

On-line Monitoring of of Drinking Water Based on a Biological Broad-Spectrum Sensor with Automatic Image Evaluation (AquaBioTox)

Onlinefähige Trinkwasserüberwachung auf Grundlage eines biologischen Breitbandsensors mit automatischer Bildauswertung (AquaBioTox)

Fereshte Sedehizade, Berliner Wasserbetriebe, Berlin, Fereshte.Sedehizade@bwb.de

Iris Trick, Anke Burger-Kentischer, Tanja Maucher, Georg Geiger

Fraunhofer IGB, Stuttgart, Iris.Trick@igb.fraunhofer.de

Thomas Bernard, Helge-Björn Kuntze, Thomas Müller, Felix Sawo

Fraunhofer IITB, Karlsruhe, Thomas.Bernard@iitb.fraunhofer.de

Christian Moldaenke, bbe Moldaenke, Kiel, CMoldaenke@BBE-moldaenke.de

Abstract

Water networks are exposed to deliberate or accidental contamination. Especially the drinking water supply is in potential danger to be a terroristic target and public health risks need to be detected in due time. This is why drinking water regulations provide for examining special germs and chemical substances on a regular basis. But today's analytical techniques which are carried out offline in special laboratories are time-consuming to warn the population of contamination risks in time. Their application spectrum is limited, e. g. by separating affected parts of the water supply mains. On the other side they are only limited in spectrum – unknown or unexpected toxic substances are unconsidered which can threaten people's health in the same way.

Considering the changed level of threats an early identification of contaminants in drinking water is very important. It should respond quickly and reliably, be robust against false alarm, easy to handle by persons without scientific qualification and the operation should be economically in view of costs of purchase and maintenance.

The project AquaBioTox aims to develop and realize such a system. Its operating principle is as follows: Highly sensitive biological microorganisms are exposed to drinking water taken from the main water current, their reaction is continuously monitored by a camera and the data is automatically analyzed in an online procedure. Any characteristic changes, for example regarding their vitality, movement, colouring or glowing, are automatically indicated.

The system is properly combined with other sensors available on the market in order to ensure maximum diagnosis reliability and robustness against false alarm in online diagnosis. This combined broadband sensor concept can be used not only to diagnose contamination with hazardous substances but also in more general quality and safety checks on water supply facilities.

Ongoing works deal with the prototypical realization of the biological sensors as well as with the automatization and image evaluation of the processes. The project aims to show the efficiency of the sensor system at a test track of the Berlin Waterworks.

1 Motivation

Wassernetze sind einer Gefährdung durch absichtliche oder unabsichtliche Verunreinigungen ausgesetzt. Insbesondere in der Trinkwasserversorgung, die zudem ein potenzielles Terror-Angriffsziel darstellt, müssen Gefahren für die öffentliche Gesundheit rechtzeitig erkannt werden. Die Trinkwasserverordnung verlangt deshalb routinemäßige Untersuchungen auf bestimmte Krankheitserreger und chemische Stoffe. Die hierbei eingesetzten Analyseverfahren, die in speziellen Labors offline durchgeführt werden, sind einerseits zu langwierig, um in Fällen von Kontaminationen die Bevölkerung rechtzeitig warnen zu können und wirksame Abhilfemaßnahmen (z. B. Abtrennung betroffener Teile des Wasserversorgungsnetzes) einleiten zu können. Andererseits beschränken sie sich auf ein begrenztes Spektrum. Unbekannte oder nicht erwartete toxische Stoffe, die die Gesundheit des Menschen in gleicher Weise bedrohen können, bleiben unberücksichtigt.

Für die frühzeitige Erkennung von gesundheitsbedrohenden Kontaminationen im Trinkwasser wird jedoch gerade angesichts einer veränderten Bedrohungslage ein onlinefähiges breitbandiges Testverfahren für die Trinkwasserkonformität benötigt, das sehr schnell und zuverlässig reagiert, robust gegenüber Fehlalarmen ist, von Personen ohne wissenschaftliche Qualifikation bedient werden kann und dessen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten wirtschaftlich vertretbar sind. Gegenwärtig stehen solche onlinefähigen und breitbandigen Testverfahren bzw. Sensorsysteme nicht zur Verfügung.

2 Systemkonzept

In dem gegenwärtig laufenden BMBF-Verbundvorhaben AquaBioTox soll daher ein generisches Trinkwasserüberwachungskonzept für einen onlinefähigen Breitband-Toxizitätssensor entwickelt und prototypisch realisiert werden, das auf automatischer Bildauswertung beruht und sich mit anderen am Markt verfügbaren toxisch relevanten Sensoren bzw. integrierten Sensorchips sinnvoll kombinieren lässt. Das in **Bild 1** schematisch dargestellte Biosensorprinzip beruht darauf, aus dem Hauptwasserstrom eine kleine Menge abzuzweigen und damit Indikator-Organismen zu umspülen, deren Vitalität von einer geeignet positionierten und ausgelegten Kamera kontinuierlich beobachtet und automatisch ausgewertet wird.

