

Entwicklung eines Online-Messgeräts zur Nahe-Echtzeit-Detektion von *E. coli* vor Ort

Motivation

Wasserqualität und -wiederverwendung gewinnen angesichts von Klimawandel, Dürren und wachsender Nachfrage rapide an Bedeutung – in der Landwirtschaft, in Städten und in der Industrie. Zentrale Voraussetzung ist eine verlässliche mikrobiologische Überwachung, denn (pathogene) Bakterien, Viren und Protozoen können innerhalb der Aufbereitungs-, Speicherungs- und Verteilungskette Risiken verursachen. Neben der EU-Verordnung 2020/741 verankern auch WHO-Leitlinien, nationale Dürrestrategien und betriebliche Water-Stewardship-Programme einen risikobasierten, transparenten Nachweis der Wasserqualität als Grundlage für Genehmigung und Nutzung. Vor diesem Hintergrund setzt die EU-Verordnung 2020/741 seit Juni 2023 erstmalig einen EU-weit verbindlichen Rahmen für die landwirtschaftliche Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser, die immer eine zusätzliche Desinfektion erfordert. Zum Schutz von Umwelt und Gesundheit werden mikrobiologische Mindestanforderungen definiert, deren Einhaltung und Überwachung die Kläranlagenbetreiber, Wassernutzer:innen und Behörden vor große Herausforderungen stellt. Die Konzentration der genannten Indikatororganismen kann derzeit nur über kulturelle Verfahren im Labor überwacht werden, wodurch bis zum Befund z. B. beim zentralen Überwachungsparameter *E. coli* i. d. R. 1 – 2 Tage vergehen. Desinfektionsverfahren sind meist mit hohem energetischen Aufwand verbunden. Um diesen nachhaltig so gering wie möglich zu halten, ist eine direkte Vor-Ort Messung des Parameters *E. coli* essentiell. Dafür sind mikrobiologische kulturelle Verfahren nicht geeignet.

Um eine solche Steuerung zu ermöglichen, wird im BMFTR-geförderten Verbundprojekt ECOPLAS ein Messsystem zur Nahe-Echtzeit-Detektion der *E. coli*-Konzentration entwickelt. Das Messsystem wird als vor Ort einsetzbares Gerät mit einer miniaturisierten Detektorelektronik und automatisierten fluidischen Prozessen umgesetzt (**Bild 1**). In Demo-Messkampagnen werden Anwendungen in der Wiederverwendung von aufbereitetem Wasser für landwirtschaftliche Bewässerung sowie zur Gewässerüberwachung unter realen Bedingungen erprobt und mit Anwenderdialogen begleitet.

Das ECOPLAS-Messsystem

Das ECOPLAS-Messsystem ist ein innovatives, kompaktes (Online-)Gerät zur Detektion von *E. coli*-Zellen zur Vor-Ort-Überwachung in Süßwasser. Mittels photonischem Sensor werden die *E. coli*-Konzentration und der Zellviabilitätsstatus (Membran intakt/nicht intakt) ohne aufwendiges Kulturverfahren oder den Nachweis von Stoffwechselprodukten erfasst. Das „Herzstück“ des Sensors ist ein Gitter aus Nanosäulen, das mit einer dünnen Goldschicht überzogen ist und wie ein Feld aus Stimmgabeln auf Licht reagiert (**Bild 2**). Trifft Licht senkrecht auf diese Goldoberfläche, geraten die Elektronen darin in kollektive Schwingungen, sogenannte Oberflächenplasmonen. Wie bei einer Stimmgabel hat diese Schwingung eine bevorzugte „Tonhöhe“ – hier eine bestimmte Wellenlänge des transmittierten Lichts. Diese Wellenlänge verschiebt sich, sobald sich der Brechungsindex der Umgebung der Goldoberfläche verändert, z. B. durch die Anbindung von *E. coli*-Zellen. Die Goldoberfläche wird dafür mit Antikörpern als spezifische Erkennungsstruktur gegen *E. coli* funktionalisiert, sodass bei Anbindung von *E. coli*-Zellen aus der Wasserprobe eine Echtzeitänderung der Resonanzwellenlänge proportional zur *E. coli*-Konzentration detektiert werden kann.

