

Löslichkeit von Aluminium und seinen Verbindungen – eine Frage der Perspektive?

M. Krämer, C. Wippich, T. Schwank, M. Mattenklott, K. Pitzke

ZUSAMMENFASSUNG Als Grundlage für die Beurteilung der Luft am Arbeitsplatz und in diesem Zusammenhang der inhalativen Exposition von Beschäftigten gegenüber Metallen und deren Verbindungen werden unter anderem Beurteilungsmaßstäbe wie Arbeitsplatzgrenzwerte oder auch maximale Arbeitsplatzkonzentrationen herangezogen. Sofern sich solche auf bestimmte Verbindungsgruppen beziehen, die nach ihrer Löslichkeit klassifiziert sind (beispielsweise lösliche und schwerlösliche Verbindungen), stellt sich die Frage nach der Definition des (Schwer-)Löslichkeitsbegriffs. Für die (fehlende) Löslichkeit einer chemischen Verbindung können diverse Faktoren von Relevanz sein, die die chemische Verbindung selbst, aber ebenso äußere Bedingungen betreffen. Im vorliegenden Artikel soll beispielhaft beschrieben werden, wie sich die für das Lösungsverhalten einer chemischen Verbindung relevanten (und für Löslichkeitsversuche gewählten) Parameter in Abhängigkeit von der Betrachtungsweise unterscheiden können. Anhand der für unterschiedlichen Gruppen an Aluminiumverbindungen etablierten maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen soll zudem demonstriert werden, welche Herausforderungen für die Entwicklung geeigneter Messverfahren und somit auch für die Überwachung von Arbeitsplätzen aus einer Klassifizierung von Metallverbindungen nach ihrer Löslichkeit resultieren können.

1 Einleitung

Aluminium ist nicht nur das häufigste Metall der Erdkruste [1], sondern auch industriell von wesentlicher Bedeutung. Das Leichtmetall und seine Verbindungen erfahren in diversen Industriezweigen vielfältige Verwendung. Aluminium selbst wird unter anderem im Fahrzeug- und Flugzeugbau, zur Herstellung von Apparaturen und Behältern, zum Bau elektrischer Anlagen, als Lebensmittelkontaktmaterial (z. B. in Folien oder Verpackungen) sowie in Pulverform zur Herstellung rostschtzender Anstriche und im Bereich der Pyrotechnik eingesetzt [2 bis 4]. Aluminiumverbindungen werden unter anderem zur Wasseraufbereitung, in der Papierindustrie, als FlammSchutzmittel, in Düngemitteln, in Arzneimitteln, als Lebensmittelzusatzstoffe oder auch in kosmetischen Produkten verwendet [3 bis 5]. In der Natur tritt Aluminium in der Regel in Form von Verbindungen wie beispielsweise Silikaten, Hydroxiden oder Oxiden auf [1, 3]. Aluminiumoxid, das in unterschiedlichen Modifikationen kristallisieren kann und unter anderem als Zwischenprodukt bei der Gewinnung von metallischem Aluminium aus dem Aluminiumerz Bauxit auftritt, wird in bestimmten Modifikationen zum Beispiel als Schleifmittel, Adsorbens, Katalysator(-träger) [6] oder auch in der keramischen Industrie [7] eingesetzt.

Bei der Exposition gegenüber Aluminium und seinen Verbindungen am Arbeitsplatz steht der inhalative Aufnahmeweg im Fo-

The Solubility of Aluminium and its Compounds – a Matter of Perspective?

ABSTRACT Assessment criteria such as occupational exposure limit values or maximum workplace concentrations are used for the evaluation of air quality in the workplace or respiratory exposure of workers to metals and their compounds (among other opportunities). If these criteria refer to specific groups of compounds classified by their solubility (e. g., soluble and poorly soluble compounds), the question arises as to how the term “solubility” (or “poor solubility”) is defined. Various factors may be relevant to the (lack of) solubility of a chemical compound; factors concerning the chemical compound itself as well as external conditions. This article aims to describe parameters (using examples) that are relevant to the solubility behaviour of a chemical compound and how these can differ depending on the perspective and in corresponding solubility studies. In consideration of maximum workplace concentrations recently established for different groups of aluminium compounds, we will also discuss challenges for the development of suitable measurement procedures and, consequently, for workplace monitoring that may arise from a classification of metal compounds based on their solubility.

kus. Toxische Effekte, die durch eine entsprechende Exposition hervorgerufen werden können, variieren zwischen unterschiedlichen Aluminiumverbindungen und sind von Faktoren wie deren Löslichkeit, aber auch der Größe der in Aerosolen vorliegenden Partikel abhängig [8]. Die Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (MAK-Kommission) hat diesem Umstand bei der Bewertung der Toxizität von Aluminium und dessen Verbindungen sowie der Ableitung entsprechender maximaler Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) Rechnung getragen [5, 9].

Mit Veröffentlichung der MAK- und BAT-Werte-Liste 2024 [10] wurden für die Beurteilung der inhalativen Exposition an Arbeitsplätzen MAK-Werte für verschiedene Gruppen von Aluminiumverbindungen eingeführt. MAK-Werte werden allgemein definiert als „höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes als [...] Aerosol in der Luft am Arbeitsplatz, die [...] auch bei wiederholter und langfristiger, in der Regel täglich 8-stündiger Exposition, jedoch bei Einhaltung einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden im Allgemeinen die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt [...]“ [11]. Basierend auf einer differenzierten und detaillierten Bewertung der toxischen Eigenschaften unterschiedlicher Aluminiumverbindungen [5; 9] wurden diese in (i) lösliche, nicht reizende, (ii) lösliche, reizende Aluminiumverbindungen sowie (iii) Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen unterteilt. Für die genannten Gruppierungen wurden auf Grundlage der

vorliegenden Studienlage jeweils MAK-Werte abgeleitet. Diese belaufen sich auf 0,005 mg Al/m³ für lösliche, nicht reizende Aluminiumverbindungen in der einatembaren Fraktion, 0,0002 mg Al/m³ für lösliche, reizende Aluminiumverbindungen in der einatembaren Fraktion sowie 0,05 mg Al/m³ und 0,5 mg Al/m³ für Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen in der alveolengängigen bzw. einatembaren Staubfraktion [5, 9 bis 11].