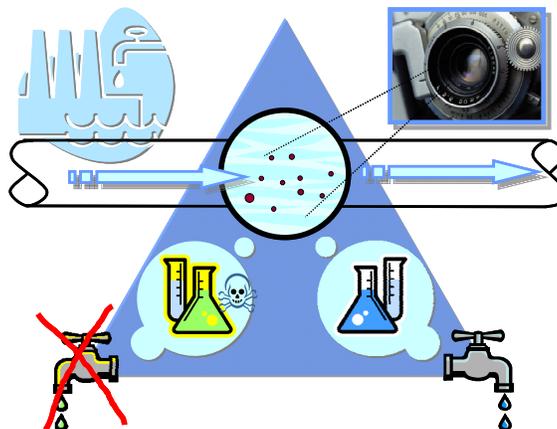


Bild 1: Schema des AquaBioTox-Systemkonzeptes.

Um eine hohe Breitbandigkeit hinsichtlich möglicher Giftsznarien zu erreichen und eine hohe Ansprechempfindlichkeit bei geringer Fehlalarmwahrscheinlichkeit zu erzielen, werden mehrere unterschiedliche Biosensorkomponenten in das AquaBioTox-Systemkonzept einbezogen. Neben verschiedenen Bakterienstämmen und mammalische Zellen, die bei toxischer Schädigung ihre Fluoreszenz verlieren, werden auch Wasserflöhe (Daphnien) integriert, die dann ein charakteristisches Bewegungsverhalten annehmen.

Da sich die Vitalität der verwendeten Mikroorganismen nicht ausschließlich in Abhängigkeit von der Toxizität des Wassers verändert, sondern möglicherweise auch bei anderen unbedenklichen Schwankungen des Wasserzustandes (z. B. Temperatur, pH, O₂-Gehalt etc.), ist es notwendig, die Umgebungsbedingungen der Mikroorganismen in dem vom Fraunhofer IGB entwickelten verfahrenstechnischen Prozess durch Automatisierung so zu stabilisieren, dass eine eindeutige Abhängigkeit zwischen anomalen Vitalitätsverhalten der Mikroorganismen und der Toxizität des Wassers aufrecht erhalten wird.

Die Online-Diagnose relevanter Vitalitätsmerkmale der Organismen (z. B. Bewegungsgeschwindigkeit, Fluoreszenzverhalten) erfolgt primär mit Hilfe eines bildgebenden Sensors und unter Verwendung modell- und wissensbasierter Methoden der automatischen Bildauswertung die vom Fraunhofer IITB entwickelt werden. Für die Fusion der verschiedenen heterogenen Sensorinformationen und -daten zu einem belastbaren Gesamtdiagnoseergebnis werden probabilistische Methoden (Bayes-Verfahren) sowie lernfähigen Neuro-Fuzzy-Methoden angewendet.

Die zunächst auf einer gemeinsamen Systemplattform von bbe Moldaenke integrierten und vorgetesteten Hardware- und Softwarekomponenten werden schließlich in einem stillgelegten Bereich des Netzes der Berliner Wasserbetriebe unter realistischen Praxisbedingungen erprobt und optimiert.

3 Biologische Sensoren

Die *biologischen Sensoren* sind das Kernstück von AquaBioTox. Diese reagieren sensitiv auf den Eintrag von Verunreinigungen oder toxischen Stoffen. Als biologische Systeme werden sowohl zwei mikrobiologische Sensoren und zwei mammalische Zellsysteme des Fraunhofer IGB als auch ein an die Fragestellung angepasstes Daphnientoximeter von bbe Moldaenke verwendet. Die spezifischen Eigenschaften der biologischen Sensoren werden in den folgenden Abschnitten 3.1 und 3.2 näher erläutert.

3.1 Sensoren auf der Basis von Zellsystemen

Die im Fraunhofer IGB für AquaBioTox etablierten biologischen Systeme sind:

- *Escherichia coli* RFP-IGB (**Bild 2a**)
- *Caulobacter crescentus* RFP-IGB (**Bild 2b**)
- Hamsterzelllinie CHO-K1-RFP-IGB und humane Zelllinie HEK 293T-RFP-IGB (**Bild 3**)

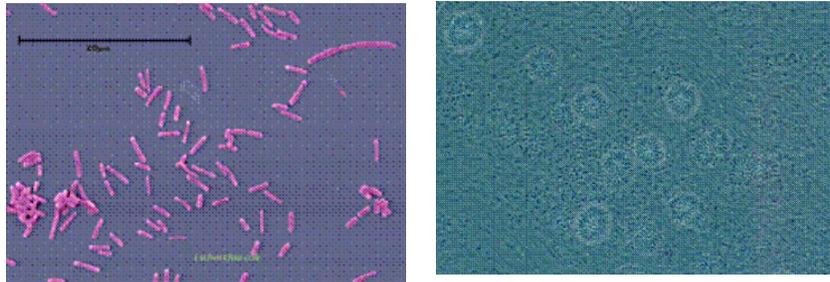


Bild 2: Bakterielle Systeme in AquaBioTox: **(a)** Zellen von *Escherichia coli* und **(b)** *Caulobacter crescentus*

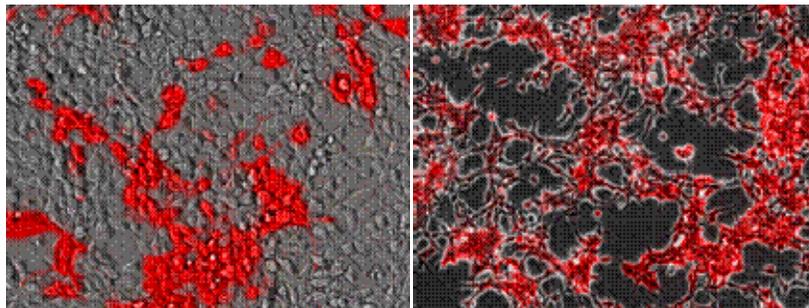


Bild 3: Mammalisches System in AquaBioTox: **(a)** Hamsterzelllinie CHO und **(b)** humane Zelllinie HEK 293T.

