

„Sewer-Ball“ – Die räumlich-zeitliche Verteilung von Abwasserparametern in Kanälen erfassen

Adrian Koller¹, Christian Ebi¹ und Christoph Ort¹

¹ Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology,
8600 Dübendorf, Switzerland.

Kurzfassung: In der abwasser-basierten Epidemiologie wird anhand von Drogenrückständen im Abwasser geschätzt welche Mengen von illegalen Drogen in der Bevölkerung konsumiert werden. Drogenrückstände können aber bereits während der Aufenthaltszeit in der Kanalisation durch chemische und biologische Prozesse unterschiedlich beeinflusst werden. Wie sich die Umgebungsparameter des Abwassers im Transit verändern ist jedoch unbekannt. Darum entwickeln wir derzeit eine Sensorplattform, welche direkt im Abwasserstrom mitschwimmt und Veränderungen der Umgebungsbedingungen laufend aufzeichnet. pH, Redoxpotential, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur werden von unserem „Sewer-Ball“ mit ca. 100 mm Durchmesser im Intervall von 10 s gemessen. Durch die wiederholte Anwendung kann so die räumlich-zeitliche Verteilung relevanter Prozessparameter erfasst werden.

Keywords: Sensorplattform, pH, EC, ORP, Abwasserparameter, abwasser-basierte Epidemiologie.

1 Hintergrund und Motivation

Der Aufwand für den zuverlässigen Betrieb einer Messstelle in der Kanalisation ist gross. Darum werden Abwasserparameter online nur an wenigen Stellen in der Kanalisation gemessen, wenn überhaupt. Daten liegen deshalb meistens nur für spezifische Messpunkte vor, z. B. Kläranlagenzuläufe oder Mischwasserentlastungen (z. B. zum Bestimmen von Schmutzfrachten, z. B. Gruber et al., 2005). Wenn man aber den Kanal als „grossen verteilten Reaktor“ charakterisieren möchte, so müssen

Prozessparameter räumlich in höherer Auflösung erfasst werden. Für Temperatur gibt es bereits Lösungsansätze, die sind aber auch aufwändig und geben meistens nur Resultate für einzelne ausgewählte Kanalabschnitte, jedoch nicht für lange Distanzen oder gar ganze Kanalnetze (z. B. Schilperoort et al., 2013).

In der abwasser-basierten Epidemiologie wird anhand von Drogenrückständen im Abwasser geschätzt welche Mengen von illegalen Drogen in der Bevölkerung konsumiert wurden (Thomas et al., 2012). Drogenrückstände können aber bereits während der Aufenthaltszeit in der Kanalisation durch chemische und biologische Prozesse unterschiedlich beeinflusst werden (McCall et al., 2016a). Die Art der Transformationsvorgänge und Prozessraten hängen von den Eigenschaften der Substanzen und den Umgebungsbedingungen ab. Abwasserparameter wie Temperatur, pH, Redoxpotential und Sauerstoffgehalt beeinflussen diese Transformationsprozesse direkt. Aber auch Biofilme tragen zur Umwandlung von Drogenrückständen bei und die Zusammensetzung und Abbauleistung von Biofilmen kann wiederum auch von den Abwasserparametern abhängen (McCall et al., 2016b).

Darum entwickeln wir derzeit eine Sensorplattform, welche direkt im Abwasserstrom mitschwimmt und Veränderungen der Umgebungsbedingungen laufend aufzeichnet. Durch die wiederholte Anwendung kann so die räumlich-zeitliche Verteilung relevanter Prozessparameter erfasst werden. In erster Linie wenden wir die Plattform bei typischen Trockenwetterverhältnissen an.

2 Entwicklung der Sensorplattform

2.1 Anforderungen

Zu Beginn der Entwicklung wurden die Anforderungen an die Sensorplattform formuliert. Die wichtigsten Punkte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Nebst der Messung der Wasserparameter wurden auch die Datenerfassung und gewisse mechanische Rahmenbedingungen festgelegt.

Tabelle 1: Anforderungen an die Sensorplattform

Messgrösse	Temperatur	0 bis 60°C
	pH	4 bis 10
	ORP	-900 bis 900 mV
	EC	50 bis 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Datenerfassung	Intervall	10s
	Speicherung	SD Karte, onboard
	Kapazität	min 8h, besser 72h
Betrieb	Dauer	min 8h, besser 72h
Mechanik	Grösse	ideal < 60 mm, 100mm ok
	Auftrieb/Dichte	nahe neutrales Schwimmverhalten
	Material	abwasserkompatibel

2.2 Auswahl der Sensoren

Um die Sensorplattform so klein wie möglich zu halten, entschieden wir für pH, Redoxpotential (ORP,) und elektrische Leitfähigkeit (EC) die auswechselbaren Sonden aus Handmessgeräten von Hanna Instruments zu integrieren (Abbildung 1). Die Sonden sind nahezu zylindrisch mit rund 60 mm Länge und einem Durchmesser von etwa 15 mm. Mit einem radial dichtenden O-Ring an der Anschlussschulter und einem koaxialen elektrischen Anschluss (weiblich, 5.8mm aussen, 2mm innen) verfügen die Sonden über eine identische mechanische Schnittstelle. Wird nicht gemessen, muss die gelgefüllte Glaselektrode der pH-Sonde durch eine Gummikappe, welche mit etwas Lagerungsflüssigkeit (3M KCL Lösung) innen befeuchtet wird, geschützt werden.

