

Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser im Jahr 2020

DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT, Forschungsstelle für Brandschutztechnik und TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe, Teil 3

Harald Horn, Thomas Kolb, Dimosthenis Trimis und Josef Klinger

Tätigkeitsbericht, Forschung und Lehre, Ausbildung, Weiterbildung

Dieser jährlich erscheinende Bericht gibt einen Überblick über die Entwicklungen und Aktivitäten am Engler-Bunte-Institut, der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sowie der Forschungsstelle für Brandschutztechnik. Darüber hinaus wird über das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser berichtet. Wie es auch in den vergangenen Jahren gehandhabt wurde, erscheinen die gasspezifischen Beiträge in gwf Gas + Energie (Teil 1: Ausgabe 6/2021, EBI ceb; Teil 2: Ausgabe 7-8/2021, EBI vbt) und die wasserspezifischen Beiträge in gwf-Wasser | Abwasser (Teil 3: Ausgabe 6/2021, EBI WCT; Teil 4: Ausgabe 7-8/2021, TZW). Typischerweise steht die Entwicklung der verschiedenen Einrichtungen mit Beiträgen aus der universitären Lehre, der Aus- und Weiterbildung, über Forschungs- und Entwicklungsprojekte, über Beratung und Firmenkontakte im Fokus. In diesem Bericht wird aber unstrittig auch immer wieder die Corona-Pandemie thematisiert werden, da sie sehr tief in die Organisation der Forschungsarbeiten und vor allem der Lehre eingegriffen hat.

The annual report aims at giving an overview of developments and activities of the Engler-Bunte-Institut, the DVGW-Research Center, the Research Center of Fire Protection Technology, and the TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser (German Water Center). As every year, the gas related parts can be found in gwf Gas + Energie (part 1: issue 6/2021, EBI ceb; part 2: issue 7-8/2021, EBI vbt) and the water related parts in gwf-Wasser | Abwasser (part 3: issue 6/2021, EBI WCT; part 4: issue 7-8/2021, TZW). The report typically highlights academic teaching, courses and advanced education, and focuses on scientific research and development projects, on consulting and contacts to business companies as well as on other activities. However, the current annual report also addresses the effects of the corona pandemic, which does significantly influence the daily work in research, consulting and of course teaching.

Zur Geschichte und zum Umfeld

Das Engler-Bunte-Institut am Karlsruher Institut für Technologie ist hervorgegangen aus der 1907 gegründeten „Lehr- und Versuchsgasanstalt“ und führt seit 1971 den Namen „Engler-Bunte-Institut“. Die enge Verbindung zu praxisrelevanten Fragestellungen des Gas- und Wasserfaches äußert sich darin, dass die jeweiligen Teilinstitutsleiter, gegenwärtig „Chemische Energieträger – Brennstofftechnologie“, „Verbrennungstechnik“ und „Wasserchemie und Wassertechnologie“, auch in Personalunion Leiter der entsprechenden Bereiche der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT sind.

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist nach dem Zusammenschluss des Forschungszentrums Karlsruhe und der Universität Karlsruhe im Jahre 2009 inzwischen eine feste Größe in der internationalen Forschungslandschaft. Dies gelingt mit dem hohen Anspruch, sich selbst als die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft zu definieren. Im KIT wird seit dem Jahre 2015 ein übergeordneter Strategieprozess (Dachstrategie KIT 2025) umgesetzt, der als Konsequenz des zuvor erarbeiteten Leitbilds des KIT angesehen werden kann. Das KIT hat sich 2015 zum Ziel gesetzt, maßgeblich Beiträge zu den Feldern Energie, Mobilität und Information zu leisten. 2019 konnte das KIT im

Rahmen der Exzellenzstrategie von Bund und Ländern mit dem Leitmotiv „Living the Change“ in den Kreis der Exzellenzuniversitäten in Deutschland zurückkehren.

Unstrittig ist das Engler-Bunte-Institut (EBI) ein wichtiger Baustein der Strategie, indem es das KIT-Leitbild mit relevanten Forschungsfragen/-projekten und der Ausbildung des ingenieur- und naturwissenschaftlichen Nachwuchses bespielt. So sieht das KIT sich „in der Verantwortung, durch Forschung und Lehre Beiträge zur nachhaltigen Lösung großer Aufgaben von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu leisten“. „Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaften sowie Geistes- und Sozialwissenschaften bilden den Fächerkanon des KIT. Mit hoher interdisziplinärer Wechselwirkung erschließen sie Themenstellungen von den Grundlagen bis zur Anwendung, von der Entwicklung neuer Technologien bis zur Reflexion des Verhältnisses von Mensch und Technik. Um dies bestmöglich zu erreichen, erstreckt sich die Forschung am KIT über die gesamte Bandbreite: von der Grundlagenforschung bis zu industrienaher, angewandter Forschung, von kleinen Forschungsvorhaben bis zu langfristigen Großforschungsprojekten.“

Das Engler-Bunte-Institut am KIT zusammen mit der angeschlossenen DVGW-Forschungsstelle trägt seit Jahren mit einer sehr hohen internationalen Sichtbarkeit im Rahmen von Forschungs- und Lehrtätigkeit zu den Themenfeldern Energie und Umwelt wesentlich zur Umsetzung des KIT-Leitbilds bei. Diese Zusammenarbeit wurde vom

Landesrechnungshof 2020 nach einer Prüfung des Engler-Bunte-Instituts in 2019 positiv adressiert. Die Organisation des Engler-Bunte-Instituts ist in **Bild 0.1** dargestellt. Seit 2020 ist Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia die Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle des Engler-Bunte-Instituts.

Am Tag der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts (als online-Veranstaltung am 10. Juni 2020) wurde auf der Kuratoriumssitzung des Engler-Bunte-Instituts und in der Mitgliederversammlung einem neuen Logo zugestimmt (siehe **Bild 0.2**).

Darüber hinaus ging 2020 der seit 2019 von der Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts vergebene Preis für die beste Masterarbeit an Herrn Fabian Hardock, der bei seiner Arbeit zu Rußpartikeln (Entwicklung und Validierung eines HRTEM-Bildauswertungsalgorithmus zur nanostrukturellen Analyse von Rußpartikeln) von Prof. Henning Bockhorn betreut wurde.

Nach dem Bezug der neuen Gebäude (40.50 und 40.51) des Engler-Bunte-Instituts wurde im letzten Jahr auch die Kunst am Bau abgeschlossen. Es handelt sich bei dem Objekt um einen länglichen Quader aus Eisen (Grauguss), der in zwei Teile gesprengt wurde, die nun vor dem Gebäude 40.51 installiert sind (siehe **Bild 0.3**). Ein Video der Herstellung des Quaders und der anschließenden Sprengung kann im Internetauftritt des Künstlers Nino Maaskola gefunden werden (<http://nino-maaskola.de/40-tonnen/>).

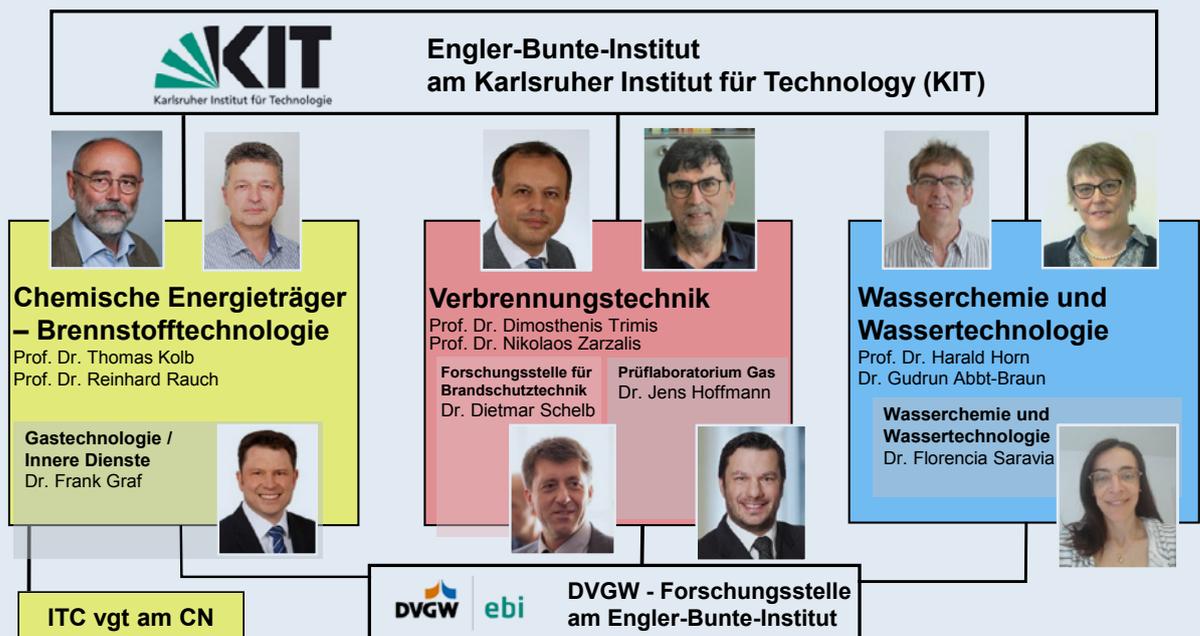


Bild 0.1: Aktuelle Organisationsstruktur des Engler-Bunte-Instituts und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut. Frau Dr.-Ing. Florencia Saravia ist seit 2020 Leiterin des Bereichs Wasserchemie und Wassertechnologie an der DVGW-Forschungsstelle.

