

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. 2

R. Hebisch, T. Göen, K. Hartig

1 Einleitung

Mit dieser Veröffentlichung werden die im letzten Halbjahr in der MAK Collection for Occupational Health and Safety publizierten Methoden zur Bestimmung von Gefahrstoffen in der Arbeitsplatzluft sowie zur Bestimmung von Gefahrstoffen oder deren Metaboliten im menschlichen Körper mittels Biomonitoring beschrieben. Weiterhin sollen die Leserinnen und Leser im Rahmen dieser Publikationsreihe über die Arbeitsweise der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe informiert werden. Zum Auftakt wird die Arbeit der Geschäftsstelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) vorgestellt, die die MAK-Kommission hauptamtlich betreut.

2 Wissenschaftsbasierte Empfehlungen als Grundlage für gesetzliche Regelungen im Arbeitsschutz

2.1 Vorstellung der DFG

„Als Selbstverwaltungsorganisation der Wissenschaft in Deutschland fördert die DFG Forschung in allen Formen und Disziplinen an Hochschulen und anderen Forschungseinrichtungen“ [1]. Die DFG finanziert dabei in erster Linie Forschungsvorhaben, berät aber auch staatliche und im öffentlichen Interesse tätige Einrichtungen in wissenschaftlichen und wissenschaftspolitischen Fragen. Diese Form der Politikberatung findet überwiegend in den Senatskommissionen statt. Die älteste und bekannteste Kommission ist die Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Diese oft auch als MAK-Kommission bezeichnete Kommission feiert in diesem Jahr bereits 70-jähriges Bestehen. Sie hat in dieser Zeit nicht nur den Wissensstand zu einer Vielzahl von Stoffen zusammengetragen und Empfehlungen für deren Risikobewertung abgegeben, sondern auch wichtige Stellungnahmen verfasst, in denen sie sich für die Forschungsgemeinschaft zu wichtigen forschungspolitischen Themen positioniert hat. Ein Beispiel hierfür ist die Stellungnahme zur aktuellen und zukünftigen Rolle von New Approach Methods (NAMs), in der die Kommission deutlich macht, dass Risikobewertung in der Gesamtbetrachtung von Beobachtungen am Menschen, aus Tiermodellen und wo immer möglich auch aus in-vitro- und Modellierungsansätzen am besten gelingt [2]. Ein vollständiger Ersatz von tierexperimentellen Ansätzen zu Gunsten von in-vitro-Ansätzen, wie aktuell auf europäischer Ebene diskutiert, ist auch perspektivisch nicht umsetzbar, weil nicht alle Wirkmechanismen von Substanzen im Menschen darüber abgebildet werden können. NAMs haben zweifellos ein hohes Potential in der Chemikalienprüfung, allerdings gibt es auch Grenzen der Einsatzmöglichkeit.

2.2 Arbeitsweise der MAK-Kommission

Die MAK-Kommission stellt mit Unterstützung ihres wissenschaftlichen Sekretariats alle verfügbaren Informationen über relevante Stoffe am Arbeitsplatz zusammen und gibt Empfehlungen für Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK-Werte) in der Luft, aber auch für Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte in Blut und Urin (insbesondere BAT-Werte) ab. Ergänzend dazu werden krebserzeugende, keimzellmutagene, sensibilisierende, hautresorptive und die Schwangerschaft beeinträchtigende Stoffe spezifisch markiert und entsprechende Messmethoden für die Überwachung der Grenzwerte in der Arbeitsplatzluft und in biologischem Material beschrieben [3].

Die Mitglieder der MAK-Kommission werden vom Senat der DFG ernannt und sind ehrenamtlich tätig. Ständige Gäste stellen den Informationsfluss von und zu relevanten Akteuren, wie beispielsweise den Berufsgenossenschaften oder dem Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), sicher. Zu spezifischen Themen und Stoffen werden zusätzlich Gäste eingeladen und unterstützen die Arbeit der Kommission. Auf diese Weise vereint die Kommission nicht nur Kompetenzen aus der Arbeitsmedizin und Toxikologie, sondern auch aus der Statistik, Epidemiologie und Messtechnik. Dieser interdisziplinäre Austausch ist die Voraussetzung für die wissenschaftsbasierte Bewertung von Stoffen.

Im Mittelpunkt der Kommissionsarbeit steht die Empfehlung von MAK- und BAT-Werten und die Beschreibung von geeigneten Messmethoden (**Bild 1**).

