

## Kurzbericht

<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>01DJ21001</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme (IMM) Carl-Zeiss-Str. 18-20 55129 Mainz
<b>Thema (Akronym):</b>	<b>Verbundprojekttitel (1.04.2021-28.02.2022):</b> Mikrofluidische Plattform mit Nanosensor-Arrays basierend auf mehreren Nachweisprinzipien für die Multikomponenten-Analyse von Schadstoffen und toxischen Metallionen in Wasser (EMPOLSENS) <b>Teilprojekttitel (1.04.2021-1.03.2022):</b> Design und Herstellung von mikrofluidischen Mehrkanalchips mit integriertem optischen Detektor, sowie die Entwicklung von Modifikationsprotokollen für die Kanäle Funktionalisierung. <b>Verbundprojekttitel (1.09.2022-30.06.2024):</b> Mikrofluidische Plattform mit Nanosensor-Arrays basierend auf mehreren Nachweisprinzipien für die Multikomponenten-Analyse von Schadstoffen in Wasser (EMPOLSENS) <b>Teilprojekttitel (1.09.2022-30.06.2024):</b> Design und Herstellung von mikrofluidischen Mehrkanalchips mit integriertem optischen Detektor, sowie die Entwicklung eines Nachweisassays für ein ausgewähltes Pestizid in Wasser.
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.04.2021 bis 30.06.2024
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.04.2021 bis 30.06.2024

### Die ursprüngliche Aufgabenstellung sowie der wissenschaftliche und technische Stand, an den angeknüpft wurde

Sauberes Trinkwasser ist eine der wichtigsten Ressourcen im täglichen Leben, die durch industrielle Arbeiten und die immer schneller wachsende Bevölkerung durch kontinuierlichen Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt belastet wird. Abgesehen von giftigen Schwermetallen, die schon jahrelang die Listen der Schadstoffe in vielen Ländern angeführt haben, sind neu auftretende Schadstoffe, wie Hormone, Antibiotika, Pestizide bereits in sehr geringen Konzentrationen (im Bereich von ppb bzw. nM) genauso schädlich für den Menschen [1, 2]. Insbesondere Antibiotika und Pestizide stellen eine große Gesundheitsgefährdung dar, da sie in immer höheren Maßen eingesetzt werden, langzeitstabil in Wasser und Öl vorliegen und einen deutlichen Effekt auf die Ausbildung von Resistenzen haben. Außerdem sind normale Wasseraufbereitungsanlagen kaum geeignet, um solche Stoffe zu entfernen [3]. Es liegen zwar zahlreiche Analysesysteme für die Wasserqualität vor, die allerdings keine Schadstoffe miteinschließen. Bisher wurde auch keine einheitliche Überwachung für Schadstoffe in Oberflächen- und Grundwasser über alle Länder hinweg etabliert [4]. Detektion, Identifikation und Quantifizierung der Schadstoffe und deren Abbauprodukte sind überaus wichtig, um deren Auftreten und Auswirkung auf die Umwelt bestimmen zu können. Dies stellt vor allem eine Herausforderung dar, da die Anzahl aktuell bekannter Schadstoffe und deren Abbauprodukte in Europa bei etwa 4700 liegt [1].

Die Vor-Ort-Überprüfung von Pestiziden ist ein entscheidender Schritt, um die sichere Anwendung und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften im Umgang mit chemischen Pflanzenschutzmitteln zu gewährleisten. Sie dient nicht nur dem Schutz der Umwelt, sondern auch der menschlichen Gesundheit, indem sie sicherstellt, dass Pestizide sachgerecht gelagert, dosiert und angewendet

---

werden. Die Fortschritte in den letzten Jahren im Bereich der Nanotechnologie und Nanomaterialien haben den Weg für die Entwicklung innovativer und leistungsstarker Sensoren geöffnet. Die gewünschten Eigenschaften solcher Sensoren umfassen die einfache Herstellung, Integration, Kompaktheit, hohe Empfindlichkeit, kurze Reaktionszeit, Zuverlässigkeit und Wiederverwendbarkeit. Im Projekt EMPOLSENS wurde eine kosteneffiziente, mikrofluidische Plattform entwickelt, die verschiedenen Nanosensoren und Detektionsmethoden (optisch, impedimetrisch) kombiniert, um die wichtigsten Schadstoffe (Antibiotika und Hormone) und das anwendungsrelevante Pestizid (Acetamiprid) zuverlässig zu identifizieren und im nanomolaren Konzentrationsbereich zu quantifizieren.

