

# Voltammetrische Multielementsensoren zum simultanen und selektiven Nachweis von Metallionen

*Janek Weißpflog<sup>1</sup>, Alfred Kick<sup>1</sup> und Michael Mertig<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg e.V., Waldheim, Deutschland

<sup>2</sup>Professur für Physikalische Chemie, Mess- und Sensortechnik, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Kontakt: [janek.weisspflog@ksi-meinsberg.de](mailto:janek.weisspflog@ksi-meinsberg.de)

## Einleitung

Die steigende Umweltbelastung durch Schwermetallionen und ihre Auswirkungen auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit machen präzise Analysemethoden zur Detektion von Metallionen in Umwelt- und Lebensmittelproben unabdingbar. Metallionen wie Cd(II), Pb(II), Cu(II) und Zn(II) reichern sich in natürlichen Wasserkreisläufen an und gelangen so in die Nahrungskette, was u.a. zur Anreicherung toxischer Metalle im menschlichen Körper führen kann [1]. Um den Gehalt solcher Metallionen verlässlich nachzuweisen und regulatorische Grenzwerte einzuhalten, sind innovative Analysemethoden erforderlich, die sowohl empfindlich als auch selektiv arbeiten und geringere Detektionsgrenzen ermöglichen. Eine vielversprechende Methode für den simultanen und selektiven Nachweis von Metallionen stellt die anodische Stripping-Voltammetrie (ASV) dar. Diese elektrochemische Technik bietet die Möglichkeit, Metallionen nach Voranreicherung bei leicht negativen Potentialen auf der Elektrodenoberfläche in Lösung abzutrennen. Bei anschließenden positiveren Potentialen finden die Stripping-Schritte statt, wobei die erhaltenen Peakpotentiale quantifiziert werden können. Nur Ionen, die in einem bestimmten Potentialbereich reduziert und wieder oxidiert werden können, sind durch die ASV nachweisbar. Nicht-metallische Ionen oder solche, die keine stabile Film-Bildung ermöglichen wie Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> und nicht direkt elektrochemisch aktiv sind können daher nicht über ASV erfasst werden. Nachweisbare Metallionen besitzen die Fähigkeit, sich auf der Oberfläche der Elektrode abzusetzen, oft in Form von Filmen oder Legierungen. Die Legierungsbildung durch Bi(III) und Sb(III) ist bei voltammetrischen Untersuchungen entscheidend für eine höhere Sensitivität und Selektivität beim Nachweis von Metallionen. Bi(III) kann *in-situ* auf der Elektrodenoberfläche Legierungen mit Metallen wie Pb(II), Cd(II) und Zn(II) bilden, was die Signalstärke und Auflösung verbessert. Aufgrund seiner Stabilität und geringen Eigeninterferenz ist Bi(III) besonders geeignet für die Spurenanalyse und unterstützt eine effiziente Anreicherung von Metallionen auf der Elektrodenoberfläche. Sb(III) bildet ebenfalls stabile Legierungen, welche speziell bei Cd(II) und Pb(II) die Sensitivität erhöhen. Diese zeigen eine hohe Toleranz gegenüber O<sub>2</sub> und mechanische Stabilität [2]. Zusätzlich fördern Goldelektroden oder -nanopartikel auf der Elektrodenoberfläche die Anreicherung von As(III)

und Hg(II), da Gold starke Wechselwirkungen mit diesen Ionen eingeht [3].

In den letzten Jahren hat sich die ASV besonders durch die Entwicklung neuer Elektrodendesigns und Oberflächenmodifikationen als eine vielseitige und kosteneffiziente Methode bewährt. Insbesondere die Verwendung von modifizierten Elektrodenmaterialien, wie etwa Glassy-Carbon-Elektrode (GCE) und Graphitpastelektroden in Kombination mit Bismutfilmen, verbessert die Sensitivität und Genauigkeit, da sie das Abscheidungsverhalten der Metallionen beeinflussen und so niedrigere Nachweisgrenzen ermöglichen [4].