In der Plenarsitzung im Frühjahr jeden Jahres wird eine Ankündigungsliste verabschiedet und veröffentlicht, in der sichtbar gemacht wird, mit welchen Stoffen sich die Kommission gerade beschäftigt (**Bild 2**). Am 1. Juli jeden Jahres wird die MAK- und BAT-Werteliste veröffentlicht, in der alle Werte in jeweils aktueller Form aufgelistet sind. Eine Liste mit Änderungen und Neuaufnahmen erleichtert die Übersichtlichkeit. Alle Änderungen und Neuaufnahmen werden ausführlich begründet und können ab diesem Zeitpunkt innerhalb einer Frist von sechs Monaten durch die Öffentlichkeit kommentiert werden. Sachliche und durch Daten gestützte Änderungsvorschläge werden in der Kommission diskutiert und ggf. zur Überarbeitung der Einstufungen sowie Begründungen genutzt und die revidierten oder bestätigten Begründungen in der nächsten Plenarsitzung final verabschiedet.

Liegen neue Erkenntnisse oder Studien vor, werden diese systematisch überprüft und ggf. erforderliche Ergänzungen der Begründungen oder eine Neubewertung von Stoffen vorgenommen. Die auf wissenschaftlicher Basis und dem jeweils verfügbaren Erkenntnisstand für einen Stoff entstandenen Empfehlungen werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), einem Beratungsgremium des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS),

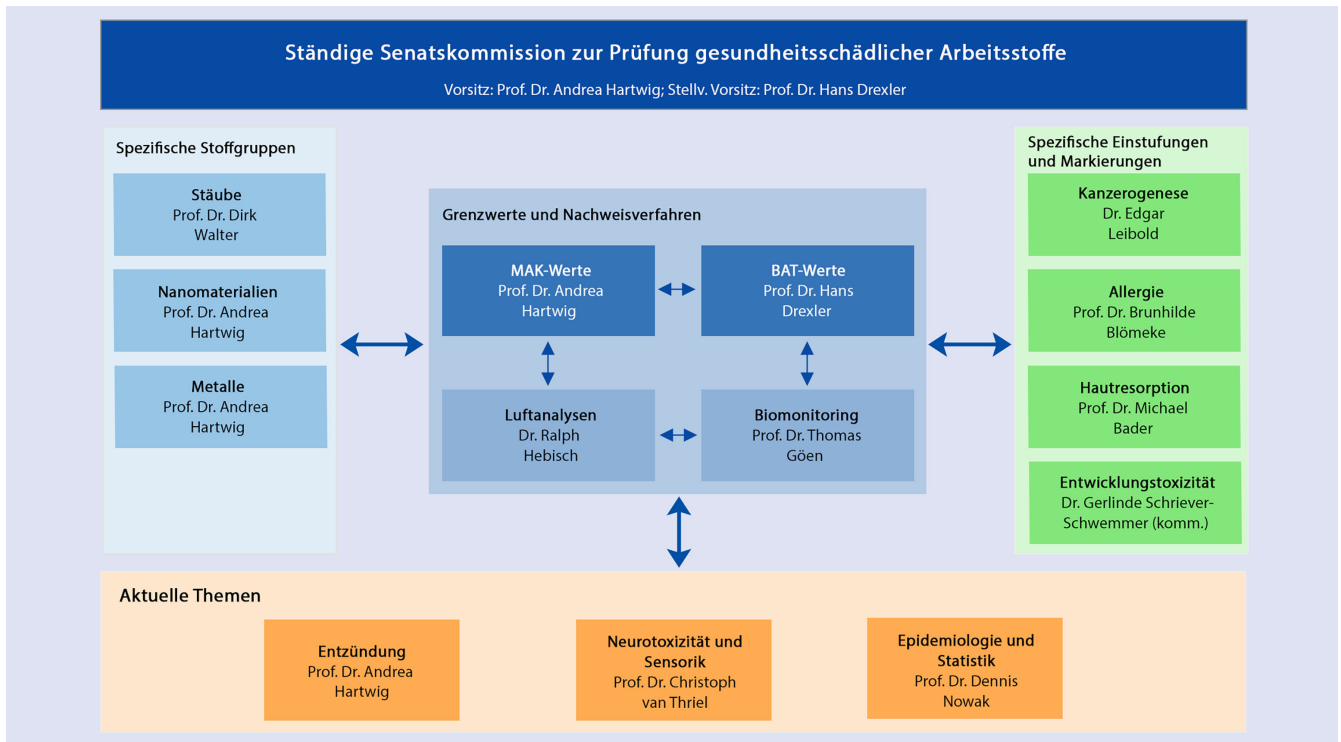


Bild 1. Übersicht über die in der MAK-Kommission zusammenwirkenden Arbeitsgruppen und deren Leitung. Grafik: [4]