Auswahl und Etablierung geeigneter Zellsysteme: Die mikrobiellen Populationen bestehen aus einer Vielzahl mikroskopisch kleiner Zellen, die in hoher Populationsdichte auf kleinstem Raum bereit gestellt werden können und aufgrund der großen Oberfläche einen raschen Stoffaustausch ermöglichen und damit eine sehr rasche Reaktion auslösen können. Die bislang experimentell getesteten Reaktionszeiten liegen bei < 5 min, was für einen späteren Einsatz als Alarmsystem von großer Bedeutung ist.

Zwei Bakterienstämme wurden so modifiziert, dass sie bei Kontakt mit verschiedenen chemischen Substanzen mit einer signifikanten Farb- bzw. Fluoreszenzänderung reagieren, die mit einer Fluoreszenzmesssonde aufgenommen und ausgewertet wird. Um die Breitbandigkeit zu erhöhen, wurden zwei mammalische Zelllinien mit demselben Fluoreszenzmarker versehen. Damit wird eine größere genetische und metabolische Nähe zu menschlichen Organismen erreicht und das Reaktionsspektrum abgesichert und erweitert. Die fluoreszierenden Organismen exprimieren das Red Fluorescent Protein Turbo FP 602 mit einer Anregungswellenlänge von $\lambda = 574$ nm.

Testsysteme: Die biologischen Sensoren werden im immobilisierten Zustand auf verschiedenen Trägermaterialien in Bioreaktoren (20ml-Volumen) realisiert, in denen die Messungen mit der Fluoreszenzsonde aufgenommen werden. **Bild 4** zeigt die makroskopisch wahrnehmbare Farbänderung hier bei dem Testorganismus *Escherichia coli* RFP-IGB, zu beobachten auf zwei verschiedenen Trägermaterialien.

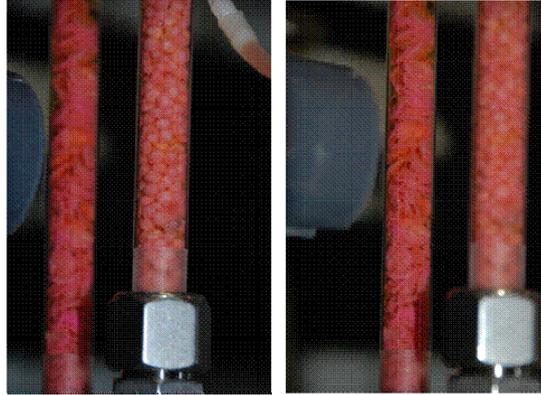


Bild 4: Messzelle mit den immobilisierten Mikroorganismen: Fluoreszenzänderungen mit bbe-Sonde messbar. Makroskopisch sichtbare Farbänderungen von pink (links) nach orangefarben (rechts) nach Zugabe von Testsubstanz.

Prüfung auf Sensitivität: Die Sensitivität wurde für eine Reihe relevanter Substanzen geprüft. Die Messwerte wurden dabei mit einer für den Wellenlängenbereich geeigneten Fluoreszenzsonde der Fa. bbe Moldaenke aufgenommen. Aus **Bild 5** ist zu entnehmen, dass bei Zugabe einer Testsubstanz die Signaländerung bereits nach 3 – 5 Minuten deutlich erkennbar ist.

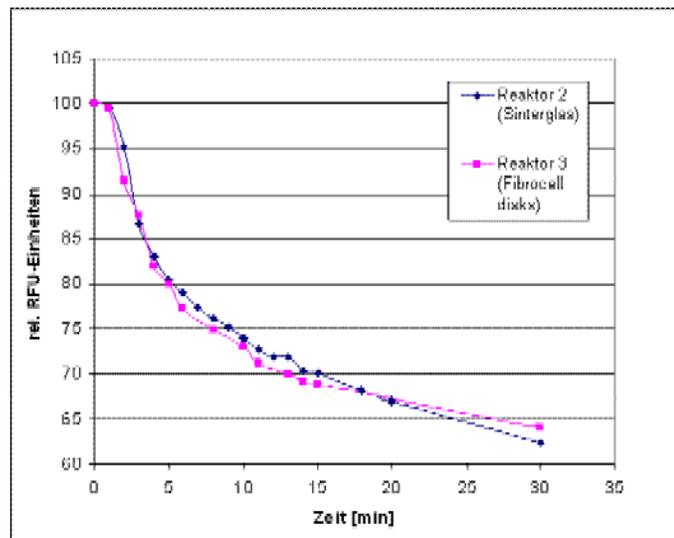


Bild 5: Prüfung der Funktionalität des Testsystems und der Sensitivität der Testorganismen: Zwei verschiedene Trägermaterialien zur Immobilisierung. Fluoreszenzabnahme nach 3 – 5 min deutlich erkennbar. (Testorganismus *Escherichia coli* RFP-IGB).