Dieser Effekt wird mit der Messung der Fluoreszenzemission kombiniert, um im selben Messzyklus die Zellviabilität der *E. coli*-Zellen zu erfassen. Je nach Membranzustand der *E. coli*-Zellen wird nach Zugabe von Fluoreszenzfarbstoffen Licht unterschiedlicher Wellenlänge detektiert und erlaubt eine Unterscheidung zwischen intakter und nicht intakter Zellmembran und damit Rückschluss auf den Grad der Desinfektion.

Das System soll vollständig automatisiert arbeiten: Probenahme, Messung, Regenerierung und Reinigung erfolgen selbstständig direkt am Einsatzort. Die integrierte Probenvorbereitung lässt sich der jeweiligen Wasserqualität anpassen. Das Messsystem kann entweder als tragbare Einheit, als Labortischgerät oder als Standgerät für die Integration in Anlagensteuerungen genutzt werden. Es soll auch für den

Quelle: ECH



Bild 1: Illustration des ECOPLAS-Messsystems in einem Koffer

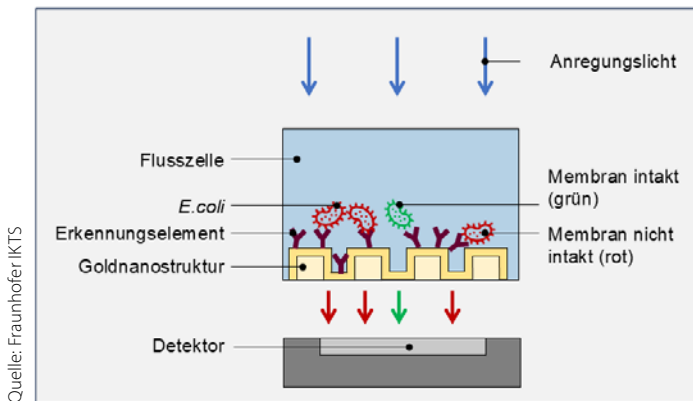


Bild 2: Funktionsprinzip der Detektion von *E. coli*-Konzentration und Zellviabilität

Remote-Einsatz geeignet sein. Es werden vorkalibrierte Sensorsubstrate sowie eine integrierte Selbstüberwachung zum Einsatz kommen.

Das Messsystem wird Konzentrationsangaben für den Indikatororganismus *E. coli* ausgeben, der in Regularien wie EU 2020 / 741, EC 2017 / C 163 / 01, 2006 / 7 / EG und DIN 19650 verwendet wird. Der Betrieb wird automatisch mit einstellbaren Messzyklen über eine externe Ansteuerung, z. B. durch einen Trübungssensor, oder manuell erfolgen.

Potenzielle Anwendungsfelder

Mit dem neuen Messsystem kann die Einhaltung mikrobiologischer Mindestanforderungen (für dem Parameter *E. coli*) sichergestellt werden. Verschiedene Anwendungsbereiche sind für das ECOPLAS-Messsystem grundsätzlich vorstellbar. Mit dem avisierten *E. coli*-Konzentrationsmessbereich von 10 –

10.000 KBE / 100 ml Wasser eignet sich der Einsatz des Gerätes beispielsweise in den folgenden Bereichen:

- der Abwasserbehandlung mit dem Ziel der optimierten Regelung der Aufbereitung für die Wasserwiederverwendung, der landwirtschaftlichen Bewässerung im Feld und Gewächshaus,
- dem Gewässerschutz inkl. der Überwachung der Badewasserqualität,
- der kommunalen Überwachung von Betriebswasser aus Abwasser(teilstromen), Niederschlagswasser, Flusswasser etc.,
- der Rohwasserüberwachung zur Trinkwassergewinnung, der Schnellanalyse von Wasserproben diverser Herkunft im Labor.

Praktische Erprobung

An konkreten Beispielen wird die Anwendung des Messsystems in der Praxis demonstriert und erprobt.