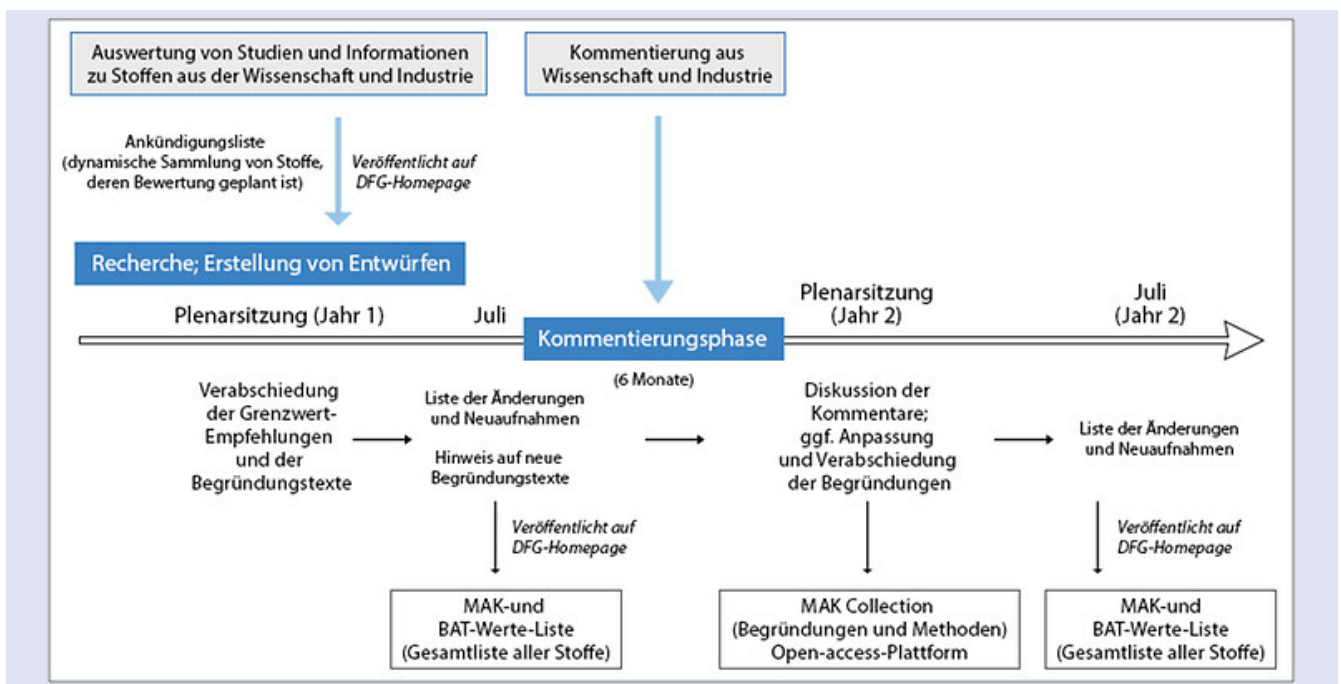


Bild 2. Arbeitsweise der MAK-Kommission. Grafik: [5]

genutzt und in gesetzliche Regelungen und Rahmenbedingungen für den Arbeitsschutz überführt.

Die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe bietet auch international eine der wenigen Möglichkeiten, systematisch, wissenschaftsbasiert und unabhängig alle verfügbaren Erkenntnisse zu Arbeitsstoffen zusammenzutragen. So arbeiten Mitglieder und Gäste z. B. aus Großbritannien, der Schweiz und Österreich in der MAK-Kommission mit. Darüber

hinaus wird die MAK- und BAT-Werteliste nicht nur in deutscher, sondern auch englischer und spanischer Sprache veröffentlicht.

2.3 Unabhängigkeit und Transparenz der Ergebnisse

Die Festlegung von Grenzwerten und deren Einhaltung stellen Arbeitgeber und Verantwortliche für Arbeitssicherheit häufig vor

Herausforderungen und können durchaus auch hohe Kosten erzeugen. Gleichzeitig ist die Festlegung von Grenzwerten für den Schutz der Gesundheit am Arbeitsplatz sowie im Zusammenhang mit Fragen der Unfallversicherung von wichtiger Bedeutung. Eine rein auf wissenschaftlichen Fakten basierende Darstellung des Erkenntnisstandes und die Sicherstellung von Unabhängigkeit bei der Beratung sind daher von herausgehobener Bedeutung und werden durch die Arbeit der Kommission gewährleistet. Klare Regeln zum Umgang mit Interessenkonflikten und ein Kodex zum Selbstverständnis der Kommissionsarbeit sind hierfür wichtige Werkzeuge [6].