Eine der größten Herausforderungen bei der elektrochemischen Detektion mehrerer Metallionen besteht in der Überlagerung der voltammetrischen Signale, die bei ähnlichen Redoxpotentialen der Zielmetalle auftreten können. Diese Signalüberlagerungen erschweren die Interpretation der Daten und können zu Fehlbestimmungen führen. Um diese Herausforderung zu bewältigen, sind präzise Anpassungen der Art der Elektrode sowie der experimentellen Parameter unerlässlich, darunter die Wahl der Elektrolytzusammensetzung und der Anreicherungszeit. Durch gezielte Optimierung der Parameter können die Empfindlichkeit und Selektivität der ASV entscheidend verbessert werden [5].

Die Modifikation der Elektrodenoberfläche mit Bismutfilmen ist ein Ansatz, der in dieser Arbeit weiterentwickelt wurde. Bismut weist gegenüber traditionellen Quecksilber-Elektroden den Vorteil auf, dass es toxikologisch unbedenklich ist und ebenfalls hohe Empfindlichkeiten im Spurenbereich erzielt. Die Bismut-beschichteten Elektroden erzeugen starke und stabile Signale für eine Vielzahl von Schwermetallionen, was die Qualität der Analyseergebnisse erheblich steigert. In Kombination mit dem Einsatz einer GCE oder planaren Siebdruckelektrode (SPE) auf Graphitbasis, die eine hohe chemische Stabilität und Leitfähigkeit besitzen, ermöglichen diese Modifikationen die simultane Detektion von Metallen auch bei geringen Konzentrationen [6].

Ein innovativer Ansatz zur Verbesserung der Signaltrennung war die Anwendung der Peakdekonvolution. Hierbei wurden die voltammetrischen Signale in Gauß- und Lorentz-Banden zerlegt und durch die Pseudo-Voigt-Funktion mathematisch modelliert. Diese Funktion, welche die Vorteile von Gauß- und Lorentz-Profilen kombiniert, ermöglichte eine präzise Anpassung an die überlappenden experimentellen

Daten und erleichterte als Peakdekonvolution die exakte Bestimmung der individuellen Ionensignale [7].

Mobile Sensorplattformen, die eine selektive und sensitive Vor-Ort-Analyse für Schwermetallionen erlauben, sind von zunehmender Bedeutung, um eine schnelle und dezentrale Überwachung in realen Umgebungen zu gewährleisten. Dies ist nicht nur für die Umweltanalytik von Bedeutung, sondern eröffnet auch neue Anwendungsmöglichkeiten in der industriellen Prozessüberwachung, der Lebensmittelsicherheit und der Medizin [8]. Die hier vorgestellte Multielementensensorik vereint die Vorteile der hohen Empfindlichkeit der ASV mit der Präzision moderner Signalverarbeitung und Datenanalyse. Zukünftige Entwicklungen könnten zudem auf die Integration von drahtlosen Datenübertragungsmodulen zielen, die eine Echtzeit-Datenanalyse und -überwachung ermöglichen.

## Methoden und Materialien

Für die Versuche wurden standardisierte Lösungen der Zielmetallionen Cd(II), Pb(II), Cu(II) und Bi(III) von Carl Roth verwendet. Alle wässrigen Lösungen wurden mit ultrareinem Wasser (Leitfähigkeit kleiner  $0,058 \mu\text{S}/\text{cm}$  bei 298 K) aus einem ThermoScientific MicroPure UV-Wasserreinigungssystem hergestellt. Die Chemikalien für die Herstellung der Acetat- und PBS-Pufferlösungen wie Eisessig, Salzsäure und Natriumhydroxid wurden bei Carl Roth erworben.

### Elektrodenmaterial

Als Arbeitselektroden kamen modifizierte GCE und SPE zum Einsatz. Diese wurden vor den Messungen durch Beschichtung mit einem Bismutfilm modifiziert. Als Gegenelektrode wurde Platin verwendet, während eine Ag/AgCl-Elektrode als Referenzelektrode diente. In der Anordnung mit drei Elektroden auf einer gemeinsamen Substratoberfläche hat die Referenzelektrode die Aufgabe, mit ihrem konstanten Potential für eine genauere Messung und Regelung zu sorgen. Das Potential der Arbeitselektrode wird gegen das der Referenzelektrode, durch die kein Strom fließt, gemessen. Damit wird der Fehler durch den ohmschen Spannungsabfall in der Lösung weitgehend eliminiert [9]. Um die Spannung wieder an das gewünschte Sollpotential anzugleichen, wird ein Strom von der Gegenelektrode zur Arbeitselektrode geschickt. Die elektrochemischen Messungen wurden mit einem PalmSens<sup>4</sup>-Potentiostat (Niederlande) durchgeführt, gesteuert durch die PStTrace Software (Version 5.10), was eine präzise Steuerung und Datenauswertung ermöglicht. Alle Messungen wurden bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) durchgeführt.