Forschung und Beratung am Engler-Bunte-Institut und am TZW

Das Aufkommen von Forschungsprojekten aus dem Gas- und Verbrennungsfach sowie dem Wasserfach ist nach wie vor sehr hoch. Die Mittel kommen dabei vom Land BW (Ministerien, BW-Stiftung), dem Bund (DFG, BMBF, BMWi, DBU, HGF) und der Europäischen Union. Die einzelnen Forschungsprojekte werden in den Berichten der Teilinstitute detaillierter dargestellt. Die aus der Praxis entstehenden Fragestellungen werden vor allem in der DVGW-Forschungsstelle, der Abteilung Gastechologie, dem Prüflaboratorium Gas und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik bearbeitet.

Das TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser entwickelt auf der Basis seiner umfangreichen Forschungsaktivitäten und Praxiserfahrungen Lösungen für alle Bereiche der nationalen und internationalen Wasserbranche vom Ressourcenschutz über die Gewinnung und Aufbereitung bis hin zur Entnahmematur. Rund 200 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter stehen Wasserversorgern, Unternehmen, Fachbehörden und Hochschulen partnerschaftlich zur Seite. Das TZW liefert zuverlässige Zahlen, Daten und Fakten und entwickelt daraus innovative Konzepte für eine zukunftsfähige Wasserversorgung. Organisatorisch ist das TZW untergliedert in die Fachabteilungen: Wasserversorgung, Wasserchemie, Wasserbiologie, Wasserverteilung und Prüfstelle Wasser.

Erfreulich war im Jahr 2020, dass nahezu alle Forschungsarbeiten am EBI und am TZW trotz der Corona-Pandemie weiterlaufen konnten. Dies wurde ermöglicht durch die Erstellung von spezifischen Gefährdungsbeurteilungen und den entsprechenden Betriebsanweisungen (ab März 2020) für das Arbeiten in den Werkstätten und Laboratorien auf der einen Seite und die intensive Nutzung der Möglichkeit zum mobilen Arbeiten.

Zusätzlich zu den oben benannten Quellen der Förderung durch die öffentliche Hand wird ein erheblicher Anteil der Forschungsprojekte auch durch Aufträge aus Industrie und Unternehmen finanziert. Ein Partner für besonders innovative Forschungsideen ist die Gesellschaft der Freunde des Engler-Bunte-Instituts, die die Teilinstitute seit Jahren zuverlässig und zum Teil sehr großzügig unterstützt. Die Ergebnisse der zahlreichen Forschungsprojekte sind in einer beachtlichen Zahl von Publikationen dokumentiert, die in führenden internationalen Fachjournalen mit strengen Begutachtungsverfahren erschienen sind. Die Verzeichnisse sind den Berichten der einzelnen Teilinstitute zu entnehmen.

Lehre und Ausbildung

Im Grunde genommen stand die Lehre am Engler-Bunte-Institut das ganze Jahr 2020 unter dem Eindruck der Corona-Pandemie. Während die Lehre des WS 19/20



Bild 0.2: Das neue Logo (links) des Engler-Bunte-Instituts, rechts ist das alte Logo abgebildet.

noch bis Anfang März in Präsenz angeboten wurde, waren dann Vorlesungen und Seminare ab SS 2020 als online Veranstaltungen für die Studierenden verfügbar. Einschränkungen gab es bei den großen Praktika, bei denen die Studierenden die Versuche als Video angeboten bekommen haben und dann auf der Basis von „Versuchsergebnissen“ ihre Protokolle schreiben mussten. Nur ein Teil der Praktika konnte im Sommer 2020 in Präsenz durchgeführt werden. Erfreulich war, dass wir die Durchführung von Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten nahezu uneingeschränkt realisieren konnten, da der Zugang zu den Laboratorien nicht eingeschränkt war, solange die Abstandsregeln und die weiteren Schutzmaßnahmen (wie das Tragen von Masken) eingehalten wurden.

Nach wie vor ist der Zugang von Studierenden in den ersten Semestern der Ingenieurstudiengänge an deutschen Universitäten nicht zufriedenstellend. Auch der Bachelor-Studiengang „Chemieingenieurwesen und Ver-



Bild 0.3: Kunstobjekt vor dem neuen Gebäude des Engler-Bunte-Instituts.

fahrenstechnik“ ist betroffen, konnte aber die Zahlen im WS 20/21 stabil halten. Der Bachelor-Studiengang „Bioingenieurwesen“ ist ausgelastet und stellt zurzeit ein Drittel der Studierenden im ersten Semester. Im Rahmen der Studiengänge „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ beteiligt sich das Engler-Bunte-Institut an der Grundausbildung und bietet in den Bereichen Brennstoffe, Energieverfahrenstechnik, Verbrennung und Wasserchemie/Wassertechnologie eine Reihe von Hauptfächern, Vertiefungsrichtungen und Profulfächern an. Für den englischsprachigen Studiengang „Water Science and Engineering“ wird vom Engler-Bunte-Institut das Profil „Water Technologies & Urban Water Cycle“ bedient, mit Veranstaltungen zur Wasser-

qualität, Mess-/Analysetechnik und Wasserbehandlung. Neben der Studierenden- und Doktorandenausbildung ist die Weiterbildung der bereits im Beruf stehenden Fachleute ein zentraler Bestandteil des Programms am Engler-Bunte-Institut. Leider musste für 2020 der Gaskursus am Engler-Bunte-Institut wegen der Pandemie abgesagt werden. Eine lange geplante internationale Konferenz „Biofilms9“ wurde mit 280 Teilnehmern online durchgeführt.

Der folgende detailliertere Tätigkeitsbericht enthält wie in den letzten Jahren Beiträge der drei Bereiche am Engler-Bunte-Institut und der angeschlossenen DVGW-Forschungsstelle und des TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser.

3. Aktivitäten des Teilinstituts und der DVGW-Forschungsstelle, Wasserchemie und Wassertechnologie

Harald Horn, Gudrun Abbt-Braun, Andrea Hille-Reichel, Florencia Saravia, Fritz H. Frimmel

3.1 Forschung und Lehre

Forschung

Das letzte Jahr war dominiert durch die Pandemie, die sich in allen Lebensbereichen Bahn gebrochen hat. Das Thema der mikrobiologischen Wasserqualität ist durch das Auftreten von SARS-CoV-2 Viren noch einmal verstärkt in den Vordergrund getreten. Konkret muss die Frage nach der mikrobiologischen Qualität der über kommunale und industrielle Kläranlagen eingeleiteten Wässer aufgeworfen und beantwortet werden (Bogler et al. 2020). **Bild 3.1** zeigt den mutmaßlichen Verbleib von SARS-CoV Viren in einer kommunalen Kläranlage auf, wie er sich aus dem aktuellen Kenntnisstand ergibt. Eine sichere Entfernung wäre im Ablauf Nachklärung nur mit weitergehenden (Desinfektions-) Verfahren möglich. Die Diskussion ist auch vor dem Hintergrund der Einleitungen von antibiotikaresistenten Bakterien und Antibiotikaresistenzgenen wichtig, da mit der sogenannten vierten Reinigungsstufe teilweise Fakten geschaffen werden, die die mikrobiologische Wasserqualität nur unzureichend adressieren.

Neben der Frage des Verbleibs von SARS-CoV Viren wurden im letzten Jahr in der Wasserchemie und Wassertechnologie verschiedene Projekte weitergeführt oder auch neu begonnen. Sehr erfreulich sind die Ergebnisse aus einem Projekt, das hier an gleicher Stelle im letzten Jahr vorgestellt wurde (BMBF Projekt „KompAGG-N“). Wir können zeigen, dass mit Hilfe der Membrantechnik die (Vor-)Behandlung von Gülle sehr gut möglich ist, in Abschnitt 3.2 werden die ersten Ergebnisse vorgestellt. Membranverfahren spielen zusehends eine wichtige Rolle bei der Aufbereitung verschiedenster wässriger Stoffströme. Neben der Behandlung von Gülle mit Membranverfahren werden

auch organische Säuren aus Hydrolysaten mit Hilfe der Nanofiltration (BMBF Projekt „ProBioLNG“) angereichert oder die wässrige Phase aus der hydrothermalen Liquefaktion (HTL) von Klärschlamm behandelt (EU-Projekt).

Einen wichtigen Beitrag zur Bereitstellung von Lithium aus „heimischen“ Quellen konnten Frau Saravia (EBI, DVGW) und Herr Grimmer (Geowissenschaften, KIT) mit einer Patentanmeldung leisten, die die Gewinnung von Lithium aus Thermalwasser des Oberrheingrabens mit einem Membranverfahren beschreibt. Hier ist die Entwicklung des Verfahrens noch nicht abgeschlossen, unstrittig ist aber das sehr große Potenzial, das in dem Bereich vorhanden ist.

