nur dem jeweiligen Ersteller, können aber für andere Nutzer zur Ansicht oder auch zur Bearbeitung freigegeben werden. Für wissenschaftliche Zwecke freigegebene Inhalte der Datenbank sollen beim Herunterladen zukünftig mit einem Digital Object Identifier (DOI) versehen werden, um sie zitierfähig und wiederauffindbar zu machen.

5 Ergebnisbewertung und Berichterstellung

Alle bei der Filteranalyse akquirierten Rasterdaten werden von AsbestosDetect zu einem „Informationsstapel“ zusammengefasst. Dieser enthält neben dem initialen SE-Bild und den Segmentierungen auch die Spektren der zur EDX-Analyse ausgewählten Punkte. Diesem Stapel können weitere, unter anderen Aufnahmebedingungen genommene SE-Bilder oder EDX-Spektren hinzugefügt werden, beispielsweise hochaufgelöste Bilder, mit denen morphologische Details feiner dargestellt werden. Durch die den Informationen zugeordneten Koordinatensysteme können die Informationsebenen wechselseitig örtlich anhand des Probenkoordinatensystems oder lokaler Strukturmerkmale korreliert werden, sofern erkennbar. Den in diesem Informationsstapel identifizierten Segmenten werden ihre morphologischen Eigenschaften, Element-Quantifizierungsergebnisse und die darauf basierenden Klassifizierungsentscheidungen zugeordnet. Darauf basierend erfolgt die Klassifizierung als WHO-analoge Asbestfaser zunächst automatisiert.

Die Ermittlung von Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Asbest sind durch eine sachkundige Person durchzuführen [17]. Kommen dabei messtechnische Methoden zum Einsatz, muss eine entsprechende Fachkunde der durchführenden Stelle gegeben sein. Die Messstelle hat sich über die Eignung des Messverfahrens auch im Hinblick auf Störeinflüsse zu vergewissern und muss eine Qualitätssicherung der Messergebnisse durch eine geeignete Person dokumentieren [27]. Um problematische Proben und Abweichungen der Verlässlichkeit der automatischen Fasererkennung und Klassifizierung erkennen und die Robustheit der verwendeten KNN quantifizieren zu können, erscheint es als geboten, zunächst alle automatisierten Faserklassifizierungen durch eine qualifizierte Person zu überprüfen. Dieser zu überprüfende Prozentsatz wird in Abhängigkeit von der Eignung der zu analysierenden Proben für eine automatische Fasererkennung und Klassifizierung und der Verlässlichkeit des Verfahrens reduziert werden können.

Bei fragwürdigen Klassifizierungen ist über das probenbezogene Koordinatensystem ein Wiedereinschleusen und wiederholtes Anfahren und Analysieren mit TiNa möglich, beispielsweise um ein EDX-Spektrum noch einmal interaktiv zu messen oder die Geometrie einer Faser nachzumessen.

6 Nutzbarkeit mit verfügbaren REM-EDX-Detektor-Kombinationen

Mittelfristig wird eine breite Anwendbarkeit der Automatisierungslösung AsbestosDetect für ganz unterschiedliche Gerätekombinationen angestrebt, um AsbestosDetect zu einem von vielen Forschungseinrichtungen und Referenzlaboratorien nutzbaren Analysewerkzeug zu machen.

Derzeit können folgende REM genutzt werden: die SU-Serie des Herstellers Hitachi High-Tech Europe, die Phenom-Serie des Herstellers Thermo Fisher Scientific und REM, die vom DISS5-System der Fa. point electronic kontrolliert werden. EDX-seitig können XFlash-Detektoren des Herstellers Bruker angesteuert werden. Weitere Hersteller haben sich prinzipiell zur Nutzung ihrer Softwareschnittstellen durch AsbestosDetect bereit erklärt, allerdings hat sich in der praktischen Entwicklungsarbeit gezeigt, dass der Zugriff auf das API die Klärung von Detailfragen durch den Hersteller erfordert. Hierfür ist eine latenzarme und offene Kommunikation zwischen den Entwicklungspartnern unverzichtbar.

