

# Wirkungsbezogene Analytik in der Trinkwassergewinnung

Im DVGW-Forschungsvorhaben „WBA-BeReit“ (Förder-Nr.: W 201518) wurde ein neuer Ansatz zur orientierenden Bewertung **organischer Spurenstoffe in Rohwasserressourcen** zur Trinkwassergewinnung und bei Aufbereitungsprozessen entwickelt. Zur Anwendung kam dabei die sogenannte Wirkungsbezogene Analytik (WBA), eine Kombination aus **Fraktionierung, Bioassay und chemischer Analytik**. Ziel des Vorhabens war es, die Leistungsfähigkeit der Wirkungsbezogenen Analytik und die Aussagekraft der Ergebnisse zu demonstrieren, um hierüber eine schnelle orientierende Einschätzung von Spurenstoffwirkungen zu ermöglichen.

von: Lena Stütz, Dr. Wolfgang Schulz, Dr. Rudi Winzenbacher (alle: Zweckverband Landeswasserversorgung), Dr. Oliver Happel, Beat Schmutz & Dr. Marco Scheurer (alle: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser)

Die Analytik ist heute zwar in der Lage, eine Vielzahl organischer Spurenstoffe in einer Wasserprobe zu detektieren, eine sichere Identifizierung aller detektierten Stoffe und darüber hinaus eine Beurteilung deren toxikologischer Relevanz ist derzeit allerdings nicht möglich [1]. Da für Wasserversorger – neben der hygienischen Sicherheit – die toxikologische Unbedenklichkeit des abgegebenen Wassers höchste Priorität hat, werden Analyse-

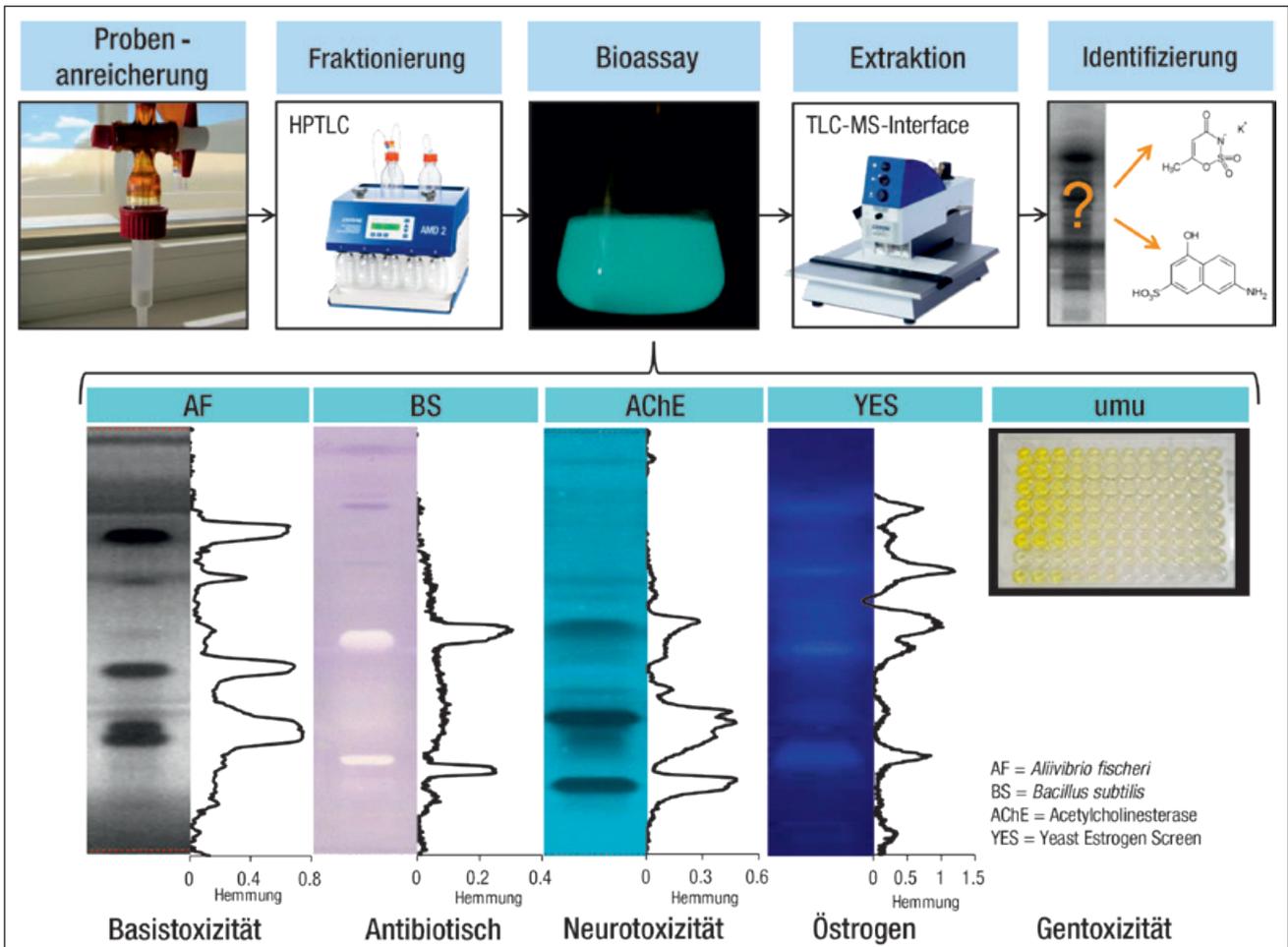


Abb. 1: Die Methodik der WBA/HPTLC im Überblick

Quelle: LW

verfahren zur Ermittlung der Wirkungen der im Wasser vorliegenden Spurenstoffe benötigt. Hierfür kann die Wirkungsbezogene Analytik angewandt werden [2].