Lehre

Die Anzahl der Studienanfänger im Bachelorprogramm „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ konnte im WS 2020/21 im Vergleich zum Vorjahr gehalten werden. Dort liegt die Auslastung unter 100 %. Im Vergleich dazu sind die Anfängerzahlen im Bachelorprogramm „Bioingenieurwesen“ stabil hoch mit einer Auslastung von über 100 %. Durch die sehr hohen Anfängerzahlen in den vorigen Jahren sind die Studierenden in den Masterstudiengängen „Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik“ und „Bioingenieurwesen“ nahezu identisch mit denen der Anfänger in Bachelorstudiengängen. Wie schon in den Vorjahren erfreut sich der englischsprachige Masterstudiengang „Water Science and Engineering“ einer sehr hohen nationalen und internationalen Nachfrage. Vor allem die Veranstaltung „Water Technology“, „Membrane Technology in Water Treatment“ und „Fundamentals of Water Quality“ sind integrale und sehr stark be-

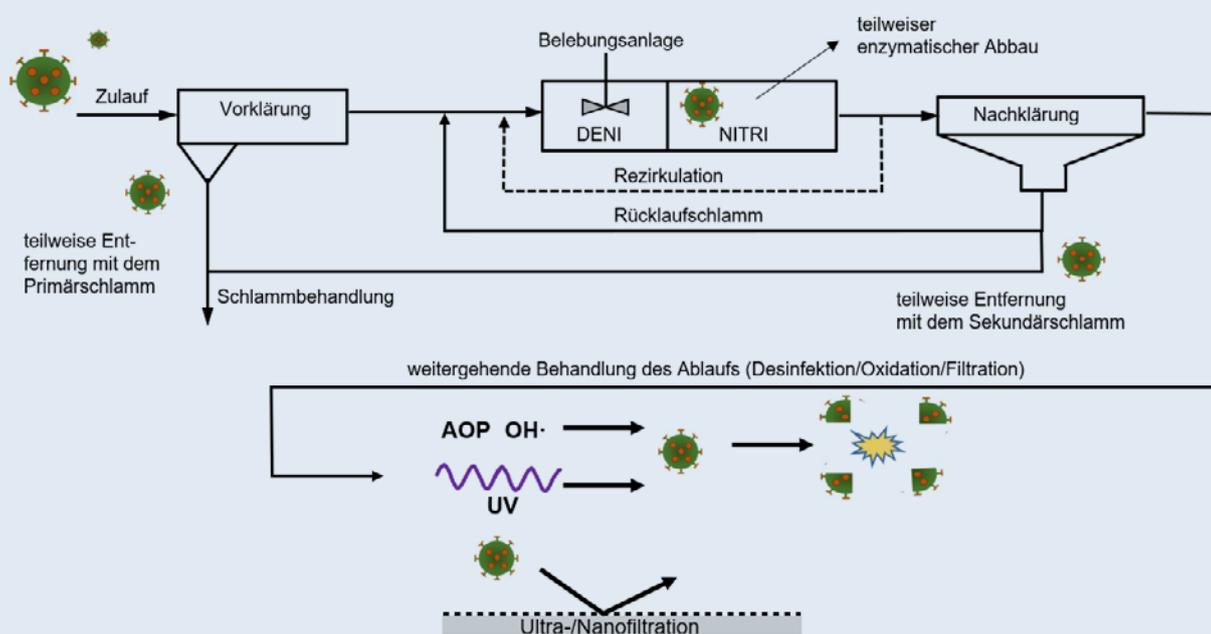


Bild 3.1: Die biologische Abwasserbehandlung ermöglicht den enzymatischen Abbau von organischen Kohlenstoffverbindungen, aber auch die Entfernung von Viren. Dabei wird ein Teil der SARS-CoV-Erreger im Vorklärbecken ausgeschleust, andere sorbieren an Belebtschlammflocken und werden dann mit dem Überschussschlamm entfernt. Im Anschluss an die Nachklärung besteht die Möglichkeit zur weiteren Behandlung. Das Abwasser kann mit weitergehenden Oxidationsverfahren (AOP), UV und/oder Filtration über verschiedene Membransysteme wie Ultrafiltration (z.B. in einem Membranbioreaktor, MBR) behandelt werden. Diese Abwässer können durch dichte Membranen in der Nanofiltration oder Umkehrosmose weiter aufbereitet werden, um eine vollständige Entfernung des Virus zu gewährleisten. Zum Teil übernommen aus (Bogler et al., 2020).

suchte Veranstaltungen in den oben genannten Masterstudiengängen. Frau Dr. Borowska hat im Wintersemester zum ersten Mal die Veranstaltung „Micropollutants in Aquatic Environment – Determination, Elimination, Environmental Impact“ erfolgreich gehalten. Alle Veranstaltungen sind in den letzten Jahren an die Studiengänge angepasst worden.

Die Pandemie hat auch hier Spuren hinterlassen, da wir alle Vorlesungen seit April 2020 online anbieten. Erfreulicherweise konnten wir die Praktika zur Grundvorlesung „Allgemeine Chemie und Chemie der wässrigen Lösungen“ im letzten Jahr im Sommer noch zur Hälfte in Präsenz durchführen.

Internationale Kooperationen in Forschung und Lehre

Die Forschung in der Wasserchemie und Wassertechnologie am Engler-Bunte-Institut erfreut sich international einer großen Aufmerksamkeit. Seit dem letzten Jahr haben wir einen Humboldt-Forschungsstipendiaten und eine -stipendiatin am Institut. Dr. Samuel Bunani aus Burundi untersucht die Abtrennung von Schwermetallen unter Einfluss von Huminstoffen mit der Elektrodialyse. Frau Dr. Keke Xiao aus China beschäftigt sich sowohl mit der Entfernung von organischen Spurenstoffen aus Klärschlamm,

als auch mit den Prozessen, die bei der Desintegration von Klärschlamm auftreten. Sie setzt dabei auf unsere Kompetenz bei der Fraktionierung des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) und die Möglichkeit, daraus die Abbauege besser identifizieren zu können. In 2021 werden zwei weitere Humboldt-Forschungsstipendiatinnen hinzukommen.

Der ABC Kurs (Advanced Biofilm Course), der 2020 in Karlsruhe stattfinden sollte, ist am Ende der Pandemie zum Opfer gefallen. Wir hoffen, dass wir den Kurs spätestens in 2022 wieder aufnehmen können. Stattgefunden hat aber die internationale Tagung „Biofilms9“, die wir zusammen mit den Angewandten Biowissenschaften des KIT (Johannes Gescher) Anfang Oktober 2020, während drei Tagen online durchgeführt haben. Dazu konnten wir über 280 Teilnehmer und Teilnehmerinnen aus mehr als 30 Ländern gewinnen. Spannend war in der Tat, dass wir mit nur drei Personen die Vortragsessions organisiert haben. Die Postersessions konnten mit der Unterstützung aller Doktoranden und Doktorandinnen sehr individuell gestaltet werden, und boten den Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen eine optimale Plattform für Diskussionen.

Promotionen

Im Jahr 2020 konnten vier Doktoranden und Doktorandin-

nen ihre Promotionen in unserem Institut abschließen. Im August verteidigte Frau M. Sc. **Annika Bauer** ihre Dissertation mit dem Titel „Einsatz der optischen Kohärenztomographie zur kontinuierlichen Überwachung von Scaling bei der Membrandestillation“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Mathias Ernst (Technische Universität Hamburg)). Die Arbeit ist im Folgenden kurz zusammengefasst:

Die Membrandestillation (MD) ist ein junges und innovatives Verfahren zur thermischen Aufbereitung hoch saliner Wässer. Die Separation anhand einer hydrophoben Membran wird durch den Phasenübergang von volatilen Komponenten bei gleichzeitigem Rückhalt der flüssigen Bestandteile erreicht. Im (Langzeit-)Betrieb bilden sich häufig Deckschichten, die bei hoch salzigen Wässern hauptsächlich aus Scaling bestehen und zu einem Rückgang des Permeatstroms und einer Verschlechterung der Permeatqualität führen können. Die Detektion des Permeatstroms ist derzeit die Methode der Wahl, um auf die Bildung von Scaling zu schließen. Ein ganzheitliches, nichtinvasives Monitoring der Membran im laufenden MD-Betrieb existiert nicht, und auch die Bestätigung von Scaling auf der Membran wird vornehmlich ex situ nach Abschluss des Experiments durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wurde, basierend auf der optischen Kohärenztomographie (OCT), eine Methode zur sicheren Visualisierung und Quantifizierung von anorganischen Deckschichten entwickelt und im laufenden MD-Betrieb angewandt.

In einer vollautomatisierten Membrandestillationslaboranlage wurden konzentriertes Ostseewasser (OstWK) und Leitungswasser der Stadt Karlsruhe (KALW) behandelt und das Wachstum der Deckschicht auf den Einfluss variierender Prozessparameter mittels OCT untersucht. An einer manuellen Membrandestillationslaboranlage wurde zudem die chemische Reinigung mittels Zitronensäure und Natronlauge an einer Scalingschicht aus Calciumsulfat prozessbegleitend bewertet.

Basierend auf ImageJ und Matlab wurde eine Methode zur Bearbeitung der digitalen OCT-Datensätze entwickelt, die neben der Visualisierung vor allem eine sichere Quantifizierung des Scalings auf der Membranoberfläche ermöglichte. Gebildete Artefakte – hervorgerufen durch die Eigenschaften der Salzkristalle – wurden durch die PolyFIT Methode kompensiert und die Fehlerrate deutlich reduziert. Neu entwickelte Scalingparameter ermöglichten zudem eine objektive morphologische Bewertung des Membranzustandes und können als membranbasierte Prozessleitparameter eingesetzt werden.