7 Perspektiven

Für die Etablierung der Automatisierungslösung AsbestosDetect in der Praxis ist im Anschluss an die derzeit noch laufende Entwicklungsphase eine Evaluierungs- und Servicephase geplant.

Ziel von AsbestosDetect ist es nicht, eine Konkurrenz zu kommerziellen Produktivlösungen zu etablieren, sondern die Software einem breiten Anwenderkreis verfügbar zu machen, um gemeinsam mit Forschungseinrichtungen und Referenzlaboratorien die Verlässlichkeit der Asbestquantifizierung mit ganz unterschiedlichen Software- und Gerätekombinationen zu studieren. Solche Vergleichsuntersuchungen werden durch die durch Standardarbeitsanweisungen algorithmisch definierten Analyseabläufe, eine vollständige Dokumentation aller Analyseschritte und (Teil-)Ergebnisse in der Datenbank sowie die Möglichkeiten zur Datenaggregation und zum Datenexport auf eine methodisch solide Basis gestellt. Um voll- oder teilautomatisierten Asbestanalysen zu breiterer Akzeptanz zu verhelfen und einen Weg hin zu einer Akkreditierung zu öffnen, werden systematische Ringversuche und Laborvergleiche und rigorose Ergebnisauswertungen notwendig sein.

Es wird erwartet, dass die in AsbestosDetect implementierten automatischen Bildauswerteverfahren den Einfluss subjektiver Kriterien auf die Zählung und Zuordnung von Fasern reduzieren und – mit dem Klassifikator auf Basis der Konvention zur quantitativen Elementzusammensetzung – eine objektive und reproduzierbare Identifizierung von Asbestfaserkandidaten erreicht wird. Eine detaillierte Untersuchung der Verlässlichkeit der KNN-basierten Fasererkennung steht kurz vor der Fertigstellung [26].

Durch die Automatisierung werden größere und damit statistisch signifikantere Zählstatistiken möglich (Bild 1). Dies ist unter anderem erforderlich für die Bewertung von emissionsarmen Arbeitsverfahren und von Tätigkeiten an im Baubestand

