

Schwermetalle und Schadmetalle im Vollblut

Möglichkeiten und Grenzen der Labordiagnostik chronischer Metallbelastungen

Autor: Prof. Dr. med. MSc. Matthias Willmann

Kurzfassung

Die Bestimmung von Schadmetallen im Vollblut kann bei begründetem Expositionsverdacht einen wichtigen Beitrag zum Humanbiomonitoring leisten. Ihr Nutzen hängt allerdings stark vom untersuchten Element ab. Für Blei ist Vollblut der etablierte Biomarker. Auch bei überwiegend organischem Quecksilber sowie bei Cobalt, Chrom und teilweise Titan liefert die Blutmessung klinisch gut verwertbare Informationen. Bei anderen Fragestellungen – etwa bei chronischer Cadmiumbelastung, anorganischem Arsen, anorganischem oder elementarem Quecksilber, Thallium und Uran – ist Urin oft aussagekräftiger. Die Multielementanalyse im Vollblut mittels ICP-MS wird daher als eine praktikable und attraktive Einstiegsuntersuchung gesehen, welche durch weitere Untersuchungen gestützt werden kann. Jeder Messwert zeigt dabei zunächst eine Exposition an. Ob daraus eine gesundheitliche Bedeutung folgt, lässt sich erst im Zusammenhang mit Expositionsanamnese, Toxikokinetik und klinischem Bild beurteilen. ^[2-6]



Foto: KI generiert

TEIL 1 – Essentielle Metalle, Schwermetalle und Schadmetalle

Eigenschaften von Metallen und die Begrifflichkeiten

Metalle sind nicht per se schädlich. Einige von ihnen erfüllen unverzichtbare physiologische Funktionen und müssen dem Organismus in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Eisen, Zink und Kupfer sind typische Beispiele. Für diese essentiellen Metalle gilt zugleich, dass sowohl ein Mangel als auch eine ausgeprägte Überversorgung gesundheitliche Folgen haben kann. Die Bezeichnung „essentiell“ beschreibt also eine biologische Funktion, nicht eine unbegrenzte Unbedenklichkeit. ^[1,2]

Der im Alltag häufig verwendete Begriff „Schwermetall“ hilft bei der medizinischen Risikobewertung nur begrenzt weiter. Seine Definition ist historisch uneinheitlich und stützt sich je nach Quelle auf Dichte, Atommasse oder andere physikalisch-chemische Eigenschaften. IUPAC hat deshalb ausdrücklich davor gewarnt, aus dieser Sammelbezeichnung eine gemeinsame toxikologische Eigenschaft abzuleiten. Ein „Schwermetall“ ist folglich nicht automatisch ein „toxisches Metall“. Und umgekehrt können toxikologisch relevante Elemente außerhalb mancher Schwermetalldefinitionen liegen. ^[1]

Für die vorliegende Fachinformation ist daher der pragmatische Begriff „Schadmetall“ hilfreicher. Gemeint sind Metalle und Halbmetalle, deren erhöhte oder länger anhaltende Aufnahme unter bestimmten Bedingungen gesundheitlich nachteilig sein kann und deren Bestimmung im Humanbiomonitoring eine klinische oder umweltmedizinische Fragestellung beantworten kann. Entscheidend sind nicht Name oder Stoffgruppe, sondern das konkrete Element, seine chemische Form, Dosis und Dauer der Exposition, der Aufnahmeweg, die Bioverfügbarkeit und die individuelle Vulnerabilität. ^[2]

Kategorie	Definition	Physiologische Funktion	Mögliche Toxizität	Beispiele	Diagnostische Bedeutung
Essentielle Metalle	Für normale biologische Funktionen erforderlich	Ja	Mangel und Überexposition möglich	Fe, Zn, Cu	Versorgungsstatus und Überexposition trennen, Messung im Serum/Vollblut ^[1,2]
Schwermetalle	Uneinheitliche historisch/physikalische Sammelbezeichnung	Nicht aus Begriff ableitbar	Nicht aus Begriff ableitbar	Pb, Hg, Cd, Ni, Co – je nach Definition	Für klinische Risikobewertung allein ungeeignet ^[1]
Schadmetalle	Toxikologisch-pragmatische Gruppe potenziell schädlicher Metalle/Halbmetalle	Kann fehlen oder vorhanden sein	Dosis-, Spezies- und Expositionsabhängig	Pb, Cd, Hg, anorg. As	Messung im Urin oder Vollblut ^[2]

Tabelle 1: Begriffsdefinitionen unter Metallen

TEIL 2 – Vollblut oder Urin? Biomonitoring chronischer Metallbelastungen

Humanbiomonitoring: Was bedeutet ein Messwert?

Humanbiomonitoring (HBM) beschreibt die innere Belastung eines Menschen, indem ein Stoff, ein Metabolit oder – wie bei Metallen – die Elementkonzentration in einem geeigneten biologischen Material gemessen wird. Diese Information ist wichtig, aber sie ist nur eine Stufe in der medizinischen Bewertung. Zwischen äußerer Exposition, messbarer innerer Belastung, biologischem Effekt und klinisch manifester Toxizität liegen mehrere Schritte. Deshalb darf weder aus einem erhöhten Laborwert unmittelbar auf eine Erkrankung geschlossen werden, noch lässt sich aus einem unauffälligen Wert jede denkbare Wirkung sicher ausschließen. ^[2,3]

2.1 Was misst Vollblut?

Vollblut umfasst sowohl den flüssigen Anteil des Blutes als auch die zellulären Bestandteile. Das ist für die Metallanalytik relevant, weil sich einzelne Elemente sehr unterschiedlich auf Plasma und Blutzellen verteilen. Für einen detaillierten Überblick verweisen wir auf die [Fachinformation Sinnvolle Mikronährstoffdiagnostik](#).

Bei stark erythrozytengebundenen Metallen kann bereits unzureichendes Mischen zu einem fehlerhaften Ergebnis führen. Serum, Plasma und Vollblut sind deshalb keineswegs beliebig austauschbar. Welche Expositionsphase eine Blutkonzentration widerspiegelt, hängt wiederum von der Verteilung im Organismus, der Bindung an Blutbestandteile, der biologischen Halbwertszeit und möglichen Gewebespeichern ab. Blei ist dabei das klassische Beispiel für einen Vollblutmarker. Bei Quecksilber bildet Blut dagegen vor allem die Exposition gegenüber organischen Formen wie Methylquecksilber ab. ^[2,4]

2.2 Was misst Urin?

Urin beantwortet eine andere Frage. Urin zeigt, was über die Niere ausgeschieden wird. Bei einer Spontanurinprobe kann die Konzentration bereits durch die Trinkmenge und den aktuellen Urinfluss deutlich schwanken. Kreatinin- oder Dichtekorrekturen mildern diesen Effekt ab, bringen jedoch eigene Einflussgrößen mit sich, etwa Muskelmasse, Alter und Nierenfunktion. Ferner spielt auch hier die chemische Form eine wichtige Rolle. Besonders anschaulich ist die Problematik beim Arsen. Nach Fisch oder Meeresfrüchten kann Gesamtarsen im Urin deutlich ansteigen, obwohl der Anstieg überwiegend auf wenig toxisches Arsenobetain zurückgeht. Ohne den Zusammenhang mit einer Expositionsanamnese kann ein solcher Befund leicht fehlinterpretiert werden. ^[5,13,14]

