



Bestimmung von Benzotriazol in Gewässern mit plasmonischer on-site Analytik

Hainer Wackerbarth^a (hainer.wackerbarth@ifnano.de), Christoph Lenth^a (christoph.lenth@ifnano.de), Georgios Ctistis^a (georgios.ctistis@ifnano.de), Florian Wieduwilt^a (florian.wieduwilt@ifnano.de), Norbert Konrad^b (NKonradt@swd-ag.de)

^a Institut für Nanophotonik Göttingen, Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, 37077 Göttingen

^b Qualitätsüberwachung Wasser, Stadtwerke Düsseldorf AG, Wiedfeld 50, 40589 Düsseldorf

Abstract

In den letzten Jahren wurde die Industriechemikalie 1H-Benzotriazol (BTA) weltweit in fast allen Oberflächengewässern als relevante Kontamination beobachtet. Diese mobile und persistente Verbindung lässt sich nur mit aufwendigen Techniken analysieren, die ungeeignet für ein flächendeckendes Monitoring sind. Hier werden erste Ergebnisse einer plasmonischen on-site Analytik für die Detektion von BTA vorgestellt. Dazu wurde die Adsorption von BTA an die erforderlichen nanostrukturierten Silber- und Goldoberflächen erforscht. Mit einem mobilen Raman-Gerät und einer kommerziell hergestellten plasmonischen Oberfläche konnten in einer realen Abwasserprobe 17,6 µg BTA innerhalb von 15 Minuten detektiert werden.

Einleitung

1H-Benzotriazol (BTA) ist eine weltweit verbreitete Industriechemikalie, die seit über 70 Jahren als Korrosionsschutzmittel, in Kühlfüssigkeiten, Frostschutzmitteln, Enteisungsmitteln sowie in Entkalkungsmitteln eingesetzt wird. Die Europäische Chemikalienagentur warnt, dass BTA giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung ist und für den Menschen gesundheitsschädlich (ECHA 2021). 2018 wurde erstmals belegt, dass Flohkrebse BTA anreichern (Munz et al. 2018). In den letzten Jahren wurde BTA in fast allen Oberflächengewässern als relevante Kontamination festgestellt. So sind im Rhein bei Düsseldorf zwischen 0,2 und 1,2 µg/L bestimmbar. In Schweizer Flüssen und Seen wurden Gehalte von 0,1 bis 5,4 µg/L detektiert (BAFU 2009). Doch nicht nur in Europa werden hohe Kontaminationen beobachtet. Auch im Haihe River System im Einzugsbereich von Peking mit 20 Millionen Menschen, wurden bis zu 1,1 µg/L gefunden (Heeb et al. 2012). Kläranlagen schaffen es nicht, BTA zufriedenstellend aus dem Wasser zu entfernen, da es schwer abbaubar ist. Dadurch gelangt BTA in Flüsse und Seen und somit schließlich in das Uferfiltrat und ohne weitere Aufbereitung in das Trinkwasser. In Deutschland stammen 30,8% des Trinkwassers aus Oberflächenwasser (BDEW 2021). Wegen der immensen Bedeutung für die Trinkwasserversorgung ist die Trinkwasseranalytik von besonderem Interesse. Die Wasserversorger, die sich im Zuge des Europäischen Fluss Memorandum (ERM 2020) mit dem Thema auseinandergesetzt haben, streben eine Maximalkonzentration von 0,1 µg/l an. Dieser Wert ist nur mit aufwendigen Verfahren zu erreichen, wie z. B. einer Kombination aus Ozon und Aktivkohle (Konrad et al. 2021). Dieser Sachverhalt stellt ein gravierendes Hindernis für eine sichere, nachhaltige Trinkwasserversorgung dar, so dass ein zu-

nehmender Handlungsbedarf besteht (van der Hoek et al. 2014).