Temperatur wird mit einem PT1000 Messwiderstand von ROTAX Albert Balzer AG gemessen (Abbildung 2). Der Fühler ist wasserdicht in eine 30 mm lange Schutzhülse mit 3 mm Durchmesser vergossen und wird mit einem Anschlusskabel geliefert.



Abbildung 1: Die auswechselbaren pH-, ORP-, und EC-Sonden von Hanna Instruments.



Abbildung 2: Der PT1000 Messwiderstand von ROTAX Albert Balzer AG.

2.3 Gesamtelektronik

Als Rechenzentrale wurde ein Arduino Pro Mini auf einem Trägerboard aufgesteckt. Mit der zusätzlichen Einbindung einer SD Karte und einer Echtzeituhr mit Kalenderfunktion entstand ein minimaler Datenlogger. Die Energiequelle stellt ein 3.7 V Polymer Lithium Ionen Akku mit einer Kapazität von 850 mAh. Die Analogsensoren pH, ORP, und T sind auf einem separaten Board aufgebaut. Ebenso wurde der EC-Sensor mit seinen Wechselspannungssignalen auf ein eigenes Board ausgelagert (siehe Abbildung 3). Um den Sewer-Ball im dunklen Kanal besser wieder auffinden zu können, haben wir eine starke Signal-LED integriert, welche zugleich als Signalanzeige für abnormale Funktion oder Störungen der Datenerfassung benutzt wird.

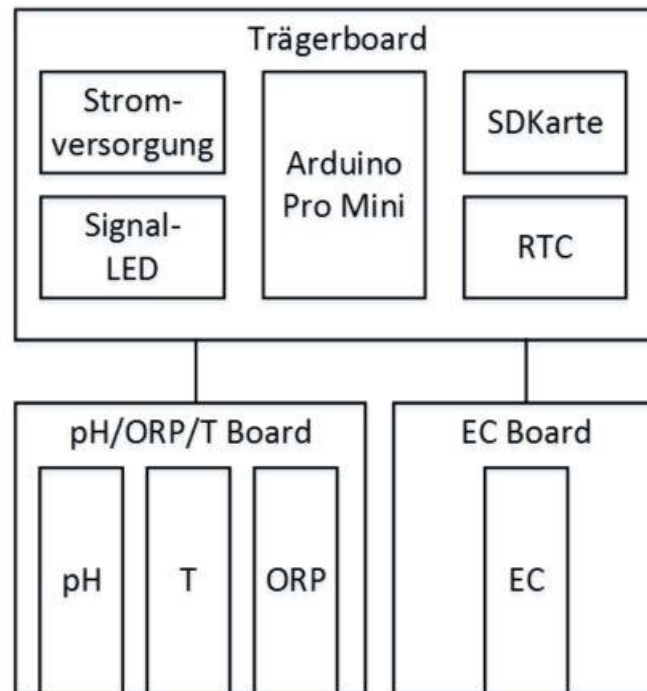


Abbildung 3: Schematische Übersicht über die Gesamtelektronik.

2.4 Elektronische Integration der Sensoren

2.4.1 Temperaturfühler

Der PT1000 Messwiderstand wurde in eine Wheatstone-Brücke verschaltet. Die drei zusätzlich notwendigen Widerstände von $1\text{k}\Omega$ wurden mit einem abgeglichenen Widerständenetzwerk aufgebaut, die Brückenspannung mit einem LT1789-1 Differenzverstärker ausgelesen und auf den gesamten Ausgangsbereich aufskaliert. Die Versorgungsspannung der Brücke wurde auf 2.1 V gesetzt. Am Spannungsteiler der Brücke ergibt sich so 1.05 V , was dem Idealbereich des LT1789-1 für die Gleichtaktunterdrückung entspricht. Das Analogsignal des Sensors wird direkt in den A/D Wandler des Arduino Pro Mini geführt.

2.4.2 pH- und ORP-Sonden

Die pH- und ORP-Messung erfolgt über zwei Elektroden: Eine Messelektrode, deren Spannung sich proportional zum elektrochemischen Potential der Lösung verhält und eine Referenzelektrode mit konstanter und stabiler Spannung. Theoretisch bewegt sich gemäss Nernst bei der

pH-Messung die elektrochemische Spannung zwischen -414 mV und $+414\text{ mV}$ bei 25°C . pH ist jedoch temperaturabhängig. Die Abhängigkeit nimmt zu je weiter entfernt sich der gemessene Wert von pH 7 befindet. So liegt der Messfehler bei einer Temperatur von 75°C und einem gemessenen pH von 4 im Bereich von 0.5 pH. Im Abwasser bewegt sich der pH normalerweise zwischen 5 und 9 (im Kläranlagenzulauf oft zwischen 7 und 8.5, siehe Ort et al., 2014) und die Temperatur liegt zwischen 10 und 40°C . Daher müsste genauer überprüft werden inwiefern der temperaturbedingte Messfehler in der Abwasserforschung relevant ist.