Auf dem Klärwerk Steinhof in Braunschweig wird Abwasser gereinigt und desinfiziert, damit es auf landwirtschaftlichen Flächen unter anderem zur Bewässerung von Energie- und Industriepflanzen genutzt werden kann (**Bild 3**). Das ECOPLAS-Messsystem wird in unmittelbarer Nähe der UV-Desinfektion des Klärwerks Steinhof installiert (**Bild 4**). Durch eine automatisierte Messung lässt sich eine engmaschigere Überwachung der Desinfektionsstufe realisieren und eine Steuerung der Desinfektionsanlage ermöglichen. Im Projekt wird angestrebt, basierend auf dem Messsystem ein Regelkonzept für UV-Anlagen zu entwickeln, sodass die gemessenen Restkonzentrationen der *E. coli* die Intensität der UV-Strahlung direkt beeinflussen. Innerhalb einer mehrmonatigen Messkampagne ab voraussichtlich Ende 2026 wird das Messsystem bei



Bild 3: Anwendungsort für das Messsystem: Überwachung von Bewässerungswasser wie z.B. bei der Kartoffelbewässerung.

Quelle: AVB



Bild 4: Auf dem Klärwerk Steinhof wird das ECOPLAS-Messsystem in unmittelbarer Nähe der UV-Desinfektion installiert.

BETEILIGUNG IM ANWENDERDIALOG

Interessiert am Messsystem? Dann beteiligen Sie sich gerne am ECOPLAS-Anwenderdialog. Die ersten Austauschrunden finden im Frühjahr/Sommer 2026 statt. Interessierte können sich ab sofort melden. Zu einem späteren Zeitpunkt wird zudem die Besichtigung des Messsystems im Probetrieb möglich.

Kontakt: Dr. Martina Winker
martina.winker@isoe.de, Tel. 069-7076919-53

unterschiedlichen Betriebsbedingungen und für die Erzeugung verschiedener Wasserqualitäten zum Einsatz kommen. Zudem wird das Messsystem im Bereich der Gewässerüberwachung im Gebiet der Emschergenossenschaft und des Lippeverbands im praktischen Einsatz getestet (**Bild 5**). Insbesondere in dicht besiedelten urbanen Räumen besteht ein hoher und vielfältiger Nutzungsanspruch an Gewässer, unter anderem für die Freizeitnutzung und Naherholung. Die mikrobiologische Wasserqualität von Fließgewässern unterliegt allerdings großen Schwankungen. Zahlreiche Faktoren des Fließgewässers selbst und aus dem Einzugsgebiet haben Einfluss auf diese Dynamik wie z. B. Niederschlags- und Mischwasserentlastungen. Für Gewässerabschnitte mit intensiver öffentlicher Nutzung ist daher eine kontinuierliche Überwachung der Wasserqualität empfehlenswert. Für ausgewiesene Badegewässer werden in der Badegewässerrichtlinie 2006/7/EG unter anderem konkrete Vorgaben zur Überwachung der *E. coli*-Konzentrationen gemacht. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollen Messungen an verschiedenen Gewässerabschnitten mit unterschiedlichen Randbedingungen und zu erwartenden Belastungen durchgeführt werden. Perspektivisch ist die Integration des Messsystems in ein Frühwarn- und Überwachungssystem z. B. für Badestellen denkbar.

Anwenderdialog – Einbindung der Praxis

Ziel des ECOPLAS-eigenen Anwenderdialogs ist es, die Entwicklung des Messsystems mit Blick auf zukünftige Anwendungen und Nutzer:innen abzusichern. Der Dialog ermittelt die Erwartungen und Anforderungen an das Messsystem in den verschiedenen Anwendungsbereichen, so dass diese in der Entwicklung des Messsystems berücksichtigt werden können. So wird das Risiko reduziert, dass wichtige Elemente übersehen werden und es dadurch zu aufwendigen Produktüberarbeitungen und Ver-



Quelle: EGLV

Bild 5: Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) können das Messsystem in die Überwachung der Gewässerqualität integrieren.

zögerungen in der Markteinführung kommt. Dies ist insbesondere wichtig, da es mehrere mögliche Anwendungsoptionen des Messsystems gibt (als Labormessgerät, im Feld, zur kontinuierlichen Onlineüberwachung) und diese in unterschiedlichen Überwachungssituationen eingesetzt werden.