### Elektrodenvorbereitung

Die GCE wurde vor jedem Versuch mechanisch auf einem Poliertuch mit  $0,05 \mu\text{m}$  feiner Alumina-

Suspension poliert, um die Oberfläche zu glätten und Rückstände zu entfernen. Nach dem Polieren wurde die Elektrode gründlich mit destilliertem Wasser gespült und anschließend in Ethanol ultraschallgereinigt, um restliche Partikel und organische Verunreinigungen zu beseitigen. Die gereinigte Elektrode wurde danach mit einem Bi(III)-Film modifiziert. Die Bismutbeschichtung erfolgte durch Eintauchen der Arbeitselektrode in eine  $\text{Bi}^{3+}$ -haltige Lösung ( $1 \text{ mg/L}$  in  $0,1 \text{ M}$  Acetatpuffer +  $0,1 \text{ M}$  KCl). Die Deposition des Films wurde mittels Cyclovoltammetrie durchgeführt, bei einem Potenzialbereich von  $-0,4$  bis  $-1,2 \text{ V}$  und einer Scanrate von  $50 \text{ mV/s}$  für 30 Zyklen.

### Voltammetrische Methode

Für die Detektion der Metallionen wurde die anodische Stripping-Voltammetrie (ASV) in Verbindung mit Square-Wave-Voltammetrie (SWV) verwendet. Die Messparameter wurden so gewählt, dass die Signalstärke und -trennung maximiert wurden (Tab. 1).

Tab. 1: Messparameter.

Parameter	Wert
Elektrolyt	0,1 M Acetatpuffer + 0,1 M KCl
$V_{\text{gesamt}}$	30 mL
$E_{\text{condition}}$	0 V
$t_{\text{condition}}$	0 s
$E_{\text{deposition}}$	-1,2 V
$t_{\text{deposition}}$	180 s
$t_{\text{equilibration}}$	10 s
$E_{\text{begin}}$	-1,2 V
$E_{\text{end}}$	+0,8 V
Amplitude	10 mV
Frequenz	10 Hz

### Peakdekonvolution

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Analyse von überlappenden Peaks in voltammetrischen Kurven eine Peakdekonvolution eingesetzt, die durch Gauß- und Lorentz-Kurvenmodelle sowie deren Kombination, das Pseudo-Voigt-Profil, dargestellt wurde. Die Peakdekonvolution ermöglicht die Trennung überlagerter Signale, indem das Gesamtsignal in einzelne Peaks zerlegt wird, was zu einer präzisen Quantifizierung auch bei eng benachbarten Signalen führt. Gauß-Kurven sind durch eine symmetrische, glockenförmige Struktur charakterisiert, die mathematisch durch die Formel (1) dargestellt wird:

$$G(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

Hierbei beschreibt  $A$  die Amplitude,  $x_0$  die Peakposition und  $\sigma$  die Standardabweichung, welche die Breite des Peaks angibt. Lorentz-Kurven (Formel (2)) haben einen schmalen, spitzeren Peak, was sie besonders sensitiv für scharfe Signalübergänge macht.