Laut der MAK- und BAT-Werte-Liste [10, 11] beziehungsweise der zugehörigen MAK-Begründung [5] werden Aluminiumammoniumdisulfat, Aluminiumchlorhydrat und Aluminiumkaliumdisulfat den löslichen, nicht reizenden Aluminiumverbindungen zugerechnet, während Aluminiumchlorid, Aluminiumchlorid, basisch, Aluminiumchloridhydroxidsulfat, Aluminiumcitrat, Aluminiumdiacetat, Aluminiumgluconat, Aluminiumlactat, Aluminiummaltolat, Aluminiumnitrat und Aluminiumsulfat Vertreter der Gruppe der löslichen, reizenden Aluminiumverbindungen darstellen. Bei der Bewertung der Toxizität von löslichen Aluminiumverbindungen standen die lokalen Reizwirkungen auf die Augen und die Lunge im Vordergrund. Die Klasse der nicht reizenden Verbindungen (z.B. Aluminiumchlorhydrat) zeichnet sich dadurch aus, dass in der Auswertung der relevanten Studien keine oder lediglich eine geringfügige reizende Wirkung auf die Augen und an der Lunge beobachtet werden konnte, wohingegen im Falle von reizenden Verbindungen (z.B. Aluminiumchlorid) in der Regel von einer augenreizenden/-ätzenden Wirkung oder der Möglichkeit einer irreversiblen Schädigung der Augen sowie einer reizenden Wirkung an der Lunge auszugehen ist. Aluminiumverbindungen, für die keine Daten zu einer etwaigen Reizwirkung auf die Augen oder den Atemtrakt vorlagen, wurden ebenfalls den reizenden Verbindungen zugeordnet. Darüber hinaus wird, basierend auf der Ursache für neurotoxische Effekte (gelöste Aluminiumionen), für lösliche Aluminiumverbindungen von einer neurotoxischen Wirkung ausgegangen [5].

Nach der MAK- und BAT-Werte-Liste [10, 11] sowie der zugehörigen MAK-Begründung [9] bilden unter anderem Aluminium, Aluminiumhydroxid, Aluminiumoxid (γ - und δ -Modifikation) sowie Aluminiumoxyhydroxid (γ -Modifikation) die Gruppe „Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen“. Nicht bioverfügbare Verbindungen wie α -Aluminiumoxid (Korund) werden explizit von der MAK-Begründung für Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen ausgenommen. Bei der toxikologischen Evaluation von Aluminium und seinen schwerlöslichen Verbindungen lag ein Augenmerk auf der mit diesen Substanzen assoziierten Lungentoxizität. Bei inhalativer Exposition gegenüber schwerlöslichen Aluminiumverbindungen ist das Auftreten eines Partikelüberladungseffekts möglich, der eine Tumorbildung in der Lunge nach sich ziehen kann. Die Ableitung der MAK-Werte für Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen erfolgte darüber hinaus (unter anderem) unter Berücksichtigung etwaiger neurotoxischer Effekte [9].

Auf einer fundierten Datenauswertung beruhend, toxikologisch detailliert begründet und schließlich unter differenzierter Betrachtung abgeleitet, wurden für Aluminium und seine Verbindungen unterschiedliche Beurteilungsmaßstäbe für die Luft am Arbeitsplatz in Form von MAK-Werten veröffentlicht [5, 9 bis 11]. Die Beurteilung von Arbeitsplätzen beziehungsweise der dort vorliegenden Exposition von Beschäftigten auf Basis solcher Bewertungsgrundlagen stützt sich in den meisten Fällen auf eine analytische Bestimmung von Aluminium (ggf. aus bestimmten Verbindungen)

in Proben aus luftgetragenen Stäuben. Der vorliegende Artikel hat zum Ziel, mögliche Definitionen der Löslichkeit von Metallverbindungen darzulegen. Handelt es sich dabei um eine Frage der Perspektive? Schließlich sollen etwaige Kontroversen auch im Hinblick auf mögliche Herausforderungen bei der Etablierung geeigneter Messverfahren und somit auch für die Überwachung von Arbeitsplätzen diskutiert werden.

2 Definition von „Löslichkeit“

Wie in der Einleitung beschrieben, wurden nach ausgiebiger Auswertung der Studienlage durch die MAK-Kommission [5, 9] MAK-Werte für (i) lösliche, nicht reizende, (ii) lösliche, reizende Aluminiumverbindungen sowie (iii) Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen eingeführt [10, 11]. Folglich wurden Aluminium und seine Verbindungen vor dem Hintergrund abweichender gesundheitsschädlicher Wirkungen unter anderem nach ihrer Löslichkeit unterschieden. Aus einer solchen Unterteilung erwächst die Frage, unter welchen Bedingungen die „Löslichkeit“ oder auch „Schwerlöslichkeit“ einer chemischen Verbindung zu betrachten ist. Für diese sind auch bei vereinfachter Betrachtung bereits Parameter wie das Medium (z.B. Wasser), dessen pH-Wert, darin enthaltene Substanzen (z.B. Komplexbildner, Redoxpartner), physikalische und chemische Eigenschaften der Verbindung selbst (z.B. Partikelgröße), aber auch Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Druck von nicht unerheblicher Bedeutung. Soll die (Schwer-)Löslichkeit gar im menschlichen Organismus unter physiologischen Bedingungen betrachtet werden, sind die zu berücksichtigenden Faktoren weitaus komplexer. So wäre im Falle des inhalativen Aufnahmepfads beispielsweise die Gesamtheit der Eigenschaften und Funktionalitäten des respiratorischen Systems in die Betrachtungen einzubeziehen.

Die den MAK-Begründungen [5, 9] zu entnehmenden Definitionen der für die MAK-Werte gebildeten Löslichkeitskategorien für Aluminiumverbindungen sowie messtechnische und modellhafte Ansätze zur Simulation des Löslichkeitsverhaltens chemischer Verbindungen werden im Folgenden beispielhaft umrissen.

2.1 Löslichkeitskategorien nach „MAK-Definition“

Laut Definitionen der den MAK-Werten zugrundeliegenden Begründungen [5, 9] können lösliche Aluminiumverbindungen mit einem im Jahr 2014 von der MAK-Kommission veröffentlichten Analyseverfahren [12] als Aluminium in der Luft am Arbeitsplatz bestimmt werden [5], wohingegen solche Verbindungen als schwerlöslich betrachtet werden, die nicht mit diesem Verfahren in Lösung gebracht werden können [9]. Folglich sei eine Differenzierung von löslichen und schwerlöslichen Aluminiumverbindungen möglich [5]. Das genannte Analyseverfahren sieht eine Behandlung des im Rahmen der Probenahme auf einem Filter gesammelten Staubs mit 0,1 molarer Salzsäure vor (120 Minuten bei 100 °C im Zuge eines Mikrowellenaufschlusses) [12].

Darüber hinaus werden die Definitionen der Löslichkeitskategorien dahingehend erweitert, dass für nicht bioverfügbare Aluminiumverbindungen der Allgemeine Staubgrenzwert für granuläre biobeständige Stäube heranzuziehen ist. Beispielhaft wird in diesem Zusammenhang α -Aluminiumoxid (Korund) genannt. Als Maß für die fehlende Bioverfügbarkeit wird auf einen Biologischen Arbeitsstoff-Referenzwert (BAR) für Aluminium verwiesen, wobei bei fehlender Überschreitung nach Exposition gegen-

über einer Aluminiumverbindung von einer fehlenden Bioverfügbarkeit ausgegangen werden kann [9].