Alle erarbeiteten Ergebnisse, Begründungen für Substanzbewertungen und Messmethoden werden frei zugänglich in der MAK Collection publiziert [7].

2.4 Möglichkeiten der Mitwirkung

Studien oder Datensätze, aber auch Beobachtungen aus der Praxis sind jederzeit erwünscht und können an die Kommission weitergeleitet werden. Gern kann hier die Kommentierungsphase genutzt und auf nicht berücksichtigte Erkenntnisse oder diskussionswürdige Schlussfolgerungen hingewiesen werden.

Bei vielen Substanzen besteht ein Mangel an qualitativ hochwertigen Studien und Daten, sodass nicht immer ein MAK- oder BAT-Wert abgeleitet werden kann. Daraus resultiert ein Bedarf an der Durchführung und Veröffentlichung weiterer Arbeitsplatzstudien oder Untersuchungen von Wirkmechanismen von Substanzen, die unter anderem durch die DFG gefördert werden können.

3 Neue Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen

Im zweiten Halbjahr 2024 wurden in den Ausgaben 3 und 4 der MAK Collection [7] sechs Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen veröffentlicht. Dabei handelt es sich bei den Messverfahren zur Bestimmung von Aminen mittels Headspace-Gaschromatographie mit Massenspektrometrie (GC/MS), kurzketziger aliphatischer Amine mit Ionenchromatographie sowie von Benzoesäure mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) um die englischsprachigen Übersetzungen. Diese wurden bereits in Teil 1 dieser Mitteilungen kurz beschrieben [8]. Nachfolgend werden die drei neu publizierten Messverfahren dargestellt.

3.1 Bestimmung von Gadolinium mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) [9]

Gadolinium wird z.B. in Magnetspeichern verbaut und zur Herstellung von Lichtwellenleitern und optischen Speichermedien verwendet. Weiterhin wird es seit einigen Jahrzehnten als Bestandteil von Kontrastmitteln bei bildgebenden Verfahren wie der Magnetresonanztomografie (MRT) verwendet.

Es besteht der Verdacht, dass bei Patienten durch abgelagertes Gadolinium Gesundheitsschäden hervorgerufen werden können. Da bisher noch kein Beurteilungsmaßstab oder MAK-Wert festgelegt wurde, erfolgte die Validierung des Messverfahrens auf der Grundlage des Allgemeinen Staubgrenzwertes für die alveolengängige Fraktion in Höhe von $1,25 \text{ mg/m}^3$ [10].

Bei dem Messverfahren für Gadolinium und Gadoliniumverbindungen wird die Arbeitsplatzluft mit einem Volumenstrom von 10 l/min auf einem Cellulosenitratfilter unter Verwendung eines Sammelkopfes FSP 10 als alveolengängige Staubfraktion abgeschieden. Der mit der alveolengängigen Staubfraktion beladene Filter wird mit einem Gemisch aus Salpetersäure und Salzsäure aufgeschlossen. Der Aufschluss kann sowohl offen als auch mikrowellenunterstützt durchgeführt werden. Die Aufschlusslösung wird anschließend unter Zusatz von Lutetium als internem Standard mittels ICP-MS analysiert.

Die Bestimmungsgrenze für die Summe an Gadolinium und seinen Verbindungen beträgt bei einer zweistündigen Probenahme in Abhängigkeit vom verwendeten Aufschlussverfahren $0,001$ bis $0,002 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. In dem für die Validierung verwendeten Messbereich von einem Zehntel bis zum Doppelten des Allgemeinen Staugrenzwertes für die alveolengängige Fraktion liegt die erweiterte Messunsicherheit bei $23,5$ bis 25% . Das Messverfahren ist entsprechend den Vorgaben der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 402 [11] als geeignet zu bewerten.

3.2 Bestimmung von p-Chloranilin mittels GC/MS [12]

Das z.B. als Zwischenprodukt zur Herstellung von Pflanzenschutzmitteln und Farbstoffen verwendete p-Chloranilin hat einen Arbeitsplatzgrenzwert von $0,3 \text{ mg/m}^3$ ($0,06 \text{ ml/m}^3$). Der Überschreitungsfaktor für kurzzeitig erhöhte Expositionen beträgt 2 für diesen der Kurzzeitwertkategorie II zugeordneten Stoff [10].