Ein Vorteil der WBA besteht darin, dass aufgrund der Fraktionierung der Proben nicht die Summenwirkung aller Substanzen erfasst wird, sondern einzelne Fraktionen auf ihre Wirkung hin untersucht werden. Durch den Einsatz der Hochleistungs-Dünnschichtchromatografie (HPTLC) als Fraktionierungsmethode kann der Bioassay direkt auf der HPTLC-Platte durchgeführt werden [3,4]. Die Zuordnung der Wirkung zu einer Fraktion der Probe kann dabei den Aufwand für die Suche nach der wirkenden Substanz reduzieren.

Über den Vergleich von Wirkmustern verschiedener Proben, die sich aus dem Verlauf der Wirkung über die Fraktionen auf der Platte abzeichnen, können die Prozesse der Trinkwassergewinnung weitergehend bewertet werden. Die WBA ermöglicht es, Spurenstoffe und deren Transformationsprodukte nach ihrer Wirkung anstatt ihrer Konzentration in Wasserproben zu beurteilen.

### Struktur und Ziele des Forschungsprojekts „WBA-BeReit“

Das DVGW-Forschungsvorhaben „WBA-BeReit“ wurde vom Zweckverband Landeswasserversorgung und dem TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser bearbeitet. Die wissenschaftliche Begleitung des Projekts übernahmen Spezialisten aus interessierten Wasserversorgungsunternehmen sowie das Umweltbundesamt (UBA).

Wesentliches Projektziel war es, die Möglichkeiten der WBA und die Aussagekraft der Ergebnisse zur Beurteilung organischer Spurenstoffe in Rohwässern zur Trinkwassergewinnung aufzuzeigen. Dabei wurde untersucht, inwieweit die WBA zur Bewertung des Verhaltens dieser Stoffe bei

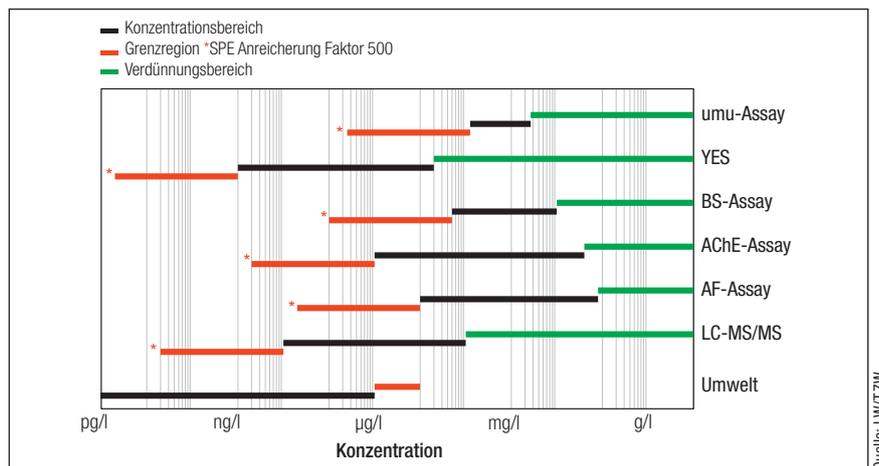


Abb. 2: Konzentrationsbereich organischer Spurenstoffe in der Umwelt, im Vergleich zu den Arbeitsbereichen der LC-MS/MS und der Bioassays

Prozessen der Trinkwasseraufbereitung genutzt werden kann. Insgesamt sollte gezeigt werden, dass die WBA in Verbindung mit der HPTLC (WBA/HPTLC) eine Methode der Wahl darstellt, die die chemische Analytik um eine zeitnahe Aussage zur Wirkung erweitern und damit einen Beitrag zur sicheren Risikobewertung leisten kann. Zur möglichst umfassenden toxikologischen Beurteilung des Trinkwassers wurden fünf Endpunkte angewandt, um eine gewisse Vielfalt an Wirkungen von organischen Spurenstoffen und Transformationsprodukten abzudecken.