2.2 Analytische Bestimmung in der Luft am Arbeitsplatz

Im Zuge der „MAK-Definitionen“ der Löslichkeitskategorien wird auf ein Messverfahren verwiesen, aus welchem Arbeitsbedingungen wie Medium (0,1 molare Salzsäure) und Behandlungstemperatur hervorgehen [5, 9, 12]. Derartige Definitionen sind im Bereich der Metallanalytik keinesfalls unüblich. So erfolgt die Bestimmung von Metallen und deren Verbindungen in der Luft an Arbeitsplätzen häufig unter Bezugnahme auf Konventionsbedingungen.

Für die Bestimmung von löslichen Metallverbindungen wird in Deutschland eine Extraktion mit 0,1 molarer Salzsäure für zwei Stunden bei Siedetemperatur im offenen Heizblock als Konventionsverfahren empfohlen. In den zugrundeliegenden Veröffentlichungen werden Argumente vorgebracht, warum 0,1 molare Salzsäure und nicht etwa andere Medien zur Extraktion zu verwenden sind. So wird die Verwendung von Wasser mit dem Hinweis auf weitere Proben-/Staubinhaltsstoffe, die die Eigenschaften der Extraktionslösung (z. B. pH-Wert oder Redoxpotential) und damit die Reproduzierbarkeit einer solchen beeinflussen können, bewusst abgelehnt, da sich die variierenden Eigenschaften auf das Lösungsverhalten von Metallverbindungen auswirken können. Dies könnte in der Konsequenz zu größeren Streuungen der Messergebnisse (auch für identische Metallverbindungen) führen. Der Verwendung von Pufferlösungen oder synthetischen Körperflüssigkeiten werden insbesondere mögliche praktische Komplikationen bei der routinemäßigen Aufarbeitung von Stäuben entgegengebracht (unter anderem lange Behandlungsdauern, z. B. 24 Stunden bei 37 °C) [13; 14]. Darüber hinaus können die Inhaltsstoffe derartiger Medien matrixbedingte Einflüsse beziehungsweise Interferenzen bei der instrumentellen, analytischen Bestimmung der Metallkonzentration nach sich ziehen.

Neben dem (unter anderem in der MAK-Collection [14]) beschriebenen Konventionsverfahren mit 0,1 molarer Salzsäure finden sich durchaus weitere Empfehlungen für Bedingungen der Probenvorbereitung im Hinblick auf die Bestimmung löslicher Metallverbindungen. In der ISO-Norm 15202-2, die die Bestimmung von Metallen in luftgetragenen Partikeln am Arbeitsplatz mittels Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma zum Gegenstand hat, wird für die Bestimmung löslicher Metallverbindungen beispielsweise ein Auslaugen der Proben (beaufschlagte Filter) in einer geeigneten Lösung unter spezifischen Bedingungen beschrieben. Sofern solche nicht übergreifend definiert werden (z. B. durch nationale Vorgaben), wird eine Behandlung der Probe mit Wasser bei 37 °C für 60 Minuten empfohlen [15].

Anders als für lösliche Metallverbindungen wird eine Bestimmung „schwerlöslicher“ Metallverbindungen in den angeführten Beschreibungen von Probenvorbereitungsverfahren in der IFA-Arbeitsmappe [13] und in der MAK-Collection [14] nicht gesondert thematisiert. Es wird lediglich allgemein darauf hingewiesen, dass für eine Bestimmung schwerlöslicher Legierungsbestandteile (mikrowellenunterstützte) Druckaufschlüsse in geschlossenen Systemen und bei höheren Temperaturen mit einem speziell auf das betreffende Metall und seine Verbindungen abgestimmten Säuregemisch geeignet sein können [14]. Weitere in den betreffenden Veröffentlichungen [13, 14] beschriebene Arbeitsbedingungen für die Aufbereitung von Stäuben haben die Bestimmung

des „Gesamtmetallgehalts“ zum Ziel (z. B. unter Verwendung eines mikrowellenunterstützten Druckaufschlusses mit Salpetersäure, $\geq 65\%$).

Sollen – um die ansonsten notwendige, parallele Probenahme mehrerer Proben zu umgehen – für eine Probe sowohl Analysergebnisse für eine Beurteilung unter Vergleich mit Grenzwerten für lösliche Metallverbindungen als auch für eine Beurteilung unter Vergleich mit Grenzwerten für Metalle und deren (unlösliche) Verbindungen ermittelt werden, ist in Anlehnung an die Vorgaben der ISO 15202-2 [15] folgende Vorgehensweise empfehlenswert: Zunächst erfolgt eine Bestimmung der löslichen Metallverbindungen unter Verwendung eines definierten Extraktionsverfahrens. Das hierbei nicht gelöste Material wird zur Bestimmung des Gehalts an Metallen und deren (unlöslichen) Verbindungen herangezogen, wobei hierfür auf ein geeignetes Probenvorbereitungsverfahren zurückzugreifen ist [15].

Die beschriebene Herangehensweise für eine differenzierte Betrachtung erscheint grundsätzlich schlüssig, setzt aber voraus, dass alle als „löslich“ definierten Metallverbindungen im zugehörigen Extraktionsverfahren vollständig in Lösung gebracht werden können und Verbindungen, die nicht als „löslich“ (sondern z. B. als „schwerlöslich“) eingestuft sind, unter den vorliegenden Bedingungen nicht gelöst werden. Im Hinblick auf die für Aluminium und seine Verbindungen vorgenommene Klassifizierung [10, 11] kommt erschwerend hinzu, dass nicht bioverfügbare Verbindungen nach anderen Gesichtspunkten zu beurteilen sind als „schwerlösliche Aluminiumverbindungen“ [9]. Auf chemisch-analytischer Ebene ist keine Differenzierung zwischen „schwerlöslichen, bioverfügbaren“ und „schwerlöslichen, nicht bioverfügbaren“ Aluminiumverbindungen möglich.

2.3 Löslichkeitsbestimmung in Anlehnung an physiologische Bedingungen

Am Beispiel einer Publikation von Avramescu et al. [16] soll beschrieben werden, mit welchen Ansätzen im Rahmen von In-vitro-Studien die Löslichkeit von Metallverbindungen unter physiologischen Bedingungen in Annäherung simuliert werden kann. Die genannte Studie hatte zum Ziel das Löslichkeitsverhalten einiger Metalloxide in unterschiedlichen (biologischen) Medien zu untersuchen und unter anderem in Abhängigkeit von der Partikelgröße der Metalloxide zu bewerten. Hierbei verweisen die Autoren darauf, dass die toxischen Eigenschaften chemischer Verbindungen mit deren physikalisch-chemischen Eigenschaften (unter anderem Löslichkeit und Oberflächenreaktivität) in Zusammenhang stehen [16].