$$L(x) = \frac{A}{1 + \frac{(x-x_0)^2}{\gamma}} \quad (2)$$

wobei  $\gamma$  die Halbwertsbreite ist, welche die Breite des Lorentz-Peaks bestimmt. Lorentz-Kurven sind symmetrisch, jedoch mit längeren Flanken im Vergleich zur Gauß-Kurve. Für komplexe Datensätze, bei denen die Peakform eine Mischung aus Gauß- und Lorentz-Charakteristika aufweist, bietet sich eine Verwendung des Pseudo-Voigt-Profiles an. Das Pseudo-Voigt-Profil ist eine gewichtete Kombination beider Funktionen und wird wie folgt dargestellt (3):

$$V(x) = \eta \cdot G(x) + (1 - \eta) \cdot L(x) \quad (3)$$

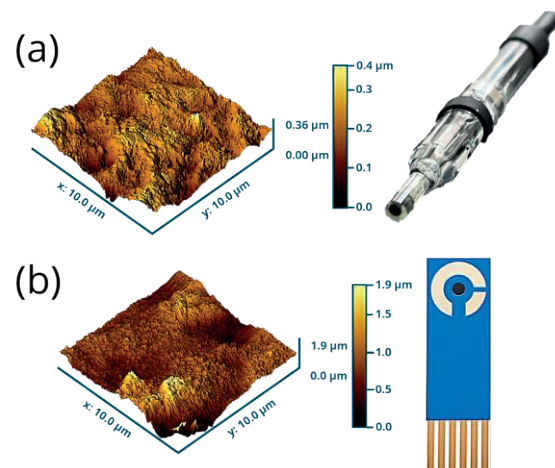
wobei  $\eta$  den Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1 darstellt, der die Form des Peaks anpasst – je nachdem, ob der Peak eher Gauß- oder Lorentz-förmig ist. In der Datenanalyse wurde das Pseudo-Voigt-Profil für die Peakdekonvolution verwendet, um z.B. die überlappenden Signale von Cd(II) und In(III) zu trennen. Die iterative Anpassung ermöglichte eine Minimierung des Anpassungsfehlers und eine präzise Trennung beider Peaks.

## Ergebnisse

### Charakterisierung der Elektroden

Für die voltammetrische Multielementsensorik wurden zwei Elektrodenmaterialien verwendet und auf ihre Oberflächenstrukturen hin charakterisiert: eine GCE in Form einer Einstabmesskette (Abb. 1(a)), die eine Arbeits- sowie Referenzelektrode in einem kompakten Gehäuse vereint, und eine siebgedruckte SPE. Die GCE wurde in Kombination mit einer Platin-Gegenelektrode und einer Ag/AgCl-Referenzelektrode eingesetzt, während die siebgedruckte SPE ebenfalls mit einer Platin-Gegenelektrode und einer Ag/AgCl-Referenzelektrode ausgestattet ist.

Die Analyse der Oberflächenmorphologie der beiden Elektrodenmaterialien zeigt signifikante Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit. AFM-Aufnahmen (Abb. 1(a) und (b)) verdeutlichen, dass die GCE eine vergleichsweise glatte Oberfläche mit einer durchschnittlichen Rauigkeit von  $R_{a,GCE} = 27 \text{ nm}$  aufweist, was auf eine gleichmäßigere, weniger poröse Struktur schließen lässt. Diese Eigenschaft begünstigt eine gleichmäßige Ablagerung und gleichbleibende elektrochemische Aktivität, was insbesondere bei der Anreicherung der Metallionen vorteilhaft ist. Im Gegensatz dazu zeigt die SPE eine deutlich rauere Oberfläche mit einer Rauigkeit von  $R_{a,SPE} = 1,3 \mu\text{m}$ , was auf die Beschaffenheit der Graphitpaste zurückzuführen ist. Diese erhöhte Rauigkeit kann die aktive Oberfläche vergrößern und damit zur Signalverstärkung beitragen, erfordert jedoch eine differenzierte Auswertung, da die Variabilität der Ablagerung bei unterschiedlichen Oberflächenstrukturen höher ist.



**Abb. 1:** AFM-Aufnahmen der (a) GCE und (b) SPE. Die GCE weist eine glatte Oberfläche mit einer durchschnittlichen Rauigkeit von  $R_{a,GCE} = 27 \text{ nm}$  und einem hier dargestellten Höhenunterschied von  $0,36 \mu\text{m}$  auf. Die SPE zeigte eine höhere Rauigkeit mit  $R_{a,SPE} = 1,3 \mu\text{m}$  und einem hier dargestellten Höhenunterschied von  $1,9 \mu\text{m}$  auf.