Dazu erarbeitet der ECOPLAS-Verbund derzeit eine Dialogreihe mit den potenziellen zukünftigen Anwender:innen, um die Erwartungen und Anforderungen an das Messsystem bzgl. Handling, Prozesse und Anwendungsumfeld zu ermitteln. Hierzu werden Anlagenbauer, Kläranlagenbetreiber, Landwirte, Wasser- & Bodenverbände, kommunale Akteure aus Stadtentwässerung und Stadtgrün, Betriebswassererzeuger, Gewässerschützer und Verantwortliche für die Überwachung von Badegewässern sowie in Laboren tätige Personen eingeladen, in den Austausch zu treten (s. **Infobox**). Die Dialogreihe wird durch das Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) verantwortet.

Ausblick

Wasserressourcen stehen durch den Klimawandel zunehmend unter Druck. Die Nationale Wasserstrategie nennt zahlreiche Ansatzpunkte, um Deutschland darauf vorzubereiten und mit dem sich quantitativ und qualitativ reduzierenden Ressourcenangebot umzugehen. Viele Maßnahmen bedürfen einer effektiven und zeitnahen Überwachung der Wasserqualität, um Wasser stärker im Kreislauf zu führen oder alternative Wasserressourcen wie aufbereitetes Abwasser einsetzen zu können. Genau hier will das Messsystem Antworten bieten, da es eine quasi-kontinuierliche mikrobiologische Qualitätskontrolle für den Parameter *E. coli* bietet. Mit dem zu entwickelnden Messsystem werden über eine effizientere Regelung von Desinfektionsprozessen zudem auch Einsparungen von Energie und damit verbundenen CO₂-Äquivalenten und Betriebsmitteln ermöglicht.

Danksagung

Bei Autor:innen danken dem Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) für die gewährte Unterstützung für dieses Forschungsvorhaben.

Autor:innen:

Laura Backes, M.Sc., Dr. Tim Fuhrmann
EWLW – Emscher Wassertechnik GmbH

Dr. Michael Hahn, Dr. Dorit Wilke, ECH Elektrochemie Halle GmbH

Janina Heinze, Abwasserverband Braunschweig

Dr. Christiane Schuster, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme – IKTS

Bosse Schwedt, Nicole Zacharias, Institut für Hygiene und Public Health / Universitätsklinikum Bonn

Dr. Martina Winker, ISOE – Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH

Kurz nachgefragt bei...

...Dr. Michael Hahn



Quelle: Marco Warmuth

Dr. Michael Hahn ist Geschäftsführer der ECH Elektrochemie Halle GmbH und ECOPLAS-Verbundkoordinator.

Warum reichen bestehende Messverfahren aus wissenschaftlicher Sicht nicht mehr aus?

Bestehende Nachweissysteme für mikrobiologische Parameter, z. B. mikrobiologische kulturelle Verfahren und qPCR, sind nicht direkt vor Ort und nicht ohne entsprechende Infrastruktur anwendbar. Kulturverfahren, bei denen wenige Milliliter Wasserprobe direkt auf Nährböden ausplattiert werden, sind aufgrund der Teilungsraten der Bakterien aufwendig. Für den Nachweis von *E. coli* mittels klassischer mikrobiologischer Kulturverfahren vergehen je nach Methode 24 bis 72 h nach Eingang der Probe im Untersuchungslabor. In-situ-Kulturverfahren können auch schon in 2-12 h Ergebnisse liefern, sind aber nur in einer limitierten Anzahl von Messungen ohne externe Eingriffe durchführbar. Die langen Analysezeiten der bisher eingesetzten Verfahren erlauben keine Echtzeitanwendungen, wie beispielsweise für die gezielte Regelung von Desinfektionsverfahren.

Worin liegt die zentrale wissenschaftliche Innovation des Messsystems?