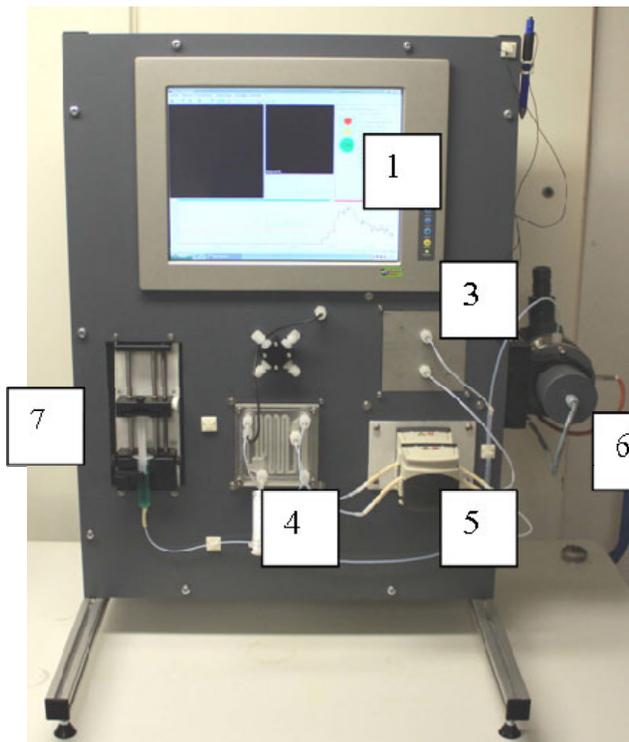
Stabilität der Zellsysteme: Die Stabilität für die mikrobiellen und mammalischen Zellsysteme kann mindestens für 3 Wochen (maximal getesteter Zeitraum für die verwendeten Bakterienkulturen) aufrecht erhalten werden. Mit den mammalischen Zelllinien wurden Vitalität und Fluoreszenz auch nach 10-wöchiger Inkubation nachgewiesen.

3.2 Daphnien-Toximeter

Grundlage dieses biologischen Teilsensors ist eine Adaption eines Daphnientoximeters an die speziellen Anforderungen der Trinkwasserüberwachung durch Fa. bbe Moldaenke. **Bild 6** zeigt den schematischen Aufbau und die Hauptfunktionsträger des Gerätes.

Als Daphnientyp wurde der Organismus *Daphnia magna* ausgewählt, da er sich als sensibel gegen Nervengifte erwiesen hat und somit als Biosensor gut geeignet ist. Die Daphnien bewegen sich in einer Messzelle im Inneren des Gerätes. Ihre Bewegungen werden mit Hilfe einer Kamera aufgezeichnet, die Bewegungsmuster mit Hilfe geeigneter Bildauswertungs-Algorithmen, automatisch ausgewertet (vgl. Abschnitt 5). Die Auswertungssoftware ermittelt dabei die mittlere Schwimgeschwindigkeit, die Schwimmhöhe, den mittleren Abstand, die Verteilung der Schwimmbewegungen, die fraktale Dimension der Schwimmbewegungen und die Anzahl der lebenden Organismen. Diese Daten werden auf plötzliche Veränderungen untersucht und nach Wichtigkeit bewertet. Die Gesamtheit der gewichteten Bewegungsmuster wird auf ungewöhnliche und damit alarmwürdige Fälle untersucht, ein Alarm kann ausgelöst werden.

Die Leistungsfähigkeit des biologischen Teilsensors Daphnientoximeter wird durch den in **Bild 7** dargestellten Dauerversuch belegt, bei dem in verschiedenen Zeitabständen das Wasser durch Gift kontaminiert wurde. Die plötzlichen Änderungen der fraktalen Dimension (unteres Bild) und der mittleren Geschwindigkeit (mittleres Bild) tragen zum Toxizitätsindex (oberes Bild) bei und lösen einen Alarm aus (roter Balken).



Das Daphnientoximeter beinhaltet:

1. Industrie-PC (Windows XP), Touchscreen
2. Evaluierungssoftware
3. Messkammer, Videokamera
4. Temperaturregelung
5. Pumpe
6. Entgasung, Durchflussmessung etc.
7. Injektionssystem für Futter

Bild 6: Schematischer Aufbau des neuen Daphnientoximeters

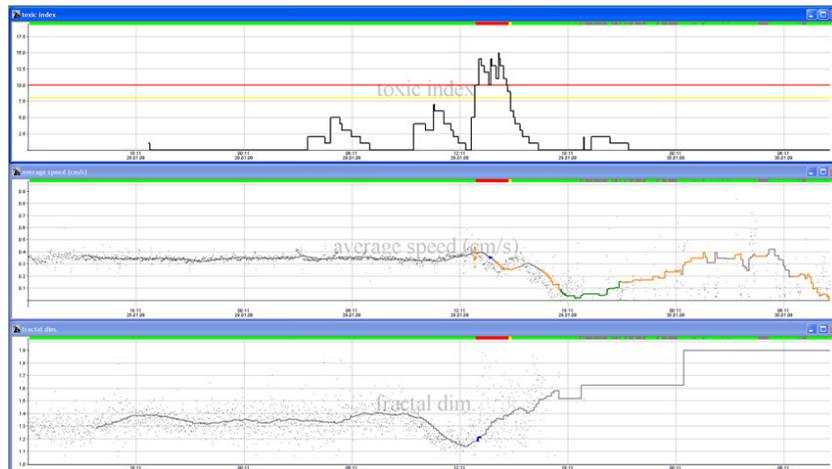


Bild 7: Verhalten des Toximeters bei einem Dauertest mit Giftstoffeintrag (oben: Toxizitäts-Index, mitte: mittlere Geschwindigkeit der Daphnien, unten: fraktale Dimension)

Von bbe Moldaenke wurde in Zusammenarbeit mit den Berliner Wasserbetrieben eine Überwachungssoftware („IT SEES“) entwickelt, die Signale von schon vorhandenen und zusätzlichen Sensoren zur Nutzung als Alarmsystem einbinden kann. Dazu zählen physikalisch-chemische Sensoren wie pH, Redox, Leitfähigkeit, Temperatur etc., aber optional auch Ergebnisse von Biomonitoring, UV-Absorptionswerte oder Chlorkonsum.

