

Kuntze Instruments GmbH
Robert-Bosch-Straße 7a
40668 Meerbusch

**Entwicklung eines Sensors und Handmessgerätes zur
kontinuierlichen strömungsunabhängigen
Desinfektionsmittelanalyse zur Vermeidung von Umwelt-
und Gesundheitsbelastungen bei der Wasserdesinfektion
(1. Phase)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsvorhaben
gefördert unter dem AZ 31420/01
durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Dr. Fabian Kruse

Meerbusch, 26.08.2016

11/95		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	31420/01	Referat	23	Fördersumme	112.578,00 €
Antragstitel		Entwicklung eines Sensors und Handmessgerätes zur kontinuierlichen strömungsunabhängigen Desinfektionsmittelanalyse zur Vermeidung von Umwelt- und Gesundheitsbelastungen bei der Wasserdeseinfektion (1. Phase)			
Stichworte					
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
27 Monate		26.02.2014		31.05.2016	
Projektphase(n)		1			
Zwischenberichte:		keine			
Bewilligungsempfänger		Kuntze Instruments GmbH Robert-Bosch-Straße 7a 40668 Meerbusch		Tel +49 2150 7066-40 Fax +49 2150 7066-60	
				Projektleitung Dr. Fabian Kruse	
				Bearbeiter Dr. Fabian Kruse	
Kooperationspartner					
./.					
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Ziel des Projektes war es, ein Messsystem zu entwickeln, mit dem Desinfektionsmittelanteile (Chlor, Chlordioxid, Ozon und Wasserstoffperoxid) im Wasser exakt und unabhängig von der Durchflussmenge analysiert werden können. Das Sensorsystem wird dabei als Mikroelektrodenarray (MEAS) realisiert, mit dem über amperometrisch-potentiometrische Messungen der Desinfektionsmittelgehalt im Wasser bestimmt wird. Um die hohe Messgenauigkeit beizubehalten, wird die von der Fa. Kuntze patentierte ASR (automatische Sondenreinigung) zur kontinuierlichen Reinigung der Elektroden genutzt.</p> <p>Aktuell existieren keine anderen Messmethoden, mit denen der Gehalt von Desinfektionsmitteln im Wasser kontinuierlich und strömungsunabhängig gemessen werden kann. Deshalb müssen bisher für die Messungen Bypässe angelegt oder das Messwasser nach der Messung abgeführt werden. In einigen Fällen ist keine Messung des Desinfektionsmittelgehaltes möglich, sodass meist eine umwelt- oder gesundheitsschädliche Überdosierung vorgenommen wird.</p> <p>Die angestrebten Umwelteffekte ergeben sich somit aus der Einsparung von Desinfektionsmitteln, der Verhinderung der Bildung von umwelt- und gesundheitsschädlichen Stoffen sowie der Einsparung von Wasser (keine Abführung nach Messung).</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Das Projekt wird in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wurde ein funktionierendes Messsystem als Mikroelektrodenarray mit integrierter ASR entwickelt und dessen Funktion in Labor- und Praxisversuchen nachgewiesen. In der zweiten Projektphase soll ein Handmessgerät auf Basis dieses Sensorsystems entwickelt werden.</p> <p>Die Arbeitsschritte der 1. Phase umfassten die Entwicklung der Mikroelektroden, die Ertüchtigung der ASR für die Mikroelektroden, die Entwicklung des Mikroelektrodenarrays sowie den Aufbau eines provisorischen Messsystems und Versuche.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0 ☐ Fax 0541/9633-190					

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt ist es gelungen, einen Sensor zu entwickeln, mit dem man durchflussunabhängig Chlor messen kann. Die Messung ist stabil und ruhig und absolut präzise, die Handhabung der Sensoren einfach.

Die Entwicklung war allerdings geprägt durch einige Misserfolge und Neustarts. Bei der Chipfertigung und danach hauptsächlich bei der Kontaktierung gab es immer wieder Probleme. Die Mikroelektroden sind so klein, dass die Durchgängigkeit der Kontakte nicht mit Ohmmetern geprüft werden kann – sobald die Kontaktfläche einmal vergossen ist, konnte die Unversehrtheit des Kontakts nur noch durch die Messung gezeigt werden.

Die MEAs mussten viel größer sein als angenommen, was den Aufbau kompletter Sensoren erschwerte und für die beiden anderen Elektroden wenig Raum lässt. Um einen Aufbau im klassischen 12 mm-Design zu realisieren, musste die Chipgröße so weit reduziert werden, dass die Signalstärke sich gerade noch so verarbeiten lässt. Durch die extrem hohe Verstärkung im Messeingang wird eine Vor-Ort-Elektronik am Sensor unverzichtbar sein. Das kann zunächst eine einfache Vorverstärkung sein.

Die großen Chipdimensionen und die dennoch geringe Signalstärke lassen es zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu, mehrere Messungen in einem Chip zu realisieren. Außerdem sind bisher nur Versuche zur Messung von Chlor durchgeführt wurden, sodass die Ergebnisse für weitere Desinfektionsmittel folgen müssen.

Die Adaption der ASR ist noch nicht komplett abgeschlossen. Fest steht zum jetzigen Zeitpunkt, dass die Sensoren durch die Reinigung nicht beschädigt werden. Zurzeit ist die Signalbeeinträchtigung aber noch zu groß, sodass weitere Anpassungen der Reinigungsprozedur folgen werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Veröffentlichungen zu Projektergebnissen gab es bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht. Allerdings haben wir bereits während der Projektlaufzeit erste potenzielle Kunden angesprochen, die uns nun auch bei den Feldtests unterstützen wollen. Für die weitere Präsentation der Ergebnisse werden wir die üblichen Kanäle nutzen, d. h. vor allem Websites von uns und unseren Partnern, Messen und Präsentationen bei Kunden sowie Veröffentlichungen in branchenspezifischen Zeitschriften zum Beispiel von Ergebnissen erfolgreicher Feldtests.

Fazit

Trotz einiger Probleme hat das Ergebnis des Projekts alle Erwartungen erfüllt, und es liegen ein Prototyp eines Sensors sowie eine ausreichende Menge an Chips vor, um die neuartigen Sensoren zur strömungsunabhängigen Desinfektionsmittelmessung zu produzieren. Hier muss vor allem eine möglichst sichere Fertigung und Prüfung festgelegt werden, da die Chips hochpreisig und die Kontaktierung nicht mit konventionellen Mitteln prüfbar ist.

Die kontinuierliche Reinigung der Sensoren sowie umfassende Feldtests erfordern aktuell noch weitere Entwicklungsarbeit. Darüber hinaus muss die Elektronik noch weiter verbessert werden, um eine erfolgreiche Vermarktung der Projektergebnisse zu ermöglichen. Aktuell sehen wir die Verwertungsmöglichkeiten sehr positiv.

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS VON BILDERN, ZEICHNUNGEN, GRAFIKEN UND TABELLEN	4
ZUSAMMENFASSUNG	5
EINLEITUNG	6
HAUPTTEIL	10
FAZIT	24

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Sensor mit Mikroelektrode, ein Draht Durchmesser 1.000 μm	10
Abbildung 2: Sensor mit Mikroelektrode der Universität Marburg, vier Drähte Durchmesser 100 μm	11
Abbildung 3: Sensor mit Mikroelektrode eigene Herstellung, vier Drähte Durchmesser 70 μm , eingebettet in Glaskapillaren	11
Abbildung 4: Erste Chips Mikroelektrodenarrays	12
Abbildung 5: Halterungen für die MEAs	13
Abbildung 6: Kontaktierungen: Löten, kleben, klemmen	13
Abbildung 7: erste erfolgreiche Messung ohne definierte Anströmung, links der gesamte Prüfaufbau, rechts Einbau der MEA-Chips.....	14
Abbildung 8: Linearitätsmessung in fliegendem Aufbau.....	14
Abbildung 9: Signaländerungen bei unterschiedlichen Rührgeschwindigkeiten	15
Abbildung 10: Durchflusseinfluss der Mikroelektroden mit 5 μm und 2 μm im Vergleich zu den konventionellen Sensoren.....	16
Abbildung 11: Durchfluss-unabhängige Chlormessung mit MEA	17
Abbildung 12: Prototyp.....	18
Abbildung 13: Messbereich 0-10 mg/l mit Prototyp	18
Abbildung 14: Durchflusseinfluss Prototyp	19

Zusammenfassung

Im Projektzeitraum wurde ein Mikroelektrodenarray-Sensor für eine durchflussunabhängige Messung von freiem Chlor in Wasser entwickelt. Versuche mit einfachen Aufbauten aus sehr dünnen, in Trägermaterial eingebetteten Drähten verliefen ergebnislos. Es zeigte sich schnell dass die Elektrodenflächen sehr klein sein müssen und die Anzahl der Elektroden im Array entsprechend groß. Da zudem der Abstand zwischen den Elektroden für den Durchflusseinfluss maßgeblich ist, wurde ein Partner gesucht für die Entwicklung und Produktion von MEA-Chips. Einen solchen Partner fanden wir im Institut für Mikroelektronik der Universität Freiburg, das über das notwendige Fachwissen, die erforderlichen Produktionsstätten und Methoden zur Charakterisierung der fertigen Chips verfügen. Nach Abstimmungen um technische Erfordernisse und Möglichkeiten wurden schließlich vier Wafer mit je fünf Chips produziert, an denen die Machbarkeit geprüft werden konnte. Trotz erheblicher Schwierigkeiten bei Kontaktierung und Sensoraufbau ließ sich zeigen, dass mit solchen Chips eine freie Chlormessung möglich ist und der Durchflusseinfluss bei der richtigen Elektrodengröße und dem richtigen Verhältnis zwischen Abstand und Durchmesser vernachlässigbar klein wird.