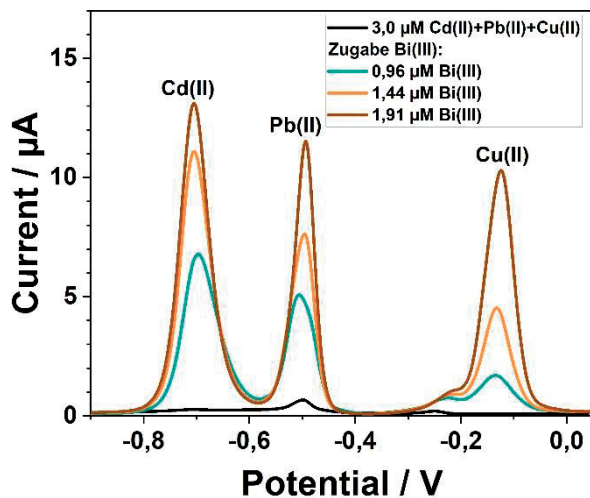
### Effekt der Elektrodenmodifikation mit Bi(III)

In diesen Untersuchungen wurden die Signalintensitäten von Cd(II), Pb(II) und Cu(II) an einer nicht mit Bi(III) modifizierten GCE mit den Signalintensitäten bei schrittweiser Erhöhung der Bi(III)-Konzentration *in-situ* verglichen. Ziel war es, den Einfluss von Bi(III) auf die Signalintensität bei der Bestimmung dieser Metallionen zu evaluieren. Zunächst erfolgte eine Messung der Metallionen ohne Bi(III), gefolgt von einer sukzessiven Erhöhung der Bi(III)-Konzentration, um den Effekt auf die Sensitivität und Peakauftrennung zu untersuchen.

Abb. 2 zeigt deutlich die Unterschiede in den Stripping-Voltammetrie-Signalen einer unmodifizierten GCE im Vergleich zu den Signalen nach der Zugabe von Bi(III). Durch die Bi(III)-Modifikation stieg die Empfindlichkeit für Cd(II) von  $0,24 \mu\text{A}$  auf  $13,1 \mu\text{A}$ , was eine 54,6-fache Verbesserung darstellt. Bei Pb(II) erhöhte sich der Peakstrom von  $0,64 \mu\text{A}$  auf  $11,5 \mu\text{A}$  (17,9-fache Verbesserung), und für Cu(II) stieg der Strom von  $0,2 \mu\text{A}$  auf  $10,3 \mu\text{A}$ , was einer 51,5-fachen Steigerung entspricht. Die signifikante Zunahme der Ströme verdeutlicht den positiven Einfluss der Bi(III)-Modifikation auf die Sensitivität und die Nachweisgrenze von Schwermetallen im Spurenbereich.

Diese Empfindlichkeitssteigerung resultiert aus der Bildung stabiler intermetallischer Phasen durch die *in-situ* erzeugte Bi(III)-Legierung, welche die Metallionen fest an die Elektrodenoberfläche bindet. Dadurch verbessert sich die Auflösung der Stripping-

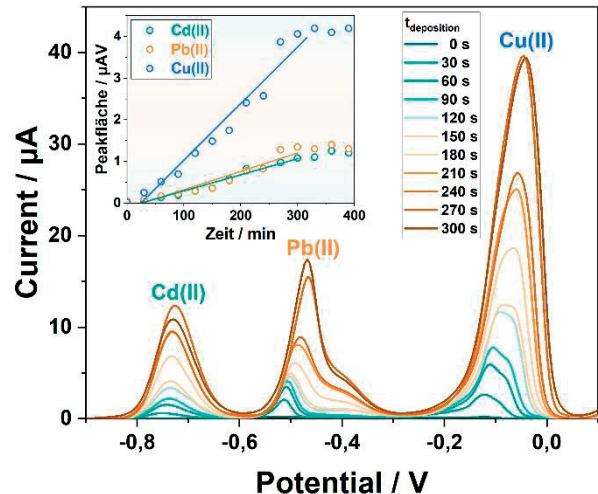
Peaks, was die Selektivität und Präzision der Messung maßgeblich erhöht.