Die Software untersucht alle Signale nach relativ plötzlichen und untypischen Ereignissen, die in etwa gleichzeitig vorkommen müssen. Ein Bewertungssystem entscheidet automatisch, ob es sich um einen ‚Alarmfall‘ oder um natürliche Vorkommnisse handelt. In Bild 8 ist eine beispielhafte Auswertung gezeigt. Es ist zu erkennen, dass der Alarmindex trotz deutlicher – aber harmloser – Änderungen der Werte der physikalisch-chemischen Sensoren den kritischen Alarmindex-Wert 100 nicht erreicht, d.h. es wird korrekterweise kein Alarm ausgegeben.

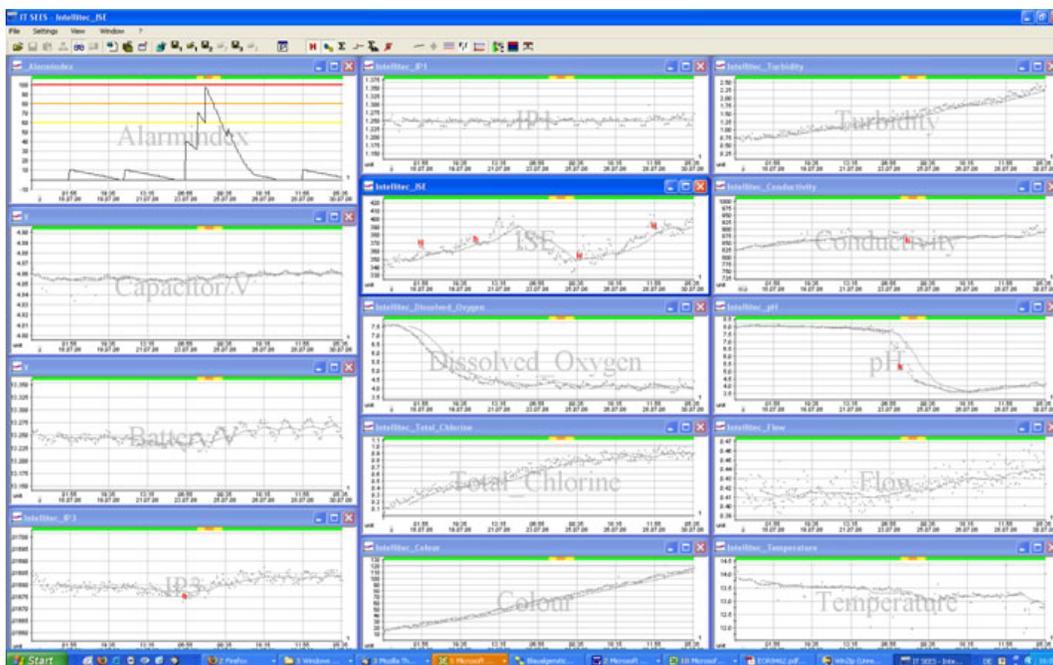


Bild 8: Beispiel einer Auswertung von physikalisch-chemischen Sensoren

4 Prozessautomatisierung

Die Aufgabe der Automatisierung besteht in der Stabilisierung des biologischen Prozesses, der Fusion der von den einzelnen Teilsensorsystemen generierten Ausgangssignale und die darauf basierende automatische Erkennung von Gefahrensituationen. Das Automatisierungskonzept des biologischen Sensorsystems ist in **Bild 9** veranschaulicht. Dabei stellt sich die besondere Herausforderung, dass die Vitalität der verwendeten Mikroorganismen sich nicht ausschließlich durch toxische Stoffe ändert. Vielmehr können geringe Veränderungen der Umgebungsbedingungen, die bezüglich der Wassernutzung unbedenklich sind, zusätzliche Schwankungen verursachen. Das Ziel sollte also sein diese natürlichen Schwankungen des Wasserzustandes von Gifteinträgen zu unterscheiden. Durch Nutzung von zusätzlichen Messgrößen (z.B. Temperatur, pH-Wert, Trübung, Sauerstoffgehalt, Leitfähigkeit) sowie modell-basierten Zusammenhängen kann eine eindeutige Abhängigkeit zwischen anomalen Vitalitätsverhalten der Mikroorganismen und Toxizität des Wassers gefunden werden.