Monitoring ist ein wichtiges Mittel zur Dokumentation der Gewässerverunreinigungen, um eine Basis für Qualitätsverbesserungen der Oberflächenwässer zu erreichen, wie es die europäische Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG) vorsieht. Die derzeit eingesetzten Verfahren zur Untersuchung von Spurenstoffen sind jedoch sehr aufwändig und damit kostenintensiv. Der Nachweis von BTA erfolgt meist im Labor mittels HPLC/MS/MS-Methoden (Weiss und Reemtsma 2005). Daher wird ein schnelles on-site Verfahren für die zeitnahe Ausweitung des Monitorings benötigt.

Die Raman-Spektroskopie ist eine optische Methode, um Stoffe schnell und ohne Probenvorbereitung zu identifizieren, die industriell weite Anwendung findet. Robuste und tragbare Raman-Geräte sind dabei ideal für die Vor-Ort-Analytik geeignet. Ein entscheidender Vorteil ist, dass Wasser so gut wie keine Signale im Raman-Spektrum erzeugt, so dass die Methode für die Analyse von wässrigen Proben prädestiniert ist. Eine der wichtigsten Forschungsaufgaben im Bereich der Raman-Spektroskopie ist die Verringerung der Nachweisgrenzen. Die von der Industrie erzielten Verbesserungen der Raman-Spektrometer durch Erhöhung des Lichtdurchsatzes und ausgefeilte Detektoren reichen nicht, um Spurenanalytik im µg/l-Bereich und darunter zu betreiben. Daher wird an sogenannten erweiterten Raman-Techniken geforscht, um die inhärent schwache Quanteneffizienz zu kompensieren.

Eine dieser Techniken basiert auf der 1974 entdeckten oberflächenverstärkten Raman-Streuung (SERS engl. für surface-enhanced Raman scattering), mit der auch die SERS-basierte Spurenanalytik entstand (Fleischmann et al. und Hendra 1974). Hierbei wird ausgenutzt, dass sich in Metallen sogenannte Oberflächenplasmonen anregen lassen. Plasmonen kann man sich als Schwingungen von Elektronen vorstellen, die relativ zu den positiven Atomrümpfen oszillieren. An nanostrukturierten Edelmetall-Oberflächen entstehen an den Strukturkanten Feldüberhöhungen, die dazu führen, dass die unelastisch gestreuten Ramansignale um mehrere Zehnerpotenzen erhöht werden. Zusätzlich tragen auch chemische Effekte (first layer effect) zur Erhöhung des Streuquerschnittes bei, spielen allerdings nur eine untergeordnete Rolle (Schlücker 2014). Abbildung 1 visualisiert den Effekt der lokalen Feldüberhöhung. Es werden nur die Raman-Signaturen der Moleküle verstärkt, die innerhalb der Feldüberhöhungen adsorbiert sind, hier beispielsweise an den Kanten und Stufen. Betrachten wir eine einzelne Nanoantenne, so

hängt die Verstärkung von ihrer Größe, Form und Materialeigenschaft ab.

Bereits 1997 gelang dabei die Detektion von einzelnen Molekülen (Nie und Emory 1997). An dieser Methodik wurde und wird, getrieben durch Fortschritte im Bereich der Nanotechnologie und Plasmonik, sehr intensiv geforscht. Am IFNANO wurde intensiv die Detektion von Sprengstoffen wie Trinitrotoluol und Triazetontriperoxid erforscht (Wackerbarth et al. 2010a,b).

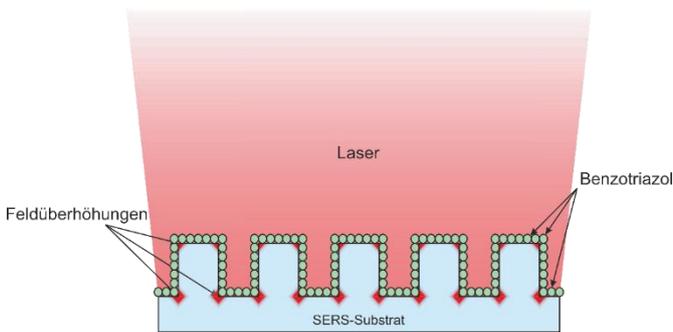


Abb.1: Schematische Darstellung der Feldüberhöhungen an einem nanoskaligen plasmonischen Substrat belegt mit BTA.