Da um 0 mV herum schwerlich gemessen werden kann, wird häufig die Referenzspannung nicht auf 0 mV sondern auf einen erhöhten Wert gesetzt. Für unsere Anwendung haben wir 512 mV gewählt, womit wir über den gewünschten pH-Messbereich ein Signal von ca. 100 mV bis 900 mV erwarten. Die Schaltung wurde gemäss des Application Report von Texas Instruments (2013a) umgesetzt (Abbildung 4). Dabei werden die Signale der beiden Elektroden durch zwei Operationsverstärker hochohmig vom Rest der Schaltungen getrennt. Gleichzeitig lässt sich über die Widerstände R1 und R2 die Verstärkung einstellen, sodass der Zielbereich des Signals den gesamten Bereich des A/D Wandlers ausnutzt und die Auflösung maximiert wird.

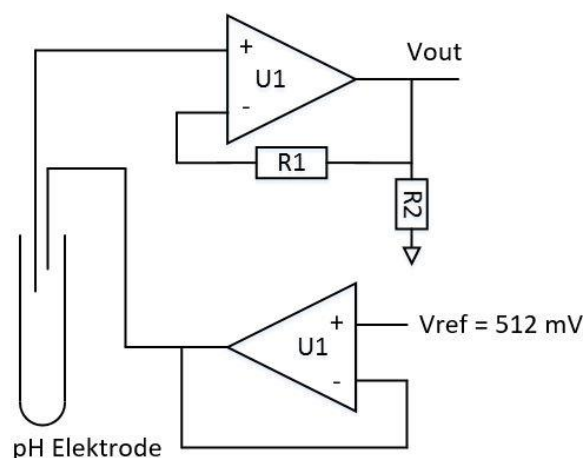


Abbildung 4: Schaltung zur Integration der pH-Sonde (adaptiert aus Texas Instruments (2013a)).

Die Schaltung für die Einbindung der ORP-Sonde ist identisch bis auf die Referenzspannung, welche von 512 mV auf 1024 mV verdoppelt wurde, da der Zielmessbereich zwischen -900 mV und +900 mV liegt.

2.4.3 EC-Sonde

Im Kern handelt es sich bei der Bestimmung der Leitfähigkeit um eine Impedanzmessung. Für den Fall der vorliegenden EC-Sonde mit den parallelen Plattenelektroden ist die gemessene Impedanz Z [Ω] definiert als

$$Z = \frac{l}{A} \rho$$

wobei l [m] dem Abstand der Platten, A der effektiven Fläche der Elektroden [m^2] und ρ der elektrischen Resistivität [Ωm] entspricht. Die Leitfähigkeit σ [S/m] einer Flüssigkeit ist dann definiert als der Reziprokwert der Resistivität.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Das Verhältnis von l zu A ist wiederum definiert als die Zellkonstante k einer EC-Sonde, häufig in cm^{-1} angegeben. Für zwei unserer EC-Sonden haben wir die Zellkonstanten mit Hilfe eines Netzwerkanalysators ausgemessen. Die Sonden wurden in drei Kalibrierlösungen mit Leitfähigkeiten 84 $\mu\text{S/cm}$, 1000 $\mu\text{S/cm}$ und 1413 $\mu\text{S/cm}$ getaucht und die Impedanz gemessen. Daraus konnte die Zellkonstante, wie in Abbildung 5 dargestellt, berechnet werden.

Für unsere Anwendung konnte so die zu erwartende Impedanz für den Zielmessbereich von 50 bis 3000 $\mu\text{S/cm}$ auf ca. 10 k Ω bis 150 Ω geschätzt werden.

Der AD5933 von Texas Instruments ist ein hochintegrierter Impedanzwandler, welcher sich ausgezeichnet für eine EC Messung eignet. Kombiniert mit der analogen Signalaufbereitung gemäss der Application Note AN-1252 von Texas Instruments (2013b) lässt sich der Empfindlichkeitsbereich nach unten bis ca. 100 Ω Impedanz erweitern. Die Messfrequenz haben wir auf 3 kHz eingestellt. Der AD5933 verfügt über eine

I²C Schnittstelle, welche direkt vom Arduino Pro Mini angesprochen werden kann.

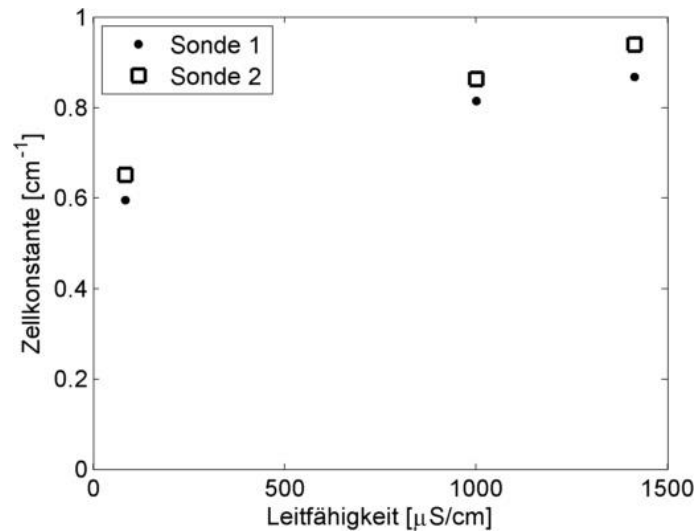


Abbildung 5: Die Bestimmung der Zellkonstante für zwei EC-Sonden.