Basierend auf den gemachten Beobachtungen wurde konstituiert, dass für die Untersuchung des Löslichkeitsverhaltens solche Medien verwendet werden sollten, die den relevanten Expositionsweg repräsentieren. Für die inhalative Expositionsrouten bzw. den Atemtrakt wurden im konkreten Studiendesign simulierte Phagolysosomalflüssigkeit sowie simulierte interstitielle Lungenflüssigkeit berücksichtigt – Salzlösungen mit unterschiedlichen pH-Werten, die sich aus verschiedenen anorganischen und organischen Inhaltsstoffen zusammensetzen. Die simulierte Phagolysosomalflüssigkeit (pH 4,5) wird modellhaft für die Untersuchung der Löslichkeit in Lungenalveolarmakrophagen (nach Phagozytose der inhalierten Partikel) herangezogen. Die simulierte Lungenflüssigkeit (pH 7,4) repräsentiert dagegen die Flüssigkeit im Bereich der Lungenauskleidung. Die Inkubation von Metall-

oxiden in den genannten Medien (neben weiteren Medien wie Wasser) erfolgte für definierte Zeitspannen unter gelegentlichem Schütteln bei 37 °C (orientierend an der Körpertemperatur von Menschen). Die analytische Bestimmung der gelösten Metallkonzentrationen wurde nach Abtrennung ungelöster Bestandteile (mittels Zentrifugation) durchgeführt [16].

Da der pH-Wert eines Mediums Einfluss auf das Löslichkeitsverhalten einer chemischen Verbindung nehmen kann, wurden im Zuge der Löslichkeitsversuche etwaige Veränderungen des pH-Werts der verwendeten Medien überprüft. Neben dem pH-Wert können aber auch bestimmte Inhaltsstoffe das Löslichkeitsverhalten einer chemischen Verbindung beeinflussen. Hierbei sind beispielsweise Komplexbildner oder mögliche Redoxpartner (Reduktions- oder Oxidationsmittel) von wesentlicher Bedeutung [16].

Resümierend stellen Löslichkeitsversuche in simulierten biologischen Medien einen wichtigen Bestandteil der Gefahrenbewertung von chemischen Verbindungen dar, da das Löslichkeitsverhalten Einfluss auf die Biopersistenz und -kinetik nimmt [16], wenngleich die komplexen, dynamischen Vorgänge im menschlichen Organismus auch durch derartige Versuche nicht abgebildet werden können. Anhand der Diskussion der Ergebnisse der beispielhaft angeführten Studie [16] wird nochmals deutlich, wie vielfältig die Einflüsse für die (ermittelte) Löslichkeit sind. Neben den Eigenschaften der zu überprüfenden Substanz (unter anderem Partikelgröße, Ausgangskonzentration) und den äußeren Bedingungen (unter anderem Zusammensetzung des Mediums, dessen pH-Wert und Stabilität des pH-Werts sowie Temperatur), können auch methodische Parameter wie das gewählte Separationsverfahren (Abtrennung der nicht gelösten Bestandteile) für die bestimmte Löslichkeit relevant sein. Auch wenn die Löslichkeit unter Verwendung simulierter biologischer Flüssigkeiten eine Annäherung an die physiologischen Bedingungen (insbesondere unter Berücksichtigung des relevanten Zielorgans) darstellt, sollten derartige Einflussgrößen bei der Heranziehung entsprechender Daten berücksichtigt werden. Auch die Autoren der zitierten Studie [16] verweisen darauf, dass der analytisch ermittelte, gelöste Anteil eine „scheinbare Löslichkeit“ (nicht matrixgebundener Anteil) suggeriert, die unter den verwendeten experimentellen Bedingungen bestimmt wurde.

3 Herausforderung bei der Entwicklung geeigneter Messverfahren

Toxische Effekte von Metallen und deren Verbindungen sind unter anderem von ihrem Bindungszustand und dem Lösungsverhalten im menschlichen Organismus abhängig. Insofern ist es aus arbeitsmedizinischer und toxikologischer Perspektive absolut nachvollziehbar, Metallverbindungen differenziert zu bewerten. Auf chemisch-analytischer Ebene kann eine derartige Differenzierung jedoch in aller Regel nicht oder nur mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand abgebildet werden [14].

Eine spezifische, quantitative Bestimmung einzelner (anorganischer) Metallverbindungen (z.B. Aluminiumverbindungen) oder gar konkreter Modifikationen derartiger Verbindungen im (Ultra-)Spurenbereich ist mit gängigen Analysentechniken zur Bestimmung von Metallen und Metallverbindungen nicht möglich. Mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) kann beispielsweise lediglich die Aluminiummenge (als Reinmetall oder in Verbindungen vorliegend) in einer Luftprobe bestimmt werden, die mit dem verwendeten Probenahme-

verfahren gesammelt und mit dem berücksichtigten Probenvorbereitungsverfahren in Lösung überführt werden konnte. Die Messwerte beziehen sich grundsätzlich auf den Elementgehalt (z.B. Aluminium) und lassen keine konkreten Rückschlüsse auf die im untersuchten Staub vorliegenden Verbindungen zu. Die Auswahl des Extraktions- oder Aufschlussverfahrens ist in diesem Fall demnach maßgeblich für die ermittelte Aluminiumkonzentration.

Denkbar wäre alternativ eine Bestimmung einzelner (kristalliner) Aluminiumverbindungen mittels Pulver-Röntgendiffraktometrie, wie sie für silikogene Komponenten schon seit Jahrzehnten Standard ist. Dabei gibt es jedoch Einschränkungen zu beachten. In Anbetracht der niedrigen Beurteilungsmaßstäbe und zu erwartender Nachweisgrenzen für einzelne Aluminiumverbindungen in der Größenordnung von etwa 1 Masse-% wird die notwendige Nachweisstärke wahrscheinlich nicht erreicht werden können. Im Hinblick auf die schwerlöslichen Aluminiumverbindungen ist außerdem zu beachten, dass keine konkrete Liste dieser Phasen vorliegt. Somit wäre bei der Analyse von Stäuben unbekannter Zusammensetzung jeweils ein umfangreiches Screening durchzuführen, um alle möglicherweise vorhandenen aluminiumhaltigen kristallinen Phasen auch vollständig zu erfassen. Welche davon dann als schwerlöslich zu betrachten sind, bleibt offen. Zudem wird, je nach Zusammensetzung des Staubes, der Nachweis bestimmter Phasen durch Interferenzen anderer Staubkomponenten nicht möglich sein. Somit kann nicht sichergestellt werden, in allen Fällen eine eindeutige Aussage über die Art und den Anteil der vorhandenen aluminiumhaltigen Phasen zu erreichen. Für eine Quantifizierung des Anteils einzelner mittels Röntgendiffraktion festgestellter kristalliner Phasen sind üblicherweise Kalibrierungen anhand von Referenzen jedes relevanten Stoffes nötig. Dies wird bei der Vielfalt von Aluminiumphasen nicht umsetzbar sein. Um eine Kalibrierung der Einzelstoffe zu umgehen, wäre eine Quantifizierung mit der Rietveld-Methode denkbar. Doch auch dann gelten die zuvor genannten Einschränkungen.