### Methodik der WBA/HPTLC

Die Methodik der WBA/HPTLC gliedert sich in mehrere Teilschritte (Abb. 1): Zuerst wird eine Probenanreicherung durchgeführt, an die sich die Auftragung der Probenextrakte und ihre Trennung mittels HPTLC anschließt. Nach der Trennung der Proben wird der Bioassay angewandt, wobei im Forschungsprojekt insgesamt fünf Endpunkte zum Einsatz kamen:

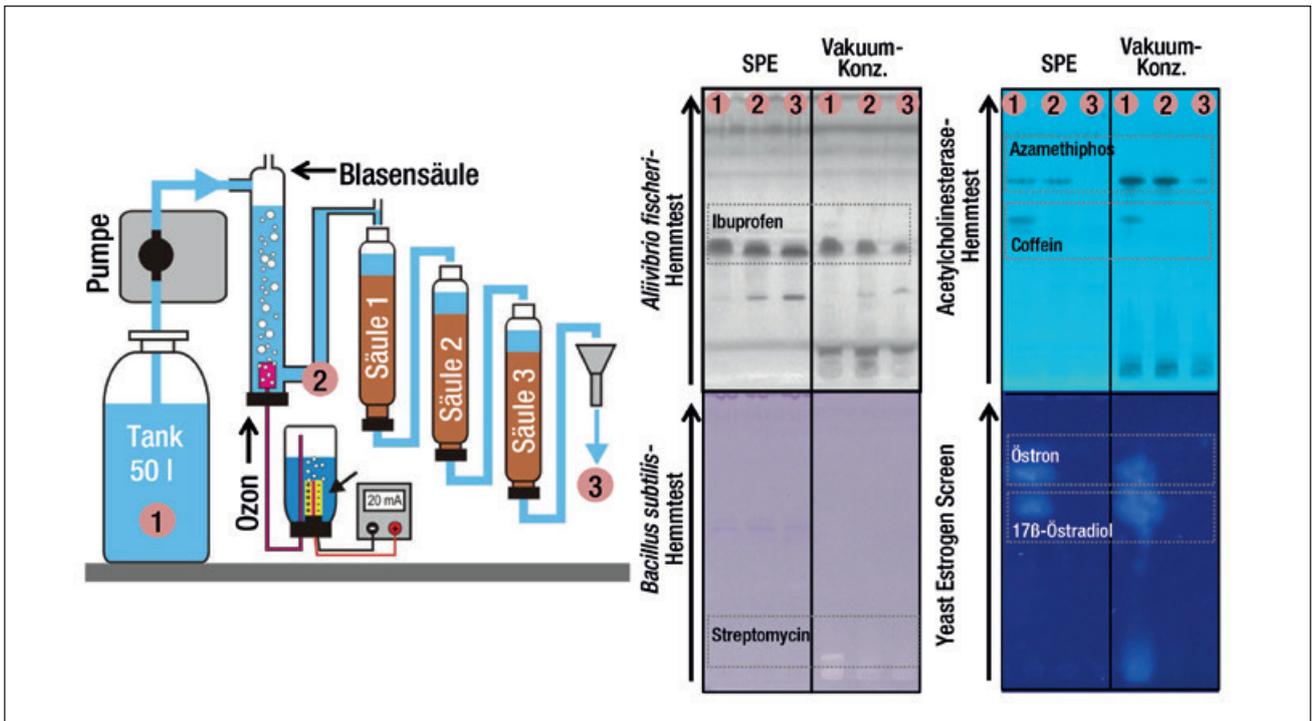
- Umu-Assay, Gentoxizität
- Yeast Estrogen Screen (YES), östrogene Effekte
- Acetylcholinesterase-Hemmtest (AChE), Neurotoxizität
- *Bacillus subtilis*-Hemmtest (BS), antibiotische Effekte
- *Aliivibrio fischeri*-Hemmtest (AF), Basistoxizität

Nach der Wirkungsdetektion können wirkende Zonen mit einem TLC-MS-Interface von der HPTLC-Platte extrahiert und in ein hochauflösendes Massenspektrometer (HRMS) überführt werden. Ziel ist es, die wirkungsauslösende Substanz zu identifizieren. Alle Bioassays mit Ausnahme des umu-Assays wurden direkt auf der HPTLC-Platte durchgeführt; die Durchführung des umu-Assays erfolgte für die angereicherte Gesamtprobe und für einzelne Fraktionen nach DIN 38415-T3 in der Mikrotiterplatte.

### Vergleich verschiedener Anreicherungsverfahren für die WBA/HPTLC

Bisher bekannte organische Spurenstoffe treten typischerweise im Nanogramm-pro-Liter (ng/l)-Bereich in der aquatischen Umwelt auf, können vereinzelt aber auch den Mikrogramm-pro-Liter (µg/l)-Bereich erreichen. Während die chemische Analytik mittels Flüssigkeitschromatografie mit Tandem-Massenspektrometrie (HPLC-MS/MS) diese Substanzen anreicherungsfrei noch bis in den ng/l-Bereich detektieren kann, befindet sich der Arbeitsbereich der im Projekt angewandten Bioassays eher im µg/l- bis mg/l-Bereich (Ausnahme YES: ng/l- bis µg/l-Bereich) (Abb. 2). Aus diesem Grund ist eine Anreicherung der mit der WBA zu untersuchenden Proben notwendig.