**Abb. 2:** Einfluss der *in-situ*-Zugabe von Bi(III) auf das Messsignal beim Nachweis der Metallionen. ASV-Untersuchung von Cd(II), Pb(II) und Cu(II) mit einer Konzentration von 100  $\mu\text{g/L}$  auf einer unmodifizierten GCE (schwarze Kurve) und einer nachträglichen Zugabe von Bi(III). Die Bismut-Modifikation erhöhte die Empfindlichkeit der Elektrode und verbesserte die Peakauflösung.

#### Einfluss der Anreicherungszeit auf die Peakströme

Um die optimale Anreicherungszeit zu bestimmen, wurde die Peakfläche in Abhängigkeit von der Anreicherungszeit für jedes Metallion untersucht. Abb. 3 zeigt, dass sich die Peakströme für Cd(II), Pb(II) und Cu(II) mit zunehmender Anreicherungszeit zunächst proportional steigern, bevor eine Sättigung ab 300 s erreicht wird. Dabei wurden maximale und stabile Signale für alle Metallionen erzielt, was diese Zeit als ideale Bedingung für die simultane Analyse festlegt. Aufgrund der durchgeführten Doppelmessungen konnte herausgefunden werden, dass schon bei einer Anreicherungszeit von  $t_{\text{deposition}} = 180$  s reproduzierbare Signale erhalten werden konnten. Im Sinne der Zeiteffizienz wurde diese Anreicherungszeit für weitere Untersuchungen gewählt.

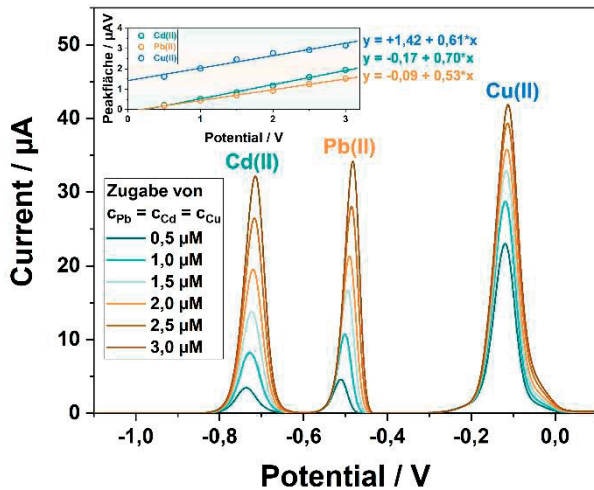


**Abb. 3:** Einfluss der Anreicherungszeit  $t_{\text{deposition}}$  auf die Peakströme von Cd(II), Pb(II) und Cu(II). Eingefügt ist die Abhängigkeit der Peakfläche von der Anreicherungszeit.

#### Kalibrierung und Nachweisgrenzen

Um Cd(II) und Pb(II) in Lösung gleichzeitig und präzise zu quantifizieren, wurden Kalibrierkurven erstellt, welche die Peakstromstärke in Abhängigkeit von den Konzentrationen der Metallionen im Bereich von 0,5 bis 3  $\mu\text{M}$  darstellen. In Abb. 4 sind die Kalibrierkurven abgebildet. Sie zeigen eine sehr gute lineare Beziehung zwischen Peakstrom und Konzentration (Korrelationskoeffizienten  $R^2 > 0,99$ ). Diese Linearität unterstreicht die Präzision und Reproduzierbarkeit der Methode, auch bei gleichzeitiger Anwesenheit mehrerer Analyten. Die Bestimmung der Nachweisgrenzen (Limit of detection, LOD) erfolgte nach der 3-Sigma-Methode, wobei die berechneten LODs für Cd(II) bei  $c_{\text{LOD}} = 0,017$   $\mu\text{M}$ , für Pb(II) bei  $c_{\text{LOD}} = 0,01$   $\mu\text{M}$  und für Cu(II) bei  $c_{\text{LOD}} = 0,2$   $\mu\text{M}$  liegen. Diese niedrigen Nachweisgrenzen bestätigen die Eignung der Methode für Spurenanalysen, auch bei sehr geringen Konzentrationen und in komplexen Proben.