Die gezielte Veränderung der Temperatur hatte einen maßgeblichen Einfluss auf die Bildung von Calcit-Deckschichten. Eine erhöhte Prozesstemperatur setzte die Löslichkeit der Ionen herab und führte damit zu einer massiven und schnellen Bildung von großen Kristallen auf der Membranoberfläche. Die schrittweise Erhöhung des Per-

meatstroms J_p (temperaturgekoppelt) führte ebenfalls zur verstärkten Bildung von Calcit-Scaling. Dies wurde durch das vermehrte Auftreten von temporären lokalen Superkonzentrationen bei hohem J_p erklärt. Die Variation der Konfiguration von Direct Contact zu Air Gap hatte keinen Einfluss auf das Wachstum der anorganischen Deckschicht. Durch die Änderung der Wassermatrix bildeten sich ähnliche Scalingschichten aus Calcit und Magnesiumcalcit. Beide führten zur identischen Reduktion des Permeatstroms, die durch unterschiedliche Bedeckungsgrade in Kombination mit signifikant verschiedenen Kristallmorphologien hervorgerufen wurde. Die alleinige Detektion von J_p lieferte damit nur unzureichend genaue Informationen, die nur eingeschränkt für die Interpretation von Scaling genutzt werden konnten. Die Bestimmung der Scalingparameter verdeutlichte die Unterschiede hingegen klar und lieferte neben der Wachstumsgeschwindigkeit auch Informationen über die Morphologie der Kristalle.

Die Menge an chemisch abgereinigtem Calciumsulfat wurde in situ untersucht und anhand der Scalingparameter quantifiziert. Neben dem idealen Zeitpunkt zur Reinigung konnten damit auch die Reinigungsdauer und die Effektivität der verwendeten Chemikalien bestimmt werden. Dabei zeigte Zitronensäure eine verbesserte Reinigungskinetik gegenüber Natronlauge.

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode stellt damit ein Werkzeug zur ganzheitlichen Optimierung der Membrandestillation in Bezug auf die Bildung von Scaling dar und liefert durch die nichtinvasive Anwendung Informationen zur morphologischen Entwicklung der Deckschicht.

Im November schloss Frau M. Sc. **Luisa Gierl** ihre Dissertation mit dem Thema „Untersuchungen zum Einfluss von Eisen auf die Struktur und mechanischen Eigenschaften von *Bacillus subtilis* Biofilmen“ ab (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Johannes Gescher (KIT)): Biofilme sind Aggregationen von Mikroorganismen, die in einer Matrix aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) eingebettet sind und hauptsächlich an Grenzflächen in wässrigen Umgebungen auftreten. Die Biofilmforschung ist von großem Interesse, um operative Parameter in Tröpfchen-Bewässerungssystemen, Kläranlagen, Trinkwasseraufbereitungssystemen oder auch in Reaktorsystemen zur Produktion von Chemikalien bestimmen zu können.

In der Dissertation wurde deshalb auf die Biofilmentwicklung sowie auf die Interaktion des Biofilms mit seiner Umgebung (Fluid-Struktur-Dynamik) unter dem Einfluss verschiedener Eisenkonzentrationen ($\beta = 0,25$ und $2,5$ mg/L Fe^{2+}) sowie Volumenströmen ($Q = 1$ und 5 mL/min) näher eingegangen. Dabei fanden Wachstumsexperimente im Hinblick auf strukturelle Biofilmeigenschaften sowie Deformationsstudien unter dem Aspekt der Analyse mechanischer Biofilmeigenschaften in Fließzellen statt. Weiterhin wurde die Automatisierung von Laborabläufen sowie die Auto-

matisierung der Versuchsauswertung näher betrachtet. Die Untersuchungen erfolgten dabei mittels optischer Kohärenztomographie (OCT). Die OCT ist ein Verfahren, welches die Biofilmstruktur in situ, nichtinvasiv und hochauflösend abbildet. Die Integration der OCT in ein neues und automatisiertes Kultivierungs- und Monitoringsystem zeigte hier die Notwendigkeit einer Mindestanzahl von statistisch relevanten Biofilmreplikaten und die Möglichkeit, diese mit dem System simultan abzubilden.

Eine Differenzierung der Biofilmentwicklung bzw. -stabilität unter verschiedenen Wachstumsbedingungen konnte unter Anwendung des Kultivierungs- und Monitoringsystems beurteilt werden. Die Arbeit zeigt dabei, dass eine Zugabe von Fe^{2+} zum Kultivierungsmedium die Differenzierung zu voll entwickelten Biofilmen maßgeblich beeinflusst. Es wurde nachgewiesen, dass erhöhte Mengen an Fe^{2+} (2,5 mg/L) das Biofilmwachstum bezogen auf die Biofilmdicke, Fließkanalbedeckung sowie weitere Strukturparameter förderte. Dabei lagerten sich unterschiedliche Modifikationen von Eisenoxidhydroxiden $x\text{-FeO(OH)}$ in die Biofilmmatrix ein.

Innerhalb von Deformationsstudien wurde weiterhin illustriert, dass auch nach Wandschubspannungen von $\tau_w = 16$ Pa noch Biofilmmasse in den Fließzellen vorhanden war, was vor allem für Aufreinigungsprozesse in Trinkwassersystemen von Bedeutung ist. Weiterhin zeigten die Versuche, dass ein erhöhtes Vorkommen von Fe^{2+} im Nährmedium zu einer erhöhten Kompressibilität der Biofilme führt. Die Ergebnisse der Dissertation begründen die Notwendigkeit der Durchführung von Replikaten in der Biofilmforschung. Weiterhin zeigen sie auch die Notwendigkeit der Nutzung einer Vielzahl von Strukturparametern zur vollständigen Analyse der Fluid-Biofilm-Interaktion und der Biofilmentwicklung. Auch wird demonstriert, dass eine Automatisierung der Analyse mechanischer Biofilmeigenschaften sinnvoll ist. Da die physikalische Struktur eines Biofilms die Interaktion mit seiner Umgebung determiniert, sind die Ergebnisse von großer Bedeutung für den Forschungsbereich Biofilmkontrolle.

Ebenfalls im November konnte Herr M. Sc. **Jung** seine Dissertation zum Thema „Raman microspectroscopy for in-situ measurement of concentration polarization in nanofiltration“ erfolgreich verteidigen (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Cristian Picioreanu (King Abdullah University of Science and Technology, Saudi-Arabien)). Im Folgenden ist eine Kurzfassung der Arbeit abgedruckt: Konzentrationspolarisation (CP) beschreibt ein Phänomen des Stofftransports gelöster Teilchen an der Membranoberfläche druckbetriebener Membrananlagen. Die sich bildende Grenzschicht hat eine Dicke in der Größenordnung von Mikrometern. Daher ist CP experimentell nur schwer zugänglich, weshalb das Phänomen in der allgemeinen Forschung meist mit indirekten Methoden untersucht wird. Diese Arbeit verfolgt jedoch einen direk-

ten Ansatz und stellt ein neues Messkonzept für die nicht-invasive Untersuchung der CP in situ vor.

Mittels Raman-Mikrospektroskopie (RM) wurde die Konzentrationspolarisationsgrenzschicht (CPL) von Sulfat im Labor in situ gemessen. Dafür wurde eigens eine Nanofiltrations(NF)-Flachkanalzelle entwickelt, die es erlaubt, die CPL in einer Umgebung zu messen, welche repräsentativ für in der Praxis verwendete Wickelmodule ist (Kanalhöhe 0,7 mm, ausstattbar mit kommerziellen Spacern). Ziel war, RM als neue Messtechnik für die orts aufgelöste Untersuchung von Konzentrationsgradienten in der NF und Umkehrosmose (RO) vorzustellen.

Die NF-Membrananlage wurde mit einer Modelllösung (Magnesiumsulfat gelöst in demineralisiertem Wasser) bei einem konstanten Systemdruck von 10 bar betrieben. Übliche Messparameter zur Bestimmung der Filtrationsleistung, unter anderem Ausbeute, Leitfähigkeit im Permeat etc., wurden aufgezeichnet. Der Membranrückhalt betrug mindestens 96 %. Konzentrationsprofile wurden mit und ohne Spacer für Sulfatkonzentrationen von 10 und 20 g/L im Zulauf an mehreren Positionen entlang des Membrankanals gemessen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde im Bereich 0,004 bis 0,2 m/s variiert, wodurch eine Ausbeute zwischen 0,5 und 31 % erreicht wurde. Es wurden sowohl 1D-Tiefenprofile als auch 3D-Scans durchgeführt. Die Messergebnisse zeigten übereinstimmend, dass eine höhere Ausbeute zu einer Konzentrationserhöhung an der Membranoberfläche führt. Zudem wurde bei Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung mm/s, ein Einfluss der Membranorientierung beobachtet. Filtration entgegen der Schwerkraft hatte eine höhere Ausbeute und Permeatqualität zur Folge. Die RM Messungen zeigten, dass dafür ein verbesserter Stofftransport an der Membranoberfläche durch natürliche Konvektion (Rayleigh-Taylor-Instabilität, RTI) verantwortlich ist. Damit wurde hierin auch erstmals RTI in einem NF-System in situ gemessen. Bei den RM Messungen mit Spacer zeigte sich bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten eine charakteristische Konzentrationsverteilung. Der Vergleich mit simulierten Strömungsprofilen in der Fachliteratur zeigte eine große Ähnlichkeit zwischen Simulations- und Messergebnissen. Inwieweit RM auch auf die Untersuchung komplexer Foulingphänomene in der Membranfiltration angewendet werden kann, wurde anhand von Biofouling untersucht. Dazu wurde die NF-Anlage mit einer Nährlösung betrieben, welcher Kulturen von *Bacillus subtilis* zugesetzt wurden. Ziel war es, den Einfluss eines Biofilms an der Membranoberfläche auf die CPL zu untersuchen. Zur Analyse des Biofilms wurde die optische Kohärenztomographie (OCT) verwendet. Dabei wurde festgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften des Biofilms mit den Betriebsparametern der Membranfiltration zusammenhängen. Insbesondere führten Änderungen des Permeatflusses

zu Änderungen der Biofilmdicke durch Kompression und Relaxation. Es wurden Konzentrationsprofile für vier Biofilme unterschiedlicher Dicke im Bereich von 20 bis 100 µm gemessen. Die Ergebnisse bestätigten, dass Biofilme zu einer Erhöhung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche führen und damit weitere Foulingtypen, insbesondere Scaling, gefördert werden.