Das Chip-Design wurde in einem zweiten Durchgang optimiert, um Produktionsprobleme zu verhindern, Kosten zu senken und einen Sensoraufbau im klassischen 12mm-Design zu ermöglichen. Diese Chips wurden bereits mit angebondeten Aluminiumdrähten versehen.

Passend dazu wurden Halterungen entwickelt, die die Chips mechanisch schützen und produktionssicher in den Sensor integrieren lassen. Ebenso wurde die Geräteelektronik angepasst, um den extrem kleinen Signalen der MEA-Sensoren gerecht zu werden.

Ein erster Prototyp des MEA-Sensors erlaubte die Prüfung von Messbereich, Linearität, pH-Einfluss und ähnlichen Leistungsdaten sowie die endgültige Prüfung der Durchflussabhängigkeit unter realen Einbaubedingungen. Die Ergebnisse erfüllten selbst die höchsten Erwartungen.

Die Grundlagen zur strömungsunabhängigen Desinfektionsmittelmessung wurden somit gelegt. Im weiteren Verlauf soll versucht werden mit einem Chip durch Gruppieren der Mikroelektroden mehrere Parameter gleichzeitig zu messen. Ferner bleibt noch Arbeit auf der Geräteseite, insbesondere bei der in der zweiten Phase geplanten Entwicklung eines Handmessgeräts, und auch die automatische Sondenreinigung muss noch weiter optimiert werden, da sie zwar anwendbar ist und auch den gewünschten Reinigungseffekt erzielt, aber noch zu lange und ausgeprägte Störungen der Messung verursacht.

Das Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert (AZ 31420/01) und soll in Kürze in eine zweite Phase übergehen, in der ein Handmessgerät für die strömungsunabhängige Desinfektionsmittelanalyse entwickelt wird.

Einleitung

Ausgangssituation

Um Trinkwasser aber auch Schwimmbadwasser oder industrielles Prozesswasser, beispielsweise Kühlwasser, für den Gebrauch aufzubereiten, werden Desinfektionsmittel verwendet.

Insbesondere bei der Trinkwasseraufbereitung sind dabei sehr strenge Normen einzuhalten. Die Trinkwasserverordnung sagt aus, dass die Beschaffenheit des Rohwassers so anzupassen ist, dass es den Anforderungen an ein gutes Trinkwasser genügt. Es muss keimarm, appetitlich, farb- und geruchlos, kühl und geschmacklich einwandfrei sein. Darüber hinaus darf es nur einen geringen Gehalt an gelösten Stoffen aufweisen und keine unverhältnismäßigen Korrosionsschäden am Leitungsnetz hervorrufen.

Bei ca. 1.700 Wasserversorgern muss zur Reinigung des Wassers zunächst eine Desinfektion (meist Oxidation durch Ozon) eingesetzt werden. Ozon gilt als das stärkste Oxidations- und Desinfektionsmittel. Mithilfe von Ozon können ein ungewollter Geschmack, Geruch und eine ungewollte Farbe aus dem Wasser entfernt werden. Ferner wird ein Teil der Bakterien, Sporen, Viren und Parasiten abgetötet bzw. deaktiviert. Organische Verbindungen, wie Phenole, Tenside oder Pestizide, werden abgebaut. Es ist ebenfalls möglich, biologisch nicht abbaubare Stoffe zu abbaubaren Stoffen umzuwandeln. Eine Behandlung mit Ozon vermindert auch den Bedarf an Chlor bzw. Chlordioxid in der weiteren Behandlung.

Durch eine nachgelagerte Desinfektion mit Chlorgas oder Chlordioxid können auch die restlichen Krankheitserreger bzw. Bakterien aus dem Rohwasser entfernt werden. Der Einsatz von Chlor verhindert zusätzlich die Wiederverkeimung des Wassers.

Ähnlich ist die Situation bei Schwimmbadwasser und industriellem Prozesswasser, wie v.a. Kühlwasser. In Schwimmbädern werden die Desinfektionsmittel eingesetzt, um die enthalten unterschiedlichsten Verunreinigungen v.a. diverse Mikroorganismen aus dem Wasser zu entfernen und so die Qualität des Wassers zu gewährleisten und die Ansteckungsgefahr durch pathogene Krankheitserreger zu minimieren. Die Bedingungen für das Wachstum von Mikroorganismen in Kühltürmen sind ideal, sodass mittels Desinfektionsmitteln der Biofilmentwicklung, die zu Korrosion führt, entgegengewirkt wird. Ferner können sich im Kreislauf Bakterienstämme bilden, die zu gesundheitlichen Belastungen führen. Diese Probleme sollen durch Desinfektion vermieden werden.

Der korrekten Dosierung der Desinfektionsmittel ist eine hohe Bedeutung beizumessen: Während bei einer Minderdosierung nicht die gewünschte Reinigungswirkung erzielt wird, kann eine Überdosierung im Wasser sowohl für Mensch als auch Flora und Fauna gefährlich werden. Die chemischen Desinfektionsmittel bilden Nebenprodukte, die die Gesundheit beeinträchtigen können. So können beim Einsatz von Chlorgas bei Vorhandensein von

Humussäuren Trihalogenmethane entstehen, die als gesundheitsschädlich gelten. Trihalogenmethane sind leichtflüchtige, organische Halogenverbindungen, deren bekanntester Vertreter das Chloroform ist. Sie entstehen durch Reaktion des Chlors mit natürlichen Belastungsstoffen im Füllwasser oder mit von Badegästen eingebrachten organischen Belastungsstoffen. Die THMs stehen in begründetem Verdacht, ein krebserzeugendes Potenzial zu besitzen. Für Chloroform und Bromdichlormethan erfolgte der Nachweis der Kanzerogenität im Tierversuch.

Ein zu hoher Anteil von Desinfektionsmitteln im Abwasser kann ferner dazu führen, dass Bakterien in Gewässern oder Kläranlagen abgetötet werden. Desinfektionsmittel besitzen somit bei Überdosierung ökotoxische Eigenschaften.

Grundsätzlich existieren photometrische und amperometrische Messsysteme zur Prüfung des Desinfektionsmittelbedarfes. Der Nachteil bei photometrischen Methoden liegt darin, dass das kontrollierte Wasser durch die Einbringung von weiteren Chemikalien entsorgt werden muss. Ein zentraler Nachteil derzeitiger amperometrischer Desinfektionsmittel-Messsysteme ist die Durchflussabhängigkeit. Aufgrund dieser Abhängigkeit muss der Messaufbau im Bypass betrieben werden. Hierzu wird meist eine Bypasspumpe verwendet. In vielen Fällen ist es nicht möglich das Messwasser zurückzuführen, sodass es verworfen wird. Auch Mikroelektroden-basierte Messsysteme waren vor dem Projekt bekannt. Allerdings konnten sie nicht kontinuierlich eingesetzt werden, da die Elektroden in verunreinigten Medien zu schnell zusetzen.

Dies führt dazu, dass bestimmte Abwässer bisher nur aufwendig oder gar nicht untersucht werden können. In diesem Fall wird v.a. in industriellen Anwendungen wie der Kühlmittelaufbereitung eine Überdosierung von Desinfektionsmitteln vorgenommen, um die schädlichen Stoffe mit Sicherheit abzutöten.

Gesamtziel des Vorhabens

Ziel in der ersten Phase des Projektes war es, ein neuartiges Sensorsystem zu entwickeln, mit dem Desinfektionsmittelanteile (Chlor, Chlordioxid, Ozon und Wasserstoffperoxid) im Wasser exakt und unabhängig von der Durchflussmenge analysiert werden können. Im zweiten Schritt soll dann ein einfach bedienbares Handmessgerät auf Basis des Sensorsystems entwickelt werden.