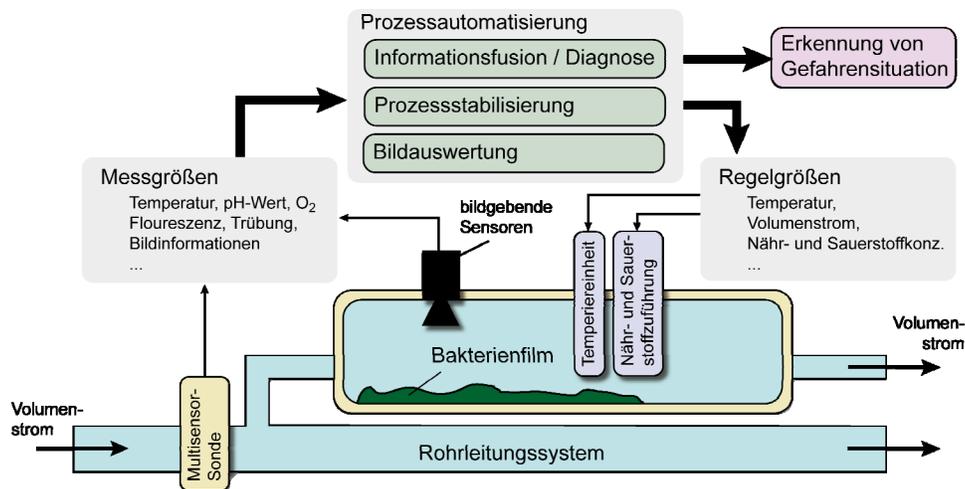


Bild 9: Schematische Darstellung des Automatisierungskonzeptes.

Im Folgenden werden die Aufgabenkomplexe *Prozessstabilisierung*, *Informationsfusion / Diagnose* und *Modellierung des Sensorsystems* näher erläutert.

Prozessstabilisierung: Um optimale Vitalitätsbedingungen für die Mikroorganismen sicherzustellen und somit eine nachhaltige Nutzung des Sensorsystems zu gewährleisten, ist eine Stabilisierung der o.g. natürlichen Schwankungen des Wasserzustandes notwendig. Hierzu werden Regelungskonzepte entwickelt, die eine Stabilisierung der relevanten physikalischen, chemischen und biologischen Prozessgrößen ermöglichen. Relevante Regelgrößen sind dabei beispielsweise Temperatur, Volumenstrom und die Zuführung von Nährstoffen und Sauerstoff. Eine besondere Herausforderung besteht dabei in der Findung der optimalen Arbeitspunkte bzw. Trajektorie von Arbeitspunkten, so dass die Mikroorganismen über einen möglichst langen Zeitraum genutzt werden können.

Informationsfusion / Diagnose: Um einerseits hohe Sensitivität und schnelles Ansprechen bei bedrohlichen toxischen Veränderungen des Trinkwassers zu gewährleisten und andererseits ausreichende Robustheit gegenüber kostenaufwändigen Fehlalarmen sicherzustellen, ist es notwendig, die Bildinformationen des biologischen Breitbandsensors mit den Daten von weiteren toxisch relevanten Sensoren intelligent zu fusionieren. Für die Fusion der heterogenen Sensorinformationen zu einem belastbaren Gesamtdiagnoseergebnis sind Entwicklung, Erprobung und Optimierung verschiedener modell- und wissensbasierte Methoden notwendig.

Modellierung des Sensorsystems: Für die Stabilisierung des biologischen Prozesses und der robusten Erkennung von Gefahrensituationen werden aus mehreren Gründen modellbasierte Ansätze bevorzugt. Diese ermöglichen nicht nur das Prozessverständnis basierend auf Simulationsszenarien zu erhöhen, sondern auch die einzelnen Basisregelkreise auszulegen. Dadurch wird in der Regel eine höhere Genauigkeit, nachhaltigere Einsatzmöglichkeit der Mikroorganismen und vor allem eine erhöhte Robustheit gegenüber Fehlalarmen erreicht. Für die Modellierung der physikalischen, chemischen und biologischen Teilsensoren steht eine Vielzahl von Ansätzen zur Verfügung.

Für die *mikrobiologischen Teilsensoren* kann unter der Annahme einer homogenen, räumlichen Verteilung der zu untersuchenden Prozessgrößen basierend auf Massenbilanzgleichung und empirischen Wachstumsmodellen ein konzentriert-parametrisches Modell hergeleitet werden. Dieses besteht aus einem System gekoppelter, nichtlinearer gewöhnlicher Differentialgleichungen. In **Bild 10** sind die Simulationsergebnisse zweier Prozessphasen (Wachstumsphase und Einleitung von Toxinen) und der Vergleich mit experimentellen Daten dargestellt.