Die Probenahme von p-Chloranilin erfolgt mit zwei schwefelsäureimprägnierten Glasfaserfiltern, die in einen Sammelkopf GSP eingesetzt werden, bei einem Volumenstrom von 1 l/min . Mit einer Mischung aus Acetonitril und Ammoniak, die p-Propylamin als internen Standard enthält, wird das p-Chloranilin desorbiert und anschließend mittels Gaschromatographie mit massenspektrometrischer Detektion quantifiziert.

Bei einer vierstündigen Probenahme (240 Liter Probeluftvolumen) beträgt die Bestimmungsgrenze dieses Messverfahrens $0,0037 \text{ mg/m}^3$. Die erweiterte Messunsicherheit liegt bei max. 27% . Eine Überwachung des Kurzzeitwertes von $0,6 \text{ mg/m}^3$ ist möglich. Es handelt sich somit um ein geeignetes Messverfahren gemäß TRGS 402 [11].

3.3 Bestimmung von Schwefelkohlenstoff mit Headspace-Gaschromatographie mit flammenphotometrischer Detektion (GC-FPD) [13]

Schwefelkohlenstoff wird insbesondere zur Herstellung von Cellulosefasern aus Zellstoff verwendet. Der Arbeitsplatzgrenzwert beträgt 30 mg/m^3 (10 ml/m^3). Der Überschreitungsfaktor dieses Kurzzeitwertkategorie II zugeordneten Stoffes ist 2 [10].

Zur Probenahme wird ein mit Aktivkohle gefülltes Sammelröhrchen (Typ B/G) verwendet. Es wird empfohlen, 40 l Probeluft zu sammeln. Die entspricht bei zweistündiger und achtestündiger Probenahmedauer einem Volumenstrom von 333 bzw. 83 ml/min . Nach der Probenahme wird Schwefelkohlenstoff mit Toluol extrahiert. Die Probenaufarbeitung muss spätestens sieben Tage nach der Probenahme erfolgen. Vor der gaschromatographischen Bestimmung wird den Probelösungen Thiophen als interner Standard zugesetzt. Die Detektion nach gaschromatographischer Trennung erfolgt mit einem FPD.

Da die Wiederfindung des Messverfahrens etwa 70 % beträgt, ist diese bei der Durchführung von Arbeitsplatzmessungen vorab zu bestimmen und bei der Berechnung des Messergebnisses einzubeziehen. Bei einem Probeluftvolumen von 40 l beträgt die Bestimmungsgrenze 0,5 mg/m³. Die erweiterte Messunsicherheit liegt bei 21 bis 22 %. Zur Überwachung des Kurzzeitwertes wird ein Probeluftvolumen von 5 l mit einem Volumenstrom von 333 ml/min gesammelt. Das Messverfahren ist nach den Vorgaben der TRGS 402 geeignet [11].

4 Neue Messverfahren für das Biomonitoring

Im zweiten Halbjahr 2024 wurden in den Ausgaben 3 und 4 der MAK Collection zwei Messverfahren sowohl in deutscher als auch englischer Sprache veröffentlicht.

4.1 3-(4'-Methylbenzyliden)campher (4-MBC) – Bestimmung von 3-(4'-Carboxybenzyliden)campher und 3-(4'-Carboxybenzyliden)hydroxycampher in Urin mittels UPLC-MS/MS [14, 15]

3-(4'-Methylbenzyliden)campher (4-MBC) ist ein UVB-Filter in kosmetischen Produkten, vor allem in Sonnenschutzcremes, und darf in diesen mit einem maximalen Anteil von 4 % enthalten sein [16]. Ab Mai 2026 dürfen Kosmetikprodukte, die 4-MBC enthalten in der EU nicht mehr angeboten werden [17].

Für das Humanbiomonitoring wird in der hier beschriebenen Methode eine selektive und sensitive Quantifizierung der beiden Hauptmetaboliten von 4-MBC, 3-(4'-Carboxybenzyliden)campher (cx-MBC) und 3-(4'-Carboxybenzyliden)hydroxycampher (cx-MBC-OH), in Urin durchgeführt. Nach Zugabe deuterierter interner Standards (cx-MBC-d₄ und cx-MBC-OH-d₄) werden die Urinproben enzymatisch hydrolysiert. Im Anschluss an die Extraktion und Anreicherung durch Online-Festphasenextraktion werden die Analyten durch Flüssigkeitschromatographie getrennt und mittels Tandem-Massenspektrometrie analysiert. Für die Kalibrierung werden mit cx-MBC bzw. cx-MBC-OH dotierte Poolurinproben verwendet.