2.5 Mechanische Konstruktion

Als Basisform wurde eine Kugel gewählt, welche in seichem Wasser rollen und in tieferem Wasser schwimmen kann. Die mechanischen Teile sind so ausgelegt, dass der Schwerpunkt möglichst weit vom Auftriebszentrum entfernt in Richtung der Sensoren liegt. Dies bewirkt, dass sich die Kugel aufrichtet sobald sie schwimmt. Gepaart mit einer mittleren Dichte von ca. 900 kg/m^3 wird sichergestellt, dass die integrierten Sensoren ständig im Abwasser eingetaucht sind.

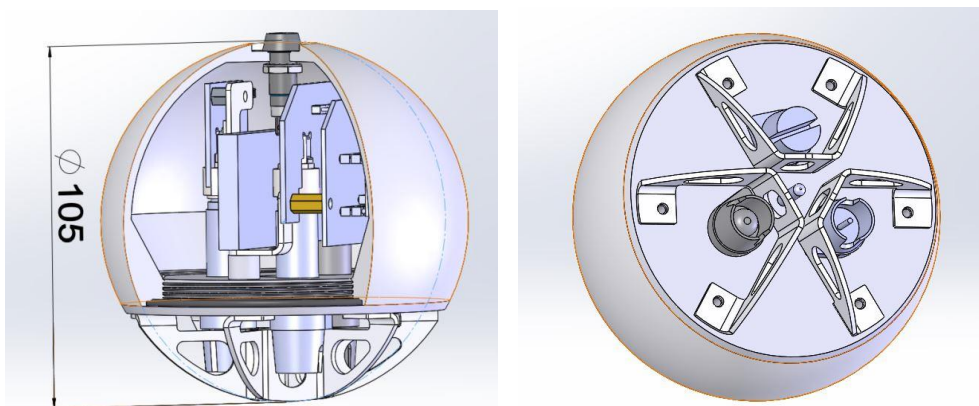


Abbildung 6: Isometrische Ansicht der Konstruktion des Sewer-Balls.

Wie aus Abbildung 6 ersichtlich sind die drei Sonden im Dreieck angeordnet und der Temperaturfühler in der Mitte angebracht. Die Sonden werden von einer Blechkonstruktion vor Beschädigung geschützt. Das Trägerbauteil der Sensoren ist aus Aluminium, die Schutzbleche aus rostfreiem Stahl und die mit einem O-Ring wasserdicht verschlossene Kuppel aus Polypropylen.

3 Kalibration und Messbetrieb der Sensoren

3.1 Temperatursensor

Der Temperatursensor wurde über den Zielbereich von nahe dem Gefrierpunkt bis ca. 80°C kalibriert. Dieser Bereich könnte wahrscheinlich noch eingeschränkt werden, da Ort et al. (2014) bereits festgestellt hatten, dass die gemittelte Abwassertemperatur in 42 Europäischen Städten während einer Woche nie ausserhalb des Bereichs von 7 bis 28°C lag.

Als Referenzmessung haben wir ein Fluke FLK t-3000FC Messgerät mit einem K-Type Thermoelement verwendet. Die aufgezeichneten Daten sind in Abbildung 7 dargestellt. Wie aus der Grafik ersichtlich, wurden die Messpunkte oberhalb von 50°C nicht für die Kalibrierung berücksichtigt, da sich das Signal im Randbereich des Operationsverstärkers nicht mehr linear verhält.

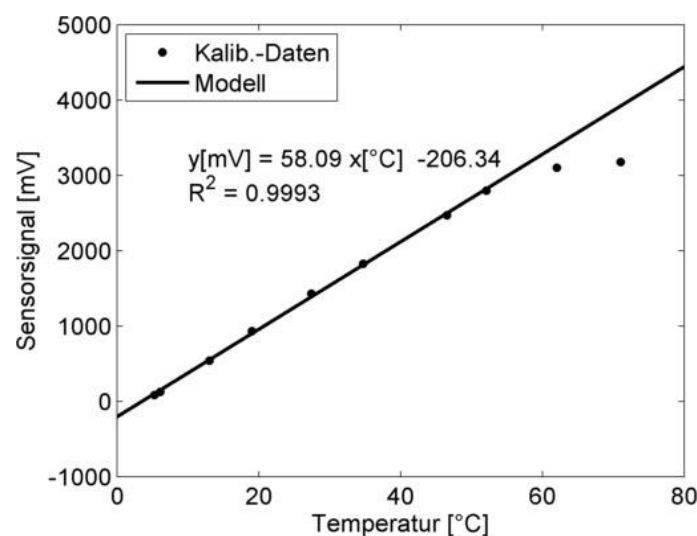


Abbildung 7: Kalibrierung des Temperatursensors.

Anhand dieser Vorwärtskalibrierung kann durch die Umkehr des mathematischen Modells die Funktion der Temperatur in Abhängigkeit des Sensorsignals aufgestellt werden.

$$y[^\circ\text{C}] = 0.0172 x[\text{mV}] + 3.552$$

Somit liegt die maximal messbare Temperatur im linearen Bereich bei rund 55°C und die minimale Temperatur (Sensorausgang = 0 mV) bei ca. 3.5°C. Unter Berücksichtigung des 10-bit A/D Wandlers des Arduino Pro Mini Analogeingangs ergibt sich somit eine Auflösung von 0.05°C/Inkrement.