Das Sensorsystem sollte als Mikroelektrodenarray (MEAS) realisiert werden, mit dem über amperometrisch-potentiometrische Messungen der Desinfektionsmittelgehalt im Wasser bestimmt werden kann. Für die notwendige kontinuierliche Reinigung der Elektroden wird die von der Firma Dr. A. Kuntze patentierte ASR (automatische Sonden-Reinigung) genutzt.

Der Aufbau des Mikroelektrodenarrays wurde im Rahmen des Projektes weiter präzisiert, da zu Beginn des Projektes noch nicht absehbar war, ob die Signalübertragung über Drähte oder Lötkontakte umgesetzt werden sollte.

Das Sensorsystem sollte sich durch folgende Funktionen und Parameter beschreiben lassen:

- Wafergröße 10 – 100 µm
- Elektrodengröße: 2 – 10 µm
- Anzahl der Elektroden: 10.000
- Strömungsunabhängiges Messen von Chlor-, Chlordioxid-, Ozon- und Wasserstoffperoxid-Gehalten im Wasser
- Genauigkeit:
 - Chlor: 0,04 mg/l
 - Chlordioxid: 0,04 mg/l
 - Ozon: 0,01 mg/l
 - Wasserstoffperoxid: 0,3 mg/l
- Nachweisgrenze:
 - Chlor: 0,01 mg/l
 - Chlordioxid: 0,02 mg/l
 - Ozon: 0,03 mg/l
 - Wasserstoffperoxid: 0,1 mg/l
- Wiederfindungsrate: 99 %
- Ansprechzeit: 20 s
- Signalstärken: 8 mV/mg

Ergebnis des Projektes sollte ein neuartiges Sensorsystem sein, mit dem eine strömungsunabhängige Analyse von Desinfektionsmittelgehalten in Wasser durchgeführt werden kann. Das System kann zur einfachen Analyse von verschiedensten Abwässern eingesetzt werden, die nach dem aktuellen Stand der Technik gar nicht oder nur mit hohem Aufwand (anlegen eines künstlichen Bypass) geprüft werden können. Somit kann der Einsatz von Desinfektionsmitteln optimiert werden, was in den meisten Fällen eine Reduktion der benötigten Chemikalien und damit der Wasserbelastung bedeutet.

Aufgabenstellung

Folgende Arbeiten waren im Rahmen der ersten Projektphase geplant:

Zu Beginn des Projektes sollten zunächst Untersuchungen und Versuche mit verschiedenen Mikroelektroden durchgeführt werden. Im Rahmen der Versuche sollte ein

optimaler Aufbau der **Elektroden** (Elektrodengröße, Kontaktierung, Material Signalstärke, Anordnung, mechanische Stabilität, Verschmutzungsresistenz) **entwickelt** werden.

Teilweise parallel zur Elektrodenentwicklung wurde die **ASR** für den Einsatz an Mikroelektroden **entwickelt**.

Bisher wurde die ASR nur an Makroelektroden eingesetzt, sodass sie nicht ohne weiteres auf die Mikroelektroden übertragen werden konnte. Zum Beispiel ist die Stromstärke auf größere Flächen ausgelegt. Außerdem war nicht bekannt, ob die ASR zu Korrosion oder Materialabtrag an den Elektroden führt.

Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt war die Minimierung der peakförmigen Signalerhöhung während der Reinigung der Elektroden, die sich aufgrund der Repolarisation der Elektroden einstellt. Derartige Störungen der Messung beim Mikroelektrodenarray konnten sich bis auf mehrere Stunden ausdehnen. Es wurde vermutet, dass dies mit der Einlagerung von Wasserstoff an der Oberfläche zusammenhängt. Aus diesem Grund sollten die Polarisationszeiten verringert werden.

Die **Entwicklung des MEA** umfasste sowohl die konstruktions- als auch softwaretechnische Realisierung des Sensorsystems.

Es wurden die Anordnung der Elektroden, die Kontaktierung sowie der komplette Sensoraufbau entwickelt. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Genauigkeiten, Ansprechzeiten, Nachweisgrenzen etc. mit dem gewählten Aufbau erreicht werden können.

Die Ansteuerung der Elektroden sollte so gestaltet werden, dass einzelne Elektroden angesprochen werden können. Dies ermöglicht eine parallele Durchführung von Reinigung und Messung. Ferner können gleichzeitig verschiedene Parameter (z. B. Chlor- und Ozongehalt) gemessen werden.

Zur Entwicklung des MEA gehörte auch die Signalauswertung. Wichtig war, dass die kleinen zu erwartenden Messströme sicher ausgewertet werden können.

Zum Abschluss des Projektes wurden **Muster des Messsystems aufgebaut** und die Analyse von Desinfektionsmitteln in Wasser unter Labor- und Praxisbedingungen **getestet**.

Gleichzeitig wurde der Fertigungsprozess für das Messsystem entwickelt.

Nach Auswertung der erzielten Testergebnisse wurde das Messsystem noch einmal optimiert, um zum Abschluss der 1. Projektphase einen funktionierenden Prototypen des Messsystems präsentieren zu können.

Hauptteil

Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte

Um die extrem kleinen Ströme der Mikroelektroden verwerten zu können, wurde die Hardware von vier Prüfgeräten umgebaut und dabei insbesondere die Verstärkung auf das bis zu 500fache der regulären Werte erhöht. Damit konnten Ströme bis 5 nA/mg/l ausgewertet werden. Eine Flächenreduktion auf 1/1.000 der regulären Sensoren wäre damit möglich.

Auf der Sensorseite wurden zu Beginn einfache Aufbauten von Mikroelektroden getestet, die in der hauseigenen Sensorproduktion realisiert werden könnten. Dabei handelte es sich im Wesentlichen um die Kopfseiten von dünnen Drähten, Durchmesser 70-1.000 μm , eingegossen oder eingeschmolzen in Trägerrohre.

Ein einzelner Draht von 1 000 μm gab nicht nur ein sehr kleines Signal, der Sensor zeigte auch weiterhin die bekannte Durchflussabhängigkeit.



Abbildung 1: Sensor mit Mikroelektrode, ein Draht Durchmesser 1.000 μm

Eine Mikroelektrode der Universität Marburg, die aus vier Drähten in 100 μm bestand, ergab bei ebenfalls sehr kleinen Signalen immerhin noch 40 % Durchflussabhängigkeit – nicht genug, um als durchflussunabhängig durchzugehen und nicht genug um den Nachteil der kleinen Signale aufzuwiegen. Eine zweite Mikroelektrode der Universität mit vier Drähten in 1.000 μm wurde daher gar nicht erst getestet.



Abbildung 2: Sensor mit Mikroelektrode der Universität Marburg, vier Drähte Durchmesser 100 μm

Nachdem 100 μm offenbar noch nicht klein genug waren, wurde ein ähnlicher Aufbau aus dem eigenen Haus mit vier Drähten in 70 μm gebaut, zeigte aber die gleichen Probleme.

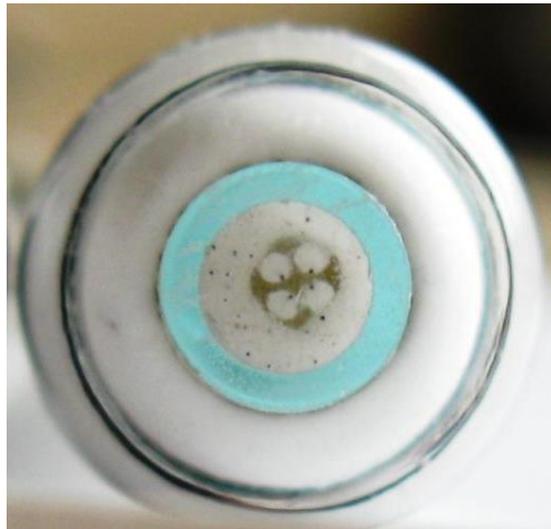


Abbildung 3: Sensor mit Mikroelektrode eigene Herstellung, vier Drähte Durchmesser 70 μm , eingebettet in Glaskapillaren

Noch kleinere Durchmesser ließen sich nicht mehr sicher verarbeiten. Und die Gesamtfläche lag bereits deutlich unter den spezifizierten Mindestanforderungen.

Daher wurde dieser Ansatz verworfen und ein Partner gesucht, der ein Mikroelektrodenarray auf einem Siliziumchip entwickeln könnte. Offenbar mussten die Elektroden deutlich kleiner sein, eher im Bereich 2-20 μm und gleichzeitig eine ausreichend große Anzahl an Mikroelektroden kombiniert werden, wenn der Sensor Aussicht auf Erfolg haben sollte. Aus der arbeitsbegleitenden Literaturrecherche hatte sich allerdings als neue Voraussetzung für Durchflussunabhängigkeit ein sehr großes Verhältnis zwischen dem Abstand der einzelnen Mikroelektroden und ihrem Durchmesser herauskristallisiert, daher wurde bei dem Entwurf

auf eine separate Kontaktierung der Mikroelektroden verzichtet, um die benötigte Oberfläche von 1 % der bisherigen Sensoren auf einem gerade noch handhabbaren Chip unterzubringen. Selbst damit ergab sich bereits eine Chipgröße von 66 mm Länge und 11 mm Breite.