Im Projekt wurden die Wiederfindungen mehrerer Anreicherungsverfahren



Quelle: TZWL/W

Abb. 3: Schematischer Aufbau der KOLa-Anlage, Säule 1 bis 3 mit Quarzsand (0,7 bis 1,25 mm) gefüllt (links); wirkungsbezogene Untersuchung von dotiertem Karlsruher Trinkwasser nach verschiedenen Anreicherungsverfahren (1: Probe aus dem Tank der KOLa-Anlage, 2: Probe nach der Ozon-Blasensäule, 3: Probe nach Sandsäule 3) (rechts)

anhand verschiedener Stoffgruppen analytisch charakterisiert und deren Kompatibilität mit der WBA/HPTLC untersucht. Ausgehend von den Verfahren Festphasenextraktion (solid-phase-extraction, SPE), Flüssig-Flüssig-Extraktion (liquid-liquid-extraction, LLE), Gefriertrocknung und Vakuum-Konzentration erwiesen sich die SPE und die Vakuum-Konzentration als am besten geeignet: Während die SPE für unpolare und mäßig-polare Verbindungen gute Wiederfindungen bei hohen Anreicherungs-faktoren (standardmäßig Faktor 1.000) erzielt, gehen ionische Verbindungen oft verloren. Als Ergänzung konnten durch den Einsatz der Vakuum-Konzentration für alle nicht-flüchtigen Verbindungen sehr gute Wiederfindungen erreicht werden. Der begrenzte Anreicherungs-faktor der Vakuum-Konzentration (Faktor 50) sowie die durch die Anreicherung erhöhte Salzfracht in Proben erwiesen sich für die WBA/HPTLC jedoch als nachteilig. Zur Erfassung eines möglichst breiten Substanzspektrums wurde dennoch die prinzipielle Anwendbarkeit der Vakuum-Konzentration zur Untersuchung realer Wasserproben mittels WBA/HPTLC untersucht. Es ist

letztlich besser, ionische Verbindungen mit einem geringen Anreicherungs-faktor und mit einigen störenden Effekten durch die Salzfracht prüfen zu können, als sie durch alleiniges Anwenden der SPE-Methode nicht zu beachten.

### WBA/HPTLC bei Aufbereitungsprozessen im Labormaßstab

Im Prozess von Aufbereitungs- und Desinfektionsverfahren können organische Spurenstoffe transformiert werden, häufig – aber nicht immer – verbunden mit einem Rückgang ihrer biologischen Aktivität [5]. Die Identifizierung aller Transformationsprodukte ist aufgrund der geringen Konzentrationen schwierig und aufwendig. Durch Anwendung der WBA/HPTLC kann nach Art und Stärke der Wirkung eine Prioritätenliste für die Identifizierung erstellt werden. Zudem zeigt sich durch den Vergleich von Roh- und Trinkwasser das Potenzial eines Aufbereitungsprozesses, Wirkungen zu entfernen. Im Projekt wurde konkret untersucht, inwieweit häufig auftretende Spurenstoffe bei der Behandlung mit Ozon und Chlor oder UV-Behandlung wirkende Transformationsprodukte bilden. Da-

für wurden die Spurenstoffe Metformin und Acesulfam ausgewählt, die in Oberflächenwässern bis in den µg/l-Bereich vorkommen können [6–8].

Vor allem beim Einsatz von Hypochlorit traten wirkende Transformationsprodukte auf. Es konnten bei Metformin in vier der fünf Bioassays Wirkungen in mehreren Fraktionen nach Zusatz von Hypochlorit detektiert werden. So konnten dem gelben Transformationsprodukt „Yellow“ (zyklisches dehydro-1,2,4-triazol-Derivat) der Substanz Metformin Wirkungen auf AF, BS, AChE und beim umu-Assay nachgewiesen werden [9,10]. Die gentoxische Wirkung wurde vom Umweltbundesamt mit dem Ames-Assay bestätigt, hingegen konnte im Mikrokern-Assay keine gentoxische Wirkung festgestellt werden. Dies kann durch den Wechsel von der bakteriellen Zellebene beim umu- und Ames-Assay auf eine humane Zelllinie im Mikrokern-Assay erklärt werden, was in der Toxikologie immer wieder beobachtet wird. Bei der Ozonung von Acesulfam trat beim Einsatz sehr hoher Substanzkonzentrationen (5 g/l) ein instabiles gentoxisches Transformationsprodukt auf. Eine An-

wendung von UV-Licht auf Acesulfam zeigte keinerlei Effekte in der WBA/HPTLC. Die strahlungsabhängige Umsetzung des Acesulfams zu Transformationsprodukten wurde mittels Ionenchromatografie mit Leitfähigkeitsdetektion bestätigt.

Mit der am TZW entwickelten KOLA-Anlage (kontinuierliche Ozonung mit Langsandsandfiltration) (Abb. 3) können vielfältige Prozessvarianten im Laborversuch nachgestellt werden. Die KOLA-Anlage erlaubt realitätsnahe Laborversuche, die die Kombination aus oxidativer Aufbereitungsstufe (Ozonung) und nachgeschalteter biologischer Stufe (Langsandsandfiltration) einer Wasseraufbereitungsanlage abbilden [11,12]. Durch Variation einzelner Parameter (Ozondosis, Wassermatrix, Verweilzeit in biologisch aktiven Sandsäulen, zusätzliche adsorptive Stufen) kann ein breites Anwendungsfeld mit überschaubarem Aufwand abgedeckt werden. Ziel der KOLA-Arbeiten im WBA-BeReit-Projekt war es, erstmalig auch die WBA/HPTLC mit in die

Untersuchungen einzubeziehen und so direkt Wirkungsveränderungen während des Aufbereitungsprozesses zu untersuchen.