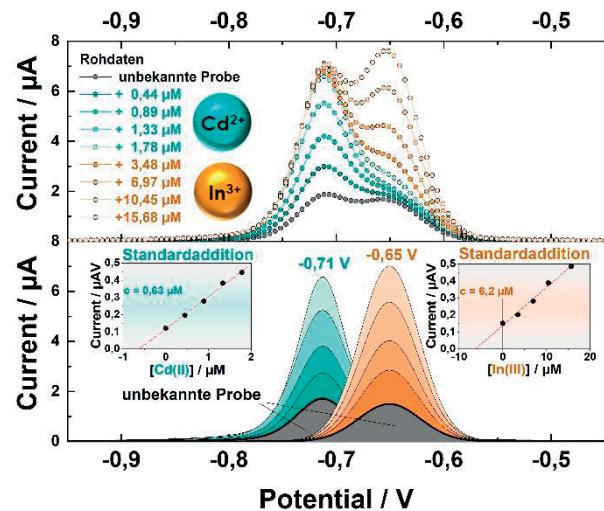
Ein entscheidender Vorteil der Methode ist ihre Fähigkeit zur gleichzeitigen Bestimmung mehrerer Metallionen in einem einzigen Messschritt. Durch die klar unterscheidbaren Stripping-Peaks für Cd(II), Pb(II) und Cu(II) wird eine hohe Selektivität erreicht, ohne dass störende Matrixeffekte oder Interferenzen den Nachweis beeinträchtigen. Dies war besonders bei der Kalibrierung von Vorteil, da der Einfluss der verschiedenen Ionen auf die Empfindlichkeit der Peakstromwerte präzise quantifiziert werden konnte.



**Abb. 4:** Kalibrierkurven der Peakströme in Abhängigkeit von der Konzentration der Metallionen Cd(II), Pb(II) und Cu(II) bei Verwendung der Bi(III)-modifizierte GCE.

#### Trennung der Peaks bei Überlagerungen

Durch das Redoxpotential der Metallionen sind die Stripping-Peaks für Cd(II), Pb(II) und Cu(II) in den voltammetrischen Kurven klar voneinander abgegrenzt, was eine direkte Quantifizierung der einzelnen Ionen ermöglicht. Komplizierter wird es bei Elementen, deren Redoxpotentiale nah beieinanderliegen, wie z.B. bei Cd(II) und In(III). Hier tritt eine Überlagerung der Peaks auf, was eine genaue Peakdekonvolution erfordert, um die jeweiligen Konzentrationen der Ionen präzise zu bestimmen. Abb. 5 zeigt die beispielhafte Anwendung einer Peakdekonvolution für ein Voltammogramm, in dem die Signale für Cd(II) bei  $-0,71$  V und für In(III) bei  $-0,65$  V liegen. Die Anwendung einer Pseudo-Voigt-Funktion ermöglichte die erfolgreiche Trennung der beiden überlappenden Peaks. Zur Verifizierung der Methode wurde die Standardaddition angewendet: Zuerst wurde Cd(II) und danach In(III) in die Lösung gegeben, wodurch sich für die ursprünglich unbekannt Probe Konzentrationen von  $C_{\text{Cd(II)}} = 0,63 \mu\text{M}$  und  $C_{\text{In(III)}} = 6,2 \mu\text{M}$  ergaben. Die Kombination von Peakdekonvolution und Standardaddition ermöglichte nicht nur eine exakte Quantifizierung, sondern zeigte auch die Robustheit der Methode bei der Trennung eng beieinanderliegender Peaks. Diese Herangehensweise unterstreicht die Eignung des Verfahrens zur simultanen Bestimmung mehrerer Metallionen, selbst in Proben mit komplexen Zusammensetzungen, wie sie in der Umwelt- oder Wasseranalytik vorkommen.



**Abb. 5:** Dekonvolutionsanalyse eines Voltammogramms mit überlappenden Peaks für Cd(II) und In(III) (oben). Die Peaktrennung wurde durch eine Pseudo-Voigt-Funktion optimiert (unten). Eingefügt sind die Standardadditionen von Cd(II) und In(III) für die Analyse einer unbekannt Probe.