Erste erfolgversprechende Gespräche mit einer Firma, die Leiterplattendesigns herstellt und Strukturen bis 10 µm realisieren kann, wurden abgebrochen, nachdem sich herausstellte, dass die Mikroelektroden, insbesondere die Größe der aktiven Oberfläche, sehr großen Schwankungen unterliegen würde und die Firma nicht über die nötigen Methoden verfügte, die Oberfläche genau genug zu charakterisieren. Sie stellten aber den Kontakt her zum Institut für Mikrotechnologie der Universität Freiburg, mit dem schließlich erste Chips versuchsweise realisiert wurden.

Dieser erste Durchgang umfasste 5 Wafer à 5 Chips mit drei unterschiedlichen Elektrodengrößen und je zwei unterschiedlichen Abstandsverhältnissen. Ein Wafer fiel den Versuchen zum Herausfinden geeigneter Herstellprozesse zum Opfer, bei den übrigen gab es vereinzelt Chips mit tiefen Korrosionsgräben, die nicht verwendet werden konnten. Es blieben aber 16 Chips für die Tests.

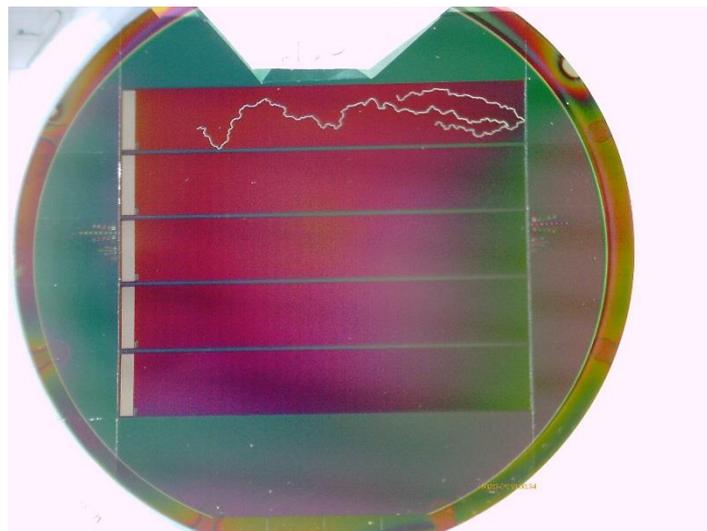


Abbildung 4: Erste Chips Mikroelektrodenarrays

Für die Sensoren waren parallel Halterungen entworfen worden, die unter anderem auch die Kombination mehrerer Chips erlauben, falls das Signal eines einzelnen Chips immer noch zu klein sein sollte. Daher wurden Halterungen mit 25 mm Durchmesser zugrunde gelegt anstelle der für uns üblicheren 12 mm. Als Gegenelektrode war ein Edelstahlstift vorgesehen.



Abbildung 5: Halterungen für die MEAs

Es zeigte sich, dass vor allem die Kontaktierung der MEAs ein Problem darstellt. Zwar enthielt jeder Chip ein Kontaktfeld aus blankem Platin zur Kontaktierung, aber das Anlöten eines Drahts führte zur großflächigen Zerstörung der Chipstruktur um die Lötstelle. Auch das Ankleben mit leitfähigem Kleber auf Graphitbasis oder mit Silberleitlack war nicht erfolgreich.

Schließlich wurde die Kontaktierung einfach über Klemmen realisiert, in den ersten Versuchen mit einer Krokodilklemme und später mit einem zurechtgebogenen dicken Silberdraht.



Abbildung 6: Kontaktierungen: Löten, kleben, klemmen

Auch der Edelstahlstift war keine gute Wahl, obwohl viele Sensoren in der Vergangenheit mit Edelstahl-Gegenelektroden ausgestattet waren. Es kam immer wieder zu Korrosion, die das Mess-Signal überlagerte.

Die ersten erfolgreichen Messungen wurden schließlich in einem fliegenden Aufbau realisiert: Zwei Chips wurden Rücken an Rücken mittels Krokodilklemme kontaktiert und dann einfach in ein Wasserbecken gehängt, in dem Chlor und pH-Wert über eine konventionelle Messung geregelt wurden. Als Bezugs- und Gegenelektrode dienen ebenfalls reguläre Sensoren in unmittelbarer Nachbarschaft. Dieser Aufbau, der allen Erfahrungen mit potentiostatischer Chlormessung zuwiderläuft, zeigte vergleichbare

Ergebnisse zu den konventionellen Sensoren, die in aufwändigen Durchflussarmaturen eingebaut waren, und das obwohl die Chips keinerlei definierte Anströmung erfuhren.



Abbildung 7: erste erfolgreiche Messung ohne definierte Anströmung, links der gesamte Prüfaufbau, rechts Einbau der MEA-Chips

Unter diesen unkonventionellen Einbauverhältnissen ergab sich bereits ein nahezu lineares Messverhalten bis etwa 3 mg/l, mit einer Signalausbeute von etwa 10 % verglichen mit konventionellen Sensoren.

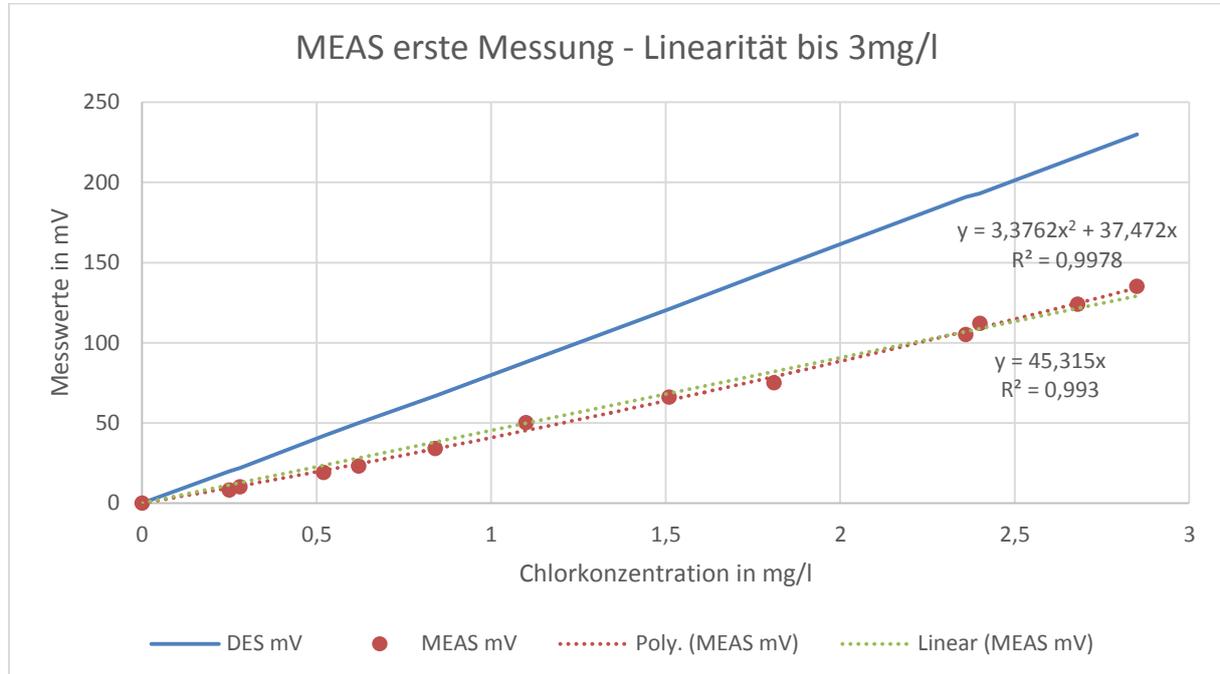


Abbildung 8: Linearitätsmessung in fliegendem Aufbau.

Da bei diesem Aufbau keine Prüfung des Durchflusseinflusses möglich war, wurde der Sensor mit den separaten Bezugs- und Gegenelektroden in einem Becherglas auf dem Rührer betrieben und über die Drehgeschwindigkeit des Rührers die Anströmung variiert.