Arbeiten mit einer Testmischung aus wirkenden Substanzen (Ibuprofen, Azamethiphos, Coffein, Streptomycin, Östron, 17 $\beta$ -Östradiol) zeigten die prinzipielle Anwendbarkeit der Prozesskette aus KOLA-Anlage, Probenanreicherungen und WBA/HPTLC (Abb. 3 rechts). Vor allem zeigte die Untersuchung ein umfassendes Bild, wie unterschiedlich sich Wirkungen während der Aufbereitung verhalten können. Der AF-Hemmtest zeigte, dass die Wirkung von Ibuprofen durch die KOLA-Anlage nicht oder nur zu geringen Teilen verringert werden konnte. Es trat zudem nach der Ozonung eine neue basistoxische Wirkung auf, die auch nach der anschließenden Sandfiltration bestehen blieb. Streptomycin konnte im BS-Hemmtest lediglich mit der Vakuum-Konzentration angereichert werden und zeigte in der Ausgangsprobe eine Wirkung, die nach der Ozonung

nicht mehr auftrat. Die Wirkung von Azamethiphos im AChE-Hemmtest konnte erst durch den Sandfilter reduziert bzw. eliminiert werden. Die Wirkung von Coffein im AChE-Hemmtest wurde bereits durch die Ozonung vollständig entfernt. Dasselbe zeigte sich auch beim YES für die Wirkungen von Östron und 17 $\beta$ -Östradiol. Nach der Ozonung konnten keine östrogenen Effekte mehr detektiert werden.

### Untersuchung verschiedener Roh- und Trinkwasserproben mit WBA/HPTLC

Im Projekt wurden insgesamt zehn Roh- und Trinkwasserprobenpaare von acht deutschen Wasserversorgern untersucht. Die Chromatografie der mit Vakuum-Konzentration angereicherten Proben wurde durch die mitangereicherte Salzfracht gestört, sodass die Ergebnisse nicht bewertet werden konnten. Eventuell bleibt der bevorzugte Anwendungsbereich der Vakuum-Konzentration auf die genannte systematische Grundsatzuntersuchungen beschränkt.