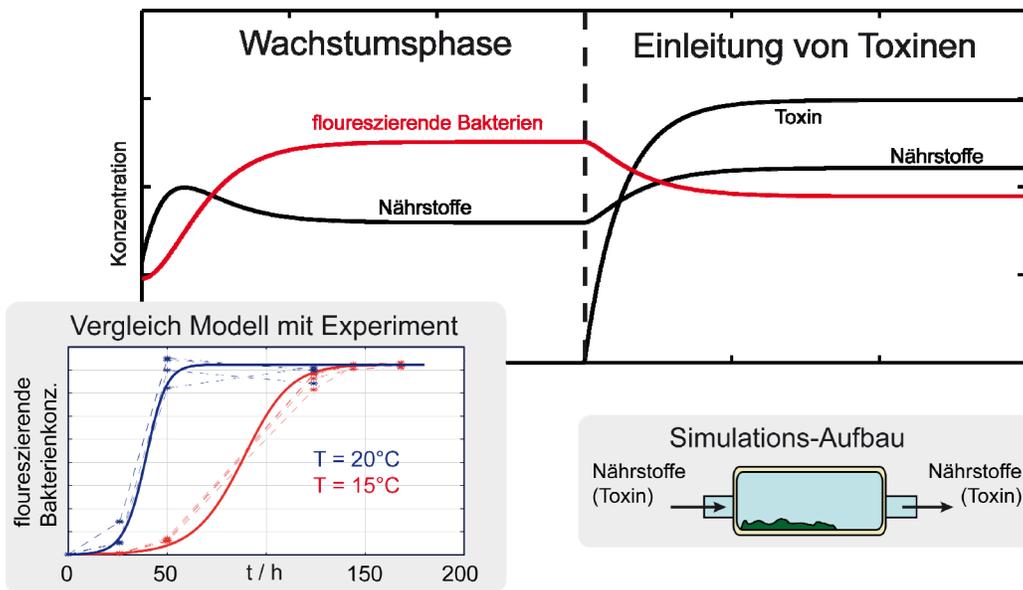


Bild 10: Simuliertes Verhalten des Biosensors in der Wachstumsphase und bei Giftstoffeinleitung.

Für die Modellierung aller *physikalischer, chemischer und biologischer Teilsensoren* ist ein Ansatz basierend auf Gesetzmäßigkeiten sehr komplex. Hierfür bieten *daten-getriebene Modelle* (z.B. Neuronale Netze, Selbst-Organisierende Karten) die Möglichkeit, probabilistische Relationen zwischen den einzelnen Prozessgrößen basierend auf gesammelten Daten zu bestimmen. Unter Verwendung leistungsfähiger Bayes- und Neuro-Fuzzy-Methoden können die gewonnenen, relevanten Sensormerkmale so fusioniert werden, dass die statistische Signifikanz der jeweiligen Sensormerkmale berücksichtigt wird. Dadurch ist eine robuste Erkennung von Gefahrensituationen möglich.

5 Bildauswertung

Die am Fraunhofer IITB entwickelten Algorithmen und Softwarekomponenten zur automatischen Bildauswertung umfassen:

- die rechnergestützte Überwachung der Biosensorkomponenten mittels geeigneter bildgebender Sensorik,
- die Modellierung des Zusammenhangs von Messungen (Beobachtungen) und dem Systemzustand (Lebendigkeit der eingesetzten Indikatororganismen, Wassergüte),
- die automatische Erfassung der vitalitätsanzeigenden bzw. auf Schädigung hindeutenden Parameter sowie
- die Generierung eines belastbaren Ausgangssignals zur Beschreibung des Sicherheitszustandes (z.B. „0“/„1“ für 'Wasser in Ordnung/toxisch belastet)

Die Herausforderung besteht hierbei darin, auch schwache Vitalitätsveränderungen der Indikatororganismen (etwa bei langsam wirkenden Toxinen) robust erkennen und sie von Störeinflüssen und natürlichen unbedenklichen Schwankungen des Trinkwassers zuverlässig unterscheiden zu können. Um eine hohe Detektionssicherheit, d.h. eine hohe Ansprechempfindlichkeit auf Toxine bei geringer Wahrscheinlichkeit von Fehlalarmen zu erzielen, werden besonders leistungsstarke und aufwändige Algorithmen eingesetzt.

Für die Daphnien-Biosensorkomponente wurde eine sehr robuste Bildauswertungskomponente entwickelt, welche die Daphnien von sich mitunter im durchgeleiteten Wasserstrom bewegenden Luftblasen und Exuvien (Häutungen) sowie von sonstigen Hintergrundartefakten unterscheiden kann. **Bild 11** zeigt hierzu zwei Beispiele, bei denen in den Wasserkammern zum Test des Algorithmus absichtlich möglichst viele Störeffekte erzeugt wurden. Die berechneten Farben decken sich mit den realen Gegebenheiten. So wird insbesondere auch die sich bewegende große Luftblase im linken Bild (oben rechts in der rechten Kammer) korrekt erkannt.

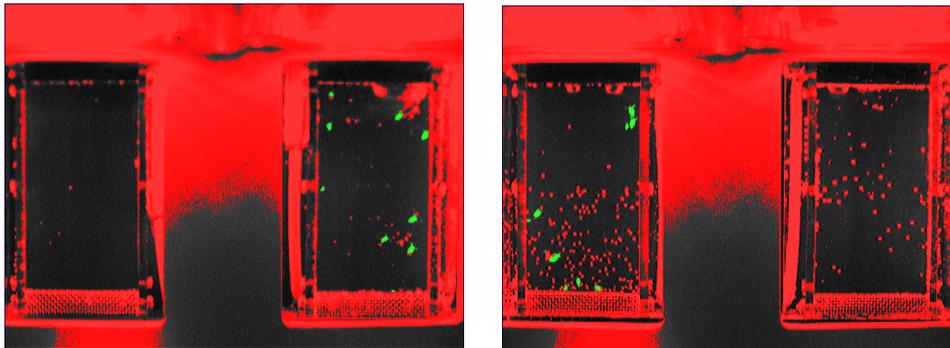


Bild 11: Zwei Bildbeispiele zur Unterscheidung der Daphnien von sich gegebenenfalls im Wasserstrom bewegenden Luftblasen, Exuvien und Hintergrundartefakten. **Grün:** algorithmisch detektierte Daphnien. **Rot:** algorithmisch ermittelte Vordergrundstrukturen, die keine Daphnien sind.