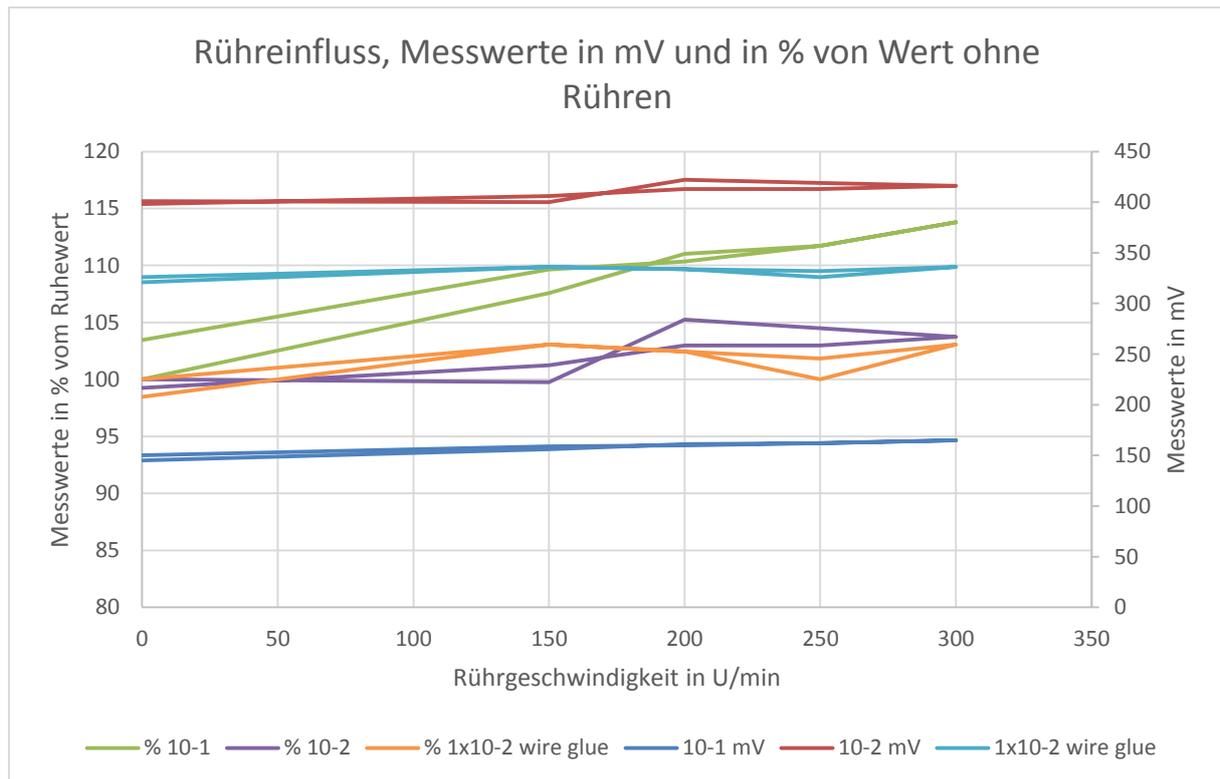


Abbildung 9: Signaländerungen bei unterschiedlichen Rührgeschwindigkeiten

Dieser Versuch ließ zum ersten Mal einen direkten Vergleich verschiedener Chipdesigns zu. Dabei bestätigte sich die Erwartung, dass ein größerer Abstand zwischen den Elektroden weniger Durchflusseinfluss zeigt – bei den als 10-1 gekennzeichneten Chips wurde bis 300 Umdrehungen/Minute ein Anstieg von 15 % bezogen auf das Ruhesignal gemessen, bei den als mit 10-2 gekennzeichneten Chips dagegen weniger als 5 %. Dass die Signale unterschiedlich stark waren, lag lediglich daran, dass Geräte mit unterschiedlicher Verstärkung verwendet wurden.

Schließlich wurden die Chips in einem ähnlichen Aufbau in Durchflussarmaturen eingebaut, um von der wenig greifbaren Größe „Umdrehungen pro Minute“ auf die bekannten „Liter pro Stunde“ zu kommen. Hier muss man allerdings berücksichtigen, dass nicht die gesamte Chipfläche eintauchen konnte und bei Erhöhen der Durchflussgeschwindigkeit die Füllhöhe in der Armatur leicht anstieg, sodass bei höherem Durchfluss mehr Mikroelektroden überspült wurden.

Diese Versuche zeigten nun auch, dass der Durchflusseinfluss mit abnehmender Elektrodengröße kleiner wird – zumindest bei den beiden geprüften Abstandsverhältnissen.

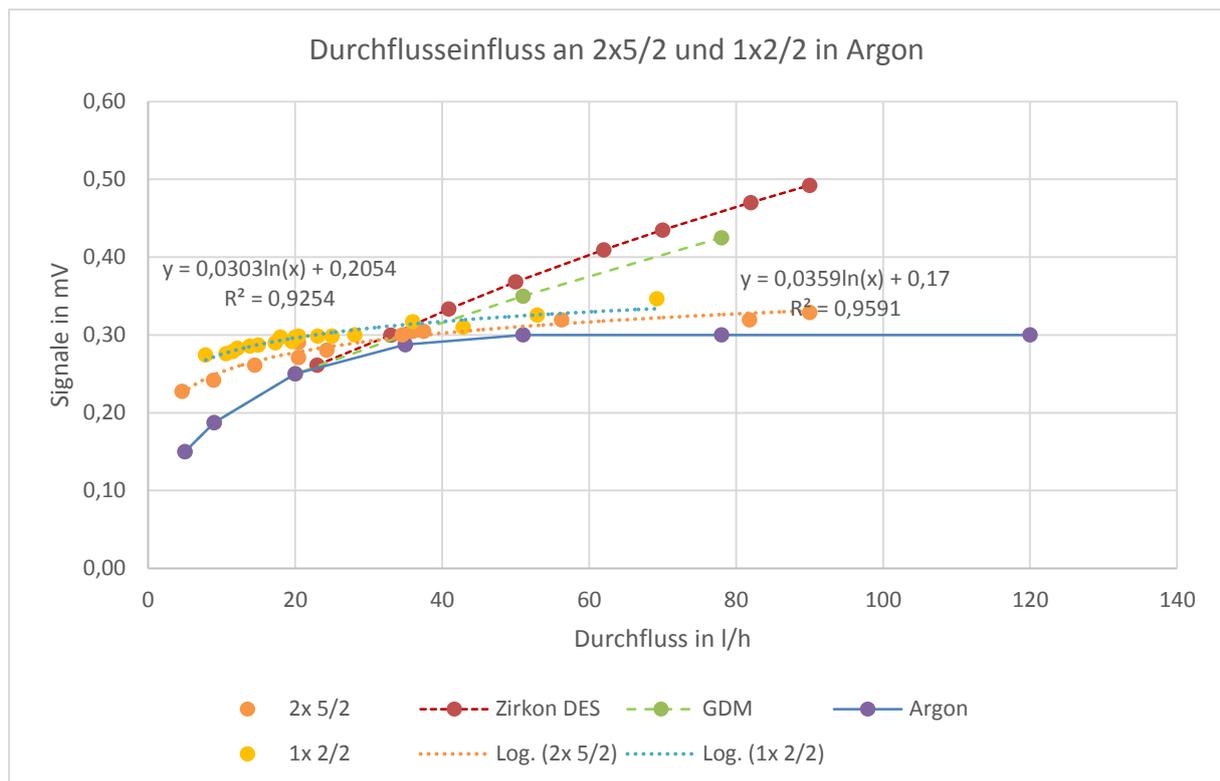


Abbildung 10: Durchflusseinfluss der Mikroelektroden mit 5 µm und 2 µm im Vergleich zu den konventionellen Sensoren

Zum Verständnis: Bei den konventionellen Sensoren steigt das Signal mit steigendem Durchfluss (rote Kurve) und sinkt gegen Null wenn der Durchfluss zum Erliegen kommt. Daher sind die Armaturen heute mit einem Durchflussregler versehen, der den Durchfluss auf ca. 30 l/h begrenzt (blaue Kurve) – obwohl der Durchfluss im Zulauf steigt, sieht der Sensor stets die 30 l/h, und das Signal bleibt konstant. Unterhalb von 30 l/h dagegen kann der Regler nicht helfen, und das Signal sinkt gegen Null. Bei den Mikroelektroden dagegen lag das Signal auch ohne Durchfluss nur unwesentlich unter dem Wert mit Durchfluss. Der immer noch erkennbare leichte Anstieg bei höherem Durchfluss resultierte aus dem oben beschriebenen Anstieg des Wasserspiegels in der Armatur.