2.3 Vollblut versus Urin – Stärken und Grenzen

Im Alltag hat Vollblut einige klare praktische Vorteile. Die Probe wird einmalig entnommen und ist kaum von der Trinkmenge abhängig. Hinzu kommt, dass sich mit modernen ICP-MS-Verfahren zahlreiche Elemente aus einem kleinen Probenvolumen gleichzeitig bestimmen lassen. Die analytische Möglichkeit, viele Metalle in einer Messung zu erfassen, bedeutet allerdings nicht, dass alle diese Werte dieselbe klinische Aussagekraft besitzen. Bei mehreren renal eliminierten Elementen ist Urin besser etabliert. Ein gutes Vollblutprofil ist jedoch ein sinnvoller Einstieg in die Schadmetall-Analytik, zumal es bei speziellen Fragestellungen durch eine Urin-Analytik ergänzt werden kann. Ein Überblick über die Eigenschaften beider Bestimmungsmethoden findet sich in *Tabelle 2*. ^[2,6]

Kriterium	Vollblut	Urin
Erfasste biologische Information	Plasma + Blutzellen, systemische Konzentration	Renale Ausscheidung
Kurzzeitexposition	Häufig geeignet	Häufig geeignet
Chronische Exposition	Sehr gut für Blei, sonst eher beding geeignet	Besonders gut für Cadmium und weitere Metalle
Hydratation	Geringer Einfluss	Deutlich relevanter Störfaktor
Kontaminationsrisiko	Kanüle, Röhrchen, Stopfen, Umgebung	Gefäß, Umgebung, Ausscheidungsinterferenzen
Praktikabilität	Hoch: einmalige Entnahme, Multiparameter	Hoch: einmalige Entnahme, Multiparameter
Standardisierbarkeit	Hoch	Gut, aber Verdünnung, Tageszeit und andere Einflussgrößen erschweren die Standardisierbarkeit
Referenzwerte	Je nach Metall, allg. gut etabliert	Je nach Metall, allgemein gut etabliert
Typische Einschränkungen	Für einige Metalle nur Nachweis einer Kurzzeitexposition, daher geringere medizinische Aussage	Geringere Standardisierbarkeit, anfällig für Störfaktoren

Tabelle 2: Unterscheidung zwischen Vollblut- und Urinmessung

Präanalytik und Analytik

Gerade bei sehr niedrigen Konzentrationen entscheidet die Präanalytik wesentlich über die Qualität des Ergebnisses. Für Spurenelementanalysen sollten daher ausschließlich geeignete und möglichst chargengeprüfte Entnahmeröhrchen beziehungsweise Sammelgefäße verwendet werden. Kontaminationen können nicht nur durch das Röhrchen selbst, sondern auch durch Kanülen, Verschlüsse, Gerinnungsaktivatoren, Antikoagulanzen, Desinfektionsmittel, Staub oder eine metallverarbeitende Umgebung entstehen. Ebenso wichtig ist die Anamnese vor der Blutentnahme. Je nach Element können Beruf und Zeitpunkt der letzten Schicht, Rauchen, Fisch- und Meeresfrüchteverzehr, Nahrungsergänzungsmittel, traditionelle Arzneimittel, Medikamente, Implantate, Zahnersatz, relevante Hobbys oder kürzlich eingesetzte Kontrastmittel die Interpretation verändern. ^[4]

Für die eigentliche Messung hat sich die ICP-MS wegen ihrer hohen Empfindlichkeit und ihrer Eignung für Multielementanalysen etabliert. Eine niedrige Nachweisgrenze ist jedoch kein Qualitätsmerkmal der klinischen Interpretation an sich. Sie sagt lediglich, wie geringe Konzentrationen analytisch erfasst werden können. Ob ein sehr niedriger Messwert medizinisch sinnvoll einzuordnen ist, hängt davon ab, ob belastbare Vergleichs- oder Bewertungsdaten vorliegen und sich aus dem Ergebnis ein nachvollziehbarer klinischer Entscheidungsweg ableiten lässt. ^[6,30]

Referenzwerte, HBM-Werte, Grenzwerte und Cut-offs

Referenzwerte beschreiben zunächst, welche Konzentrationen in einer definierten Vergleichsbevölkerung beobachtet werden. Für ihre Ableitung braucht es eine ausreichend große und gut charakterisierte Referenzpopulation, eine standardisierte Präanalytik und Analytik sowie ein geeignetes statistisches Verfahren. Je nach Fragestellung werden beispielsweise die zentralen 95 Prozent einer Verteilung oder ein oberes Perzentil herangezogen. Alter, Geschlecht, Region, Untersuchungszeitraum und Expositionsverhalten können solche Werte deutlich beeinflussen. Ein Referenzbereich ist deshalb vor allem eine populationsbezogene Vergleichsgröße und nicht automatisch eine toxikologische Sicherheitsgrenze. ^[7,19]

Davon zu unterscheiden sind HBM-Werte und andere toxikologisch abgeleitete Schwellen, die eine gesundheitliche Bewertung oder einen Handlungsbedarf unterstützen sollen. Wieder eine andere Funktion haben arbeitsmedizinische biologische Grenzwerte. Sie gelten innerhalb eines definierten beruflichen Schutzsystems. Die in der EU-Richtlinie 2024/869 festgelegten biologischen Grenzwerte für Blei sind ein Beispiel dafür und dürfen nicht als allgemeine klinische Diagnosegrenzen für die Bevölkerung gelesen werden. Referenzwert, HBM-Wert, arbeitsmedizinischer Grenzwert und klinischer Cut-off beantworten also unterschiedliche Fragen. ^[3,10]



Interpretationsregel

Ein Wert oberhalb eines Referenz- oder Bewertungswertes erhöht die Wahrscheinlichkeit einer überdurchschnittlichen bzw. relevanten Exposition, beweist aber nicht automatisch eine metallbedingte Erkrankung. Ein Wert darunter ist umgekehrt keine absolute Garantie dafür, dass bei jeder Person keinerlei biologischer (Schad-)Effekt möglich ist. Alter, Nierenfunktion, Expositions-dauer und individuelle Vulnerabilität verändern die klinische Einordnung. ^[3,8]

Klinische Anschlussdiagnostik

Bei einem auffälligen Metallwert im Vollblut beginnt die eigentliche diagnostische Arbeit meist erst. Zunächst sollte geklärt werden, ob Expositionsquelle, Zeitpunkt und Größenordnung des Befunds plausibel zusammenpassen. Anschließend richtet sich die Zusatzdiagnostik nach dem Element. Infrage kommen zum Beispiel Urinmessungen, Nieren- oder Leberfunktionsparameter, Blutbild, neurologische Untersuchungen oder – bei Implantatfragestellungen – Bildgebung und orthopädische Beurteilung. Therapeutisch steht die Reduktion beziehungsweise Beseitigung der Exposition an erster Stelle. Chelatbildner sind keine allgemein anerkannte Behandlung eines erhöhten Laborwertes, sondern sollten nur nach klar definierten Indikationen erfolgen. Unkritische „Ausleitungs-“ oder „Detox“-Protokolle, insbesondere ohne vorherige Messung, sind nicht evidenzbasiert. *Abbildung 1* fasst die kausale und diagnostische Kette inklusive medizinischer Interpretation zusammen. ^[4,8,20]