Die Möglichkeiten und Schwierigkeiten der Messmethode werden durchgängig kritisch diskutiert. Sphärische Aberration aufgrund der Lichtbrechung beim Durchgang durch verschiedene Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes stellt eine der größten Herausforderungen für das Messprinzip dar. Sie führt zu Verlust von Signalintensität und hat eine Verminderung der Tiefenschärfe zur Folge. Komplexe Strömungsfelder, welche eine Schichtung von Salzlösung unterschiedlicher Brechkraft zur Folge haben, führen zu einer Unterbewertung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche. Die beobachtete Komprimierbarkeit der Biofilme stellt eine weitere Problematik für die Messmethodik dar und hat bei größeren Filmdicken eine deutliche Überbewertung der Salzkonzentration an der Membranoberfläche zur Folge.

In dieser Arbeit wurden Konzentrationsprofile in der Grenzschicht über einer NF-Membran direkt, nichtinvasiv und orts aufgelöst gemessen. Das vorgeschlagene Messkonzept ist praktisch nutzbar, benutzerfreundlich und erlaubt darüber hinaus die Nutzung von Spacern sowie die Untersuchung komplexer Foulingphänomene.

Frau M.Sc. **Rowayda Ali** schloss ihre Doktorarbeit im Dezember 2020 ab. Der Titel ihrer Dissertation lautet „Propionic acid production through anaerobic fermentation of food waste“ (Referent: Prof. Dr. Harald Horn; Korreferent: Prof. Dr. Johannes Gescher (KIT)):

Das Streben nach der Minimierung von Abfällen in Verbindung mit der Rückgewinnung von Ressourcen hat die Aufmerksamkeit auf die Verwendung von Lebensmittelabfällen als Ausgangsstoffen für die Herstellung hochwertiger Produkte gelenkt. Weltweit fallen jährlich rund 1,3 Milliarden Tonnen Lebensmittelabfälle an. Diese Abfälle werden immer noch auf Deponien abgeladen oder verbrannt, was zu Treibhausgasemissionen führt. Die biologische Umwandlung von Lebensmittelabfällen in Mehrwertprodukte wie Propionsäure ist daher ein vielversprechender Ansatz für die Entwicklung einer biobasierten Wirtschaft und die Verringerung der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren fossilen Ressourcen. Ziel der vorliegenden Dissertation war es, die Propionsäureproduktion aus Lebensmittelabfällen durch anaerobe Fermentation zu verbessern. Dementsprechend wurden verschiedene Batch- und halbkontinuierliche Fermentationsexperimente bei mesophiler Temperatur (30 °C) durchgeführt. Der Einfluss des Inokulums, des pH-Werts und der thermischen Vorbehandlung des Substrats wurde mit Batch-Fermentationstests im Labormaßstab untersucht. Als Substrat wurde veganes Hun-

defutter als Modell für Küchenabfälle verwendet. Die ausgewählten Inokula umfassten eine gemischte Bakterienkultur, die über 24 Monate für das Wachstum auf Cellulose selektiert wurde, Milch und Ziegenweichkäse. Die Batchtests wurden bei pH 4, pH 6 und pH 8 sowohl für unbehandeltes als auch für vorbehandeltes Hundefutter durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Produktion von Propionsäure und anderen flüchtigen Fettsäuren deutlich vom gewählten Inokulum und dem eingestellten pH-Wert abhängt.

Die maximalen Propionsäureproduktionsraten und Ausbeuten wurden für das Käse-Inokulum bei pH 6 unter Verwendung von unbehandeltem und vorbehandeltem Hundefutter bestimmt. Die Propionsäurekonzentration erreichte 10 bzw. 26,5 g/L. Die höchste Konzentration an flüchtigen Fettsäuren von ungefähr 60 g/L wurde erhalten, wenn Milch als Inokulum verwendet wurde, um vorbehandeltes Hundefutter bei pH 8 zu fermentieren. Die Verbesserung der Propionsäureproduktion aus Hundefutter und Küchenabfällen wurde auch in einem halbkontinuierlichen anaeroben 12 L-Hydrolysereaktor untersucht. Drei Betriebsläufe wurden bei einem pH-Wert von $6,0 \pm 0,1$ jeweils für mehr als drei Monate durchgeführt. Dabei wurden zwei der auch in den Batchtests untersuchten Inokula verglichen, die gemischte mikrobielle Kultur und die in Ziegenkäse enthaltene Kultur. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass das Ziegenkäse-Inokulum für die Propionsäureproduktion effizienter war, was zu einer Erhöhung um 50 % führte. Die höchste Propionsäurekonzentration wurde mit 139 mmol/L unter Verwendung von Hundefutter und mit 105 mmol/L unter Verwendung von Küchenabfällen erreicht. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Propionsäureproduktion durch eine Kombination einer relativ hohen hydraulischen Retentionszeit (HRT) mit einer relativ niedrigen organischen Belastungsrate (OLR) erhöht wurde, da dies eine ausreichende Zeit für die vollständige Verarbeitung der komplexen organischen Substrate sicherstellt. Weiterhin wurde die Vorbehandlung der Fermentationsbrühen von fermentiertem Hundefutter und Küchenabfällen als erster Schritt im Propionsäureaufbereitungsprozess untersucht. Hierbei wurden zunächst unter Verwendung einer Trenneinheit große Partikel aus der Fermentationsbrühe entfernt, in der Folge wurden die übrigen suspendierten Partikel durch ein getauchtes Mikrofiltrationsmembransystem abgetrennt. Es wurde gezeigt, dass die Trenneinheit ein effizientes Vorbehandlungsverfahren für den Mikrofiltrationsprozess ist. Die Einheit konnte mehr als 86 % der gesamten suspendierten Feststoffe aus der Fermentationsbrühe entfernen. Die Mikrofiltrationsmembran wurde erfolgreich zur Abtrennung von Partikeln im Hydrolysat eingesetzt. Die Verwendung von Mikrofiltrationsmembranen mit einer

Tabelle 3.1: In Arbeit befindliche, im Jahre 2020 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte.

Schwerpunkt	Projektmitarbeiter/Innen	Thema	Förderung
Wasserqualität	Alondra Alvarado Stephanie West Gudrun Abbt-Braun	Hydrolyse partikulärer organischer Stoffe bei der anaeroben und aeroben Abwasserbehandlung*	National Council on Science and Technology, Mexiko, Dt. Akad. Austauschdienst (DAAD), DVGW
	Samuel Bunani	Einsatz der Elektrodialyse zur Abtrennung von Schwermetallen	Alexander von Humboldt Stiftung, KIT
	Amélie Chabilan Ewa Borowska	Verhalten von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkungen auf die Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen in der natürlichen Umwelt	Baden-Württemberg Stiftung, KIT
	Harald Horn	DVGW-Innovations-Scouting-Wasser	DVGW
	Stephanie Kaschewski	Anwendung neuer Technologien, wie das Internet of Things und künstliche Intelligenz, zur Verbesserung der Trinkwasserversorgung in Wohngebäuden	BOSCH
	Tim Schwarzenberger	Verifizierung und Optimierung eines kombiniert variablen Ansatzes zur mikrobiologischen Validierung von mono- und polychromatischen UV-Systemen	DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW)
	Lara Stelmaszyk	Methodenentwicklung für die Quantifizierung von Antibiotikaresistenzgenen anhand PCR-basierter Verfahren und Kulturverfahren	TZW
	Stephanie West	Weiterentwicklung und Validierung der Durchflusssytmetrie als schnelle Detektionsmethode für Bakterien in Roh- und Trinkwasser (FlowDetect; Verbundprojekt)*	DVGW
	Stephanie West	Mikroorganismen und Turbulenz – Wasserqualitätsvorhersage (MOAT, Verbundprojekt)*	Baden-Württemberg Stiftung
	Stephan Zimmermann Ewa Borowska	Verhalten von Krebsmedikamenten bei Oxidationsverfahren in der Wasseraufbereitung	KIT
Wasser-technologie	Rowayda Ali Jinpeng Liu Andrea Hille-Reichel Florencia Saravia Michael Wagner	Entwicklung von Kaskadenreaktoren zur Umsetzung biogener Abfallströme in Wasserstoff und Propionat (RECICL; Verbundprojekt)	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Islamic Development Bank, Saudi Arabia
	Andreas Netsch Michael Wagner	Entwicklung und Demonstration einer energieeffizienten bioelektrochemischen Abwasserbehandlung im technischen Maßstab mit Einhaltung gesetzlicher Anforderungen zur Ablaufqualität (Demo-BioBZ; Verbundprojekt)	BMBF
	Giorgio Pratofiorito Florencia Saravia	Entwicklung einer ressourcen- und kosteneffizienten Prozesskette zur dezentralen Produktion von LNG auf der Basis innovativer Konversions-, Power-to-Gas- und Gasaufbereitungsverfahren (ProBioLNG; Verbundprojekt)	BMBF
	Prantik Samanta Florencia Saravia	Komplettaufbereitung von Gülle und Gärresten unter Berücksichtigung regionaler Stoffstromkonzepte für Nähr- und Schadstoffe (KompaGG-N; Verbundprojekt)	BMBF
	Ali Sayegh Florencia Saravia	Verarbeitung hydrothermalen Verflüssigungsprodukte mit Membrantechnologien (Verbundprojekt)	Europäische Kommission
	Michael Sturm	Mikroplastikfreie Meersalzgewinnung – Entwicklung eines methodologischen und technologischen Verfahrens zur Reduktion der Mikroplastikbelastung bei der Meersalzgewinnung	Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BmWi) – Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
	Dámare Araya, Valenzuela Florencia Saravia	Fallstudie zur Implementation von Wassertechnologien in ariden Gebieten	National Agency of Research and Development, Chile, DAAD, KIT
	Keke Xiao	Verhalten organischer Stoffe (refraktäre Stoffe, organische Spurenstoffe) bei der Klärschlammbehandlung	Alexander von Humboldt Stiftung, KIT
Biologische Abwasserreinigung			