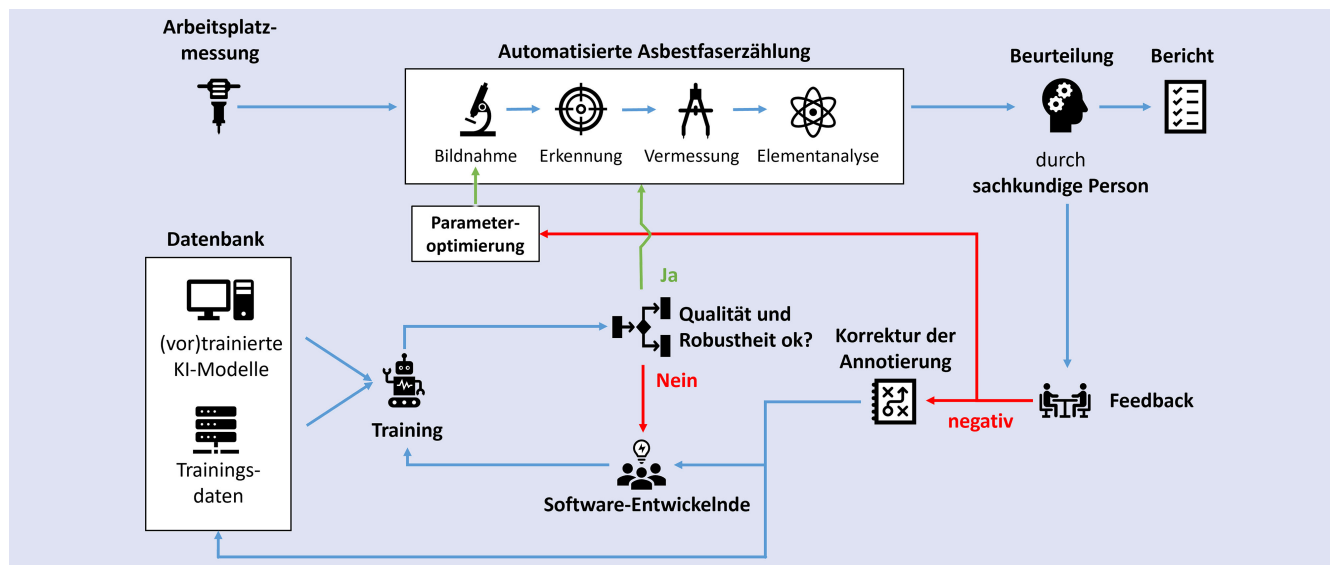


Bild 10 Schema des Analyseablaufs und der kontinuierlichen Kontrolle der Qualität und Robustheit der beteiligten KI-Komponenten zur Initiierung eines gegebenenfalls notwendigen Nachtrainings. Grafik: Autoren

vorhandenen Asbestprodukten. Außerdem werden Expositionen unterhalb der derzeit gültigen Akzeptanzkonzentration von $10\,000\text{ F/m}^3$ routinemäßig messbar. Dies ist für die in den kommenden Jahren in nationales Recht umzusetzende Asbest-Richtlinie wichtig, die bei Beibehaltung eines unteren Faserdurchmessers von $0,2\text{ }\mu\text{m}$ eine Absenkung um einen Faktor 5 vorsieht.

AsbestosDetect wird zurzeit von der BAuA auch eingesetzt, um die nationale Umsetzungsphase der neuen Asbest-Richtlinie wissenschaftlich zu begleiten. Dazu werden in einem Projekt Durchmesserverteilungen von Asbestfasern auf historischen Arbeitsplatzproben bestimmt, um die Frage nach dem Auftreten dünner, sogenannter WHO-analoger Asbestfasern unter verschiedenen Arbeitsbedingungen zu studieren und aktuelle mit historischen Zählergebnissen zu vergleichen. Diese Phase erfordert umfassende Reihenuntersuchungen auch zur derzeit technisch möglichen sowie zur praktisch mit noch vertretbarem Aufwand realisierbaren Nachweisbarkeitsgrenze für die Zählung dünner Asbestfasern mit REM/EDX. Solche Untersuchungen sollen das Ziel verfolgen, das Auftreten von Asbestfasern mit faserindividuell bestimmten Längen- und Breitenmessungen zu dokumentieren. Auf diese Weise könnten historisch wertvolle Faserexpositionsdaten auch mit solchen in Europa möglicherweise zukünftig erhobenen

Zählstatistiken vergleichbar gemacht werden, die dünnere Faserfraktionen einschließen.

Wichtig ist, dass auch bei routinemäßiger Verwendung eines KNN die Qualität der Bildsegmentierung und einer eventuellen elementbezogenen Klassifizierung kontinuierlich bewertet werden müssen, damit – sofern als erforderlich erkannt – ein Nachtraining anhand identifizierter Problemfälle mit gegebenenfalls nachgebesserten Annotierungen angestoßen wird (**Bild 10**). AsbestosDetect wird dafür ein auch von Nicht-KI-Experten nutzbares datenbankbasiertes Trainingstool zur Verfügung stellen, mit dem ein KNN mit ausgewählten annotierten Bildern nach- oder neu trainiert werden kann. Für gemahlene oder anders aufbereitete asbesthaltige Materialproben werden aufgrund der gegenüber Luftsaugmehlprouben prinzipiell vielfältigeren Partikelmorphologien und Varianten der An-, Ein- oder Überlagerung von Fasern und Partikeln neue Varianten künstlicher neuronaler Netze für die Erkennung von Fasern zu entwickeln sein. Mit diesen soll AsbestosDetect ertüchtigt werden, nicht allein anzahlbezogene, sondern auch massenbezogene Asbestquantifizierungen durchzuführen.