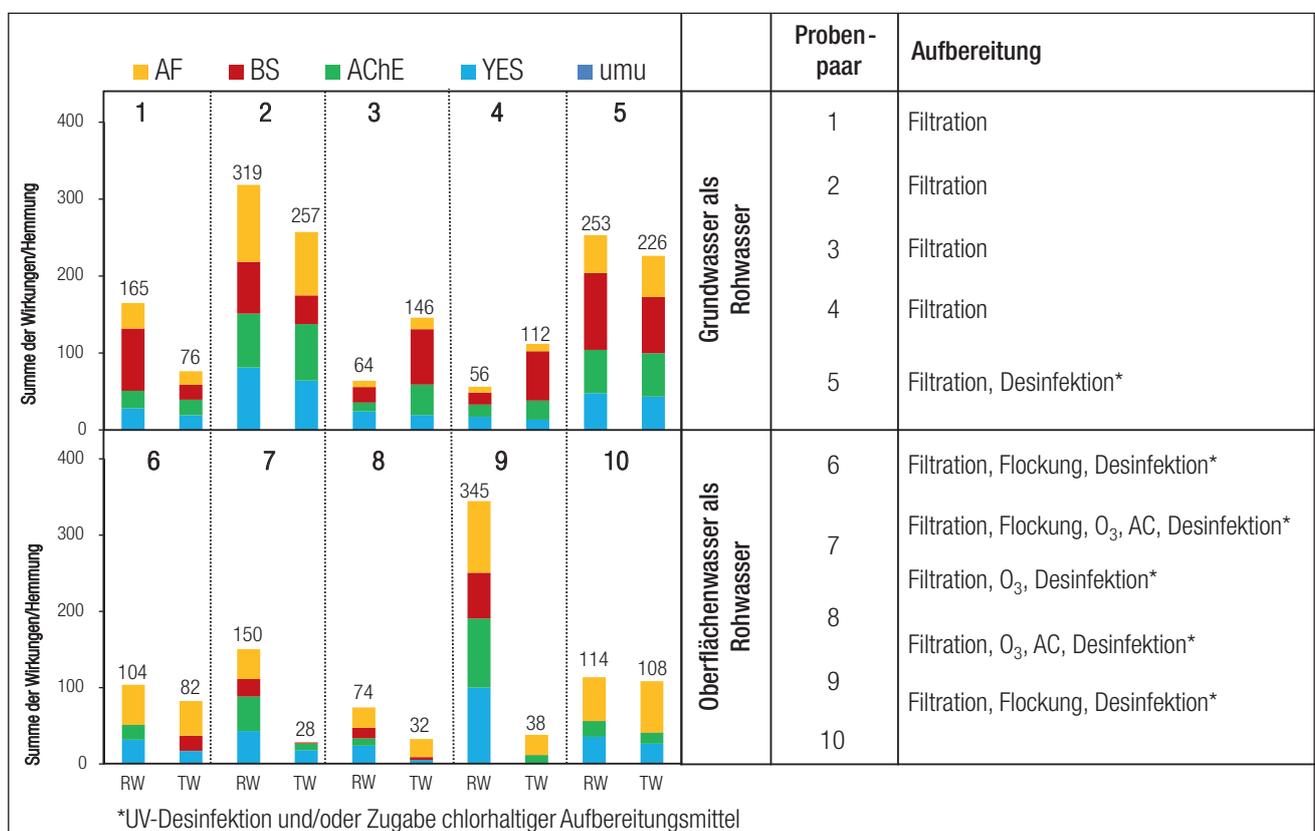


Abb. 4: Überblick der Summenwirkungen der untersuchten Roh- und Trinkwässer sowie die angewandten Aufbereitungstechniken (RW: Rohwasser, TW: Trinkwasser, O<sub>3</sub>: Ozonung, AC: Aktivkohlefiltration)

In keinem der untersuchten SPE-Extrakte trat ein gentoxischer Effekt beim umu-Assay auf. Mit dem YES wurden östrogene Wirkungen in den Rohwässern, jedoch teilweise schwach auch in den Trinkwässern, detektiert. Die Oberflächenwässer wiesen tendenziell stärkere östrogene Effekte als die Grundwässer auf. Dies konnte durch eine separate quantitative Analyse (HPLC-MS/MS) von fünf Östrogenen bestätigt werden. Es zeigte sich, dass durch eine aufwendigere Aufbereitung (wie beispielsweise Ozonung, Schnellfiltration, Aktivkohlefiltration und Desinfektion) östrogene Effekte eher reduziert werden als bei ausschließlichen Einsatz einer Schnellfiltration. Beim AChE-Hemmtest zeigten die Proben ähnliche Wirkmuster mit unterschiedlichen Intensitäten, wobei wiederum mehr Wirkungen bei Aufbereitungen mit mehreren Stufen entfernt werden konnten. Schwache antibiotische Effekte traten in nahezu allen untersuchten Probenextrakten auf. Vor allem in den Oberflächenwässern traten deutliche Hemmbanden auf, wobei sich das Muster über unterschiedliche Oberflächengewässer hinweg wiederholte. Nach der Extraktion wurden die wirkenden Zonen mittels Non-Target-Screening (NTS) analysiert, wobei mehrere Substanzen identifiziert werden konnten; zwei davon (Clindamycin-sulfoxid und Candeseartan) wiesen auch eine antibakterielle Wirkung beim BS-Hemmtest auf. Mit der vorliegenden Konzentration der beiden Sub-

stanzen konnte die Wirkung allerdings nicht erklärt werden, sodass weitere, bislang unbekannte Substanzen in der wirkenden Bande vorliegen müssen. Beim AF-Hemmtest ergaben sich vor allem im mittleren Retardationsbereich unterschiedliche Hemmmuster der Proben.

**Wirkungsbezogene Prozessbeschreibung und Vergleich mit Non-Target-Screening**

Zur übersichtlichen Beschreibung der Trinkwasseraufbereitung wurden die Wirkungen der Fraktionen für jeden der fünf Bioassays getrennt aufsummiert und normiert. So konnte die Wirkung einer Probe durch fünf Zahlenwerte beschrieben werden (Abb. 4). Es zeigte sich, dass Trinkwässer aus Oberflächenwässern insgesamt weniger Wirkungen aufwiesen als Trinkwässer, die aus Grundwasser gewonnen wurden. Dies könnte durch die Aufbereitung mit mehreren Aufbereitungsstufen bei den Oberflächenwässern erklärt werden.

Zusätzlich zur wirkungsbezogenen Untersuchung wurden die Proben mit der HPLC mit hochauflösender Massenspektrometrie (HRMS) analysiert und mittels Non-Target-Screening (NTS) des Roh- und Trinkwassers eine Prozessbeschreibung durchgeführt. Bei der Non-Target-Prozessbeschreibung [13] werden die Signale nach dem Verhältnis ihrer Signalintensität (fold

change,  $f_c$ ) vor und nach dem Behandlungsprozess (hier Rohwasser zu Trinkwasser) in fünf Kategorien eingeteilt:

$$f_c = \frac{\text{Signalintensität}_{TW}}{\text{Signalintensität}_{RW}}$$

- Elimination (dunkelgrün):  $f_c < 0,2$
- Teilelimination (hellgrün):  $0,2 \leq f_c < 0,5$
- Konstanz (grau):  $0,5 \leq f_c \leq 2,0$
- Zunahme (gelb):  $2,0 < f_c \leq 5,0$
- Neubildung (rot):  $f_c > 5,0$

Die untersuchten Roh- und Trinkwässer zeigten ein ähnliches Verhalten in den Ergebnissen der beiden Analyseverfahren. Nahmen die Wirkungen, wie in Probenpaar 7 (Abb. 5), über die Aufbereitung deutlich ab, so spiegelte sich dies auch bei der Non-Target-Prozessbeschreibung mit einer großen Anzahl der Signalverhältnisse in der Kategorie „Elimination bzw. Teilelimination“ wider. Bei Probenpaaren mit nur wenig Wirkungsreduktion von Roh- zu Trinkwasser konnte auch eine große Anzahl der Signale im Bereich „Konstanz“ detektiert werden.