Biologische Grenzflächen	Luisa Gierl Michael Wagner	Nutzung von multidimensionalen Bilddaten der optischen Kohärenztomographie zur Entwicklung eines multiphysikalischen Biofilmmodells*	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Michael Wagner	Mikrobielle Elektrosynthese zur Bioplastik Produktion aus Rauchgas (BioElectroPlast; Verbundprojekt)*	BMBF
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Harald Horn	Biotechnologische Produktion von Plattform-Chemikalien mittels Anoden-assistierter Fermentation (Bio-ProChem; Verbundprojekt)*	Bioökonomie, Land Baden-Württemberg
	Max Hackbarth Andrea Hille-Reichel Harald Horn	Extremophile Kathodenbiofilme als Power-to-X Biokatalysatoren (EKatBio; Verbundprojekt)*	BWPLUS, Land Baden-Württemberg
	Max Miehle Andrea Hille-Reichel	Kontinuierliche Bioproduktion mit maßgeschneiderten Biokatalysatoren in bioelektrochemischen Fermentern (ContiBio-Elect; Verbundprojekt)	BMBF
	Florian Ranzinger Michael Wagner Gisela Guthausen	Untersuchung poröser Medien mittels Magnetresonanztomographie	KIT
	Lizheng Guo Harald Horn	Desinfektion und Biofilme in Trinkwasserverteilungssystemen	Chinese Academy of Science, KIT

Porengröße von 0,1 µm, 0,45 µm und 0,8 µm führte zur Passage von ca. 90 % der flüchtigen Fettsäuren. Darüber hinaus entfernten die Membranen mehr als 85 % der gesamten suspendierten Feststoffe (TSS). Der höchste kritische Flux von ungefähr 14 L/(m h) wurde unter Verwendung des Küchenabfallhydrolysats, der Membran mit einer Porengröße von 0,45 µm und einer Begasung von 80 m³/(m h) beobachtet.

Die beiden erstgenannten Arbeiten sind bereits in der Schriftenreihe Bereich Wasserchemie und Wassertechnologie, Engler-Bunte-Institut, Karlsruher Institut für Technologie, erschienen (Band 79 und Band 80, ISSN 2195-2973). Die Arbeiten von Herrn Jung (Band 81) und Frau Ali (Band 82) werden in Kürze gedruckt, erscheinen aber mit einer neuen Nummer (ISSN 2747-819X (Print)). Sie sind dann ebenfalls über das Sekretariat des Lehrstuhls in gedruckter Form erhältlich und werden über KITopen elektronisch zugänglich sein.

3.2 In Arbeit befindliche, im Jahre 2020 abgeschlossene* und neu begonnene Forschungsprojekte

Die 2020 in den Forschungsschwerpunkten Wasserqualität, Wassertechnologie, Biologische Abwasserreinigung und Biologische Grenzflächen bearbeiteten Projekte sind in **Tabelle 3.1** aufgeführt.

Im Folgenden werden zwei der in **Tabelle 3.1** aufgeführten Projekte ausführlicher vorgestellt. Sie befassen sich mit der **Evaluierung der Verbreitung von Antibiotika und Antibiotikaresistenzgenen in der Umwelt** und der **Nutzung von Membranverfahren zur Aufreinigung entsprechender hochbelasteter Abwässer**.

Untersuchung des Verhaltens von Antibiotika in Flüssen und Flusssedimenten und ihre Auswirkung auf die Ausbreitung der Antibiotikaresistenzen in der natürlichen Umwelt

Amélie Chabilan, Ewa Borowska; Förderung: Baden-Württemberg Stiftung

Antibiotika werden in der Human- und Veterinärmedizin gegen bakterielle Infektionen eingesetzt und stellen eine der wichtigsten Gruppen von Pharmazeutika dar. Eines der drängendsten Probleme, das derzeit im Zusammenhang mit Antibiotika diskutiert wird, ist das vermehrte Auftreten von Antibiotikaresistenzen. Schätzungen gehen davon aus, dass z. Zt. 50.000 Menschen pro Jahr in Europa und in den USA an den Folgen von Antibiotikaresistenzen sterben. Trotz ihres unbestreitbaren Nutzens sowohl in der Human- als auch in der Veterinärmedizin, hat der übermäßige Einsatz von Antibiotika weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt. In den letzten Jahren ist die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen insbesondere in der aquatischen Umwelt zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt.

Unter anderem gelangen Antibiotika durch behandeltes Abwasser oder durch Abfluss von Gülle, die zur Düngung auf landwirtschaftlich bewirtschafteter Fläche aufgebracht wird, in Flüsse oder Seen. In einem vorangegangenen Projekt am Engler-Bunte-Institut, Teilinstitut Wasserchemie und Wassertechnologie, konnte gezeigt werden, dass die die Resistenzen codierenden sogenannten Antibiotikaresistenzgene durch ihre Bindung an Abwasserpartikel ebenfalls durch den Kläranlagenablauf in die

aquatische Umwelt eingetragen werden (Brown et al. 2019). Umstritten ist allerdings, welches Phänomen, Eintrag von Antibiotika oder Antibiotikaresistenzgenen, den Hauptanteil an der Verbreitung der Antibiotikaresistenzen trägt.

Zahlreiche wissenschaftliche Studien deuten darauf hin, dass Antibiotika in subinhibitorischen Konzentrationen verschiedene Mechanismen auslösen, die zur Entstehung und Verbreitung von Antibiotikaresistenzen führen. Andererseits ist nicht geklärt, ob die in der aquatischen Umwelt gemessenen Konzentrationen, sowohl in der Wassersäule als auch in den Sedimenten, hoch genug sind, um diese Mechanismen in den Mikroorganismen zu initiieren. Möglicherweise kann die Adsorption einiger Antibiotika an Flusssedimenten zu einer lokalen Akkumulation der Stoffe führen.

Antibiotika treten in der Größenordnung von ng/L in Oberflächengewässern und in ng/g in Sedimenten auf. Aufgrund der geringen Konzentrationen und der komplexen Matrix ist die quantitative Bestimmung eine analytische Herausforderung und bedarf einer aufwendigen Probenvorbereitung (siehe **Bild 3.2**). Die bereits am Institut entwickelte analytische Methode zur Bestimmung von Antibiotika in Wasserproben wurde auf 19 verschiedene Stoffe erweitert und um ihre Bestimmung in Flusssedimenten ergänzt.

Die entwickelten analytischen Methoden wurden im Rahmen einer Feldstudie in der Alb, ein die Stadt Karlsruhe durchziehendes und als Vorfluter genutztes Fließge-

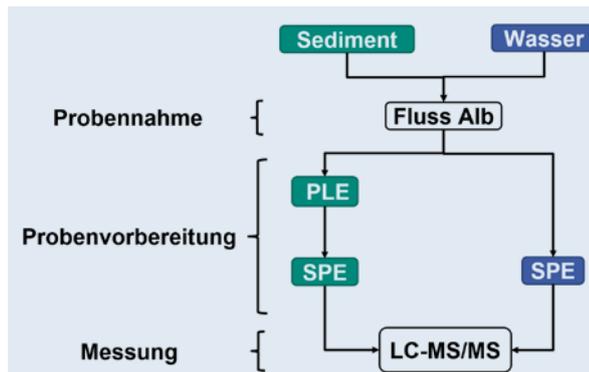


Bild 3.2: Fließschema zum Analysenverfahren von Antibiotika in Sediment- und Wasserproben; PLE (Pressurized Liquid Extraction, beschleunigte Lösemittelextraktion), SPE (Solid-Phase Extraction, Festphasenextraktion), LC-MS/MS (Flüssigkeitschromatographie gekoppelt an die Tandem-Massenspektrometrie).

wässer, angewendet (**Bild 3.3**). Dadurch soll der Verbleib, die Verteilung und Persistenz der Antibiotika in den verschiedenen Umweltkompartimenten Wassersäule und Sediment untersucht werden.