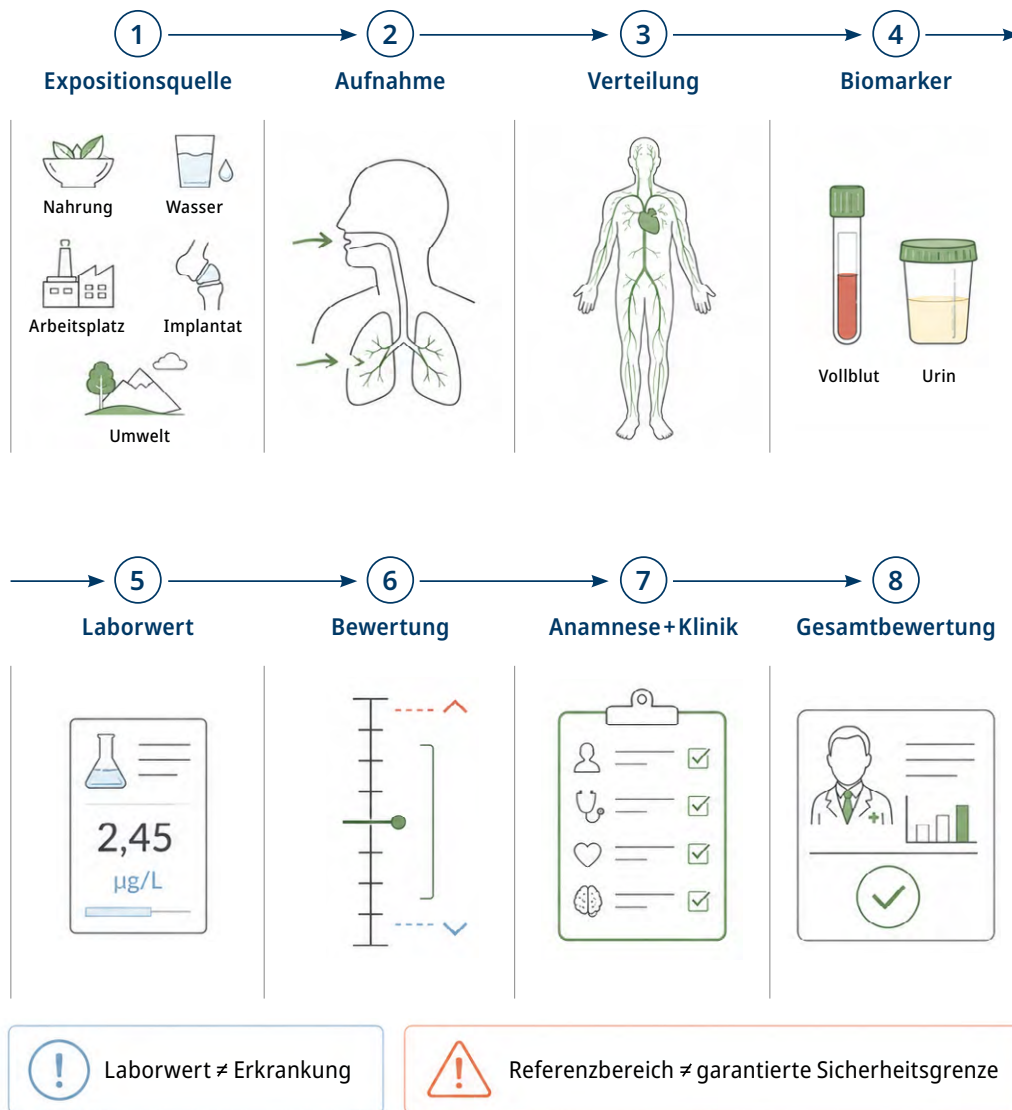


Abbildung 1: Vom Metallkontakt zur klinischen Bedeutung.

Nach Aufnahme aus Umwelt, Nahrung, Wasser, Arbeitsplatz oder Implantaten werden Metalle im Körper verteilt und können in geeigneten Biomonitoring-Materialien wie Vollblut oder Urin erfasst werden. Der gemessene Laborwert muss jedoch stets im Kontext von Referenz- bzw. Bewertungswerten, Expositionsanamnese und klinischem Bild interpretiert werden. Ein erhöhter Laborwert belegt eine Exposition, aber nicht automatisch eine Erkrankung. Umgekehrt stellt ein Wert innerhalb des Referenzbereichs keine garantierte toxikologische Sicherheit dar. ^[2,3]



Zentrale Botschaft

Das optimale Material hängt vom Metall und Fragestellung ab. Vollblut und Urin sind keine konkurrierenden, sondern häufig komplementäre diagnostische Materialien. Ein Multiparameterprofil im Vollblut kann einen pragmatischen Einstieg bieten. Ergebnisabhängig kann eine folgende Urinuntersuchung zu weiteren Erkenntnissen beitragen. ^[2,4-6]

TEIL 3 – Die einzelnen Schadmetalle

Die folgende Einteilung in drei Gruppen A – C soll die Orientierung hinsichtlich einer chronischen Toxizität erleichtern. Sie kann jedoch die jeweilige Expositionssituation nicht ersetzen. Ein selten vorkommendes, aber hochtoxisches Metall kann im Einzelfall medizinisch dringlicher sein als ein häufig gemessener Parameter. Umgekehrt gewinnen Metalle mit begrenzter Bedeutung in der Allgemeinbevölkerung bei speziellen beruflichen Expositionen oder im Zusammenhang mit Implantaten erheblich an Relevanz. Entscheidend bleibt deshalb auch in diesem Abschnitt die Verbindung aus Toxikologie, realistischer Expositionsquelle und Biomonitoring-Material. *Abbildung 2* bietet einen Überblick über die Einordnung der hier abgehandelten Schadmetalle. ^[2]

Schadmetalle im Überblick

Relevanz, typische Expositionsquellen und Aussagekraft von Vollblut

A – hohe / gut gesicherte chronische Relevanz	Pb Blei  	Cd Cadmium  	Hg Quecksilber  	As Arsen  	Tl Thallium  
	Al Aluminium  	Sb Antimon  	U Uran  	Ni Nickel  	Cr Chrom  
	Co Cobalt  	Sn Zinn  			
	Ag Silber  	Ba Barium  	Pd Palladium  	Au Gold  	Ti Titan 
	Sr Strontium  	Pt Platin  			
Medizinisch-toxikologische Relevanz A = hohe / gut gesicherte Relevanz B = mittlere / kontextabhängige Relevanz C = seltene / begrenzte / unklare Relevanz	Eignung der Vollblutuntersuchung ● = Vollblut gut geeignet ● = Vollblut bedingt geeignet ● = Vollblut wenig geeignet	 Nahrung  Wasser  Rauchen  Fisch/Meeresfrüchte  Beruf/Industrie  Schweißen/Metall  Implantate/Dental  Medizin  Schmuck  Hausstaub/Altbau  Umwelt  Konservendosen			

Abbildung 2: Schadmetalle im Überblick.

Die Übersicht ordnet die 19 betrachteten Metalle nach der Evidenz und praktischen Bedeutung chronischer Expositionen in drei vereinfachte Relevanzgruppen (A–C). Für jedes Element sind typische Expositionsquellen sowie die Eignung von Vollblut als Biomonitoring-Material dargestellt. Die Einteilung dient der klinischen Orientierung und stellt keine formale toxikologische Klassifikation dar. ^[2,8,11–29,31,32]

A – Hohe bzw. gut gesicherte chronische Toxizität

Blei

Blei ist für den menschlichen Organismus nicht essentiell. Seine chronische Toxizität gehört zu den am besten untersuchten Metallwirkungen. Betroffen sein können insbesondere Nervensystem, Blutbildung, Niere und kardiovaskuläres System. Für die Risikobewertung ist wichtig, dass sich gesundheitliche Effekte auf Populationsebene bis in relativ niedrige Expositionsbereiche verfolgen lassen. Das bedeutet nicht, dass jeder messbare Blutbleiwert eine Erkrankung anzeigt. Es erklärt aber, weshalb bei Blei eine möglichst geringe Exposition angestrebt wird und weshalb ein einzelner Grenzwert nicht als scharfe Trennlinie zwischen „gesund“ und „krank“ verstanden werden sollte.