Basierend auf der für die MAK-Werte vorgenommenen Klassifizierung von Aluminiumverbindungen [5, 9-11] wäre es wünschenswert, über selektive Messverfahren zu verfügen, also solche Verfahren, die ausschließlich die Analyse von Aluminium aus einer bestimmten Verbindungsgruppe (ohne Störungen durch Verbindungen anderer Klassen) erlauben. Um zu überprüfen, inwiefern eine solche durch bestehende Konventionsmethoden (für die Probenvorbereitung) möglich ist, wurden im Rahmen von Versuchen zur Verfahrensentwicklung einige kommerziell erhältliche Aluminiumverbindungen (Aluminiumammoniumsulfat-Dodecahydrat, Aluminiumkaliumsulfat-Dodecahydrat, Aluminiumchlorid, Aluminiumlactat, Aluminiumsulfat, Aluminiumhydroxid, unterschiedliche Modifikationen von Aluminiumoxid) sowie Aluminium selbst (jeweils in Pulverform) im Hinblick auf ihre Löslichkeit unter definierten Arbeitsbedingungen untersucht.

3.1 Vorversuche zur Verfahrensentwicklung: Aufarbeitung analog der Konvention zur Bestimmung von löslichen Metallverbindungen

Bezugnehmend auf die Bestimmung von löslichen Metallverbindungen wurden die oben genannten aluminiumhaltigen Materialien einer Extraktion mit 0,1 molarer Salzsäure bei Siedetemperatur im offenen Heizblock unterzogen und die dadurch in Lösung befindliche Aluminiumkonzentration mittels ICP-MS bestimmt. Die gewählten Extraktionsbedingungen (Volumen der

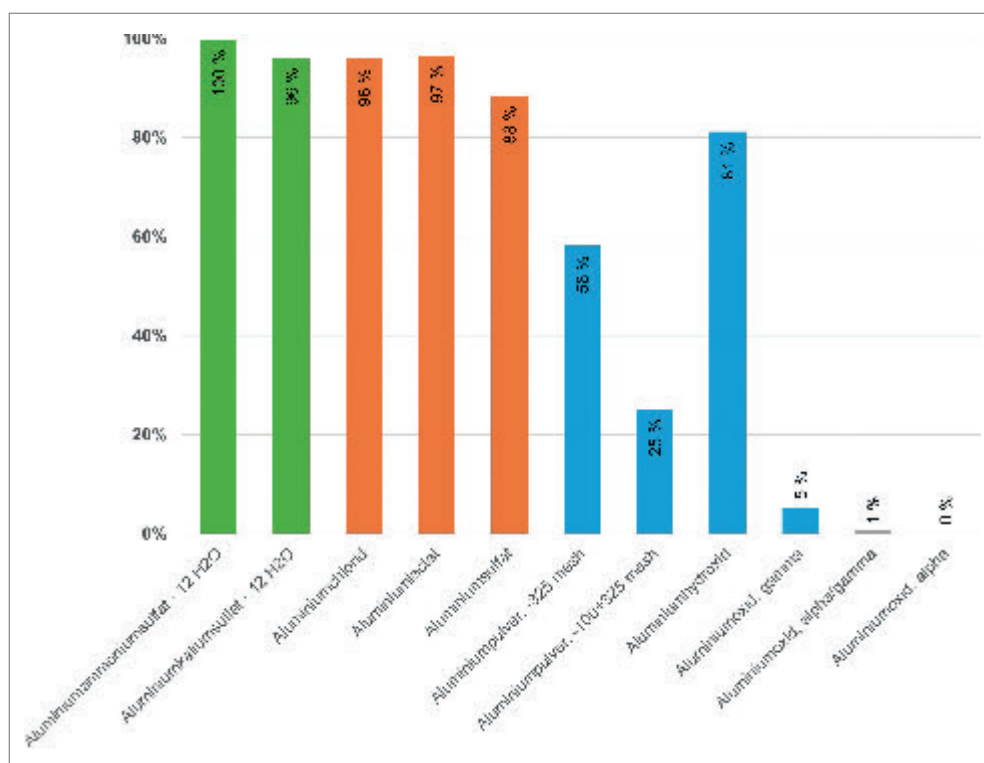


Bild 1 Wiederfindung für Aluminium aus verschiedenen Aluminiumverbindungen sowie Aluminiumpulver unterschiedlicher Korngröße nach Extraktion mit 0,1 molarer Salzsäure bei Siedetemperatur. Grün: Einstufung als lösliche, nicht reizende Aluminiumverbindungen; Orange: Einstufung als lösliche, reizende Aluminiumverbindungen; Blau: Vertreter von Aluminium und seinen schwerlöslichen Verbindungen; Grau: unter anderem nicht bioverfügbares bzw. „unlösliches“ α -Aluminiumoxid (Einstufung jeweils nach [5, 9 bis 11]). Grafik: Autoren

0,1 molaren Salzsäure: 20 ml, Behandlungsdauer: 2 h, Temperatur des beschichteten Grafit-Laborheizblocks: 125 °C) orientierten sich an den beschriebenen Arbeitsbedingungen des Konventionsverfahrens zur Bestimmung löslicher Metallverbindungen [13, 14] und ähneln demnach den Bedingungen des veröffentlichten Verfahrens [12], auf das in den MAK-Begründungen [5, 9] Bezug genommen wird. Die bei den geschilderten Vorversuchen abgeschätzten Wiederfindungen für Aluminium werden in **Bild 1** aufgezeigt.

Die in **Bild 1** ersichtliche, vergleichsweise geringe Wiederfindung für die lösliche Aluminiumverbindung Aluminiumsulfat (hier in wasserfreier Form überprüft) ist ggf. auf dessen hygroskopische Eigenschaft und dadurch bedingte Fehler beim Bezugswert für die Wiederfindungsermittlung zurückzuführen. Die Reinheit des Aluminiumhydroxidpulvers beläuft sich laut Analysenzertifikat auf 78,4 %. Diese wurde bei der Berechnung der Wiederfindung nicht berücksichtigt. Für die Abschätzung der Wiederfindungen von Aluminium aus α -/ γ - und α -Aluminiumoxid wurden extrapolierte Messwerte (unterhalb des Arbeitsbereichs) herangezogen, sodass die dargestellten Wiederfindungen mit einer weiteren Unsicherheit behaftet sein dürften.