Für die Ermittlung von Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Asbest durch eine messtechnische Methode sind qualitätssichernde Maßnahmen notwendig. Solange die Robustheit der dabei eingesetzten Automatisierungssoftware gegenüber der üblichen Pro-

benvielfalt und Bild- und Spektrenqualität nicht sichergestellt ist und Abweichungen gegenüber üblichen Variationen nicht standardmäßig detektiert werden, sollte die Qualitätssicherung probenbezogen vorgenommen werden. Dafür wären die Faserzählergebnisse jeder Probe mindestens stichpunktartig zu überprüfen.

Für solche routinemäßigen Kontrollen gilt es Konzepte zu entwickeln, mit denen der sogenannte Automation Bias vermieden oder gemanagt werden kann. Dieser Ausdruck beschreibt, dass Nutzer dazu tendieren, ein ungerechtfertigtes Vertrauen in die Ergebnisse einer scheinbar gut funktionierenden Software zu entwickeln.

DANKSAGUNG

Die Entwicklungsarbeiten wurden durch Mittel des Deutschen Aufbau- und Resilienzplans (DARF), des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) und die DGUV Forschungsförderung (Förderkennzeichen FP 456) unterstützt.

LITERATUR

- [1] Richtlinie 1999/77/EG der Kommission vom 26. Juli 1999 zur sechsten Anpassung von Anhang I der Richtlinie 76/769/EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Asbest). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften 1999, Reihe L, 18-20.
- [2] Furuya, S.; Chimed-Ochir, O.; Takahashi, K.; David, A.; Takala, J.: Global Asbestos Disaster. *Int J Environ Res Public Health* 2018, 15. doi:10.3390/ijerph15051000.
- [3] Technische Regel für Gefahrstoffe: Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe (TRGS 905). GMBI. 2016, Nr. 19, S. 378-390.
- [4] Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006. Amtsblatt der Europäischen Union 2008, Reihe L, 1-1335.
- [5] Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union. Richtlinie (EU) 2023/2668 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. November 2023 zur Änderung der Richtlinie 2009/148/EG über den Schutz der Arbeitnehmer gegen Gefährdung durch Asbest am Arbeitsplatz. Amtsblatt der Europäischen Union 2023, Reihe L, 1-13.
- [6] Rittinghausen, S.; Hackbarth, A.; Creutzenberg, O.; Ernst, H.; Heinrich, U.; Leonhardt, A.; Schaudien, D.: The carcinogenic effect of various multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) after intraperitoneal injection in rats. *Particle and fibre toxicology* 2014, 11, 59. doi:10.1186/s12989-014-0059-z.
- [7] Europäische Kommission. Delegierte Verordnung (EU) 2024/2564 der Kommission vom 19. Juni 2024 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der harmonisierten Einstufung und Kennzeichnung bestimmter Stoffe. Amtsblatt der Europäischen Union 2024, Reihe L, 1-20.
- [8] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. BGI/GUV-I 505-31 – Verfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von lungengängigen Fasern in Arbeitsbereichen – Lichtmikroskopisches Verfahren. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Berlin 2014 (BGI/GUV-I 505-31).
- [9] Meyer-Plath, A.; Bäger, D.; Dziurawitz, N.; Perseke, D.; Simonow, B.K.; Thim, C.; Wenzlaff, D.; Plitzko, S. A.: Practicable Measurement Strategy for Compliance Checking Number Concentrations of Airborne Nano- and Microscale Fibers. *Atmosphere* 2020, 11, 1254. doi:10.3390/atmos11111254.
- [10] Pott, F.; Friedrichs, K.H.: Tumoren der Ratte nach i.p.-Injektion faserförmiger Stäube. *Naturwissenschaften* 1972, 59, S. 318.
- [11] Stanton, M.F.; Wrench, C.: Mechanisms of Mesothelioma Induction With Asbestos and Fibrous Glass. *Journal of National Cancer Institute* 1972, 48, S. 797-821.