In Deutschland stehen heute vor allem berufliche oder renovierungsbedingte Staubexpositionen, ältere bleihaltige Materialien wie bleihaltige Anstriche und Lacke, alte Bleileitungen in Häusern (Trinkwasser!) und belastete Böden von Industrieflächen im Vordergrund. Auch Schießsport ist relevant. In Einzelfällen können auch belastete Produkte oder traditionelle Arzneimittel eine Rolle spielen. Eine gezielte Anamnese ist deshalb meist ergiebiger als eine allgemeine Suche nach unspezifischen Umweltquellen. Entscheidend ist, ob der gemessene Wert zu einer zeitlich und sachlich plausiblen Exposition passt.

Für das Biomonitoring ist Vollblut bei Blei gut geeignet und etabliert. Die Interpretation sollte sich an Referenzmaßstäben orientieren. Arbeitsmedizinische Grenzwerte dürfen jedoch nicht ohne Weiteres auf die Allgemeinbevölkerung übertragen werden. Bei einem auffälligen Befund stehen die Identifikation und Reduktion der Quelle an erster Stelle. Je nach Höhe der Belastung und klinischem Kontext sind eine Bestätigungsmessung sowie Blutbild und Nierenfunktion sinnvoll. Eine Chelattherapie ist keine Routinefolge eines erhöhten Blutwertes, sondern bleibt klaren, leitlinienbasierten Indikationen vorbehalten. ^[2,8-10]

Cadmium

Cadmium besitzt keine bekannte physiologische Funktion. Bei längerfristiger Exposition sind vor allem die Niere und der Knochenstoffwechsel von Bedeutung. Die chronische Toxizität ist gut belegt. Zugleich ist die zeitliche Einordnung des Biomarkers wichtig. Ein Blutwert beschreibt eher eine jüngere oder fortbestehende Exposition, während sich die längerfristige Körperlast besser über die renale Ausscheidung erfassen lässt.

Für die Allgemeinbevölkerung in Deutschland ist Tabakrauch eine besonders relevante Quelle. Die Cadmiumaufnahme erfolgt in der nicht-rauchenden Allgemeinbevölkerung überwiegend über Lebensmittel, insbesondere über Getreideprodukte, Gemüse und bestimmte pflanzliche Lebensmittel. Unter den Lebensmitteln marinen Ursprungs können vor allem Muscheln, Tintenfisch und teilweise Krebstiere höhere Cadmiumgehalte aufweisen. Gewöhnlicher Fisch zählt dagegen nicht zu den wichtigsten Cadmiumquellen, insbesondere wenn keine Raubfische verzehrt werden. Höhere Belastungen können auch in bestimmten beruflichen Situationen auftreten, namentlich bei der Herstellung und dem Recycling von Nickel-Cadmium-Akkumulatoren, in der Zink- und Metallverhüttung, beim Galvanisieren sowie beim Schweißen, Schneiden oder Löten cadmiumhaltiger oder cadmiumbeschichteter Werkstücke. Entsprechend sollte bei einem auffälligen Befund zuerst geklärt werden, ob geraucht wird, ob eine berufliche Exposition besteht und ob sich aus der Ernährungs- oder Arbeitsplatzanamnese ein plausibler Zusammenhang ergibt.

Vollblut ist für Cadmium eine gute Einstiegsuntersuchung. Wenn jedoch die Frage nach der kumulativen Exposition im Vordergrund steht, ist Urincadmium typischerweise aussagekräftiger. Bei relevanten oder wiederholt erhöhten Werten sollte die Nierenfunktion einschließlich geeigneter Marker der tubulären Schädigung berücksichtigt werden. Therapeutisch gilt auch hier: Exposition reduzieren oder beseitigen. Eine Behandlung richtet sich nicht nach dem Laborwert allein, sondern nach Expositionshöhe, Verlauf und möglicher Organbeteiligung. ^[2,11]

Quecksilber

Bei Quecksilber entscheidet die chemische Form wesentlich über Toxikokinetik und Zielorgane. Methylquecksilber, das vor allem über Fisch und Meeresfrüchte aufgenommen wird, ist insbesondere neurotoxikologisch relevant. Elementares und anorganisches Quecksilber folgen anderen Aufnahme- und Ausscheidungswegen und können neben dem Nervensystem vor allem die Niere betreffen. Eine pauschale Aussage über „Quecksilberbelastung“ ohne Kenntnis der wahrscheinlichen Metall-Spezies greift deshalb zu kurz.

In Deutschland ist die Ernährung eine wichtige Quelle für Methylquecksilber. Die Fischanamnese gehört deshalb zu jeder Interpretation eines erhöhten Blutwertes. Elementares oder anorganisches Quecksilber spielt eher in speziellen beruflichen, technischen oder dentalen Expositionskonstellationen eine Rolle. Schon aus dieser unterschiedlichen Quellenlage ergibt sich, dass Blut und Urin nicht dieselbe Information liefern.

Vollblut ist gut geeignet, wenn überwiegend organisches Quecksilber – insbesondere Methylquecksilber – erfasst werden soll. Bei Verdacht auf elementares oder anorganisches Quecksilber ist Urin im Regelfall informativer. Ein auffälliger Befund sollte daher nicht nur bestätigt, sondern anhand der Expositionsanamnese in die wahrscheinliche Quecksilberform eingeordnet werden. Bei unklarer Situation könnte gegebenenfalls eine Urinmessung erforderlich sein. Die wichtigste Maßnahme bleibt die Reduktion der relevanten Quelle. ^[2,12]

Arsen

Arsen ist ein Halbmetall, bei dem die Spezies für die gesundheitliche Bewertung unverzichtbar ist. Die chronischen Risiken beziehen sich vor allem auf anorganisches Arsen und seine Metaboliten. Beschrieben sind unter anderem Wirkungen an Haut, Gefäßen und Nervensystem sowie eine gesicherte Karzinogenität bei relevanter langfristiger Exposition. Organische Arsenverbindungen aus Meeresprodukten, insbesondere Arsenobetain, sind toxikologisch deutlich anders zu bewerten. ^[2,13,14]

Für die deutsche Bevölkerung stammen relevante Aufnahmen vor allem aus Lebensmitteln und – abhängig von der regionalen Situation – aus Trinkwasser. Reis und Reisprodukte können zur anorganischen Arsenaufnahme beitragen. Gleichzeitig kann der Verzehr von Fisch und Meeresfrüchten die gemessene Gesamarsenkonzentration deutlich erhöhen, ohne dass damit automatisch eine entsprechend hohe Exposition gegenüber anorganischem Arsen verbunden ist. Dieser Punkt sollte schon vor der Probennahme erfragt werden.

Vollblut spiegelt zwar eher eine akute und nicht zwangsweise chronische Arsenexposition wider. Bei einem auffälligen Wert sollten jedoch Seafood-Anamnese, mögliche Karenz, Trinkwasser- und Ernährungsquellen sowie gegebenenfalls berufliche Faktoren geprüft werden. Erst danach lässt sich entscheiden, ob weitere organbezogene Diagnostik erforderlich ist. ^[2,13,14]

Thallium

Thallium ist nicht essentiell und bereits in vergleichsweise geringen Mengen hochtoxisch. Chronische Expositionen sind in Deutschland selten, können aber klinisch bedeutsam sein. Im Vordergrund stehen neurologische und gastrointestinale Auswirkungen. Wegen der Seltenheit sollte ein unerwarteter Befund besonders sorgfältig auf Plausibilität und mögliche Kontamination geprüft werden.