Die mit der Methode erhaltenen Bestimmungsgrenzen von 0,15 µg/l (cx-MBC) und 0,3 µg/l (cx-MBC-OH) sind ausreichend, um die Hintergrundbelastung in der Allgemeinbevölkerung zu erfassen. Gute Präzisionsdaten mit Standardabweichungen unter 5,5 % für cx-MBC und unter 6,5 % für cx-MBC-OH sowie gute Genauigkeitsdaten mit mittleren relativen Wiederfindungen im Bereich von 90-110 % für cx-MBC und 89-106 % für cx-MBC-OH zeigen, dass die Methode zuverlässige und genaue analytische Ergebnisse liefert.

4.2 Tris(1,3-dichlorpropyl)phosphat – Bestimmung von Bis(1,3-dichlorpropyl)phosphat in Urin mittels LC-APCI-ESI-MS/MS [18, 19]

Bei Tris(1,3-dichlorpropyl)phosphat (TDCPP) handelt es sich um ein Organophosphat-Flammschutzmittel, das sehr häufig in Weichschäumen für die Automobilindustrie, aber auch in Möbeln für den Wohnbereich und in Produkten mit Polyurethanschaum eingesetzt wird. TDCPP wurde in Staub aus Autoinnerräumen, Bürogebäuden und Privathäusern nachgewiesen, was auf

eine nicht vernachlässigbare Exposition der Allgemeinbevölkerung gegen TDCPP hindeutet.

Für das Humanbiomonitoring von TDCPP-Expositionen wird in der hier beschriebenen Methode die Urinkonzentration des TDCPP-Hauptmetaboliten Bis(1,3-dichlorpropyl)phosphat (BDCPP) bestimmt. Die Urinproben werden dazu mit dem internen Standard d₁₀-BDCPP versetzt und leicht angesäuert. Die Aufreinigung erfolgt durch Anionenaustausch-Festphasenextraktion im Mischverfahren. Nach der flüssigkeitschromatographischen Trennung wird BDCPP mittels Tandem-Massenspektrometrie unter simultaner Verwendung von chemischer Ionisierung bei Atmosphärendruck (APCI) und Elektrospray-Ionisierung (ESI) detektiert. Die Kalibrierung erfolgt in Reinstwasser : Methanol (4 : 1, v/v). Gute Präzisionsdaten mit Standardabweichungen unter 7 % und gute Genauigkeitsdaten mit mittleren relativen Wiederfindungen im Bereich von 93,6-101 % zeigen, dass die Methode zuverlässige und genaue analytische Ergebnisse liefert. Die Bestimmungsgrenze von 0,2 ng BDCPP/l Urin reicht aus, um berufsbedingte Expositionen gegen TDCPP nachzuweisen und höhere Hintergrundbelastungen von TDCPP in der Allgemeinbevölkerung zu erfassen.

4.3 Publikation von konzeptionellen Beiträgen

Im zweiten Halbjahr 2024 wurde auch eine konzeptionelle Arbeit in deutscher und englischer Sprache zu den Verfahren zur Ermittlung von Nachweis- und Bestimmungsgrenzen im Humanbiomonitoring publiziert [20, 21].

Nachweis- und Bestimmungsgrenzen werden im Humanbiomonitoring bei der Validierung von Analysemethoden ermittelt, um auch in niedrigen Konzentrationsbereichen quantitative Aussagen mit ausreichender Präzision treffen zu können. In der DIN 32645 sind die Begriffe Nachweis- und Bestimmungsgrenze für die chemische Analytik definiert und Verfahren zu ihrer Ermittlung beschrieben [22]. In den allgemeinen Vorbemerkungen der MAK Collection wurden 2010 bereits verschiedene Möglichkeiten beschrieben, um Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für Biomonitoringverfahren zu bestimmen [23].

Die 2024 veröffentlichte konzeptionelle Arbeit diskutiert sechs Verfahren zur Berechnung bzw. Abschätzung der bei der Validierung von Biomonitoring-Methoden ermittelten Nachweis- und Bestimmungsgrenzen. Am Beispiel des Biomonitoring-Parameters 1-Hydroxypyren in Urin werden diese Verfahren kritisch bewertet und diskutiert. Letztlich wird nicht auf ein bevorzugtes Verfahren für die Berechnung von Nachweis- und Bestimmungsgrenzen verwiesen, sondern eine sorgfältige Abwägung und Überprüfung der Zweckmäßigkeit des gewählten Verfahrens empfohlen. Darüber hinaus sollen der gewählte Ansatz und die damit erhaltenen Ergebnisse in der Methodenbeschreibung hinreichend detailliert dokumentiert werden.