Neben der Bildauswertung für das Daphnientoximeter beschäftigen sich gegenwärtig laufende Arbeiten mit der Optimierung und Datenauswertung eines im Projekt entwickelten 1D-Fluoreszenzensors. Zur Erforschung des zur Generierung eines robusten Ausgangssignals optimalen Sensors bzw. Auswerteverfahrens (insbesondere bei den im Vergleich zu den Bakterienkulturen deutlich leuchtschwächeren Zellsystemen) wird zusätzlich parallel ein 2D-Sensor auf Basis der Mikrokanalplattentechnologie untersucht. Er soll bei den aufgrund ihrer geringeren Populationsdichte schwieriger auszuwertenden Zellsystemen zusätzliche Möglichkeiten eröffnen und zugleich Vergleichsmessungen für den 1D-Sensor liefern.

6 Demonstrator und Teststrecke

Zur Untersuchung des Demonstrators auf seine Funktionsfähigkeit unter praktischen Bedingungen ist eine Versuchsanlage auf einer stillgelegten Leitungsstrecke aufgebaut (**Bild 12**). Alle Merkmale der Leitungsstrecke (Material, Alter, Nutzung und Fließverhältnisse wie Druck und Durchfluss) entsprechen einer üblichen Trinkwasserleitung und sind somit repräsentativ für Trinkwasserversorgungsnetze in Berlin und in Deutschland. Die Versuchsanlage erfüllt alle Bedingungen und Variationsmöglichkeiten für die Durchführung von Testabläufen. An der Versuchsanlage sollen nicht nur die Funktionsfähigkeit, die Zuverlässigkeit und Robustheit des Demonstrators (und seine Einzelkomponenten) getestet werden sondern auch die Bedienung, die Anfälligkeit und der Wartungsaufwand unter Praxisbedingungen.

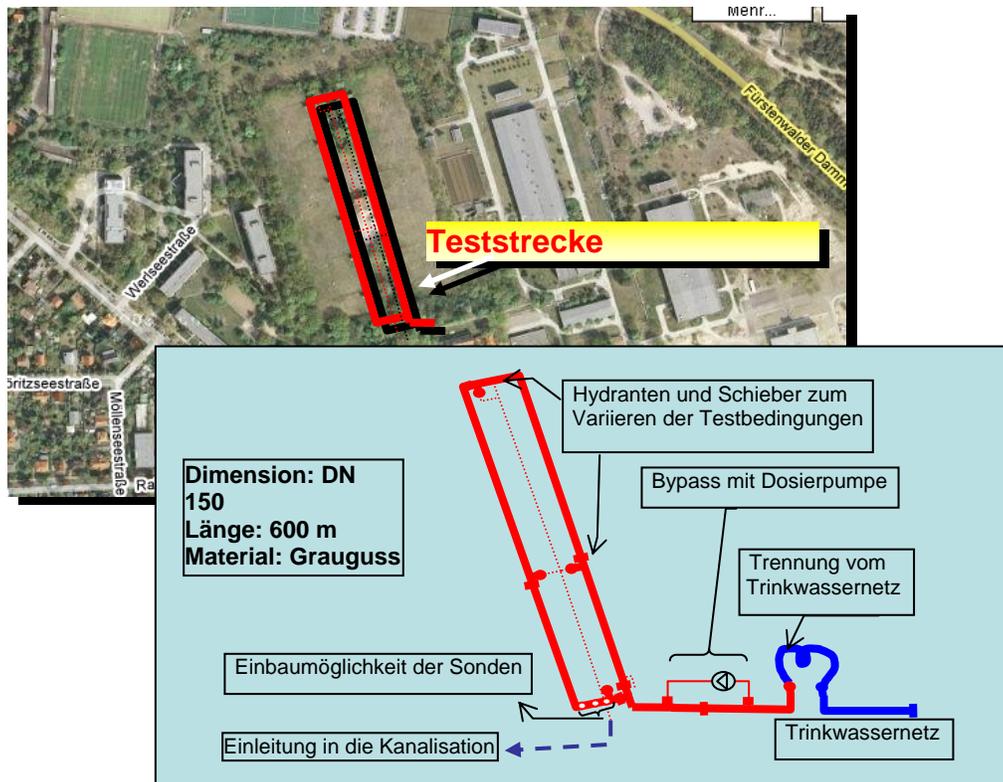


Bild 12: Demonstrator auf dem Gelände der Berliner Wasserbetriebe in Berlin-Friedrichshagen.

7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird über die Entwicklung eines generischen onlinefähigen Breitbandsensorkonzeptes im gegenwärtig laufenden BMBF-Verbundvorhaben AquaBioTox berichtet. Es beruht darauf, die Vitalität sehr schnell reagierender biologischer Kleinstlebewesen, die in einem stabilen verfahrenstechnischen biologischen Prozess ständig dem Trinkwasser ausgesetzt werden, durch eine Kamera mit automatischer Bildauswertung online zu überwachen, um signifikante Veränderungen zu diagnostizieren. Erste erfolgreiche Ergebnisse bei der prototypischen Realisierung des biologischen Sensors sowie mit der Automatisierung und Bildauswertung des Prozesses werden vorgestellt. Der Nachweis einer raschen breitbandigen Online-Detektion von Kontaminationen soll an einer Teststrecke der Berliner Wasserbetriebe erbracht werden.