Typische Alltagsquellen spielen für die Allgemeinbevölkerung kaum eine Rolle. Relevante Belastungen entstehen eher in speziellen industriellen oder beruflichen Situationen oder durch kontaminierte Produkte. Gerade weil die Vortestwahrscheinlichkeit meist niedrig ist, gewinnt eine konkrete Quellenanamnese bei Thallium besondere Bedeutung. Berufliche Thalliumexpositionen können insbesondere in der Metallverhüttung, im Bergbau, in Zementwerken, bei der Kohleverbrennung sowie bei bestimmten Hochtemperatur- und Recyclingprozessen auftreten. Thallium ist dabei häufig kein gezielt eingesetzter Stoff, sondern ein Begleitelement von Erzen, Kohle und mineralischen Rohstoffen, das sich in Prozess- und Verbrennungstäuben anreichern kann.

Für die chronische Expositionsabklärung ist Vollblut eher weniger geeignet, da es primär eine akute Exposition widerspiegelt. Urin bildet die chronische Exposition besser ab und ist daher der bevorzugte Weg zur Bestätigung. Bei einem auffälligen oder klinisch verdächtigen Befund sollte die Exposition umgehend beendet und eine spezialisierte toxikologische Abklärung veranlasst werden. ^[2,15]

B – Mittlere bzw. kontextabhängig relevante chronische Toxizität

Aluminium

Aluminium ist kein essentielles Spurenelement. Bei üblichen Umweltkonzentrationen ist seine systemische Toxizität deutlich schwieriger zu beurteilen als die von Blei oder Cadmium. Klinisch relevante Konstellationen betreffen vor allem hohe oder besondere Expositionen und Situationen mit eingeschränkter renaler Elimination. Unspezifische neurologische Beschwerden oder eine Alzheimer-Erkrankung lassen sich dagegen nicht aus einem isolierten Aluminiumwert ableiten. Entsprechende pauschale Zuschreibungen sind wissenschaftlich nicht belastbar.

In der Praxis sollte bei einem erhöhten Wert nach konkreten Quellen gesucht werden. Dazu gehören je nach Fall aluminiumhaltige Arznei- oder Expositionsquellen, berufliche Belastungen und insbesondere eine eingeschränkte Nierenfunktion. Gerade im Niedrigkonzentrationsbereich ist zudem die Gefahr einer präanalytischen Kontamination zu berücksichtigen, sodass ein unerwarteter Befund zunächst kritisch überprüft werden sollte.

Bei einem auffälligen Vollblut-Befund sollten deshalb zunächst Präanalytik, Nierenfunktion und Expositionsanamnese geprüft werden. Eine niedrige oder geringgradig erhöhte Konzentration ohne plausiblen Expositionsbezug sollte nicht als Beleg einer chronischen Aluminiumtoxizität interpretiert werden. ^[16,19]

Antimon

Antimon ist nicht essentiell. Die chronische gesundheitliche Relevanz betrifft vor allem berufliche und industrielle Expositionen. Die Datenlage für niedrige Hintergrundbelastungen in der Allgemeinbevölkerung ist wesentlich schmäler als für die klassischen Schadmetalle Blei, Cadmium oder Quecksilber. Inhalative und systemische Wirkungen sind beschrieben. Ihre klinische Bedeutung hängt jedoch stark von Verbindung, Dosis und Expositionsweg ab.

Im deutschen Alltag sind hohe Antimonbelastungen eher ungewöhnlich. Plausibler sind spezielle Arbeitsplätze, industrielle Prozesse, Stäube oder einzelne technische Produkte. Ein auffälliger Laborwert sollte daher stets die Frage auslösen, ob eine konkrete berufliche oder produktbezogene Quelle vorhanden ist. Ohne einen solchen Zusammenhang ist die Interpretation zurückhaltend vorzunehmen.

Bei einem erhöhten Blutwert empfiehlt sich eine gezielte Berufs- und Expositionsanamnese. Organbezogene Untersuchungen richten sich nach Höhe, Dauer und klinischem Kontext der Belastung. ^[2,17]

Uran

Bei Uran müssen chemische und radiologische Wirkungen getrennt betrachtet werden. Für natürliches und angereichertes Uran steht bei relevanter systemischer Aufnahme in vielen klinischen Situationen die chemische Nephrotoxizität im Vordergrund. Die radiologische Bewertung folgt dagegen eigenen Kriterien und hängt wesentlich von Isotopenzusammensetzung, Expositionsweg und Dosis ab. Eine gemeinsame, undifferenzierte Kategorie „Uranbelastung“ wäre deshalb diagnostisch irreführend.

Mögliche Quellen sind regional belastetes Trinkwasser sowie spezielle berufliche oder industrielle Expositionen. Außergewöhnliche radiologische Ereignisse bilden einen eigenen Sonderfall. Für die Anamnese ist entsprechend wichtig, zwischen alltäglicher Umweltaufnahme, beruflichem Kontakt und einer möglichen radiologischen Exposition zu unterscheiden.

Urin ist für die systemische Uran-Exposition das bevorzugte Material. Ein auffälliger Vollblutbefund, welcher oft eine leichte Einstiegsuntersuchung darstellt, sollte daher durch eine geeignete Urinmessung plausibilisiert und mit der Nierenfunktion zusammen bewertet werden. Liegt tatsächlich eine besondere radiologische Exposition nahe, gehört die weitere Abklärung in spezialisierte strahlenmedizinische Einrichtungen. ^[2,18]

Nickel

Nickel ist nicht als essentielles Metall einzuordnen. Seine gesundheitliche Bedeutung hängt stark von chemischer Form und Expositionsweg ab. Im Alltag dominiert die Kontaktallergie, die eine lokale immunologische Reaktion darstellt und nicht mit einer systemischen „Nickelbelastung“ gleichgesetzt werden darf. Chronische inhalative Risiken sind vor allem bei bestimmten beruflichen Expositionen relevant.

Für Deutschland sind Schmuck und andere hautkontaktierende Metallprodukte vor allem im allergologischen Kontext bedeutsam. Systemische oder inhalative Expositionen betreffen eher Metallverarbeitung, Galvanik und staubbelastete Arbeitsplätze. Deshalb sollte ein Laborwert immer danach interpretiert werden, welche Art von Kontakt überhaupt vorliegt. Hautkontakt, Inhalation oder eine andere systemische Aufnahme?

Bei einer Kontaktallergie steht die klinisch-allergologische Diagnostik im Vordergrund. Ein auffälliger Blutwert sollte ohne passende Expositionsgeschichte nicht überinterpretiert werden. Bei plausibler Berufsexposition ist die weitere arbeitsmedizinische Abklärung jedoch sinnvoll. ^[2,31]

Chrom

Bei Chrom ist die chemische Form zentral. Chrom(III) und Chrom(VI) unterscheiden sich deutlich in Toxikokinetik und Gefährdung. Besonders relevant ist Chrom(VI) bei inhalativer beruflicher Exposition. Eine völlig andere Situation entsteht bei Metallimplantaten, bei denen Chrom zusammen mit Cobalt aus Abrieb oder Korrosion freigesetzt werden kann.

Typische Expositionskontexte in Deutschland sind bestimmte Tätigkeiten in Metallverarbeitung und Galvanik sowie medizinische Metallimplantate. Bei beruflicher Exposition muss daher nach Verbindung und Aufnahmeweg gefragt werden.