#### Diskussion

In dieser Arbeit wurde eine voltammetrische Multi-elementensensorik zur simultanen und selektiven Bestimmung von Schwermetallionen (Cd(II), Pb(II) und Cu(II)) entwickelt. Die gezielte Optimierung von Anreicherungszeit sowie der Modifikation der GCE und SPE mit einem Bi(III)-Film führte zu einer signifikanten Verbesserung der Empfindlichkeit und Senkung der Nachweisgrenzen. Eine Anreicherungszeit von 180 s erwies sich als optimal, während die Bi(III)-Modifikation mit  $C_{\text{Bi(III)}} = 400 \mu\text{g/L}$  ( $= 1,91 \mu\text{M}$ ) die Signalintensität und damit die Empfindlichkeit insbesondere bei niedrigen Konzentrationen verstärkte. Durch die Peakdekonvolution mittels einer Pseudo-Voigt-Funktion konnten die Signale der Metallionen Cd(II) und In(III) auch bei Überlagerungen zuverlässig getrennt und quantifiziert werden, was die Anwendung zur gleichzeitigen Erkennung mehrerer Metalle ohne Interferenzen ermöglichte. Die erreichten Nachweisgrenzen für die Zielmetallionen lagen unter  $10 \mu\text{g/L}$ , was die Eignung der Methode für Spurenanalysen bestätigt.

Das Potenzial für portable Anwendungen im Umweltmonitoring ist vielversprechend, da die Technik einfach an spezifische Bedingungen angepasst werden kann. Die Methode kann Grundlage für portable Sensorplattformen werden, die eine Echtzeitüberwachung komplexer Metallionenmischungen ermöglichen. Dafür sollten sich zukünftige Arbeiten auf die Automatisierung dieser Technik und die Integration in tragbare Systeme für den Einsatz in der Umweltanalytik und Wasserüberwachung konzentrieren.

## Literatur

- [1] M.M. Uddin, M.C.M. Zakeel, J.S. Zavahir, Marikar, Faiz M. M. T., I. Jahan, Heavy Metal Accumulation in Rice and Aquatic Plants Used as Human Food: A General Review, *Toxics* 9 (2021) 360.
- [2] R. Babić, M. Metikoš-Huković, N. Lajqy, S. Brinić, The effect of alloying with antimony on the electrochemical properties of lead, *Journal of Power Sources* 52 (1994) 17–24.
- [3] J. Weißpflog, K. Trommer, J. Schwarz, M. Mertig, Entwicklung eines voltammetrischen In-situ- Sensorsystems zum Nachweis von As(III) und As(V), *Tagungsband 15. Dresdner Sensor-Symposium (2021)* 216–221.
- [4] I. Švancara, L. Baldrianová, E. Tesařová, S.B. Hočevar, S.A.A. Elsuccary, A. Economou, S. Sotiropoulos, B. Ogorevc, K. Vytřas, Recent Advances in Anodic Stripping Voltammetry with Bismuth-Modified Carbon Paste Electrodes, *Electroanalysis* 18 (2006) 177–185.
- [5] S.B. Hočevar, B. Ogorevc, J. Wang, B. Pihlar, A Study on Operational Parameters for Advanced Use of Bismuth Film Electrode in Anodic Stripping Voltammetry, *Electroanalysis* 14 (2002) 1707–1712.
- [6] S. Lee, S.-K. Park, E. Choi, Y. Piao, Voltammetric determination of trace heavy metals using an electrochemically deposited graphene/bismuth nanocomposite film-modified glassy carbon electrode, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 766 (2016) 120–127.
- [7] J. Weißpflog, D. Vehlow, M. Müller, B. Kohn, U. Scheler, S. Boye, S. Schwarz, Characterization of chitosan with different degree of deacetylation and equal viscosity in dissolved and solid state - Insights by various complimentary methods, *International Journal of Biological Macromolecules* 171 (2021) 242–261.
- [8] Z. Yao, P. Coatsworth, X. Shi, J. Zhi, L. Hu, R. Yan, F. Güder, H.-D. Yu, Paper-based sensors for diagnostics, human activity monitoring, food safety and environmental detection, *Sens. Diagn.* 1 (2022) 312–342.
- [9] S. Scholz, Qualifizierung eines Voltammetrie-Messsystems, Freie Universität Berlin, 2013.

## Danksagung

Diese Maßnahme wird mitfinanziert mit Steuermitteln auf Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes und im Rahmen des SAB-Projektes VoltMuSeM (FKZ: 100719798) umgesetzt.