Zahlreiche Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Optimierung der Strukturen, um die Ramansignale zu verstärken und somit möglichst niedrige Nachweisgrenzen zu erzielen. Es wurden unterschiedliche Herstellungsverfahren dieser sogenannten SERS-aktiven Oberflächen bzw. SERS-Substrate entwickelt und charakterisiert (Perney et al. 2006; Fan et al. 2011; Mosier-Boss 2017). Dabei unterscheidet man zwischen Nanopartikeln und nanostrukturierten Substraten, die inzwischen beide kommerziell erhältlich sind.

Damit lässt sich festhalten, dass es zwar geeignete Vor-Ort-Raman-Geräte und kommerzielle SERS-Substrate gibt, jedoch noch keine relevante Anwendung außerhalb von Forschungslaboren. Das liegt daran, dass die meisten analytisch relevanten Stoffe so gut wie keine Affinität zu nackten Silber- oder Goldoberflächen haben und als Spurenstoff in einem Gemisch vorliegen. Diese Affinität ist allerdings erforderlich um den Analyten, hier BTA, an der nanostrukturierten Oberfläche im Bereich der Feldüberhöhungen zu adsorbieren. Denn nur dort werden die Raman-Signaturen durch die Plasmonik verstärkt. Im Falle eines Gemisches sollte möglichst selektiv der Analyt an diesen Stellen adsorbieren, denn sonst werden die Signale von anderen Raman-aktiven Substanzen überlagert. Nach der Erzeugung von plasmonischen Nanostrukturen und dem Verständnis um die stattfindenden Wechselwirkungen sind für den Einsatz in der Analytik noch die Fragen der Kinetik der Adsorption an den Nanostrukturen und die Genauigkeit der Messung zu klären.

Plasmonische Substrate

Am IFNANO wurden bereits zahlreiche kommerzielle und selbsthergestellte SERS-Substrate untersucht. Beispielsweise

wurde eine nicht-deterministische Struktur durch UV-Laserpulse entwickelt (Christou et al. 2010). Für die BTA-Detektion wurde ein Substrat unseres langjährigen Kooperationspartners AMO GmbH sowie kommerzielle Substrate von AtoID und Silmeco untersucht.

Die hauptsächlich verwendeten SERS-Substrate (AMO C7) wurden auf Siliziumdioxid hergestellt. Die SERS-aktiven Strukturen wurden dabei durch das sogenannte soft-UV-nanoimprint-Verfahren in Amonil-Resist auf Glaswafern erzeugt (Barnett et al. 2017). Die daraus resultierenden konischen, nanoskaligen Säulenstrukturen sind in der REM-Aufnahmen in Abbildung 2(a) dargestellt, wobei eine geeignete Aufsicht der Säulen in einem Winkel von 15° zu sehen ist. Die Proben zeigen ein rechteckiges Gittermuster der Säulen mit einer Zwischenraumgröße von 375 nm, einem Säulendurchmesser von etwa 200 nm und einer Säulenhöhe von 337 nm. Die aktive Fläche eines einzelnen Substrats beträgt 7x11 mm².

Des Weiteren wurde die Anwendbarkeit von zwei kommerziellen SERS-Substraten für den Nachweis von BTA untersucht. Zum einen die "SERStrate"-Substrate der Firma Silmeco (<https://www.silmeco.com>, Dänemark), die aus mit Gold oder Silber beschichteten Silizium-Nanosäulen bestehen (Schmidt et al. 2012). Sie verfügen über eine aktive Fläche von 4x4 mm² (s. Abbildung 2(b)). Die Herstellung dieser Substrate erfolgt in einem zweistufigen Prozess: Zuerst werden die Silizium-Nanosäulen durch maskenloses Trockenätzen hergestellt, gefolgt von der Elektronenstrahlverdampfung von Gold oder Silber zur Beschichtung des Siliziums. Die resultierende Struktur ist hier wieder teilweise geordnet mit Säulengrößen von 200 nm Höhe und 100 nm Durchmesser. Als weitere kommerziell erhältliche Substrate wurden die der Firma AtoID (<http://www.atoid.com>, Litauen) verwendet. Es gibt zwei Versionen, die sich durch die Metallbedeckung unterscheiden. Die "MatoS"-Substrate besitzen eine Goldbeschichtung, während die "RandaS"-Substrate mit Silber beschichtet sind. Die aktive SERS-Fläche von 5x3 mm² wurde mittels Ultrakurzpuls-Laserablation direkt auf dem silber- bzw. Goldbeschichteten Natronkalk-Glassubstrat hergestellt (Aleknavičienė et al. 2022). Die resultierende Struktur ist stochastisch strukturiert mit charakteristischen Merkmalen in der Größenordnung von einigen Nanometern bis hin zu einem Mikrometer (s. Abbildung 2(c)).