Die Eignung von Vollblut ist kontextabhängig. Für die implantatbezogene Bestimmung von Cobalt und Chrom ist Vollblut gut geeignet. Ein erhöhter Wert bei Implantatträgern darf jedoch nicht isoliert als Implantatversagen interpretiert werden, sondern muss mit klinischer Untersuchung und gegebenenfalls Bildgebung zusammengeführt werden. Bei beruflichen Fragestellungen ist Urin häufig das etabliertere Material. ^[2,20,21]

Cobalt

Cobalt nimmt eine Sonderstellung ein. Als Zentralatom von Vitamin B12 ist es Bestandteil eines essentiellen Vitamins. Eine erhöhte freie Cobaltexposition ist davon jedoch klar zu unterscheiden. Bei hohen oder anhaltenden Belastungen können systemische Effekte auftreten. Klinisch besonders relevant sind berufliche Inhalation – etwa im Hartmetallbereich – und die Freisetzung aus bestimmten Metallimplantaten. In Deutschland ergeben sich entsprechend zwei typische Konstellationen: metallverarbeitende Arbeitsplätze und Cobalt-Chrom-haltige Implantate. Die Bedeutung eines Laborwertes lässt sich deshalb ohne Kenntnis des Expositionskontextes kaum sinnvoll bewerten.

Im Implantatkontext ist Vollblut für Cobalt gut geeignet. Der Wert ist dennoch nur ein Teil der Gesamtbeurteilung. Bei auffälligen Konzentrationen sind orthopädische Untersuchung und gegebenenfalls Bildgebung erforderlich. Bei beruflicher Exposition kann eine arbeitsmedizinische Bewertung sinnvoll sein. Die zentrale Maßnahme bleibt die Kontrolle beziehungsweise Beseitigung der relevanten Quelle. ^[20,21,32]

Zinn

Zinn ist nicht essentiell, und seine toxikologische Bewertung hängt entscheidend von der chemischen Form ab. Anorganische Zinnverbindungen und Organozinnverbindungen besitzen unterschiedliche Wirkprofile. Toxikologisch sind vor allem Organozinnverbindungen relevant. Während anorganisches Zinn nur begrenzt resorbiert wird und meist eine geringe systemische Toxizität besitzt, können bestimmte Organozinnverbindungen deutlich stärker neuro-, immun- und hepatotoxisch wirken. Ein Gesamtzinnwert kann diese Unterschiede nicht auflösen.

Mögliche Expositionen ergeben sich aus Lebensmittelkontakt und industriellen Anwendungen. Oft werden Konservendosen als Quellen genannt. Zinn aus Konservendosen liegt überwiegend in anorganischer Form vor und stammt aus der Korrosion der verzinneten Dosenoberfläche. Organozinnverbindungen spielen bei Konservendosen praktisch keine Rolle. Für die klinische Einordnung ist deshalb nicht nur die Höhe eines Messwertes wichtig, sondern die Frage, welche Zinnverbindung überhaupt plausibel aufgenommen worden sein könnte.

Ein auffälliger Gesamtzinnwert im Vollblut sollte daher nicht automatisch als toxische Körperlast interpretiert werden. Zunächst sind Quelle und chemische Form zu klären. Weitere Diagnostik richtet sich anschließend nach Expositionshöhe und klinischer Plausibilität. ^[2,22]

C – Niedrige, seltene oder wissenschaftlich unzureichend charakterisierte chronische Toxizität

Silber

Relevante chronische systemische Belastungen mit Silber sind in der Allgemeinbevölkerung selten. Bei ausgeprägter langfristiger Aufnahme ist als klassischer Befund die Argyrie beschrieben. Für niedrige Silberkonzentrationen im Blut fehlen dagegen breit standardisierte klinische Entscheidungswege, sodass die Aussagekraft eines isolierten Befunds begrenzt ist.

Plausible Quellen sind spezielle medizinische oder berufliche Anwendungen. Auch kolloidales Silber kann eine vermeidbare Expositionsquelle darstellen. Bei einem auffälligen Wert sollte deshalb konkret nach Produkten, Präparaten und Arbeitsplatzexpositionen gefragt werden, statt unspezifische Umweltquellen zu vermuten.

Bei einem auffälligen Vollblut-Befund sind eine Bestätigung, die Suche nach der Quelle und die klinische Untersuchung, insbesondere der Haut, sinnvoll. Vorrangig ist das Beenden der Exposition. ^[23]

Barium

Die Toxizität von Barium hängt stark von der Löslichkeit und damit von der chemischen Verbindung ab. Lösliche Bariumverbindungen können toxikologisch relevant sein, während niedrige chronische Umweltkonzentrationen häufig nur schwer mit klinischen Effekten in Beziehung zu setzen sind. Eine bloße Gesamtbestimmung ohne Kenntnis der Expositionsquelle besitzt deshalb Grenzen.

Für die deutsche Allgemeinbevölkerung stehen industrielle und technische Quellen eher im Vordergrund als eine breite Alltagsbelastung. Umwelt- und Nahrungsbeiträge sind in der Regel niedrig. Ein auffälliger Wert sollte deshalb zunächst auf eine konkrete Quelle und auf die chemische Form zurückgeführt werden.

Urin ist im Regelfall das bessere Material, wenn eine relevante systemische Exposition geklärt werden soll. Allerdings ist eine weiterführende klinische Diagnostik sinnvoll, wenn ein auffälliger Vollblut-Befund durch eine plausible Expositionsgeschichte gestützt wird. Ohne einen solchen Zusammenhang ist Zurückhaltung bei der Interpretation angebracht. ^[2,24]

Palladium

Die chronische systemische Toxizität von Palladium ist nur begrenzt charakterisiert. In der Praxis können Sensibilisierung und lokale Reaktionen bedeutsamer sein als eine unspezifisch gemessene Gesamtkonzentration im Körper. Die Datenlage ist damit deutlich weniger robust als bei Blei, Cadmium oder Quecksilber.

Mögliche Expositionen ergeben sich aus Katalysatoren und industriellen Prozessen, daneben aus Dentalmaterialien und Schmuck. Je nach Fragestellung kann daher eine berufliche, dentale oder allergologische Anamnese mehr zur Ursachenklärung beitragen als ein isolierter Metallwert.

Eine Messung im Vollblut ist vor allem dann sinnvoll, wenn eine konkrete Quelle oder ein passender klinischer Kontext vorliegt. Bei Beschwerden mit möglicher Sensibilisierung steht die allergologische beziehungsweise arbeitsmedizinische Abklärung im Vordergrund. ^[25,29]

Gold

Bei üblichen Alltagskontakten ist eine relevante systemische Toxizität von Gold selten. Klinisch häufiger bedeutsam sind immunologische Reaktionen oder – in speziellen Situationen – arzneimittelbedingte Effekte. Ein Goldwert im Blut sagt daher zunächst wenig über eine mögliche Kontaktallergie oder lokale Reaktion aus.

Im deutschen Alltag sind Schmuck und Dentalmaterialien die naheliegendsten Expositionsquellen. Medizinische Goldtherapien spielen heute nur noch eine begrenzte Rolle. Berufliche Kontakte sind vergleichsweise selten. Entsprechend sollte eine auffällige Messung immer mit Schmuck-, Dental-, Arzneimittel- und Berufsanamnese abgeglichen werden.