Aus **Bild 1** geht anhand der ermittelten Wiederfindungen erwartungsgemäß hervor, dass mit der beschriebenen Probenvorbereitung Aluminium aus löslichen Aluminiumverbindungen quantitativ wiedergefunden werden kann. Die toxikologisch begründete Differenzierung von löslichen, nicht reizenden und löslichen, reizenden Aluminiumverbindungen lässt durch die chemische Analytik nicht abbilden. Problematisch erscheint zudem, dass unter den gewählten Bedingungen (Konvention zur Bestimmung löslicher Metallverbindungen) – zumindest in Teilen – sowohl Aluminium aus Aluminiumpulver (Partikelgrößen entsprechend der angegebenen Klassifizierung nach der Mesh-Einheit < 45 μ m bzw. zwischen 44 und 149 μ m) als auch aus Aluminiumhydroxid wiederzufinden ist. Aluminium und Aluminiumhydroxid, die nach

der für die MAK-Werte vorgenommenen Klassifizierung der Gruppe „Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen“ zuzurechnen sind [9-11], würden demnach bei Vorliegen in einer Probe (unter Anwendung der hier berücksichtigten Konventionsbedingungen) den Messwert für „lösliche Aluminiumverbindungen“ verfälschen.

3.2 Vorversuche zur Verfahrensentwicklung: Aufarbeitung in Anlehnung an die Konvention zur Bestimmung des „Gesamtmetallgehalts“

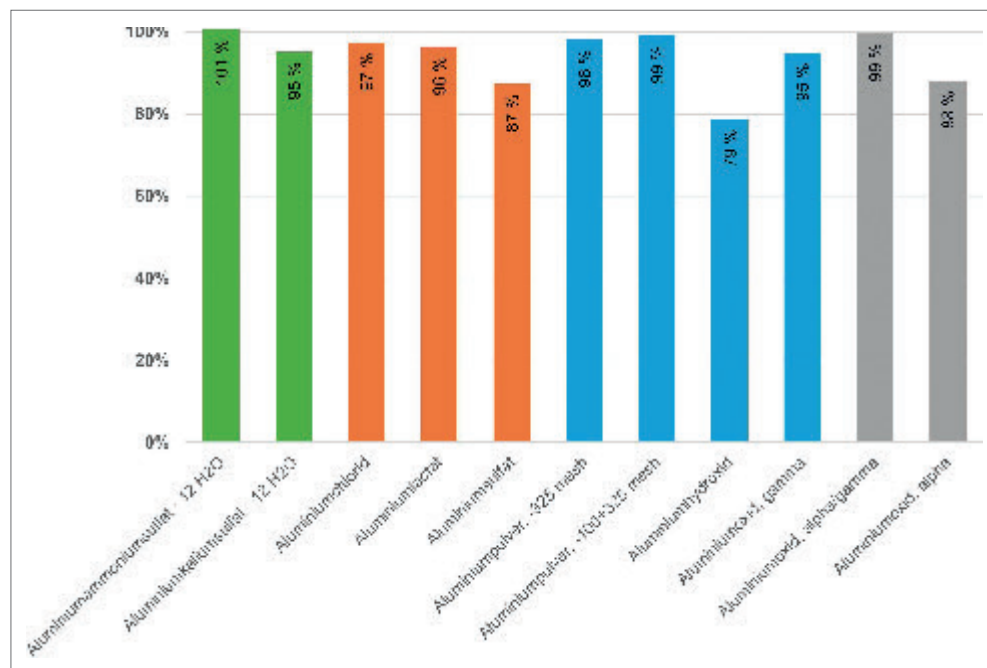
Um das Löslichkeitsverhalten der Materialien weitergehend zu evaluieren, wurden die Aluminiumpulver bzw. die pulverförmig vorliegenden Aluminiumverbindungen im Rahmen der Vorversuche einem weiteren Probenvorbereitungsverfahren unterzogen, das an den in der IFA-Arbeitsmappe [13] beziehungsweise der MAK-Collection [14] beschriebenen mikrowellenunterstützten Druckaufschluss mit Salpetersäure (≥ 65 %) zur Bestimmung des „Gesamtmetallgehalts“ angelehnt ist. Unter Verwendung eines mikrowellenunterstützten Druckaufschlusses (mit Salpetersäure, ≥ 65 %; Zieltemperatur in der Heizphase: 250 °C; erreichter Druck hier bei ca. 115 bar) wurden die in **Bild 2** dargestellten Wiederfindungen für Aluminium ermittelt.

Die in **Bild 2** ersichtliche, vergleichsweise geringe Wiederfindung für die lösliche Aluminiumverbindung Aluminiumsulfat (hier in wasserfreier Form überprüft) ist auch hier gegebenenfalls auf dessen hygroskopische Eigenschaft und dadurch bedingte Fehler beim Bezugswert für die Wiederfindungsermittlung zurückzuführen. Die Reinheit des Aluminiumhydroxid-Pulvers (laut Analysenzertifikat 78,4 %) wurde bei der Berechnung der Wiederfindung wiederum nicht berücksichtigt.

Wenig überraschend lassen sich durch den verwendeten und unter sehr intensiven Bedingungen (Temperatur, Druck, oxidierende Säure) durchgeführten mikrowellenunterstützten Druck-

Bild 2 Wiederfindung für Aluminium aus verschiedenen Aluminiumverbindungen sowie Aluminumpulver unterschiedlicher Korngröße nach mikrowellenunterstütztem Druckaufschluss mit Salpetersäure ($\geq 65\%$). Grün: Einstufung als lösliche, nicht reizende Aluminiumverbindungen; Orange: Einstufung als lösliche, reizende Aluminiumverbindungen; Blau: Vertreter von Aluminium und seinen schwerlöslichen Verbindungen; Grau: unter anderem nicht bioverfügbares bzw. „unlösliches“ α -Aluminiumoxid (Einstufung jeweils nach [5, 9 bis 11]).