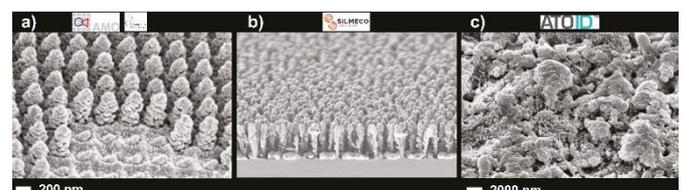


Abb. 2: Visualisierung der Nano-Strukturen auf den Oberflächen verschiedener SERS-Substrate mittels Bildgebung durch ein Raster-Elektronenmikroskop: a) Neigungswinkelansicht des nanostrukturierten Substrates AMO C7. Der Säulendurchmesser beträgt 200 nm und die Säulenhöhe 337 nm. b) Seitenansicht eines nanostrukturierten SERStrate-Substrates von Silmeco. c) Neigungswinkelansicht eines RandaS-Substrates von AtoID.

Oberflächenverstärkte Raman-Messungen an Benzotriazol
 BTA besteht aus einem Benzolring und einem anellierten 1,2,3-Triazolring, der vermutlich dafür verantwortlich ist, dass sich BTA eine gute Adsorption auf edleren Metallen wie Kupfer, Silber und Gold zeigt. Der Mechanismus ist komplex. Bei Kupfer wurden lineare, polymere Kupfer(I)BTA -Komplexe nachgewiesen, die nicht auf eine Monoschicht beschränkt sind, sondern weiterwachsen können und bis zu tausend Å dicke Filme bilden können. Bei einer Orientierung der BTA-Moleküle nehmen sie einen 90° Winkel zur Oberfläche der Metallschicht ein, wobei der Triazolring auf die Kupferoberfläche weist (Finšgar und Milošev 2010). Über die Struktur der Silber- und Gold-Komplexe ist wenig bekannt (Schaltin et al. 2012). Für die Messungen wurde das BTA in ultrareinem Wasser gelöst, wobei es abhängig vom pH-Wert als unterschiedliche Spezies (Kation, ungeladene Verbindung oder Anion) vorkommt. So wurde zunächst das Adsorptionsverhalten bei unterschiedlichen pH-Werten untersucht.

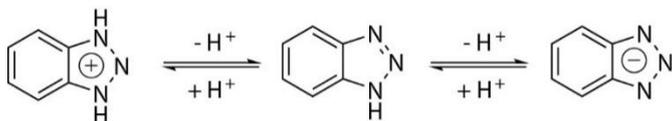


Abb. 3: Positiv geladenes (links), neutrales (mittig) und negativ geladenes (rechts) BTA, wie es bei verschiedenen pH-Werten in wässriger Lösung vorliegt.

Aufgrund der dabei entstehenden unterschiedlichen Strukturen (s. Abbildung 3), erwartet man leicht unterschiedliche Spektren. Die spektrale Signatur bzw. der Fingerabdruck von BTA in den Spektren ist in Abbildung 4 dargestellt.