Um diesen störenden Effekt auszuschließen wurde erneut ein Sensoraufbau im 25 mm-Rohr versucht, bei dem die Kontaktseiten der Elektroden vollständig vergossen wurden. Dadurch konnte der Chip bei jedem Durchfluss komplett eintauchen. Die Bezugelektrode war diesmal in den Sensor integriert, als Gegenelektrode wurde ein in die Armatur eingebauter Graphitstift verwendet. Damit ergab sich nun endlich das gesuchte Bild gleichbleibender Messwerte bei jedem Durchfluss:

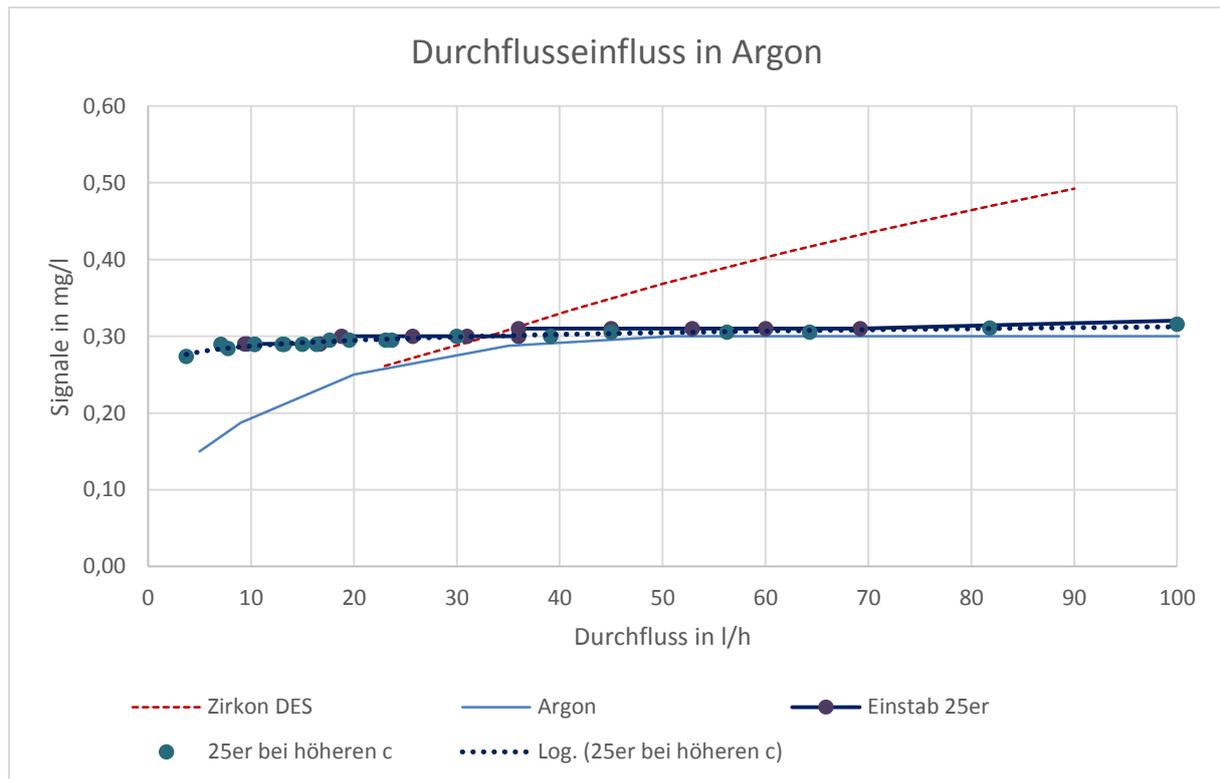


Abbildung 11: Durchfluss-unabhängige Chlormessung mit MEA

Der Durchflusseinfluss lag bei ca. 5 % bezogen auf das Mess-Signal. Zum Vergleich: Für die Messung wird ein Toleranzbereich von 2 % vom Messbereichsende angegeben. Bezogen auf den vorliegenden Messwert wären das 9 %, der Durchflusseinfluss liegt daher im Toleranzbereich der Messung.

Nachdem die Machbarkeit bewiesen war, ging es im weiteren Verlauf des Projekts darum, einen industrietauglichen Einstabsensor zu entwickeln. Dabei gab es noch diverse Probleme zu lösen:

- Kontaktierung
- Chipgröße
- Mechanischer Schutz
- Einfache und sichere Produktion

Die Kontaktierung stellte nach wie vor ein großes Problem dar. Klemmen hatte bisher die besten Ergebnisse gezeigt, erfordert aber viel Fläche und birgt die Gefahr, dass Vergussmasse zwischen Chip und Draht läuft. In Absprache mit dem Institut wurde beschlossen, an die Kontaktflächen der Chips Aluminiumdrähte anzubondern.

Ziel war nach wie vor, das 12 mm-Design der regulären Sensoren zu erreichen. Das würde unter anderem den Einsatz der üblichen Stecker und Kabel erlauben. Dafür musste der Chip aber deutlich kleiner werden. In Vorversuchen, bei denen nur ein Teil der Chips Kontakt zum Wasser hatte, wurde ermittelt dass ein 34 mm langer und 10 mm breiter Chip noch ein

hinreichend starkes Signal liefert, das mit der bestehenden Messtechnik verarbeitet werden kann.

Um die bei den ersten Chips aufgetretene Risskorrosion zu vermeiden, wurde außerdem die Struktur der metallischen Schicht der Chips verändert.

Mit all diesen Änderungen wurde die zweite Serie Chips gefertigt, mit nur noch einem Design an Durchmesser und Abstandsverhältnis.

Dazu wurden neue Halterungen gefertigt, die das gewünschte 12 mm-Design hatten, den Chip mechanisch stützen und schützen und eine schrittweise Fertigung zulassen, um sicherzustellen, dass die Kontaktierung zur Messelektrode nicht beschädigt wird.

Ein erster Prototyp hatte dann schon viel Ähnlichkeit mit einem richtigen Sensor:



Abbildung 12: Prototyp

Mit diesem Prototyp wurden die ersten Messungen zur Feststellung der Leistungskennndaten aufgenommen. Der Messbereich 0-10 mg/l wird linear abgedeckt mit einer Linearität von 99,91 %. Die größte Linearitätsabweichung lag bei 1,4 %, die größte Abweichung zur Referenzmessung bei 1,7 %.

Bei Trinkwasser-relevanten Konzentrationen lag die Genauigkeit bei oder besser als 0,04 mg/l. Die statistische Ermittlung von Nachweis- und Bestimmungsgrenze steht noch aus.

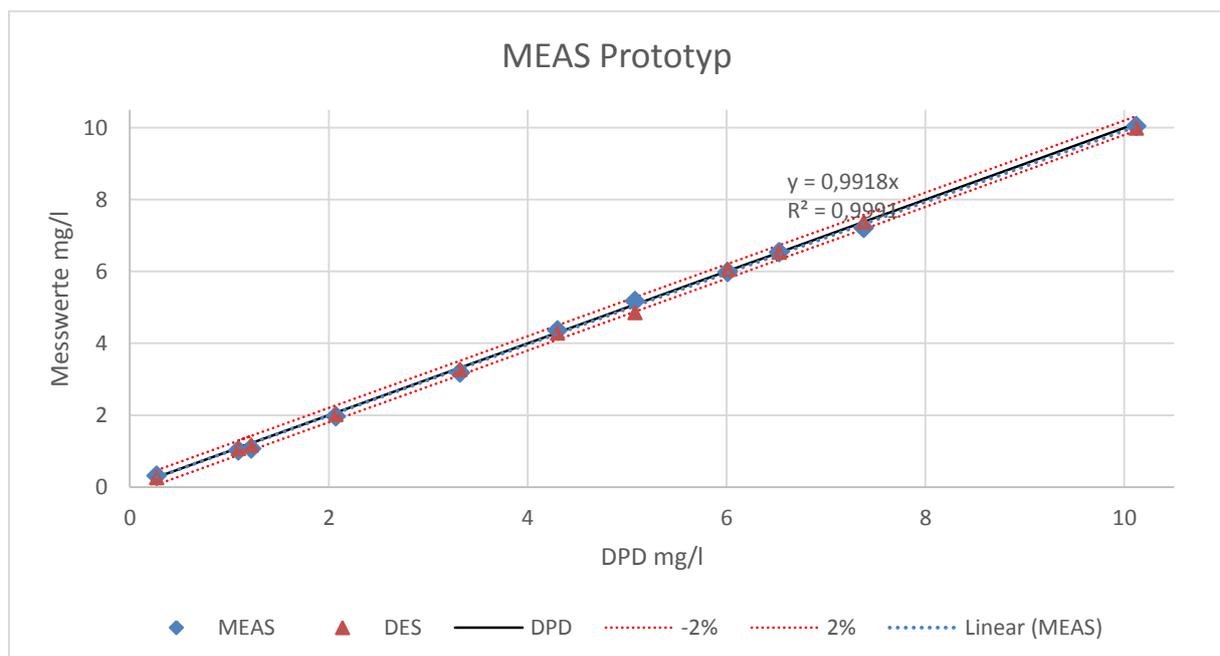


Abbildung 13: Messbereich 0-10 mg/l mit Prototyp

Auch mit dem Prototyp ergab sich eine vernachlässigbar kleine Durchflussabhängigkeit – alle Werte lagen im Toleranzbereich der Messung. Derartig kleiner Signaländerungen würden in Praxis nicht ins Gewicht fallen. Zum Vergleich das Verhalten der konventionellen Messung: Hier ändert sich der Messwert dramatisch besonders wenn der Durchfluss unter 20 l/h fällt. Und mit der Zeit abnehmende Durchflussraten sind leider in Praxis keine Seltenheit, vor allem durch sich zusetzende und nicht ausreichend gewartete Filter vor der Messung.