Grafik: Autoren



aufschluss auch „lösliche Aluminiumverbindungen“ in Lösungen bringen. Würde im Falle einer schrittweisen Untersuchung von Proben – in Anlehnung an das in der ISO-Norm 15202-2 [15] dargelegte Vorgehen – zunächst eine Bestimmung der löslichen Aluminiumverbindungen erfolgen und sich daran eine Bestimmung der schwerlöslichen Verbindungen aus dem nicht gelösten Material anschließen, wäre aus der beschriebenen Beobachtung (quantitative Wiederfindung von Aluminium aus löslichen Aluminiumverbindungen bei Anwendung des mikrowellenunterstützten Druckaufschlusses mit Salpetersäure ($\geq 65\%$)) keine maßgebliche Beeinflussung des Messergebnisses für „Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen“ durch „lösliche Aluminiumverbindungen“ zu erwarten. Angesichts der Tatsache, dass Aluminium in metallischer Form und Aluminium aus Aluminiumhydroxid aber – zumindest teilweise – bereits bei der Bestimmung von löslichen Aluminiumverbindungen (unter den hier gewählten Konventionsbedingungen) miterfasst würden, wäre bei einer mehrstufigen Analyse je nach Probenzusammensetzung mit einem Minderbefund für Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen zu rechnen.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Wiederfindungsversuche unter Verwendung des mikrowellenunterstützten Druckaufschlusses mit Salpetersäure ($\geq 65\%$), dass zumindest die hier gewählten Aufschlussbedingungen keine strikte Differenzierung von „Aluminium und seinen schwerlöslichen Verbindungen“ und „unlöslichen“ beziehungsweise nicht bioverfügbaren Aluminiumverbindungen wie α -Aluminiumoxid zulassen. Die Anwesenheit der α -Modifikation des Aluminiumoxids würde unter den vorliegenden Bedingungen zu fälschlicherweise erhöhten Messwerten für „Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen“ führen.

3.3 Zusammenfassung der analytischen Herausforderungen

Zusammenfassend wurde durch die hier beschriebenen Versuche aufgezeigt, dass die gewählten Probenvorbereitungsverfahren Einschränkungen hinsichtlich ihrer Selektivität aufweisen,

zumindest dann, wenn die für die MAK-Werte vorgenommene Einteilung von Aluminiumverbindungen [5, 9 bis 11] als Maßgabe betrachtet wird.

Der Fokus des vorliegenden Artikels liegt auf einer Betrachtung der „Löslichkeit“ bzw. „Schwerlöslichkeit“ von Metallen (im konkreten Fall Aluminium) und ihren Verbindungen. Im Zusammenhang mit den Herausforderungen bei der Entwicklung geeigneter Messverfahren für die Bestimmung von Aluminiumverbindungen soll neben dem Aspekt der Selektivität allerdings nicht unerwähnt bleiben, dass auch die als MAK-Werte definierten Luftkonzentrationen – zumindest für manche Labore – durchaus eine Herausforderung für die Entwicklung geeigneter Messverfahren darstellen könnten. Eine Konzentration von beispielsweise $0,0002 \text{ mg Al/m}^3$ (MAK-Wert für lösliche, reizende Aluminiumverbindungen [10, 11]) beziehungsweise ein Zehntel davon (Anforderung nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 [17] bzw. DIN EN 482 [18]) dürfte (bei Annahme eines typischen Probeluftvolumens von $1,2 \text{ m}^3$) zumindest durch manche Labore selbst bei Verwendung hochempfindlicher Analysetechniken wie ICP-MS (unter anderem aufgrund des ubiquitären Vorkommens von Aluminium) nicht ohne weiteres mit einer akzeptablen Genauigkeit beziehungsweise Ergebnisunsicherheit zu bestimmen sein.

4 Potenzielle Herausforderungen bei der Bewertung von Arbeitsplätzen

Ob sich aus den analytischen, insbesondere die Selektivität betreffenden Einschränkungen auch Herausforderungen für die Bewertung eines Arbeitsplatzes ergeben, hängt letztendlich vom Einzelfall ab. Wird an einem Arbeitsplatz nur eine konkrete Aluminiumverbindung eingesetzt und durchläuft diese – beispielsweise durch prozesstechnische Schritte bedingt – keine chemischen Reaktionen, aus der eine oder mehrere andere Aluminiumverbindungen hervorgehen würden, dürfte eine adäquate Beurteilung des Arbeitsplatzes vor dem Hintergrund der beschriebenen MAK-Werte [10, 11] lediglich an zwei Bedingungen geknüpft

sein: Zum einen müsste die vorhandene Datenlage zur betreffenden Aluminiumverbindung eine klare Zuordnung der Verbindung zu einer der von der MAK-Kommission etablierten Verbindungsklassen (löslich, nicht reizend; löslich, reizend; schwerlöslich; nicht bioverfügbar [5, 9 bis 11]) zulassen. Zum anderen wäre bei der Auswahl des Probenvorbereitungsverfahrens für die analytische Ermittlung der Aluminiumkonzentration zu berücksichtigen, dass die betreffende Aluminiumverbindung unter den gewählten Arbeitsbedingungen vollständig in Lösung gebracht werden kann, es sei denn, die Löslichkeit einer Verbindungsklasse wäre ausschließlich über eine Konvention (spezifische Extraktionsmittel und -bedingungen) und nicht über eine direkte Zuordnung einzelner Verbindungen definiert. Bei ausschließlicher Bezugnahme auf Konventionsbedingungen wäre es nicht zwingend notwendig, dass die Gesamtmenge bestimmter Verbindungen in Lösung gebracht wird [14].

Unter den vorgenannten Bedingungen dürfte die Bewertung eines Arbeitsplatzes auch dann vergleichsweise einfach sein, wenn an einem solchen mehrere Aluminiumverbindungen der gleichen Verbindungsklasse (nach MAK-Klassifizierung [5, 9 bis 11]) eingesetzt werden oder diese im Rahmen der am Arbeitsplatz durchgeführten Prozesse lediglich in Verbindungen umgewandelt werden, die der gleichen Verbindungsgruppe zuzuordnen wären.

Problematisch könnte die Überwachung eines Arbeitsplatzes auf Grundlage der MAK-Werte für Aluminium und seine Verbindungen [10, 11] dann werden, wenn dort bereits Aluminiumverbindungen unterschiedlicher Kategorien (z. B. lösliche, nicht reizende und lösliche, reizende Verbindungen) Verwendung finden. Weitere Probleme ergeben sich, wenn unter den vorliegenden Prozessbedingungen, durch das Auftreten von Lösungsvorgängen und/oder chemischen Reaktionen (beispielsweise durch (Luft-)Feuchtigkeit und/oder thermische Vorgänge bedingt) die Bildung von Aluminiumverbindungen anderer Kategorien möglich ist. Sofern sich Aluminium aus Verbindungen unterschiedlicher Kategorien auf einen Aluminium-Messwert auswirken, der keine konkreten Rückschlüsse auf die in der Probe vorliegenden Verbindungen und deren mengenmäßige Verteilung zulässt, wäre eine Beurteilung von Arbeitsplätzen lediglich in Form einer Worst-Case-Betrachtung möglich.