Das Verhältnis der Summenwirkung von Trink- zu Rohwasser stellt eine Maßzahl zur Beschreibung der Effektivität der Aufbereitung hinsichtlich einer Wirkungsentfernung dar. Genauso kann im NTS das Verhältnis der Anzahl detektierbarer Signale in Trink- und Rohwasser die Effektivität der Aufbereitung hinsichtlich der Entfernung von Substanzen beschreiben. Bei der

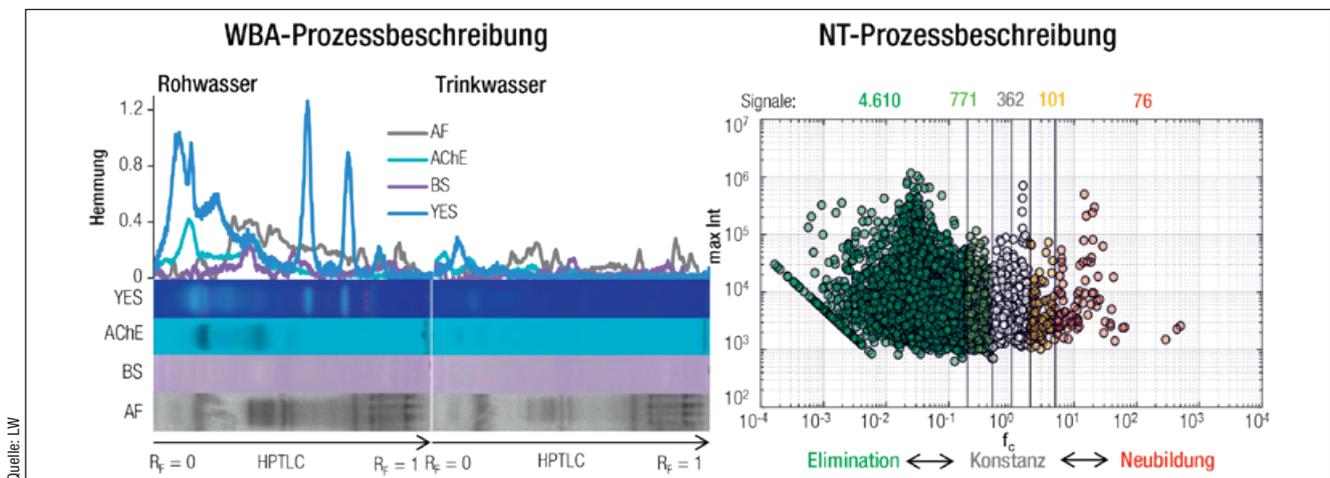


Abb. 5: Vergleich der Prozessbeschreibung von Roh- zu Trinkwasser (Probenpaar 7) mittels WBA und NTS

Gegenüberstellung dieser beiden Maßzahlen zeigte sich, dass Aufbereitungen mit Ozonung und/oder Aktivkohle im Rohwasser gemessene Wirkungen und gleichermaßen auch NTS-Signale tendenziell am besten vermindern.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Forschungsprojekt WBA-BeReit wurden die Möglichkeiten der WBA und die Aussagekraft der Ergebnisse zur Beurteilung organischer Spurenstoffe bei der Trinkwassergewinnung aufgezeigt. Durch den Einsatz einer SPE-Anreicherungs-methode ließen sich organische Spurenstoffe mit der WBA in Realwässern detektieren. Zur wirkungsbezogenen Detektion auch der ionischen Verbindungen wurde eine Vakuum-Konzentration eingesetzt, die aber Probleme mit der Kompatibilität zur WBA zeigte.

Bei der gezielten Untersuchung des Verhaltens von Substanzen bei der Trinkwassergewinnung im Labormaßstab konnten Transformationsprodukte aufgrund ihrer Wirkung priorisiert und teilweise identifiziert werden. Der Einsatz der KOLa-Anlage kann das Verhalten organischer Spurenstoffe bei der Trinkwassergewinnung simulieren. Die Untersuchung von Proben aus der KOLa-Anlage mittels WBA ermöglichte eine Beurteilung des Verhaltens zugesetzter Spurenstoffe.

Die WBA konnte bei der Untersuchung von Roh- und Trinkwässern routinemäßig zum Monitoring und zur vorläufigen Risikobewertung eingesetzt werden, wobei die jeweils unterschiedlichen Wirkungen („Wirkspektren“) von Spurenstoffen charakterisiert werden konnten. Die Ergebnisse zeigten deutliche Unterschiede in den Wirkungen in Abhängigkeit von der eingesetzten Rohwasserart und den angewand-

ten Aufbereitungsverfahren. Dieser Informationsgewinn durch die Prozessbeschreibung mittels WBA eröffnet neue Möglichkeiten in der Qualitätssicherung des Trinkwassers. Zudem konnten die Ergebnisse der WBA mit den Ergebnissen der chemischen Analytik (Non-Target-Screening) bei den bisher untersuchten Proben sehr gut korreliert werden.