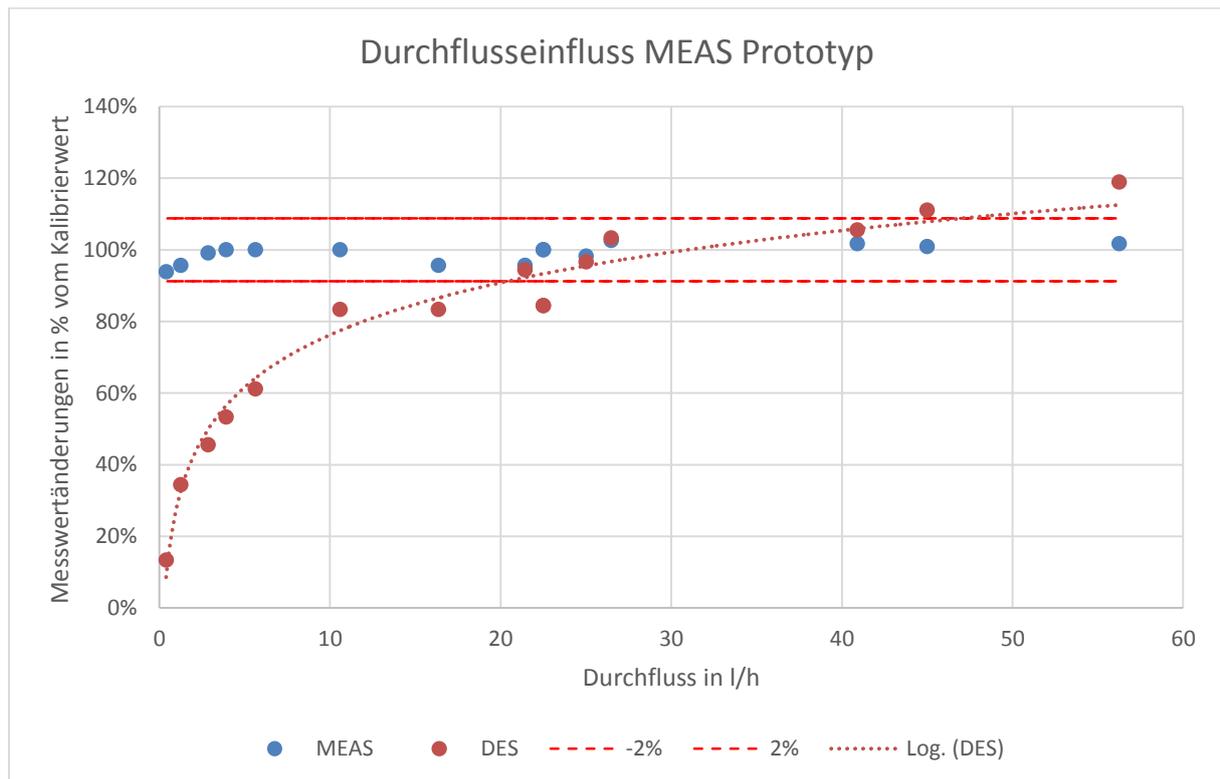


Abbildung 14: Durchflusseinfluss Prototyp

Bisher wurden noch keine Messungen mit anderen Parametern durchgeführt.

Die Adaption der Reinigung ist noch nicht komplett abgeschlossen. Fest steht zum jetzigen Zeitpunkt, dass die Sensoren durch die Reinigung nicht beschädigt werden; es wurde kein Ablösen der Deckschichten oder der Metallschicht beobachtet. Zurzeit ist die Signalbeeinträchtigung aber noch zu groß, sodass weitere Anpassungen der Reinigungsprozedur folgen werden.

Diskussion der Ergebnisse

Im Laufe des Projekts ist es tatsächlich gelungen, einen Sensor zu entwickeln, mit dem man durchflussunabhängig Chlor messen kann. Die Messung ist stabil und ruhig und absolut präzise, die Handhabung der Sensoren einfach.

Die Entwicklung war allerdings geprägt durch zahllose Misserfolge und Neustarts. Bereits im ersten Schritt der Chipfertigung und danach hauptsächlich wegen Problemen bei der Kontaktierung. Die Mikroelektroden sind so klein, dass die Durchgängigkeit der Kontakte nicht mit Ohmmetern geprüft werden kann – sobald die Kontaktfläche einmal vergossen ist, konnte die Unversehrtheit des Kontakts nur noch durch die Messung gezeigt werden.

Die Mikroelektrodenarrays mussten viel größer sein als angenommen, was den Aufbau kompletter Sensoren sehr erschwerte und für die beiden anderen im Sensor benötigten Elektroden wenig Platz lässt. Um überhaupt einen Aufbau im klassischen 12 mm-Design zu realisieren, musste die Chipgröße so weit reduziert werden, dass die Signalstärke sich gerade noch so verarbeiten ließ. Die extrem hohe Verstärkung im Messeingang wird selbst bei kurzen abgeschirmten Kabeln störanfällig sein, eine Vor-Ort-Elektronik am Sensor wird unverzichtbar sein. Das kann zu Beginn eine einfache Vorverstärkung sein. Aber wenn schon Elektronik am Sensor verbaut wird, sollte diese sinnvollerweise auch eine gewisse Speicherkapazität und Intelligenz enthalten um den Forderungen der Industrie 4.0 gerecht zu werden. Mit einer solch intelligenten Elektronik wäre der auf moderner Chip-Technologie basierende Sensor state of the art und eine solide Entwicklungsgrundlage für zahlreiche weitere Mess-Systeme.

Die großen Chipdimensionen und die dennoch geringe Signalstärke lassen es zum jetzigen Zeitpunkt nicht zu, mehrere Messungen in einem Chip zu realisieren.

Umweltentlastung

Dass es trotz zahlreicher Versuche bisher keinen marktverfügbaren Sensor gab, ist nach den Erfahrungen des Projekts vermutlich vor allem eine Folge der Chipdimensionen, die viel größer wurden als erwartet. Der Wunsch, mit Mikroelektroden kleine und kostengünstig zu produzierende Chip-Elektroden zu entwickeln und dann womöglich noch mit nur einem Messaufbau mehrere Parameter gleichzeitig messen zu können, lässt sich so nicht realisieren. Im Gegenteil war es mit Ausreizen aller technischen Möglichkeiten gerade so möglich, in einen erträglichen Kostenrahmen zu kommen.

Der Nutzen, den die neuen Sensoren bringen werden, ist trotzdem unglaublich. Mit dem Durchflusseinfluss fällt einer der letzten Störeinflüsse weg, der in der Vergangenheit immer wieder zu Problemen geführt hat und aufgrund dessen heute sehr aufwändige Armaturen mit aktiver Durchflussregelung im Einsatz sind. Diese Armaturen sind nicht nur teuer, sondern auch störanfällig, insbesondere da sie vor Verschmutzung geschützt werden müssen und darum Filter enthalten, die wiederum einen erhöhten Wartungsaufwand darstellen, der nicht der Messung als solcher dient sondern nur der Durchflussregelung. Selbst bei Einsatz in konventionellen Messaufbauten wird der neue Sensortyp daher sofort seine Überlegenheit zeigen und sehr schnell die Entwicklung einfacher, kostengünstiger und wartungsfreundlicher Armaturen nach sich ziehen.

Neben den Einsparungen auf Seiten der Installation wird auch Wasser eingespart, da häufig das Messwasser nicht in den Prozess zurückgeführt sondern verworfen wird. Wird allerdings doch Wasser zurückgeführt, erfordert dies den Einsatz von Pumpen bzw. einen höheren Installations- und Energieaufwand, um die notwendigen Druckunterschiede vor und hinter

der Messstelle sicherzustellen. Allein eine Messstelle würde so ca. 260.000 Liter Wasser pro Jahr verwerfen bzw. ein Stromverbrauch von ca. 1.500 kWh pro Jahr für eine entsprechende Pumpenleistung aufweisen.