Für eine fundierte Beurteilung von Arbeitsplätzen auf Basis der gültigen MAK-Werte für Aluminium und seine Verbindungen [10, 11] erscheint es erforderlich, diese zunächst hinsichtlich der dort eingesetzten und ggf. prozessbedingt gebildeten Aluminiumverbindungen zu beleuchten. Bei der Interpretation von Analysergebnissen sind stets die Charakteristika des Probenvorbereitungs- und Analyseverfahrens, insbesondere etwaige Einschränkungen der Selektivität, zu berücksichtigen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Natürlich ist die bereits im Titel dieses Beitrags gestellte Frage danach, ob die Löslich- oder auch Schwerlöslichkeit einer chemischen Verbindung von der Betrachtungsweise oder anders ausgedrückt, den für die Löslichkeitsbetrachtung festgelegten Bedingungen abhängig ist, eher rhetorischer Natur. Allgemein und beispielhaft anhand der für die MAK-Werte für Aluminium und seine Verbindungen vorgenommenen Klassifizierung [5, 9-11] wurde im Rahmen des vorliegenden Beitrags thematisiert, wie sich die für das Lösungsverhalten einer chemischen Verbindung relevanten (und für Löslichkeitsversuche gewählten) Parameter in

Abhängigkeit von der Perspektive (z. B. Löslichkeit in Annäherung an physiologische Bedingungen und Löslichkeit unter Konventionsbedingungen im Bereich der Messtechnik) unterscheiden können. Löslichkeitsbetrachtungen – egal auf welcher Ebene – haben allerdings gemeinsam, dass die ermittelten Löslichkeiten (neben weiteren Faktoren) wesentlich von den experimentellen Randbedingungen abhängig sind. Insofern erscheint es im Hinblick auf die Beurteilung von löslichen beziehungsweise schwerlöslichen Metallverbindungen anhand differenzierter Beurteilungsmaßstäbe in der Luft am Arbeitsplatz von wesentlicher Bedeutung, sich etwaigen Kontroversen bezüglich der Löslichkeitsdefinition, insbesondere aber der für die analytische Bestimmung gewählten Löslichkeitsbedingungen und ihrer Auswirkungen auf die Analysenergebnisse bewusst zu sein.

LITERATUR

- [1] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Lexikon der Biologie: Aluminium.
<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/aluminium/2560>.
- [2] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Lexikon der Chemie: Aluminium.
<https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/aluminium/331>.
- [3] Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH: Aluminium. <https://www.ages.at/mensch/ernaehrung-lebensmittel/rueckstaende-kontaminanten-von-a-bis-z>
- [4] Bundesinstitut für Risikobewertung: Fragen und Antworten zu Aluminium in Lebensmitteln und verbrauchernahen Produkten.
<https://www.bfr.bund.de/fragen-und-antworten/thema/fragen-und-antworten-zu-aluminium-in-lebensmitteln-und-verbrauchernahen-produkten/>.
- [5] Hartwig, A.; MAK-Kommission: Aluminiumverbindungen, lösliche. MAK-Begründung. The MAK Collection for Occupational Health and Safety 10 (2025) Nr. 3, S. 1-77. Doc048.
https://doi.org/10.34865/mb742990verdb10_3or
- [6] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH: Lexikon der Chemie: Aluminiumoxid.
<https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/aluminiumoxid/341>.
- [7] quality-Datenbank Klaus Gebhardt e.K.: Glas- und Keramikindustrie.
<https://www.industrie-lexikon.de/cms/lexikon/41-lexikon-g/7833-glas-und-keramikindustrie.html>.
- [8] Hebisch, R.; Göen, T.; Hartwig, A.: Neue Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen und Biomonitoring. Mitteilungen aus den Arbeitsgruppen „Luftanalysen“ und „Analysen in biologischem Material“ der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der DFG – Nr. 4. Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft 86 (2026) Nr. 03-04, S. 65-69.
- [9] Hartwig, A.; MAK-Kommission: Aluminium und seine schwerlöslichen Verbindungen. MAK-Begründung, Nachtrag. The MAK Collection for Occupational Health and Safety 10 (2025) Nr. 3, S. 1-62. Doc047.
https://doi.org/10.34865/mb742990verda10_3ad
- [10] Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft: Mitteilung 60: MAK- und BAT-Werte-Liste 2024.
https://www.doi.org/10.34865/mbwl_2024_deu.
- [11] Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft: Mitteilung 61: MAK- und BAT-Werte-Liste 2025.
https://www.doi.org/10.34865/mbwl_2025_deu.
- [12] Rosenberger, W.; Netz-Piepenbrink, S.; Hahn, J. U. et al.: Aluminium und seine löslichen anorganischen Verbindungen. In: Parlar H.; Hartwig, A. (Hrsg.). Analytische Methoden zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Band 1: Luftanalysen. 18. Lieferung. Weinheim: WileyVCH. <https://doi.org/10.1002/3527600418.am742990d0018>
- [13] Pitzke, K.; Poprizki, J.; Schwank, T.: Aufbereitungsverfahren zur Analytik metallhaltiger Stäube (Kennzahl 6015). In: IFA-Arbeitsmappe. Ausgabe 02/2018. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV). Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Berlin.
<https://www.ifa-arbeitsmappdigital.de/6015>.
- [14] Pitzke, K.; Breuer, D.; Hebisch, R. et al.; MAK-Kommission: Probenahme und Bestimmung von Aerosolen und deren Inhaltsstoffen – Bestimmung von metallhaltigen Staubbahninhaltsstoffen. The MAK Collection for Occupational Health and Safety 4 (2019) Nr. 4, S. 2391-2415.

- [15] ISO 15202-2:2020: Workplace air – Determination of metals and metalloids in airborne particulate matter by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry – Part 2: Sample preparation. Third edition 2020-05. ISO copyright office, Vernier, Geneva, Schweiz.
- [16] *Avramescu, M.-L.; Chénier, M.; Beauchemin, S. et al.*: Dissolution Behaviour of Metal-Oxide Nanomaterials in Various Biological Media. *Nanomaterials* 13 (2023) Nr. 1, S. 26.
- [17] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). Ausgabe September 2023. GMBI (2023) Nr. 42, S. 898-920.
- [18] DIN EN 482:2021: Exposition am Arbeitsplatz – Verfahren zur Bestimmung der Konzentration von chemischen Arbeitsstoffen – Grundlegende Anforderungen an die Leistungsfähigkeit. Ausgabe Mai 2021. DIN Media, Berlin.

Dr. rer. nat. Michael Krämer,
Dr. rer. sec. Cornelia Wippich,
Tobias Schwank,
Dr. rer. nat. Markus Mattenklott,
Katrin Pitzke

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