Durch eine Probenvorbereitung mittels Festphasenextraktion (Solid-Phase Extraction, SPE) werden die Antibiotika an einem Adsorbens angereichert und störende Matrixbestandteile entfernt. Mit organischen Lösemittel-



Bild 3.3: Einleitung des Kläranlagenablaufs (links im Bild) in die Alb (rechts).



Bild 3.4: Probenahmestelle Standort 1 (A), Probenahme (B), Schweinestall (C).

teln (z.B. Methanol) werden sie anschließend von der Festphase gespült.

Bei Sedimentproben ist die Probenvorbereitung aufwendiger, da die Antibiotika erst in eine flüssige Phase überführt werden müssen. Die beschleunigte Lösemittelextraktion (Pressurized Liquid Extraction, PLE) stellt dabei eine vielversprechende Methode dar. In die erhitzte Extraktionszelle wird Lösemittel bis zu einem Druck von 10,34 MPa gepumpt. Nach einer Interaktionszeit von 5 bis 15 Minuten wird das Lösemittelgemisch ausgeblasen. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Um eine Wiederfindungsrate von mindestens 45 % zu erzielen, ist eine Optimierung der Extraktionsparameter wie die Art des Lösemittels, die Temperatur und die Anzahl an Extraktionszyklen notwendig.

Die quantitative Bestimmung erfolgt mittels Flüssigkeitschromatographie gekoppelt an die Tandem Massenspektrometrie (LC-MS/MS). Durch eine Messung können alle 19 Antibiotika erfasst werden. Die LC-MS/MS stellt ein sehr sensibles Analyseverfahren mit Nachweisgrenzen im unterem ng/L-Bereich dar.

setzt. Die Umweltprobleme entstehen hauptsächlich, wenn die Dosierung der auf dem Feld ausgebrachten Düngemittel und Gülle über dem Pflanzenbedarf liegt und überschüssige Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor in Gewässer eingetragen werden. Dies führt zu einer erhöhten Nitratbelastung der Grundwasserspeicher und/oder zur Eutrophierung in den Oberflächengewässern.

Darüber hinaus verstärkt eine weltweit steigende Nachfrage nach Fleisch den Einsatz von Antibiotika in der Tierhaltung. Anschließend werden 90 % der verabreichten Stoffe über die Gülle ausgeschieden und können in die Gewässer eingetragen werden. In der Tat können überhöhte Einträge von Antibiotika zur Entwicklung antibiotikaresistenter Bakterien führen. Antibiotikaresistenzgene (ARG) können auch direkt über die Gülle in die Umwelt eingetragen werden.

Vor diesem Hintergrund bieten Membranverfahren eine gute Alternative für eine weitergehende Behandlung von Schweinegülle. Im Rahmen des Projektes KompaGG-N werden Schweinegülle und Gärreste im Pilotmaßstab mit Mikrofiltration (MF) behandelt und eine Nährstoffrückgewinnung angestrebt. Das Permeat der MF wird zur weite-

[1] Brown, P.C.; Borowska, E.; Schwartz, T.; Horn, H.: Impact of the particulate matter from wastewater discharge on the abundance of antibiotic resistance genes and facultative pathogenic bacteria in downstream river sediments. *Science of The Total Environment* 649, 1171-1178, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.394>.

Zweistufige Aufreinigung von Schweinegülle und Gärresten mit Membranverfahren

Prantik Samanta, Harald Horn, Florencia Saravia; Förderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF, 02WQ1516D)

Gülle ist ein unvermeidbares Nebenprodukt der Tierhaltung und wurde in der Vergangenheit als Dünger einge-

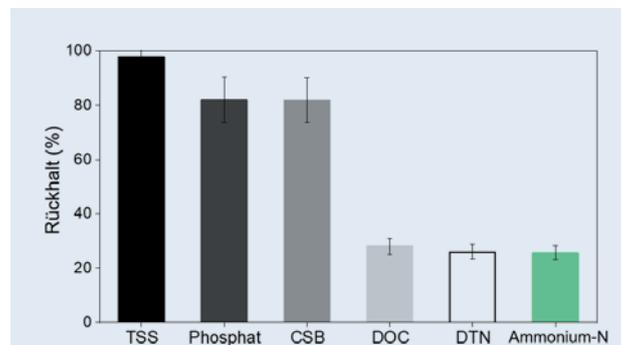


Bild 3.5: Rückhalt der 0,2 µm Mikrofiltration bei Schweinegülle (Standort 1). TSS: gesamte suspendierte Feststoffe; CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf; DOC: gelöster organischer Kohlenstoff; DTN: gesamter gelöster Stickstoff.

ren Entfernung von Antibiotika und ARG mit Nanofiltrationsmembranen nachbehandelt. Damit können Membranverfahren einen wichtigen Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Antibiotika und ARG in die Umwelt leisten.

Verschiedene Proben flüssiger Schweinegülle wurden im Jahr 2020 von zwei verschiedenen Schweinezuchtbetrieben (Standorte 1 und 2, siehe **Bild 3.4**) in Baden-Württemberg genommen und charakterisiert. Weiterhin wurde eine Gärrestprobe an einem Standort (Standort 3) in Niedersachsen untersucht.

Die erste Filtrationsstufe (MF) wurde sowohl mit keramischen als auch mit polymeren MF-Membranen durchgeführt. Die keramische MF-Membran im Pilotmaßstab erreichte eine TSS-Verringerung (Total Suspended Solids: gesamte suspendierte Feststoffe) von mehr als 98 %. Der Phosphatrückhalt lag bei 82 % (**Bild 3.5**). Die CSB-Reduktion (Chemischer Sauerstoffbedarf) durch die MF betrug ca. 80 %. Frühere Studien ergaben eine ähnliche CSB-Retention während der MF. Die Permeabilität der Membran nahm über die ersten Stunden schnell ab und erreichte ein stabiles Niveau bei ca. 30 L/(m² h bar). Der schnelle Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil der zurückgehaltenen Bestandteile die zu Beginn in der Membran vorhandenen freien Poren schnell verblockt, was den Erwartungen entspricht.

In den Proben aus verschiedenen Standorten wurden neben den Antibiotika auch verschiedene ARG nachgewiesen. Insgesamt wurden 67 (Gülle, Standort 1), 63 (Gülle, Standort 2) und 50 (Gärrest, Standort 3, siehe **Bild 3.6**) verschiedene ARG, die zu acht verschiedenen Antibiotika-Gruppen gehörten, quantifiziert. Die Membran NF270 konnte mehr als 99 % der untersuchten ARG entfernen. Allerdings war der Rückhalt von spezifischen ARG niedriger als erwartet: 6 ARG aus der Aminoglycosid-AB-Gruppe und 4 ARG aus der Tetracyclin-Gruppe wurden mittels der NF270-Membran lediglich zu 95 bis 99 % entfernt und wurden im Permeat nachgewiesen. Selbst wenn der Größenausschluss als der dominierende Mechanismus zur ARG-Entfernung durch NF-Membranen vermutet wird, zeigen die Ergebnisse, dass der Transport von ARG durch NF-Membranen noch nicht vollständig verstanden ist. Ein detaillierter Beitrag zur Behandlung von Gülle mit Membranverfahren wird in energie wasser-praxis, Ausgabe 6+7 (2021), erscheinen.

3.3 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen in „peer-reviewed“

Fachjournale und Buchbeiträge

- [2] Ali, R.; Saravia, F.; Hille-Reichel, A.; Härrer, D.; Gescher, J.; Horn, H.: Enhanced production of propionic acid through acidic hydrolysis by choice of inoculum. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, doi:org/10.1002/jctb.6529.
- [3] Balbierer, R.; Seegert, P.; Herberger, S.; Wetzels, T.; Nirschl, H.;

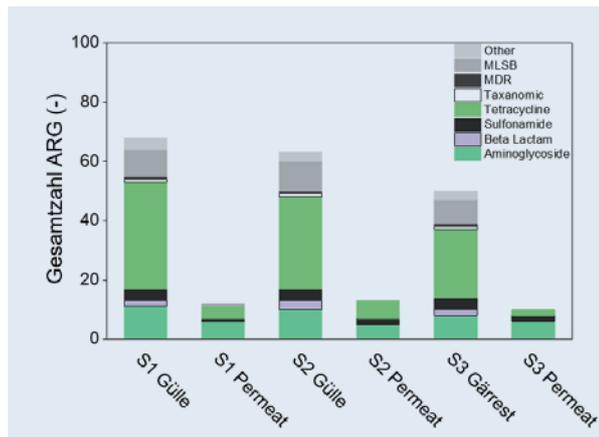


Bild 3.6: Gesamtzahl von gemessenen ARG in unbehandel- ter Gülle und Permeat aus der Nanofiltration (NF270). S1: Standort 1; S2: Standort 2; S3: Standort 3.