3.2 pH Sensor

Zur Kalibrierung des pH Sensors haben wir drei Standard Pufferlösungen von pH 4, pH 7, und pH 10 verwendet. Die Temperatur der Lösungen lag zum Zeitpunkt der Messung bei 23.9°C. Die Messpunkte sind in Abbildung 8 dargestellt. Durch Umkehrung der Gleichung ergibt sich für den pH Sensor das Modell

$$y[\text{pH}] = -0.0029 x[\text{mV}] + 11.35$$

Über den praktikablen Ausgangssignalbereich von 100 mV bis 3000 mV ergibt sich somit ein pH Messbereich von pH 11 bis pH 2.6 mit einer Auflösung über den 10-bit A/D Wandler von ca. 0.01 pH/Inkrement.

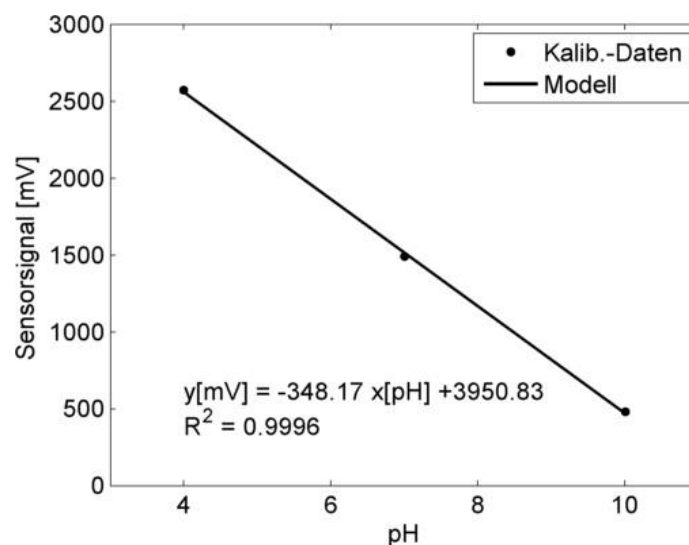


Abbildung 8: Kalibrierung des pH Sensors (bei 23.9°C).

3.3 ORP Sensor

Zur Kalibrierung des ORP Sensors verwendeten wir zwei Kalibrierlösungen mit einem ORP von 240 mV und 470 mV. Die Temperatur der Lösungen lag zum Zeitpunkt der Messung bei 24.2°C. Um weitere Messpunkte zu generieren, wurde Grüntee (bekannt für relativ tiefes ORP) aufgebracht und auf Raumtemperatur abgekühlt.

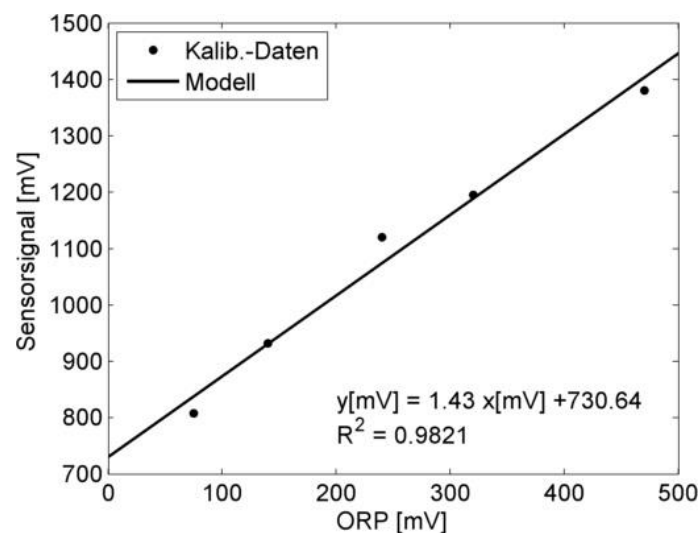


Abbildung 9: Kalibrierung des ORP Sensors (bei 24.2°C).

Der ORP von 75 mV wurde mit einem HACH 40d Datenlogger und einer IntelliCAL™ ORP-REDOX MTC101 Sonde bestimmt. Um den ORP schrittweise zu erhöhen, wurde dem Grüntee tropfenweise eine Bleichlauge zugegeben. Dies führte dazu, dass das ORP rasant anstieg, ohne den pH nennenswert zu verändern. Die Sensorsignale sind in Abbildung 9 abgebildet.

Anhand der Daten lässt sich folgendes Sensormodell aufstellen:

$$y[ORP\ mV] = 0.69 x[Sensor\ mV] - 510.93$$

3.4 Leitfähigkeitssensor

Zur Kalibrierung des Leitfähigkeitssensors haben wir vier Standard Lösungen mit Leitfähigkeiten von 84, 1413, 5000, und 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ verwendet. Um mehr Messpunkte im Zielbereich von ca. 0 bis 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ zu generieren, haben wir die 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ Lösung nach und nach mit

Lösungen einer höheren Leitfähigkeit gemischt und die aktuelle Leitfähigkeit der Testmischung mit einem HACH 40d Datenlogger und einer IntelliCAL™ CDC401 Leitfähigkeitssonde gemessen. Die Temperatur der Messlösungen lag bei 23.8°C.