Ein weiteres Einsparpotential durch die MEA-Sensoren sehen wir bei der Optimierung bestehender Regelstrecken. Wird der Prozess durch eine Online-Messung an einer Messstelle geregelt ergibt sich zwangsläufig eine Totzeit zwischen Dosierung und Registrierung. Dies führt in Praxis immer wieder zu starker Überdosierung. Ein MEA-Sensor kann direkt im zu überwachenden Medium platziert werden wodurch die Regelstrecke deutlich leichter zu überwachen ist und die starke Überdosierung minimiert werden kann. Aus unseren Erfahrungen mit Regelprozessen in Schwimmbad- und Industrie-Anlagen lässt sich diese Überdosierung auf über 10 % der jährlich verbrauchten Chemikalien schätzen. Als Beispiel verbraucht ein gewöhnliches 25 Meter Schwimmbecken ca. eine Tonne 10 %ige Bleichlaugen-Lösung zum Preis von ca. 1.000 € pro Jahr. In industriellen Anwendungen sind die genutzten Wassermengen in der Regel kleiner, die verwendeten Chemikalien allerdings deutlich teurer und die dosierten Konzentrationen sehr viel höher.

Drittes Potential sehen wir in Anwendungen bei denen derzeit gar keine Regelung mit Hilfe von Messtechnik möglich ist. Hierzu zählen alle Anwendungen bei denen die Partikelbelastung sehr hoch ist, z. B. die Einleitung von behandeltem Abwasser in natürliche Gewässer. Hierzu ist ein Sensor in einem offenen Gerinne notwendig, mit dem MEA-Sensor können wir genau diese Applikation nun abdecken. Hier kann der MEA-Sensor einen wichtigen Beitrag zum aktiven Gewässerschutz leisten.

Ein weiteres Ziel zum Einsatz der MEA-Sensoren ist die Entwicklung eines MEAs-basierten Handmessgerätes zur Referenzmessung. Die strömungsfreie Messung mit MEA-Sensoren ermöglicht eine einfache und schnelle Referenzmessung ohne den Verbrauch von Chemikalien. Bei der derzeit üblichen photometrischen Referenz-Messung werden Chemikalien in einer Wasserprobe gelöst und die Biozidkonzentration durch unterschiedlich starke Verfärbung sichtbar gemacht. Die farbige Lösung wird nach der Auswertung in den Abfluss entsorgt.

Die Desinfektion in Schwimmbädern ist nur eine der zahlreichen Anwendungen in denen eine Referenzmessung mit Hilfe von DPD oder anderen oft wesentlich giftigeren Chemikalien (z. B. o-Toluidin) notwendig ist. Die Anzahl der öffentlichen Schwimmbäder alleine in Deutschland lag Ende 2012 bei über 7.000. Nach Vorschrift müssen diese Bäder tägliche Vergleichsmessungen ihrer Online-Messung durchführen. Dazu kommen private Pools und Hotels.

Zu weiteren Anwendern zählen zum Beispiel Trinkwasser-Versorger und Einrichtungen, die Wasser öffentlich zur Verfügung stellen, z. B. Krankenhäuser, Kindergärten oder Altenheime. Des Weiteren wird Brauchwasser in industriellen Anlagen mit diversen Bioziden behandelt und deren Konzentration ebenfalls mit Hilfe von Referenzmessungen überwacht. Als Beispiel für den weltweiten Verbrauch produziert bereits ein einzelner größerer Anbieter von DPD-Messungen ca. 100 Mio. DPD Tabletten pro Jahr, die gesamte weltweite Produktion dürfte beim 10-fachen liegen.

Eine erfolgreiche Entwicklung des MEAs-Handmessgerätes würde es ermöglichen, Referenzmessungen komplett ohne jeglichen Chemikalienverbrauch anbieten zu können.

Es eröffnen sich mit dem Sensor auch neue Einsatzfelder, so z. B. die Messung direkt in Tanks und Becken, die bisher mangels definierter Anströmung nicht möglich war. Damit entfallen Pumpen und Leitungen und auch die Gefahr, dass das Wasser auf dem Transportweg Änderungen erfährt, z. B. dass beim Abkühlen Salze auskristallisieren. Auch der Einbau in große Rohrleitungen ist damit möglich, was sich insbesondere in der Landwirtschaft als Vorteil erweisen wird. In lebensmittelverarbeitenden Betrieben mit sehr hoher organischer Belastung des Wassers sind die zurzeit notwendigen Durchflussarmaturen oft nicht einsetzbar, sodass bei der Messung von Desinfektionsmitteln derart weitreichende Kompromisse gemacht werden müssen, dass die Messung nicht zur Regelung verwendet werden kann.

Hier wird sich die grundsätzlich nachteilige geringe Signalstärke noch als echter Vorteil erweisen, da die Konzentrationen in diesen Branchen weit über denen der meisten Desinfektionsanwendungen liegen und die Messbereiche konventioneller Sensoren oft überfordern. Nimmt man noch die einfache manuelle Reinigung der Chips hinzu, die sich handhaben lassen wie kleine auf Plastikträgern aufgeklebte Glasscheiben, so dürften die MEA-Sensoren die ideale Lösung für z. B. die fleischverarbeitende Industrie sein und den Einsatz von Desinfektionsmitteln dank belastbarer Regelung drastisch reduzieren bei gleichzeitig wesentlich sicherer Prozessführung.

Verwertung der Projektergebnisse

Sobald die Vorserie steht und die Produktion abschließend geklärt ist, sind Feldtests geplant. Einige ausländische Partner wurden bereits grob über das Entwicklungsprojekt informiert und warten ungeduldig auf die ersten Muster. Das Interesse ist sehr groß und die Anwendungen die dabei angesprochen wurden vielseitig. So gibt es z. B. in Israel eine Anwendung, bei der Wasser aus einer Quelle aus religiösen Gründen nicht für eine Messung entnommen werden darf und wo eine strömungsfreie Tauchsonde erstmalig die Überwachung der Desinfektion möglich machen würde. Diese Feldtests werden zunächst mit einfacher Elektronik durchgeführt um die Praxistauglichkeit der Sensoren zu beweisen. Geplant sind drei Monate im Feld. In dieser Zeit kann die Elektronikseite auf einen kundentauglichen Stand gebracht werden. Auch die automatische Reinigung erfordert noch Modifikationen, um die Beeinträchtigung der Messung möglichst kurz zu halten.

Mikroelektrodenarrays werden zurzeit intensiv erforscht, und selbst für die hier entwickelte Messung hat es bereits einen Ansatz gegeben, der allerdings nicht auf dem Markt verfügbar war. Daher ist noch nicht klar, ob und wie weit sich die neue Sensortechnologie patentieren lässt. Ein patentrechtlicher Schutz wäre aber sehr im Interesse der Firma, und die nötigen Unterlagen werden zurzeit einem Patentanwalt zur Begutachtung eingereicht.

Wenn die oben genannten Feldtests erfolgreich sind, werden sie übergehen in Kundentests, beginnend mit den bestehenden Kunden weltweit und in konventionellen Mess-Aufbauten. Daraus werden sich schnell schon von Kundenseite weitere Aufbauten ergeben, die dann nacheinander entwickelt werden können. Auch Anfragen, die wir zurzeit wegen der im

vorhergehenden Text beschriebenen Schwierigkeiten mit den Messaufbauten oder -bedingungen nicht bedienen können, werden Testfälle für die neuen Sensoren sein.

Was Veröffentlichungen angeht, so sind hier die Kanäle geplant die wir auch sonst nutzen, d. h. vor allem Websites von uns und unseren Partnern, Messen und Präsentationen bei Kunden sowie Veröffentlichungen in branchenspezifischen Zeitschriften zum Beispiel von Ergebnissen erfolgreicher Feldtests.

Fazit

Ungeachtet aller Schwierigkeiten hat das Ergebnis des Projekts alle Erwartungen erfüllt, und es liegen ein Prototyp eines Sensors sowie eine ausreichende Menge an Chips vor, um die Serienproduktion anzugehen. Hier muss vor allem eine möglichst sichere Fertigung und Prüfung festgelegt werden, da die Chips sehr teuer und die Kontaktierung nicht mit konventionellen Mitteln prüfbar ist.

Die Elektronikseite muss in eine kundentaugliche Form gebracht werden. Bisher wurden alte Gerätetypen eingesetzt, deren Messeingang hinreichend einfach aufgebaut ist, sodass er den Erfordernissen angepasst werden konnte. Die neuen Geräte sind wesentlich vielseitiger, was die Realisierung der notwendigen hohen Verstärkungen erschwert. Eine Vorverstärkung wird unumgänglich sein. Diese in absehbarer Zukunft mit Intelligenz auszustatten und die Sensoren daher tauglich für Industrie 4.0 zu machen ist ein logischer Folgeschritt, der allerdings mehr Zeit benötigen wird. Die überschaubarere Entwicklung eines Handgeräts wird daher zuerst erfolgen, da hier Nutzen und Marktbedarf hoch und die Entwicklungsrisiken vergleichsweise niedrig sind.