5 Resümee und Ausblick

In dieser Veröffentlichung wurde die Arbeitsweise der MAK-Kommission näher beschrieben. Damit verbunden ist auch ein Aufruf, bei Kommentaren zu den Ergebnissen und Vorschlägen für MAK-Werte direkt auf die Kommission zuzugehen. Die hier beschriebenen neuen Messverfahren für Luftmessungen und das Biomonitoring werden wieder zeitnah in die Liste empfohlener

Messverfahren des AGS [24] und das Biomonitoring-Auskunftssystem der BAuA [25] übernommen.

Am 1. Oktober 2025 feiern wir das 70-jährige Bestehen der MAK-Kommission. Dazu laden wir alle Interessierten in das Futurium in Berlin zu einer Ausstellung und zum Dialog über die Arbeit der Kommission ein.

Literatur

- [1] DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Was ist die DFG? <https://www.dfg.de/de/ueber-uns/ueber-die-dfg/was-ist-die-dfg>
- [2] New Approach Methods (NAMs) in der wissenschaftsbasierten Ableitung von Grenzwerten – derzeitige und zukünftige Rolle; Stellungnahme der Stellungnahme der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe (MAK-Kommission) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), 2023. <https://www.dfg.de/re-source/blob/176138/1194f188d4f5e23ac7304de80d435e/stellungnahme-nams-grenzwerte-data.pdf>
- [3] DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. <https://www.dfg.de/de/ueber-uns/gremien/senat/arbeitsstoffe>
- [4] DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Aufbau der Kommission. <https://www.dfg.de/de/ueber-uns/gremien/senat/arbeitsstoffe/aufbau>
- [5] DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Arbeitsweise der Kommission. <https://www.dfg.de/de/ueber-uns/gremien/senat/arbeitsstoffe/arbeitsweise>
- [6] DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Umgang mit Interessenkonflikten. <https://www.dfg.de/de/ueber-uns/gremien/senat/arbeitsstoffe/interessenkonflikte>
- [7] German Research Foundation – Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area (MAK Commission): The MAK Collection for Occupational Health and Safety. <https://series.publisso.de/en/pgseries/overview/mak/dam/curlIssue>
- [8] Heibisch, R.; Göen, T.: Neue Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen und Biomonitoring – Mitteilungen aus den Arbeitsgruppen „Luftanalysen“ und „Analysen im biologischen Material“ der Ständigen Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der DFG – Nr. 1. Gefahrstoffe – Reinh. Luft 84 (2024), Heft 7-8, S. 183-186.
- [9] Wippich, C.; Pitzke, K.; Göen, T.; Heibisch, R.; Hartwig, A.; MAK Commission: Gadolinium – Bestimmung von Gadolinium und seinen Verbindungen in der Luft am Arbeitsplatz mittels Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS). Luftanalysen-Methode. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc073. https://doi.org/10.34865/am744054d9_3or
- [10] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). BArBl. Heft 1/2006, S. 41–55, zul. geänd. GMBI (2024) Nr. 21, S. 411-412.
- [11] Technische Regeln für Gefahrstoffe: Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition (TRGS 402). GMBI (2023) Nr. 42, S. 898–920.
- [12] Schmitt, R.; Brock, T. H.; Heibisch, R.; Hartwig, A.; MAK Commission: p-Chloroaniline – Determination of p-chloroaniline in workplace air using gas chromatography (GC-MS). Air Monitoring Method. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc076. https://doi.org/10.34865/am10647e9_3or
- [13] Grill, A.; Maschmeier, C.-P.; Heibisch, R.; Hartwig, A.; MAK Commission: Schwefelkohlenstoff – Bestimmung von Schwefelkohlenstoff in der Luft am Arbeitsplatz mittels Headspace-Gaschromatographie (Headspace-GC-FPD). Luftanalysen-Methode. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Dez; 9(4): Doc094. https://doi.org/10.34865/am7515d9_4or
- [14] Gries, W.; Küpper, K.; Leng, G.; Hauke, T.; Gilch, G.; Scherer, G.; Göen, T.; Hartwig, A., MAK Commission: 3-(4'-Methylbenzyliden)campher (4-MBC) – Bestimmung von 3-(4'-Carboxybenzyliden)campher und 3-(4'-Carboxybenzyliden)hydroxycampher in Urin mittels UPLC-MS/MS. Biomonitoring-Methode. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc078. https://doi.org/10.34865/bi3686147d9_3or