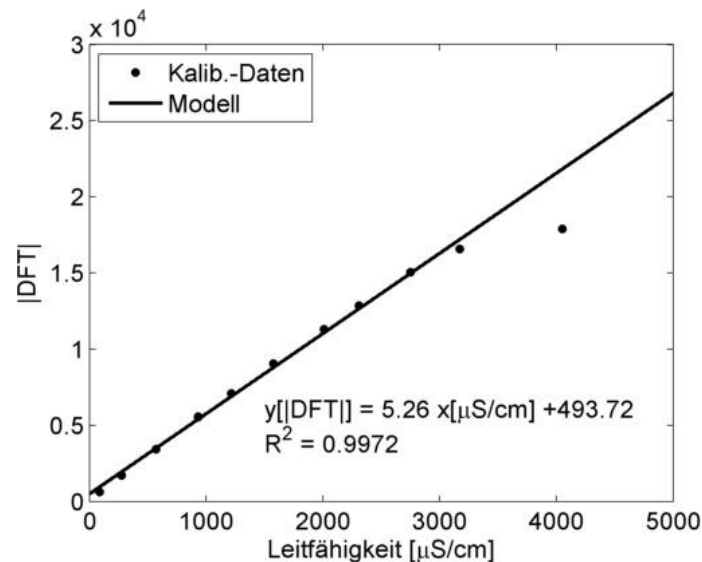


Abbildung 10: Kalibrierung des Leitfähigkeitssensors.

In der Umkehrung ergibt sich für die Leitfähigkeit folgendes Modell:

$$y[\mu S/cm] = 0.19 x[|DFT|] - 93.86$$

Als Ausgangsgrösse liegt im Fall der Leitfähigkeit nicht ein Analogsignal, sondern eine komplexe Zahl als Resultat der diskreten Fouriertransformation aus der Impedanzspektrometrie vor. Die Magnitude der gemessenen Frequenzinformation kann mit der zur Kalibrierung vorgelegten Leitfähigkeit korreliert werden. Die Daten der Messreihe sind in Abbildung 10 dargestellt.

3.5 Sequenzieller Ablauf der Messungen

ORP und pH sind beide elektrochemische Messgrößen. Während mit dem pH die jeweilige Konzentration der H⁺ und OH⁻ Ionen ausgedrückt wird, misst ORP das kollektive Redoxpotential sämtlicher Anteile der Lösung. Die elektrochemische Spannung, die durch eine Abweichung vom Neutralpunkt (pH = 7 und ORP = 0 mV) entsteht, wird gegenüber einer künstlich erzeugten Referenzspannung gemessen. Die unmittelbare

räumliche Nähe der Sonden im Sewer-Ball bedingt, dass die Messungen sequenziell und nicht parallel durchgeführt werden müssen, da die angelegte Referenzspannung an der einen Sonde das Signal der anderen Sonde beeinflussen und damit verfälschen würde.

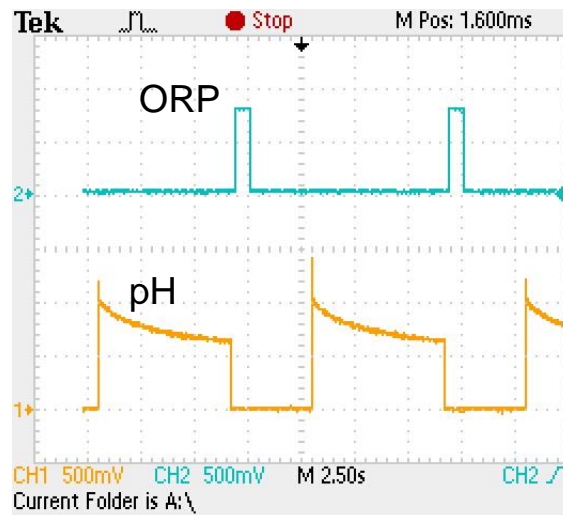


Abbildung 11: Sequenzielle Messung von pH und ORP.

Wie aus Abbildung 11 ersichtlich, wird zunächst die pH-Sonde eingeschaltet. Da die Glaselektrode Anpassungszeit benötigt, wird diese 8 s eingeschaltet, bevor der Messpunkt abgelesen wird. Danach wird die pH-Sonde aus- und die OPR-Sonde eingeschaltet. Diese reagiert sofort und somit kann die Messung innerhalb 500 ms durchgeführt werden. Nach pH und ORP wird die EC-Messung durchgeführt, die Temperatur ausgelesen und der Messzyklus beginnt im Intervall von exakt 10 s von vorne.

4 Erste Erkenntnisse aus Messversuchen im Abwasserkanal

Am 10. und 17. Mai 2017 haben wir in einem ca. 300 m langen Kanalstück südwestlich der kantonalen Fischzuchtanlage in Wangen bei Dübendorf (N47.411298, E8.641516; siehe Abbildung 12) erste Versuche im Abwasserkanal durchgeführt. Über die Gesamtlänge befinden sich fünf einfach zugängliche Schachtdeckel, wo sich der Kanalgrund nur ca. 1.5 m unter der Oberfläche befindet. Der Wasserstand im Rohr (im

Wesentlichen ein Rechteckkanal mit Dreieckprofil bei tiefem Wasserstand) mit 1 m Durchmesser betrug ca. 5 cm. Leider reichte dieser Wasserstand nicht, um den Ball zum Schwimmen zu bringen und die Strömung war zu schwach, um den Ball zu rollen. Somit zogen wir als erstes Fazit, dass das Konzept Schwimmen/Rollen noch einmal überarbeitet werden muss.