Die technologische Innovation des Messsystems liegt vor allem in der Entwicklung des plasmonischen Sensors. Bei diesem für mikrobiologische Parameter neuartigen Messsystem erlaubt die Funktionalisierung der Sensoroberfläche eine passgenaue Selektion der zu detektierenden Bakterien (hier für *E. coli*). Für den Sensor und die mikrofluidischen Strukturen besteht erheblicher Entwicklungsbedarf, um die Methodik in eine praxistaugliche Anwendung zu bringen. Die Entwicklung eines Detektionsverfahrens für pathogene Bakterienbelastungen, welches innerhalb einer Stunde strategische Aussagen zulässt, ist uns ein großer Ansporn für die Lösung der komplexen Herausforderungen.

Wie belastbar sind die Messergebnisse unter realen Umweltbedingungen mit stark variierender Wasserqualität?

Unser Messsystem ist für ausgewählte Anwendungsbereiche konzipiert, die einen gewissen Reinheitsgrad der Wasserproben voraussetzen. Ein hoher Organikanteil oder eine zu starke Trübung macht den direkten Einsatz des Messsystems ohne zusätzliche Probenaufbereitung unmöglich.

Der E. coli-Messbereich wird voraussichtlich zwischen 10 und 10.000 KBE/100 ml liegen. Wir streben dabei eine maximale Messunsicherheit von 10 % an. Die Belastbarkeit der Messergebnisse soll in Praxistests erprobt werden.

Welche Schritte sind notwendig, um von der Demonstration zur breiten Anwendung zu kommen?

Im Kern steht zunächst die Entwicklung des plasmonischen Sensors, die in der Kooperation unter anderem zwischen Fraunhofer IKTS, Institut für Hygiene und Public Health am Universitätsklinikum Bonn und Dresden Elektronik Ingenieurtechnik GmbH erfolgt. Die GeSiM - Gesellschaft für Silizium-Mikrosysteme mbH stellt dann die Prozesstechnik bereit, die den Betrieb des Sensors ermöglicht. Elektrochemie Halle GmbH integriert die Messtechnik in ein Gesamtsystem, welches dann den Praxiseinsatz ermöglicht.

Nach Validierung des Sensors mit klassischen (kulturellen) Nachweisverfahren erfolgt der Praxistest. Über die Erpro-

bung des Messgeräts beim Abwasserverband Braunschweig und im Gewässermonitoring (Emscher Wassertechnik GmbH) wie auch den Anwenderdialog (Institut für sozial-ökologische Forschung) gewinnen wir zudem wichtige Erfahrungswerte und Erkenntnisse, die uns helfen, das Produkt und das User-Interface weiterzuentwickeln. Weitere Schritte sind die Entwicklung eines robusten marktauglichen Messgerätes mit einfacher Handhabung für den Anwender und Maßnahmen zur Markteinführung.

Könnte der Ansatz auch auf andere Indikatororganismen oder Umweltmedien übertragen werden?

Der Entwicklung des Messprinzips für den plasmonischen Sensor zur E. coli-Detektion liegen vorherige Erkenntnisse aus der Messung von Diclofenac in der 4. Reinigungsstufe der Kläranlage zugrunde, das als organische Kohlenstoffverbindung deutlich einfacher zu detektieren ist. Erste Untersuchungen mit Legionellen als mikrobiologischem Indikatororganismus zeigen einen weitergehenden Entwicklungsbedarf. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird erwartet, dass die nun entwickelte Sensoreinheit insbesondere über die spezifische Funktionalisierung der Sensoroberfläche zukünftig auch auf die Detektion anderer Stoffe und Organismen übertragbar sein wird.

EWLW

**Wasser braucht
Kompetenz.
Wir liefern sie.**

- / Abwasser- und Schlammbehandlung
- / Betriebliches Management
- / Entwässerungssysteme für Regen- und Abwasser
- / Gewässerumgestaltung und Wasserbau
- / Hydrogeologie und Grundwassermodellierung
- / Hydrologie, Hydraulik und Ökologie
- / Kanalnetz- und Schmutzfrachtmodellierung
- / Projektsteuerung

Brunnenstraße 37, 45128 Essen, T 0201 3610 - 0, info@ewlw.de