Bei klinischem Verdacht auf eine allergische oder lokale Reaktion ist eine passende klinisch-allergologische Diagnostik meist relevanter als ein systemischer Konzentrationswert. Bei einem erhöhten Vollblutwert richtet sich die weitere Vorgehensweise daher nach der konkreten Exposition und Symptomatik. ^[26]

Titan

Titan ist nicht als essentielles Spurenelement etabliert. Für übliche Umwelt- und Alltagskonzentrationen ist eine relevante systemische Toxizität schlecht belegt. Medizinisch interessanter ist der Implantatkontext. Dort können Abrieb, Partikel und Ionen zu lokalen Gewebereaktionen beitragen.

Die wichtigsten Expositionsquellen sind daher orthopädische und dentale Implantate. Berufliche Spezialexpositionen sind deutlich seltener. In spezialisierten Implantatfragestellungen kann Blut-Titan als ergänzender Biomarker eingesetzt werden. Seine Interpretation bleibt aber eng an den klinischen Kontext gebunden. Bei auffälligen Werten sind orthopädische beziehungsweise dentale Untersuchung und Bildgebung einzubeziehen. ^[27]

Strontium

Bei der toxikologischen Beurteilung müssen stabile Umweltisotope und radioaktive Strontiumisotope strikt auseinandergehalten werden, weil sie völlig unterschiedliche Fragestellungen aufwerfen. Für niedrige Konzentrationen stabilen Strontiums ist die klinische Bedeutung eines Routine-Humanbiomonitorings begrenzt.

Stabiles Strontium wird vor allem über Nahrung und Umwelt aufgenommen. Radiologische Expositionen stellen einen Sonderfall dar und sollten nicht mit der alltäglichen Hintergrundaufnahme vermischt werden.

Bei einer ungewöhnlich hohen Vollblut-Konzentration sollte zunächst die Expositionsquelle geklärt werden. Besteht eine radiologische Fragestellung, ist eine spezialisierte strahlenmedizinische Diagnostik erforderlich, da ein Routine-Metallprofil diese Bewertung nicht leisten kann. ^[28]

Platin

Platin ist nicht essentiell. Für die klinische Einordnung müssen Umwelt-, Berufs- und medizinische Exposition voneinander getrennt werden. Bestimmte Platinverbindungen können insbesondere im beruflichen Umfeld sensibilisieren. Bei Patientinnen und Patienten unter platinhaltiger Chemotherapie entsteht dagegen eine völlig andere, therapeutisch bedingte Expositionssituation.

Relevante Quellen in Deutschland sind vor allem Katalysator- und Industrieumfelder sowie medizinisch Cisplatin, Carboplatin oder Oxaliplatin. Für einen auffälligen Laborwert ist deshalb die Medikamenten- und Berufsanamnese entscheidend. Ein Wert nach einer platinhaltigen Tumorthherapie darf nicht mit einer Umweltbelastung gleichgesetzt werden.

Bei einem erhöhten Vollblutwert richtet sich die weitere Diagnostik nach dem Expositionskontext. Bei beruflicher Sensibilisierung stehen arbeitsmedizinische und allergologische Fragen im Vordergrund, bei medikamentöser Exposition die therapiebezogene Organüberwachung.^[19,29]

TEIL 4 – Tabellarische Gesamtübersicht

Die nachfolgende Übersicht (*Tabelle 3*) ist als rasche klinische Orientierung gedacht. Sie fasst die wichtigsten chronischen Wirkungen, typische Expositionsquellen und die bevorzugten Biomonitoring-Materialien zusammen. Die Einstufungen beziehen sich auf längerfristige Expositionen und Metallbelastungen.^[2]

TEIL 5 – Fazit

Vollblut ist für die Diagnostik chronischer Metallbelastungen eine gute Einstiegsmethode mit bekannten Limitationen. Vorteilhaft ist eine gut standardisierbare Probenentnahme mit der Möglichkeit, mehrere klinisch relevante Elemente gleichzeitig zu erfassen. Besonders überzeugend ist die Vollblutuntersuchung bei Metallen, deren Toxikokinetik und Bewertungsgrundlagen durch die Vollblutmessung gut abgedeckt werden, insbesondere bei Blei, bei überwiegend organischem Quecksilber und in definierten Implantatkonstellationen bei Cobalt, Chrom und teilweise Titan. Für andere Elemente liefert Urin oft die bessere Information oder ist für die weitere Einordnung unverzichtbar. Der Laborwert bleibt dabei stets ein Baustein. Erst zusammen mit Expositionsquelle, zeitlichem Verlauf und klinischem Bild entsteht eine medizinisch belastbare Bewertung.^[2–6]

Gr.	Schadmetall	Chronische Hauptwirkungen	Wichtige Zielorgane	Typische Quellen (DE)	Bevorzugtes Material	Aussagekraft Vollblut	Mögliche Anschlussdiagnostik	Wichtigste Maßnahme
A	Blei	Neurotox., hämatol., renal, kardiovask.	ZNS, Blut, Niere	Staub/Altlasten, Schießsport	Vollblut	gut geeignet	ggf. Blutbild/Niere	Exposition senken ^[2,8]
A	Cadmium	renal, Knochen	Niere, Knochen	Tabak, Nahrung, Beruf	Urin	gut geeignet	Urin-Cd, Nierenmarker	Exposition senken ^[2,11]
A	Quecksilber	speziesabhängig neuro/renal	ZNS, Niere	Fisch, beruflich/spezielle Quellen	Vollblut (organ.)/ Urin (anorg.)	gut bei organ. Hg	Urin je nach Anamnese	Quelle reduzieren ^[2,12]
A	Arsen	anorg.: karzinogen, neuro, vaskulär	Haut, Gefäße, ZNS	Nahrung, Wasser, Reis, Seafood-Interferenz	Urin	bedingt wegen org. Arsen	Urin	Quelle reduzieren ^[13,14]
A	Thallium	hochtoxisch, neurologisch	ZNS/PNS	industrielle Quellen (Stäube!)	Urin	wenig	Urin	Exposition stoppen ^[15]
B	Aluminium	kontextabhängig	v. a. ZNS/Knochen bei hoher Belastung/renal	medizinisch, beruflich	Urin	wenig–bedingt	Niere, Kontamination	Quelle reduzieren ^[16,19]
B	Antimon	beruflich/ industriell	Atemwege/ systemisch	Industrie, Stäube	Urin	bedingt–wenig	Urin, Arbeitsanamnese	Quelle reduzieren ^[17]
B	Uran	chemische Nephrotox., radiol. separat	Niere	Wasser, Beruf, Sonderexposition	Urin	wenig	Urin + Niere	Quelle reduzieren ^[18]
B	Nickel	Allergie, inhalativ kontextabhängig	Haut, Atemwege	Schmuck, Beruf	Urin	wenig	Allergologie/ Arbeitsmedizin	Exposition reduzieren ^[31]
B	Chrom	Implantatkontext	Atemwege/Haut, Implantatgewebe	Beruf, Implantat	Urin berufl. Exposition/ Vollblut Implantat	gut im Implantatkontext	Bildgebung/Orthopädie bei Implantat	Quelle/Implantat bewerten ^[20,21]
B	Cobalt	beruflich/Implantat	Atemwege, systemisch bei hoher Belastung	Hartmetall, Implantat	Vollblut Implantat	gut im Implantatkontext	Orthopädie + Bildgebung	Quelle/Implantat bewerten ^[20,32]
B	Zinn	anorg. vs Organozinnverbindungen	speziesabhängig	Industrie, technische Produkte	Urin	bedingt	Form/Quelle klären	Quelle reduzieren ^[22]
C	Silber	selten systemisch	Haut (Argyrie)	Spezialprodukte, Beruf	Urin	wenig	Quelle klären/ Hautbefund	Exposition stoppen ^[23]
C	Barium	löslichkeitsabhängig	systemisch	Industrie/technisch	Urin	wenig	Urin, Quelle klären	Quelle reduzieren ^[24]
C	Palladium	Sensibilisierung > Systemtoxizität	Haut/Atemwege	Katalysator, Dental, Schmuck	Urin	wenig	Allergologie/ Beruf	Quelle reduzieren ^[25,29]
C	Gold	meist geringe Systemtox., Allergie	Haut/Immunsystem	Schmuck, Dental, Beruf	Urin	wenig	Allergologie/ Anamnese	Quelle reduzieren ^[26]
C	Titan	Implantatabrieb/ lokale Effekte	Implantatgewebe	Implantate	Vollblut Implantat	bedingt im Implantatkontext	Bildgebung, Orthopädie	Implantatursache klären ^[27]
C	Strontium	isotopenabhängig	Knochen	Umwelt, radiol. Sonderfall	Urin	wenig	Isotop/ Exposition klären	Quelle reduzieren ^[28]
C	Platin	berufl. Sensibilisierung / Zytostatika	Atemwege, therapieabhängig	Katalysator/Industrie, Medikamente	Urin	wenig	Medikament-/ Berufsanamnese	Quelle reduzieren; Therapie je Kontext ^[29]