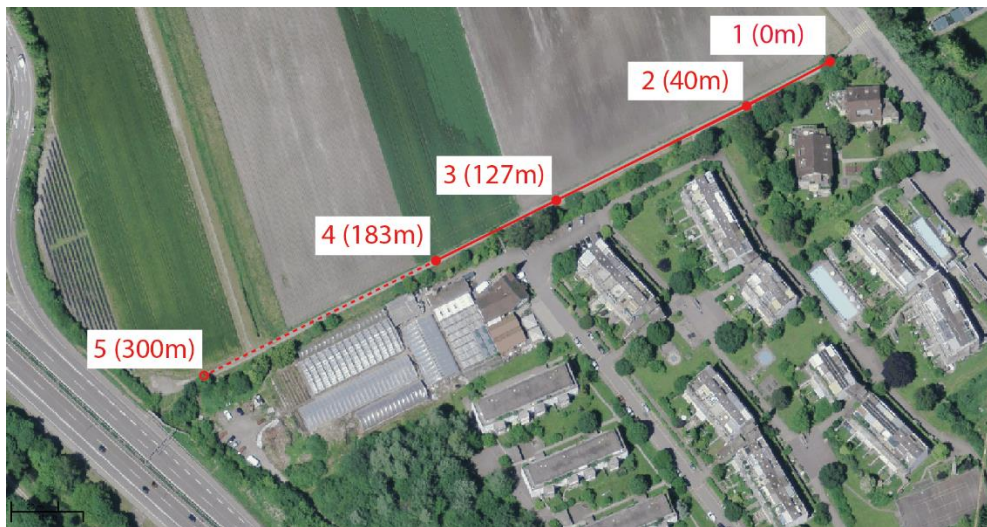


Abbildung 12: Geographische Lage der ersten Testversuche (N47.411298, E8.641516). Schachtdeckel nummeriert (in Klammern ungefähre, kumulierte Fliessdistanz ab Schacht 1). Zwischen Schacht 4 und 5 befanden sich zur Zeit der Versuche Sedimentansammlungen welche verhindert hätten, dass der Ball bei Schacht 5 angekommen wäre. Quelle: GIS Browser Kanton Zürich.

Obwohl der Sewer-Ball in der Strömung lag, verfielen sich erstaunlich wenige Feststoffe an den Sonden oder Schutzblechen und die Dichtigkeit war anstandslos.

Im zweiten Versuch vom 17. Mai installierten wir am Sewer-Ball eine Schwimmhilfe, um im ähnlich niedrigen Wasserstand Transitversuche durchführen zu können (Abbildung 13). Der Sewer-Ball wurde im Schacht 1 nahe der Brüttisellenstrasse in den Kanal gegeben und im Schacht 4 wieder entnommen. Die Transitzeit betrug gut wiederholbar rund 8.5 Minuten.

Es wurden 6 Transits durchgeführt. Am Entnahmeschacht haben wir Referenzsonden installiert und die damit gemessenen Werte zum Entnahmzeitpunkt notiert. Die pH und ORP-Sonden funktionierten nicht

korrekt, da wir den offensichtlich notwendigen, sequentiellen Messbetrieb bis dahin noch nicht implementiert hatten. Temperatur und EC wurden aber aufgezeichnet.



Abbildung 13: Sewer-Ball Versuche im Kanal mit Schwimmhilfe.

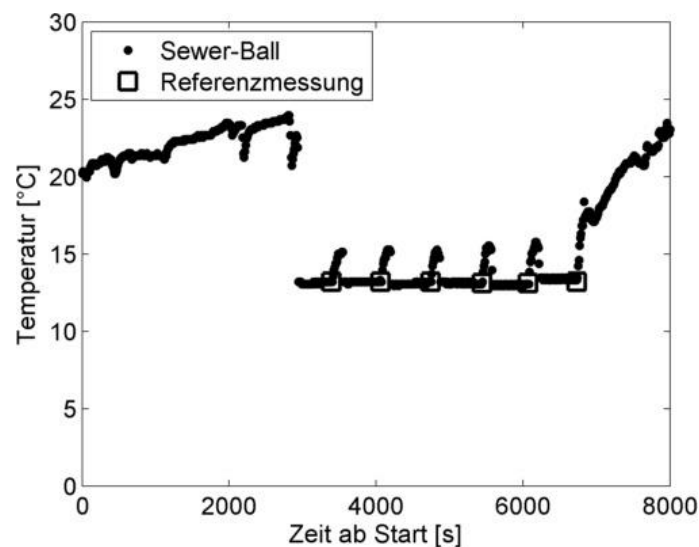


Abbildung 14: Temperatursignal des Sewer-Balls.

Abbildung 14 zeigt das vom Sewer-Ball aufgezeichnete Temperatursignal. Die sechs Durchgänge sind wegen dem oberirdischen Rücktransport des Balls ohne Wasserkontakt zu Schacht 1 eindeutig identifizierbar. Zudem stimmen die vom Ball gemessenen Werte am Entnahmepunkt sehr gut mit den Referenzmessungen überein. In Abbildung 15 ist das vom Ball aufgezeichnete EC-Signal dargestellt. Wiederum sind

die sechs Versuche eindeutig erkennbar. Obwohl der Absolutwert der EC-Messung für die späteren Versuche vom Ball etwas zu tief gemessen wurde, ist der allgemein beobachtete Trend gut wiedergegeben.