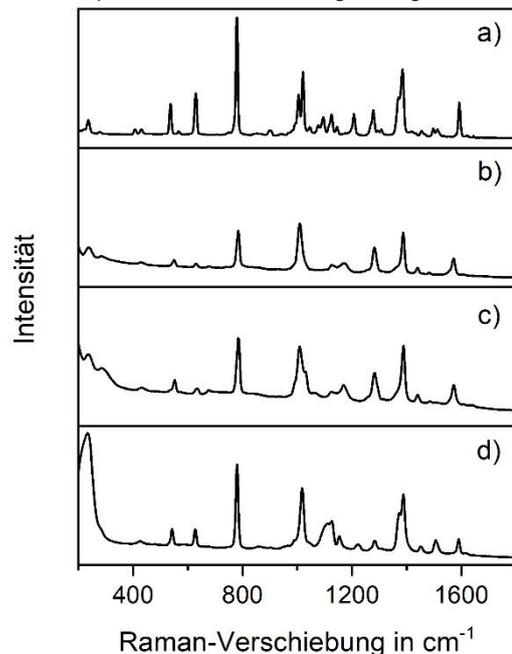


Abb. 4: BTA-Spektren gemessen auf dem Substrat RandaS bei einer Anregungswellenlänge von 785 nm. a) Raman-Spektrum von BTA. b)-d) SERS-Spektren von BTA gelöst in Wasser unter verschiedenen pH-Wert-Bedingungen: b) basisch pH 10,98, c) neutral, pH 7,01 und d) sauer pH 1,04.

Aufgrund der dabei entstehenden unterschiedlichen Strukturen (s. Abbildung 3), erwartet man leicht unterschiedliche Spektren. Die spektrale Signatur bzw. der Fingerabdruck von BTA in den Spektren ist in Abbildung 4 dargestellt. Auffallend ist die intensive breite Bande im niederfrequenten Bereich unter sauren Bedingungen (bei 225 cm^{-1}). Laut Literatur weist diese auf die Bildung eines Silberkomplexes hin. Grundsätzlich adsorbiert das BTA unter sauren, neutralen und basischen Bedingungen. Dies ist durchaus relevant für den Einsatz in der der Vor-Ort-Analytik, da Schwankungen von einigen Zehntel pH-Wert bei Oberflächenwässern jahreszeitlich bedingt auftreten.

In einem nächsten Schritt wurde die Adsorptionskinetik bestimmt. Dazu wurden zahlreiche Spektren (s. Abbildung 5) zeitabhängig aufgenommen. Auf der rechten Seite der Abbildung 5, ist deutlich das Anwachsen der Bande bei 783 cm^{-1} zu erkennen. Auf der linken Seite ist die Signalfäche der Bande und somit deren Intensität in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Es wird eine stetige Zunahme der Intensität, die eine Zunahme der Konzentration von BTA an der Oberfläche entspricht, beobachtet.

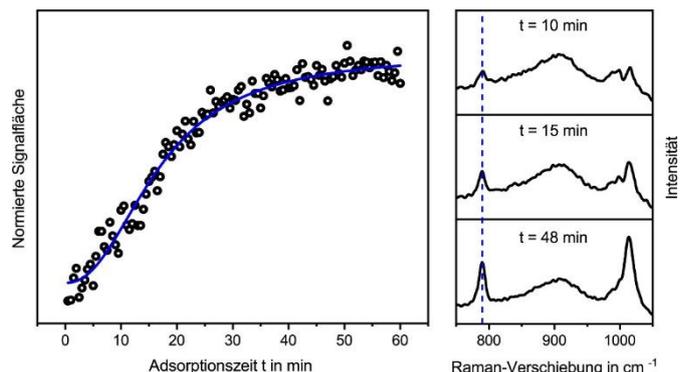


Abb. 5: Zeitaufgelöstes Adsorptionsverhalten von BTA auf dem SERS-Substrat C7 bei Raumtemperatur. Zu jedem Zeitpunkt t wurde ein Spektrum aufgenommen und die Peakfläche der Benzolring-Atmungsmode bei 783 cm^{-1} gegen die Zeit aufgetragen. Rechts: Spektren zu drei verschiedenen Zeiten.