- Guthausen, G.: Investigation of transverse relaxation rate distribution via magnetic resonance imaging: Impact of electrode formation. *Energy Technology* 2000579, 1-8, 2020.
- [4] Bogler, A.; Packman, A.; Furman, A.; Gross, A.; Kushmaro, A.; Ronen, A.; Dagot, C.; Hill, C.; Vaizel-Ohayon, D.; Morgenroth, E.; Bertuzzo, E.; Wells, G.; Kiperwas, H.R.; Horn, H.; Negev, I.; Zucker, I.; Bar-Or, I.; Moran-Gilad, J.; Balcazar, J.L.; Bibby, K.; Elimelech, M.; Weisbrod, N.; Nir, O.; Sued, O.; Gillor, O.; Alvarez, P.J.; Cramer, S.; Aron, S.; Walker, S.; Yaron, S.; Nguyen, T.H.; Berchenko, Y.; Hu, Y.; Ronen, Z.; Bar-Zeev, E.: Rethinking wastewater risks and monitoring in light of the COVID-19 pandemic. *Nature Sustainability*, doi: 10.1038/s41893-020-00605-2, 2020.
- [5] Brown, P.C.; Borowska, E.; Peschke, R.; Schwartz, T.; Horn, H.: Decay of elevated antibiotic resistance genes in natural river sediments after sedimentation of wastewater particles. *Science of the Total Environment* 705, 135861, 2020.
- [6] Fengler, C.; Arens, L.; Horn, H.; Wilhelm, M.: Desalination of sea-water using cationic poly(acrylamide) hydrogels and mechanical forces for separation. *Macromolecular Materials and Engineering* 305 (10), 2000383, 2020.
- [7] Gierl, L.; Stoy, K.; Faña, A.; Horn, H.; Wagner, M.: An open-source robotic platform that enables automated monitoring of replicate biofilm cultivations using optical coherence tomography. *npj Biofilms and Microbiomes* 6 (1), 18, 2020.
- [8] Guo, T.; Ji, Y.; Zhao, J.; Horn, H.; Li, J.: Coupling of Fe-C and aerobic granular sludge to treat refractory wastewater from a membrane manufacturer in a pilot-scale system. *Water Research* 186, 116331, 2020.
- [9] Hackbarth, M.; Jung, T.; Reiner, J.E.; Gescher, J.; Horn, H.; Hille-Reichel, A.; Wagner, M.: Monitoring and quantification of bioelectrochemical *Kyrpidia spormannii* biofilm development in a novel flow cell setup. *Chemical Engineering Journal* 390, 124604, 2020.
- [10] Ibrahim, M.; Rudsuck, T.; Kerdi, B.; Krämer, S.; Guthausen, G.; Powell, A.K.: Comparative NMR relaxivity study of polyoxometalate-based clusters $[Mn_4(H_2O)_2(P_2W_{15}O_{56})_2]^{16-}$ and $\{[Dy(H_2O)_6]_2Mn_4(H_2O)_2(P_2W_{15}O_{56})_2\}^{10-}$ from 20 MHz to 1.2 GHz. *Applied Magnetic Resonance*, doi: 10.1007/s00723-020-01267-1, 2020.
- [11] Kaysan, G.; Spiegel, B.; Guthausen, G.; Kind, M.: Influence of shear flow on the crystallization of organic melt emulsions – A

- rheo-nuclear magnetic resonance investigation. *Chemical Engineering & Technology* 43 (9), 1699-1705, 2020.
- [12] Kieselbach, M.; Hogen, T.; Geißen, S.-U.; Track, T.; Becker, D.; Rapp, H.-J.; Koschikowski, J.; Went, J.; Horn, H.; Saravia, F.; Bauer, A.; Schwantes, R.; Pfeifle, D.; Heyn, N.; Weissroth, M.; Fitzke, B.: Brines from industrial water recycling: new ways to resource recovery. *Journal of Water Reuse and Desalination*. jwrd2020033, 2020.
- [13] Klemens, F.; Schuhmann, S.; Balbierer, R.; Guthausen, G.; Nirschl, H.; Thäter, G.; Krause, M.J.: Noise reduction of flow MRI measurements using a lattice Boltzmann based topology optimisation approach. *Computers & Fluids* 197, 104391, 2020.
- [14] Layer, M.; Bock, K.; Ranzinger, F.; Horn, H.; Morgenroth, E.; Derlon, N.: Particulate substrate retention in plug-flow and fully-mixed conditions during operation of aerobic granular sludge systems. *Water Research X* 9, 100075, 2020.
- [15] Liu, W.; Wu, Y.; Zhang, S.; Gao, Y.; Jiang, Y.; Horn, H.; Li, J.: Successful granulation and microbial differentiation of activated sludge in anaerobic/anoxic/aerobic (A²O) reactor with two-zone sedimentation tank treating municipal sewage. *Water Research* 178, 115825, 2020.
- [16] Niestroj-Pahl, R.; Stelmaszyk, L.; ElSherbiny, I.M.A.; Abuelgasim, H.; Krug, M.; Staaks, C.; Birkholz, G.; Horn, H.; Li, T.; Dong, B.; Dähne, L.; Tieh, A.; Panglisch, S.: Performance of layer-by-layer-modified Multibore® ultrafiltration capillary membranes for salt retention and removal of antibiotic resistance genes. *Membranes* 10, 398, 2020.
- [17] Ranzinger, F.; Hille-Reichel, A.; Zehe, E.; Guthausen, G.; Horn, H.: Quantification of evaporation and drainage processes in unsaturated porous media using Magnetic Resonance Imaging (MRI). *Water Resources Research* 56 (2), e2019WR026658, 2020.
- [18] Ranzinger, F.; Matern, M.; Layer, M.; Guthausen, G.; Wagner, M.; Derlon, N.; Horn, H.: Transport and retention of artificial and real wastewater particles inside a bed of settled aerobic granular sludge assessed applying magnetic resonance imaging. *Water Research X* 7, 100050, 2020.
- [19] Reiner, J.E.; Geiger, K.; Hackbarth, M.; Fink, M.; Lapp, C.J.; Jung, T.; Dötsch, A.; Hügler, M.; Wagner, M.; Hille-Reichel, A.; Wilcke, W.; Kerzenmacher, S.; Horn, H.; Gescher, J.: From an extremophilic community to an electroautotrophic production strain: identifying a novel Knallgas bacterium as cathodic biofilm biocatalyst. *The ISME Journal* 14, 1125-1140, 2020.
- [20] Ruffer, H.; Karger, R.; Telgmann, U.; Horn, H.: Kapitel 13: Abwasserreinigung. In: Wasser, Höll, K.; Nießner, R. (Eds.), 989-1084, De Gruyter, Berlin, Boston, 2020.
- [21] Schopf, R.; Schork, N.; Amling, E.; Nirschl, H.; Guthausen, G.; Kulozik, U.: Structural characterisation of deposit layer during milk protein microfiltration by means of in-situ MRI and compositional analysis. *Membranes* 10 (4), 59, 2020.
- [22] Simkins, J.W.; Schuhmann, S.; Guthausen, G.; Heijnen, M.; Codd, S.L.; Seymour, J.D.: Characterization of biofilm distribution in hollow fiber membranes using compressed sensing magnetic resonance imaging. *Journal of Membrane Science* 594, 117437, 2020.
- [23] Sturm, M.T.; Herbort, A.F.; Horn, H.; Schuhen, K.: Comparative study of the influence of linear and branched alkyltrichlorosilanes on the removal efficiency of polyethylene and polypropylene-based microplastic particles from water. *Environmental Science and Pollution Research* 27, 10888-10898, 2020.
- [24] Telgmann, U.; Borowska, E.; Felmeden, J.; Frechen, F.-B.: The locally resolved filtration process for removal of phosphorus and micropollutants with GAC. *Journal of Water Process Engineering* 35, 101236, 2020.
- [25] Timm, A.; Abendschön, P.; Tölgyesi, L.; Horn, H.; Borowska, E.: Solar-mediated degradation of linezolid and tedizolid under simulated environmental conditions: Kinetics, transformation and toxicity. *Chemosphere* 241, 125111, 2020.
- [26] Tosun, J.; Scherer, U.; Schaub, S.; Horn, H.: Making Europe go from bottles to the tap: Political and societal attempts to induce behavioral change. *WIREs Water* 7 (3), e1435, 2020.
- [27] Xiao, K.; Abbt-Braun, G.; Horn, H.: Changes in the characteristics of dissolved organic matter during sludge treatment: A critical review. *Water Research* 187, 116441, 2020.

Teil 4 des Tätigkeitsberichts TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser folgt in Ausgabe 7-8/2021



Autoren
Prof. Dr. rer. nat. Harald Horn
 Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
 Karlsruhe
 Tel.: 0721 608-42580
 harald.horn@kit.edu
 www.ebi.kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Dimosthenis Trimis
 Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
 Karlsruhe
 Tel.: 0721 608-42570
 dimosthenis.trimis@kit.edu
 www.ebi.kit.edu



Prof. Dr.-Ing. Thomas Kolb
 Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
 Karlsruhe
 Tel.: 0721 608-42561
 thomas.kolb@kit.edu
 www.ebi.kit.edu



Dr. rer. nat. Josef Klinger
 TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser
 Karlsruhe
 Tel.: 0721 9678-110
 josef.klinger@tzw.de
 https://tzw.de/