Um die Grundlage der vorliegenden Ergebnisse zu festigen, soll zukünftig eine systematische Untersuchung von Aufbereitungsprozessen mit der WBA erfolgen; dies soll Gegenstand eines Folgeprojekts sein. Schon jetzt ist klar, dass die WBA als effektives Werkzeug für eine Prozessbeschreibung hinsichtlich des Verhaltens von Wirkungen bei Aufbereitungsprozessen bereit ist und einen wertvollen Beitrag zum Risikomanagement bei der Trinkwassergewinnung leisten kann.

### Danksagung

Die Autoren danken dem DVGW für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens „WBA-BeReit“ (Förder-Nr.: W 201518). ■

#### Literatur

- [1] J. Hollender, E.L. Schymanski, H.P. Singer, et al., "Nontarget Screening with High Resolution Mass Spectrometry in the Environment: Ready to Go?" *Environ. Sci. Technol.* 51 (2017) p. 11505-11512.
- [2] W. Brack, S. Ait-Aïssa, R.M. Burgess, et al., "Effect-directed analysis supporting monitoring of aquatic environments - An in-depth overview" *Sci. Total Environ.* 544 (2016) p. 1073-1118.
- [3] I. Choma, W. Jesionek, in: *Instrumental Thin-Layer Chromatography, "Effects-directed biological detection: Bioautography"* Elsevier, Amsterdam (2015) p. 279-312.
- [4] S.C. Weiss, N. Egetenmeyer, W. Schulz, in: *In vitro Environmental Toxicology - Concepts, Application and Assessment, "Coupling of In Vitro Bioassays with Planar Chromatography in Effect-Directed Analysis"* Springer, Berlin, Heidelberg (2016) p. 187-224.
- [5] M.C. Dodd, H.-P.E. Kohler, U. von Gunten, "Oxidation of Antibacterial Compounds by Ozone and Hydroxyl Radical: Elimination of Biological Activity during Aqueous Ozonation Processes" *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009) p. 2498-2504.
- [6] LUBW, "Grundwasserüberwachungsprogramm - Ergebnisse der Beprobung 2014", LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2015).

- [7] M. Scheurer, A. Michel, H.-J. Brauch, et al., "Occurrence and fate of the antidiabetic drug metformin and its metabolite guanyleurea in the environment and during drinking water treatment" *Water Res.* 46 (2012) p. 4790-4802.
- [8] M. Scheurer, H.-J. Brauch, F. Lange, "Analysis and occurrence of seven artificial sweeteners in German waste water and surface water and in soil aquifer treatment (SAT)" *Anal. Bioanal. Chem.* 394 (2009) p. 1585-1594.
- [9] D. Armbruster, O. Happel, M. Scheurer, et al., in: *Disinfection By-products in Drinking Water, "Fate of the antidiabetic drug metformin during chlorine disinfection of water"* RSC Publishing, The Royal Society of Chemistry (2015) p. 81-87.
- [10] L. Stütz, P. Leitner, W. Schulz, et al., "Identification of genotoxic transformation products by effect-directed analysis with high-performance thin-layer chromatography and non-target screening" *J. Planar Chromatogr.-Mod. TLC* 32 (2019) p. 173-182.
- [11] G.A. Zoumpoulis, M. Scheurer, H.-J. Brauch, et al., "COMBI, continuous ozonation merged with biofiltration to study oxidative and microbial transformation of trace organic contaminants" *Environ. Sci.: Water Res. Technol.* 5 (2019) p. 552-563.
- [12] O. Happel, P. Brendel, B. Schmutz, et al., "KOLa - Kontinuierliche Ozonung mit Langsandsandfiltration" *WASSER, Bamberg* (2016) p. 433-438.
- [13] T. Bader, W. Schulz, K. Kümmerer, et al., "LC-HRMS Data Processing Strategy for Reliable Sample Comparison Exemplified by the Assessment of Water Treatment Processes" *Anal. Chem.* 89 (2017) p. 13219-13226.

### Die Autoren

**Lena Stütz** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachbereich Bioanalytische Chemie beim Zweckverband Landeswasserversorgung.

**Dr. Wolfgang Schulz** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Betriebs- und Forschungslabor des Zweckverbandes Landeswasserversorgung.

**Dr. Rudi Winzenbacher** ist Abteilungsleiter des Betriebs- und Forschungslabors des Zweckverbandes Landeswasserversorgung.

**Dr. Oliver Happel** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Wasserchemische Forschung am TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe.

**Beat Schmutz** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe.

**Dr. Marco Scheurer** ist Leiter Abteilung Wasserchemische Forschung am TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in Karlsruhe.

#### Kontakt:

Dr. Wolfgang Schulz  
Zweckverband Landeswasserversorgung  
Am Spitzigen Berg 1  
89129 Langenau  
Tel.: 07345 9638-2291  
E-Mail: schulz.w@lw-online.de  
Internet: www.lw-online.de



Der Abschlussbericht des Projekts kann auf der DVGW-Homepage unter [www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-wba-bereit](http://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-wba-bereit) oder über den Direktlink im E-Paper eingesehen werden.