Nach 15 min sind ca. 50% des maximalen Signals erreicht, ab 48 min zeigt der Verlauf eine Sättigung (Wieduwilt et al. 2020). Der Verlauf der Zunahme kann mit einer Hill-Langmuir-Funktion beschrieben werden. Anhand von Konzentrationsreihen konnten mit dem AMO C7 und dem Silmeco Silber Substrat Konzentrationen von $17,6\text{ }\mu\text{g/l}$ in 15 min erfasst werden. Interessanterweise konnten ebenfalls $17,6\text{ }\mu\text{g/l}$ mit einem Vor-Ort-Ramangerät und in einer realen Abwasserprobe mit dem Silmeco Silbersubstrat bestimmt werden. Die Abwasserproben stammten von dem Wasserwerk in Ochtrup und wurden bei der Entwässerung nach einem Ausflockungsfiltrationsschritt genommen.

Fazit

Die Wasserversorger sind sehr interessiert an einem empfindlichen und stabilen Detektor für das BTA, weil es einer der

konzentrationsmäßig wichtigsten Spurenstoffe aus dem Bereich der Industriechemikalien ist und, mit Einschränkungen, ein Indikator für die Änderung der Belastung des Rohwassers ist.

Für das Trinkwasser gilt in Deutschland ein gesundheitlicher Orientierungswert (GOW) von 3 µg/l (GOW 2021). Im Uferfiltrat sind wie oben aufgeführt im Mittel 0,5 µg/l BTA (Spannweite 0,1 bis 1,5 µg/l) und in der gleichen Größenordnung das 4-Methyl-1H-Benzotriazol zu erwarten. Insofern stimmen die Ergebnisse mit ca. 10 µg/l nach 50 min des plasmonischen Sensors zuversichtlich, diese Nachweisgrenzen noch zu erreichen. Es wird aktuell daran geforscht, sowohl die Resonanz von Oberflächenplasmonen und eingestrahltm Laserlicht als auch die Diffusion der BTA-Moleküle zu der plasmonischen Oberfläche zu optimieren, um die genannten Nachweisgrenzen in angemessener Zeit zu erreichen.