- [12] International Labour Organisation: Übereinkommen über Sicherheit bei der Verwendung von Asbest, 1986 (C162). https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en?p=NORMLEXPUB:12100:0:NO:12100:P12100_INSTRUMENT_ID:312307:NO.
- [13] World Health Organization: Determination of airborne fibre number concentrations; A recommended method by phase-contrast optical microscopy, 1997. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/41904/9241544961.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [14] Dodson, R.F.; Atkinson, M.A.; Levin, J.L.: Asbestos fiber length as related to potential pathogenicity: A critical review 2003, 44, p. 291-297. doi:10.1002/ajim.10263.
- [15] OECD: Test No. 125: Nanomaterial Particle Size and Size Distribution of Nanomaterials. In: *OECD Guidelines for the Testing of Chemicals*. OECD, Ed.; Paris.
- [16] Meyer-Plath, A.; Kehren, D.; Große, A.; Naumann, R.; Hofmann, M.; Schneck, T. et al.: Investigation of the Tendency of Carbon Fibers to Disintegrate into Respirable Fiber-Shaped Fragments. *Fibers* 2023, 11, p. 50. doi:10.3390/fib11060050.
- [17] Bundesregierung: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung, GefStoffV). <https://www.baua.de/DE/Themen/Chemikalien-Biostoffe/Gefahrstoffe/Taetigkeiten-mit-Gefahrstoffen/pdf/Gefahrstoffverordnung.pdf>.
- [18] Leake, B.E.; Woolley, A.R.; Arps, C.; Birch, W.D.; Gilbert, M.C.; Grice, J.D.; Hawthorne, E. et al.: Nomenclature of amphiboles Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *European Journal of Mineralogy* 1997, 9, p. 623-651. doi:10.1127/ejm/9/3/0623.
- [19] Mattenklott, M.: Identifizierung von Asbestfasern in Stäuben, Pulvern und Pudern mineralischer Rohstoffen: Grundlagen, Daten und Struktur eines Konzeptes zur Faseridentifizierung. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 1998, 58, S. 15-22.
- [20] VDI-Richtlinie 3492: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messen von Immissionen – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren. VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) – Normenausschuss, 2013.
- [21] Ritchie, N.; Davis, J.M.; Newbury, D.E.: DTSA-II: A New Tool for Simulating and Quantifying EDS Spectra – Application to Difficult Overlaps. *Microscopy and Microanalysis* 2008, 14, p. 1176-1177. doi:10.1017/S143192760808361X
- [22] F. Peña; E. Prestat; J. Lähmann; V. T. Fauske; P. Burdet; P. Jokubauskas et al. *hyperspy/hyperspy: v2.3.0*; Zenodo, 2025.
- [23] Teurtrie, A.; Perraudin, N.; Holvoet, T.; Chen, H.; Alexander, D.T.L.; Obodzinski, G.; Hébert, C.: A Python library for the simulation of STEM-EDXS datasets. *Ultramicroscopy* 2023, 249, p. 113719. doi:10.1016/j.ultramicro.2023.113719.
- [24] Moré, J.; Dziurawitz, N.; Thim, C.; Hemmleb, M.; Berger, D.: Relocation of defined sample positions with an automated stage navigation tool for SEM. *Proceedings of the 2017 Microscopy Conference, Lausanne, Switzerland*; p. 481-483.
- [25] J. Schumann; D. Bäger; N. Dziurawitz; C. Thim; A. Meyer-Plath: Retrieving SEM sample positions under limited relocation accuracy using digital image processing. *Proceedings of the 2019 Microscopy Conference, Berlin, Germany*; pp 391-392.
- [26] Peters, T.; Schumann, J.; Kämpf, K.; Meyer-Plath, A.: AI-assisted Recognition of Fibre Instances in Scanning Electron Microscope Images for Aerosol Characterization and Exposure Assessment: In preparation.
- [27] Technische Regel für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402), 2014.

Dipl.-Ing. John Schumann,

Torben Peters, M.Sc.,

Hannes Schiweg, M.Sc.,

Dipl.-Ing. (FH) Nico Dziurawitz,

Carmen Thim,

Daphne Bäger, M.Eng.,

Dr. rer. nat. Asmus Meyer-Plath

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund.

Dr. rer. nat. Markus Mattenklott

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