- [15] Gries, W.; Küpper, K.; Leng, G.; Hauke, T.; Gilch, G.; Scherer, G.; Göen, T.; Hartwig, A.; MAK Commission: 3-(4'-Methylbenzyliden)campher (4-MBC) – Determination of 3-(4'-carboxybenzyliden)campher and 3-(4'-carboxybenzyliden)hydroxycampher in urine by UPLC-MS/MS. Biomonitoring Method – Translation of the German version from 2024. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc080. https://doi.org/10.34865/bi3686147e9_3or
- [16] Europäisches Parlament, Europäischer Rat (2009) Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel (Neufassung). ABI L (342): 59-209
- [17] Europäische Kommission (2024) Verordnung (EU) 2024/996 der Kommission vom 3. April 2024 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Verwendung von Vitamin A, Alpha-Arbutin und Arbutin sowie bestimmter Stoffe mit potenziell endokrinschädigenden Eigenschaften in kosmetischen Mitteln. ABI L (996): 1-8
- [18] Krystek, P.; Beeltje, H.; Houtzager, M. M. G.; van den Hoeven, E.M.; Kuhlmann, L.; Eckert, E.; Göen, T.; Hartwig, A.; MAK Commission: Tris(1,3-dichloropropyl)phosphat – Bestimmung von Bis(1,3-dichloropropyl)phosphat in Urin mittels LC-APCI-ESI-MS/MS. Biomonitoring-Methode. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Dez; 9(4): Doc096. https://doi.org/10.34865/bi72236d9_4or
- [19] Krystek, P.; Beeltje, H.; Houtzager, M. M. G.; van den Hoeven, E.M.; Kuhlmann, L.; Eckert, E.; Göen, T.; Hartwig, A.; MAK Commission: Tris(1,3-dichloropropyl) phosphate – Determination of bis(1,3-dichloropropyl) phosphate in urine by LC-APCI-ESI-MS/MS. Biomonitoring Method – Translation of the German version from 2024. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Dez; 9(4): Doc097. https://doi.org/10.34865/bi72236e9_4or
- [20] Gries, W.; Scherer, G.; Bader, M.; Göen, T.; Hartwig, A.; MAK Commission: Die Ermittlung von Nachweis- und Bestimmungsgrenzen im Humanbiomonitoring. Biomonitoring-Methoden, Konzeptionelle Themen. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc077. https://doi.org/10.34865/bilodloqdt9_3ad
- [21] Gries, W.; Scherer, G.; Bader, M.; Göen, T.; Hartwig, A.; MAK Commission: The determination of detection and quantitation limits in human biomonitoring. Biomonitoring Methods, Conceptual Topics – Translation of the German version from 2024. MAK Collect Occup Health Saf. 2024 Sep; 9(3): Doc079. https://doi.org/10.34865/bilodloqegt9_3ad
- [22] DIN (Deutsches Institut für Normung), Hrsg. (2008) DIN 32645:2008-11. Chemische Analytik – Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen – Begriffe, Verfahren, Auswertung. Berlin: Beuth. <https://doi.org/10.31030/1465413>
- [23] Bader, M.; Barr, D.; Göen, T.; Schaller, K. H.; Scherer, G.; Angerer, J.: (2010) Allgemeine Vorbemerkungen. Zuverlässigkeitskriterien einer analytischen Methode. In: Angerer J, Hartwig A, Hrsg. Analytische Methoden zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Band 2: Analysen in biologischem Material. Weinheim: Wiley-VCH. S. 284–336. <https://doi.org/10.1002/3527600418.bireliabd0019>
- [24] Ausschuss für Gefahrstoffe, AGS-Geschäftsführung: AGS-Liste geeigneter Messverfahren – Bewertung von Verfahren zur messtechnischen Ermittlung von Gefahrstoffen in der Luft am Arbeitsplatz. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), 25.01.2024, www.baua.de/dok/8592142
- [25] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Biomonitoring-Auskunftssystem. <http://www.baua.de/biomonitoring-auskunftssystem>



Dr. rer. nat. Ralph Heibisch

Foto: Autor

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund.

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Göen

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Institut und Poliklinik für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Erlangen.

Dr. rer. nat. Katja Hartig

Geschäftsstelle der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Medizin, Bonn.