Referenzen

- Aleknavičienė, I. et al. (2022) 'Low-cost SERS substrate featuring laser-ablated amorphous nanostructure', *Applied Surface Science*, 571, 151248. doi.org: 10.1016/j.apsusc.2021.151248.
- BAFU – Bundesamt für Umwelt (2009): Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Erhältlich unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/mikroverunreinigungen-in-den-gewaessern.html> (Letzter Zugriff: 07 November 2021).
- Barnett, J. et al. (2017) 'Highly periodic Au nano-disc arrays for plasmon-resonant SERS structures on fused silica using UV-NIL based double-layer lift-off process', *Microelectronic Engineering*, 172, 45–48. doi: 10.1016/j.mee.2017.02.020.
- BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Wasserfakten im Überblick (2021): Wasserfakten im Überblick. Erhältlich unter: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/wasser-fakten-im-ueberblick/> (Letzter Zugriff: 07 November 2021).
- Christou, K. et al. (2010) 'Fabrication and characterization of homogeneous surface-enhanced Raman scattering substrates by single pulse UV-laser treatment of gold and silver films', *Langmuir*, 26, 18564–18569. doi: 10.1021/la103021g.
- ECHA – European Chemicals Agency (2021): Substance Infocard Benzotriazole. Erhältlich unter: <https://echa.europa.eu/de/substance-information/substanceinfo/100.002.177> (Letzter Zugriff: 07 November 2021).
- ERM – Europäisches Fließgewässermemorandum zur qualitativen Sicherung der Trinkwassergewinnung (2020). Erhältlich unter: <https://www.iawr.org/timm/download.php?file=data/docs/aktuell/european-river-memorandum-2020-de.pdf> (Letzter Zugriff: 07 November 2021).
- Fan, M., Andrade, G. F. and Brolo, A. G. (2011) 'A review on the fabrication of substrates for surface enhanced Raman spectroscopy and their applications in analytical chemistry', *Analytica Chimica Acta*, 693, 7–25. doi: 10.1016/j.aca.2011.03.002.
- Finšgar, M. and Milošev, I. (2010) 'Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review', *Corrosion Science* 52, 2737–2749. doi:10.1016/j.corsci.2010.05.002.
- Fleischmann, M., Hendra, P. J. and McQuillan, A. J. (1974) 'Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode', *Chemical Physics Letters*, 26, 163-166. doi: 10.1016/0009-2614(74)85388-1.
- Heeb, F. et al. (2012) 'Organic micropollutants in rivers downstream of the megacity Beijing: Sources and mass fluxes in a large-scale wastewater irrigation system', *Environmental Science & Technology*, 46(16), 8680–8688. doi: 10.1021/es301912q.
- Konradt, N. et al. (2021) 'Removal of trace organic contaminants by parallel operation of reverse osmosis and granular activated carbon for drinking water treatment', *Membranes*, 2021, 11, 33. doi:10.3390/membranes11010033.
- Mosier-Boss, P. A. (2017) 'Review of SERS substrates for chemical sensing', *Nanomaterials*, 7, 142. doi: 10.3390/nano7060142.
- Munz, N. A. et al. (2018) 'Internal concentrations in gammarids reveal increased risk of organic micropollutants in wastewater-impacted streams', *Environmental Science & Technology*, 52(18), 10347–10358. doi: 10.1021/acs.est.8b03632.
- Nie, S. and Emory, S.R. (1997) 'Probing Single Molecules and Single Nanoparticles by Surface-Enhanced Raman Scattering', *Science*, 275, 1102. doi: 10.1126/science.275.5303.1102.
- Perney, N. M. B. et al. (2006) 'Tuning localized plasmons in nanostructured substrates for surface-enhanced Raman scattering', *Optics Express*, 14, 847–857. doi: 10.1364/OPEX.14.000847.
- Schaltin, S. et al. (2012) 'High current density electrodeposition from silver complex ionic liquids', *Physical Chemistry Chemical Physics*, 14, 1706–1715. doi: 10.1039/C2CP22987K.
- Schlücker, S. (2014) 'Surface-enhanced Raman spectroscopy: Concepts and chemical applications', *Angewandte Chemie International Edition*, 53, 4756–4795. doi: 10.1002/anie.201205748.
- Schmidt, M. S., Hübner, J. and Boisen, A. (2012) 'Large area fabrication of leaning silicon nanopillars for surface enhanced Raman spectroscopy', *Advanced Materials*, 24(10), OP11–OP18. doi: 10.1002/adma.201103496.
- GOW – Umweltbundesamt (2019): Liste nach GOW bewerteten Stoffe. Erhältlich unter: <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/listenach-gowbewerteten-stoffe> (Letzter Zugriff: 07 November 2021).
- van der Hoek, J. P. et al. (2014) 'Drinking water treatment technologies in Europe: state of the art - challenges - research needs', *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 63.2, 124–129. doi: 10.2166/aqua.2013.007.
- Wackerbarth, H. et al. (2010a) 'Challenge of false alarms in nitroaromatic explosive detection - a detection device based on surface-enhanced Raman spectroscopy', *Applied Optics*, 49(23) 4367–4371. doi: 10.1364/AO.49.004367.
- Wackerbarth, H. et al. (2010b) 'Detection of explosives based on surface-enhanced Raman spectroscopy', *Applied Optics*, 49(23) 4362–4366. doi: 10.1364/AO.49.004362.
- Weiss, S. and Reemtsma, T. (2005) 'Determination of benzotriazole corrosion inhibitors from aqueous environmental samples by liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry', *Analytical Chemistry*, 77(22), 7415–7420, doi: 10.1021/ac051203e.
- Wieduwilt, F. et al. (2020) 'Evaluation of an on-site surface enhanced Raman scattering sensor for benzotriazole', *Scientific Reports*, 10, 8260. doi: 10.1038/s41598-020-65181-z

Korrespondenzadresse

Dr. Hainer Wackerbarth
Photonic Sensor Technology
Institut für Nanophotonik Göttingen e. V.
Hans-Adolf-Krebs-Weg 1
37077 Göttingen
Tel.: +49 (0)551/5035-58
Fax: +49 (0)551/5035-99
E-Mail: hainer.wackerbarth@ifnano.de