Tabelle 3: Gesamtübersicht

Literaturverzeichnis

- [1] Duffus JH. "Heavy metals" – a meaningless term? (IUPAC Technical Report). Pure Appl Chem. 2002;74(5):793–807. DOI: 10.1351/pac200274050793.
- [2] Martinez-Morata I, Sobel M, Tellez-Plaza M, Navas-Acien A, Howe CG, Sanchez TR. A State-of-the-Science Review on Metal Biomarkers. Curr Environ Health Rep. 2023;10(3):215–249. DOI: 10.1007/s40572-023-00402-x. PMID: 37337116.
- [3] Umweltbundesamt, Kommission Human-Biomonitoring. Beurteilungswerte der HBM-Kommission. Aktualisiert 24.06.2026. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/kommissionen-arbeitsgruppen/kommission-human-biomonitoring/beurteilungswerte-der-hbm-kommission> (Abruf: 05.08.2026).
- [4] Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). C38: Control of Preexamination Variation in Trace Element Determinations. 2nd ed. Wayne, PA: CLSI; 2024.
- [5] Hsieh CY, Wang SL, Fadrowski JJ, Navas-Acien A, Kuo CC. Urinary Concentration Correction Methods for Arsenic, Cadmium, and Mercury: a Systematic Review of Practice-Based Evidence. Curr Environ Health Rep. 2019;6(3):188–199. DOI: 10.1007/s40572-019-00242-8. PMID: 31372861.
- [6] Huber S, Michel J, Reijnen M, Averina M, Bolann B, Odland JØ, Hansen S, Brox J. A Fast-Forward Dilute-and-Shoot Multielement Method for Analysis of 33 Elements in Human Whole Blood, Serum, and Urine by ICP-MS. J Anal Methods Chem. 2024;2024:9944995. DOI: 10.1155/2024/9944995. PMID: 39502360.
- [7] Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI). EP28-A3c: Defining, Establishing, and Verifying Reference Intervals in the Clinical Laboratory. 3rd ed. Wayne, PA: CLSI; 2010 (reaffirmed 2020).
- [8] World Health Organization. WHO guideline for clinical management of exposure to lead. Geneva: WHO; 2021. ISBN: 978-92-4-003704-5. PMID: 34787987.
- [9] Vogel N, Murawski A, Schmied-Tobies MIH, et al. Lead, cadmium, mercury, and chromium in urine and blood of children and adolescents in Germany – Human biomonitoring results of GerES V. Int J Hyg Environ Health. 2021;237:113822. DOI: 10.1016/j.ijheh.2021.113822. PMID: 34454255.
- [10] European Parliament and Council. Directive (EU) 2024/869 of 13 March 2024 amending Directive 2004/37/EC and Directive 98/24/EC as regards lead and its inorganic compounds and diisocyanates. OJ EU. 2024. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/869> (Abruf: 05.08.2026).
- [11] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Cadmium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2012.
- [12] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Mercury. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2024.
- [13] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Clinician Brief: Arsenic. Atlanta, GA: CDC/ATSDR; updated 15.05.2025. <https://www.atsdr.cdc.gov/environmental-medicine/hcp/clinician-briefs/arsenic.html> (Abruf: 05.08.2026).
- [14] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Update of the risk assessment of inorganic arsenic in food. EFSA J. 2024;22(1):e8488. DOI: 10.2903/j.efsa.2024.8488. PMID: 38239496.
- [15] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Thallium. Draft for Public Comment. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services; 2024. (Als Entwurf zu interpretieren.)
- [16] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Aluminum. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2008.
- [17] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Antimony and Compounds. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2019.
- [18] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Uranium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2013. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp150.pdf> (Abruf: 05.08.2026).
- [19] Wilhelm M, Ewers U, Schulz C. Revised and new reference values for some trace elements in blood and urine for human biomonitoring in environmental medicine. Int J Hyg Environ Health. 2004;207(1):69–73. DOI: 10.1078/1438-4639-00260. PMID: 14762976.
- [20] U.S. Food and Drug Administration. Information about Soft Tissue Imaging and Metal Ion Testing – Metal-on-Metal Hip Implants. <https://www.fda.gov/medical-devices/metal-metal-hip-implants/information-about-soft-tissue-imaging-and-metal-ion-testing> (Abruf: 05.08.2026).
- [21] Hart AJ, Sabah SA, Bandi AS, Maggiore P, Tarassoli P, Sampson B, Skinner JA. Sensitivity and specificity of blood cobalt and chromium metal ions for predicting failure of metal-on-metal hip replacement. J Bone Joint Surg Br. 2011;93(10):1308–1313. DOI: 10.1302/0301-620X.93B10.26249. PMID: 21969427.
- [22] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Tin and Tin Compounds. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2005.
- [23] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Silver. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 1990.

- [24] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Barium and Barium Compounds. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2007.
- [25] Kielhorn J, Melber C, Keller D, Mangelsdorf I. Palladium – a review of exposure and effects to human health. Int J Hyg Environ Health. 2002;205(6):417–432. DOI: 10.1078/1438-4639-00180. PMID: 12455264.
- [26] Lansdown ABG. GOLD: human exposure and update on toxic risks. Crit Rev Toxicol. 2018;48(7):596–614. DOI: 10.1080/10408444.2018.1513991. PMID: 31851875.
- [27] Swiatkowska I, Martin N, Hart AJ. Blood titanium level as a biomarker of orthopaedic implant wear. J Trace Elem Med Biol. 2019;53:120–128. DOI: 10.1016/j.jtemb.2019.02.013. PMID: 30910194.
- [28] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Strontium. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2004.
- [29] Linde SJL, Franken A, du Plessis JL. Occupational Respiratory Exposure to Platinum Group Metals: A Review and Recommendations. Chem Res Toxicol. 2017;30(10):1778–1790. DOI: 10.1021/acs.chemrestox.7b00184. PMID: 28858470.
- [30] Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Lead and Multi-Element Proficiency (LAMP) Program. <https://www.cdc.gov/laboratory-quality-assurance/php/inorganic-elements/lamp.html> (Abruf: 05.08.2026).
- [31] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Nickel. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2005.
- [32] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Cobalt. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; current peer-reviewed profile, online edition accessed 05.08.2026. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp33.pdf>.