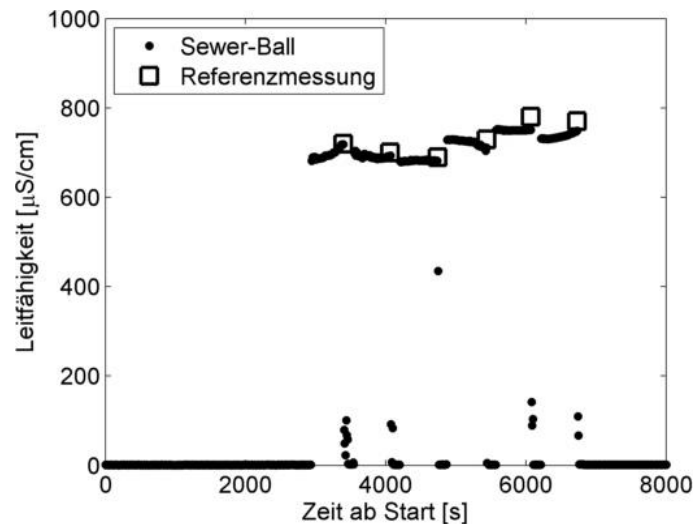


Abbildung 15: EC-Signal des Sewer-Balls.

5 Fazit

Die Integration von Sonden zur Bestimmung von Abwasserparametern auf engstem Raum gestaltete sich als mechanische und elektronische Herausforderung. Obwohl der Sewer-Ball schlussendlich etwas grösser als erhofft dimensioniert werden musste, kann die Plattform die hauptsächlichen Anforderungen erfüllen. In den folgenden Monaten werden zunächst die in den ersten Versuchen aufgedeckten Mängel in einer Designrevision behoben und danach einige Exemplare des Sewer-Balls hergestellt. Damit sollen in verschiedenen Schweizer und Europäischen Städten Testreihen durchgeführt werden.

6 Danksagung

Diese Arbeit wird durch das SBFI (Schweizerisches Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation, Projektnummer C15.0092, im Rahmen der COST Aktion ES1307) finanziert. Für die angenehme Zusammenarbeit und die stets unkomplizierte, prompte Kommunikation geht ein

ganz herzliches Dankeschön an Frau Renier und Frau Klaper (SBFI) und unser internes Support Team (Aneta Ilova, Sarah Kilic, Sabina Kündig Erzinger, Bianca Mosimann und Isabel Wiedmer). Ebenso möchten wir unseren KollegInnen Dr. Ann-Kathrin McCall für die wissenschaftliche Unterstützung und Simon Dicht für die technische Unterstützung während den Feldversuchen herzlich danken. Wir bedanken uns bei Frau Zuzana Pronayova von Hanna Instruments für die offenen, technischen und wissenschaftlichen Diskussionen über elektro-chemische Messtechnik und ein spezieller Dank gilt dem Tiefbauamt der Stadt Dübendorf, das uns in nachbarschaftlicher Freundschaft immer wieder mit Möglichkeiten zu Feldversuchen unterstützt.

7 Literatur

- Gruber G., Winkler S., Pressl A. (2005). Continuous monitoring in sewer networks an approach for quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies. *Water Science and Technology*, 52 (12), pp. 215-223.
- McCall A. et al. (2016a). Critical review on the stability of illicit drugs in sewers and wastewater samples. *Water Research* 88: 933-947.
- McCall A., Scheidegger A., Madry M., Ort C. (2016b). Influence of Different Sewer Biofilms on Transformation Rates of Drugs. *Environmental Science and Technology*, 50(24), p. 13351-13360.
- Ort C., van Nuijs A.L.N., Berset J.D., Bijlsma L., Castiglioni S., Covaci A., de Voogt P., Emke E., Fatta-Kassinos D., Griffiths P., Hernández F., González-Mariño I., Grabic R., Kasprzyk-Hordern B., Mastroianni N., Meierjohann A., Nefau T., Östman M., Pico Y., Racamonde I., Reid M., Slobodnik J., Terzic S., Thomaidis N., Thomas K.V. (2014) Spatial differences and temporal changes in illicit drug use in Europe quantified by wastewater analysis, *Addiction*, 109(8), 1338-1352.
- Schilperoort R., Hoppe H., De Haan C., Langeveld J. (2013). Searching for storm water inflows in foul sewers using fibre-optic distributed temperature sensing. *Water Science and Technology*, 68 (8), pp. 1723-1730.
- Texas Instruments (2013a). AN-1852 Designing With pH Electrodes.
- Texas Instruments (2013b). AN-1252 How to Configure the AD5933/AD5934.
- Thomas K.V. et al. (2012). Comparing illicit drug use in 19 European cities through sewage analysis. *Science of The Total Environment* 432: 432-439.

Korrespondenz an:

Eawag
Dr. Christoph Ort
Ueberlandstrasse 133
CH-8600 Dübendorf
Tel: +41 58 765 5277
Email: christoph.ort@eawag.ch