### **Ablauf des Vorhabens**

*01.04.2021 - 31.12.2021:*

- Entwicklung und Herstellung von mikrofluidischen Chips mit vier verschiedenen Kanalgeometrien
- Entwicklung der Elektronik für die Steuerung der Sensormodul.

*01.01.2022 - 28.02.2022 und 01.09.2022 - 31.12.2022:*

- Es wurden mehrere Designs mikrofluidischer Sensorplattformen entwickelt und hergestellt. Die optischen und mikrofluidischen Eigenschaften der Plattformen wurden charakterisiert.
- Das anwendungsrelevante Pestizid (Acetamiprid), für das ein optisches Nachweisassay entwickelt werden soll, wurde identifiziert.

*01.01.2023 - 31.12.2023:*

- Verschiedene Messaufbauten wurden aufgebaut und auf ihre Sensitivität getestet.
- Der Nachweis von Acetamiprid im Abwasser wurde durchgeführt

*01.01.2024 - 30.06.2024:*

- Entwicklung und Verifizierung einer Detektionsplattform mit etablierten Nachweismethoden zur Messung von einem Hormon (Östrogen) und Pestizid (Acetamiprid) in Wasser.

### **Die wesentlichen Ergebnisse**

Das Fraunhofer IMM war mit der Entwicklung und dem Aufbau der mikrofluidischen Detektionsplattform inklusive Flüssigkeitsmanagement befasst. Mehrere Designs der mikrofluidischen Plattform mit integriertem Silizium-Photomultiplier (SiPM) wurden entwickelt, aufgebaut und bei der Erkennung des vorab ausgewählten Pestizids Acetamiprid getestet. Eine der Herausforderungen bestand darin, die Detektion von ACP im UV-Bereich zu etablieren. In mehreren Iterationen wurde das System optimiert bzw. die Nachweisempfindlichkeit verbessert, sowie das ACP in gespikten realen Wasserproben nachgewiesen bzw. quantifiziert.

Die wesentlichen Ergebnisse, die im Rahmen des Projekts erreicht wurden, sind:

1. Entwicklung und Aufbau einer mikrofluidischen Detektionsplattform mit integriertem Silizium-Photomultiplier (SiPM).
2. Auswahl des Pestizids und Entwicklung eines Nachweistests basierend auf der mikrofluidischen Detektionsplattform.
3. Integration des UV-Behandlungsschritts von Acetamiprid und Automatisierung der einzelnen Detektionsschritte.
4. Aufbau eines Prototyps mit integrierten Detektionssystemen, entwickelt von den Partnern von UHasselt (Belgien) und Fraunhofer IMM.

### **Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen**

Im Rahmen des Projekts wurde mit der Universität Hasselt (UHasselt) zusammengearbeitet, um die Ziele zu erreichen.

Prof. dr. Anitha Ethirajan ([anitha.ethirajan@uhasselt.be](mailto:anitha.ethirajan@uhasselt.be))

Prof. dr. ir. Ronald Thoelen ([ronald.thoelen@uhasselt.be](mailto:ronald.thoelen@uhasselt.be))

Wetenschapspark 1,3590 Diepenbeek, Belgium

- 
1. Geissen et al// Int. Soil Water Conserv. Res. 3 (2015) 57
  2. Larsson // Philosophical Trans. R. Soc. B. 369 (2014) 20130571
  3. Verlicchi et al.// Sci. Total Environ. 429 (2012) 123 ; Martinez// Environ. Pollut. 157 (2009) 2893
  4. Hartmann et al.// Arch. Environ. Contam. Toxicol. 36 (1999) 115.

## Schlussbericht

<b>Förderkennzeichen:</b>	<b>01DJ21001</b>
<b>Zuwendungsempfänger:</b>	Fraunhofer-Institut für Mikrotechnik und Mikrosysteme (IMM) Carl-Zeiss-Str. 18-20 55129 Mainz
<b>Projektleiter:</b>	Dr. Anna Musyanovych <a href="mailto:anna.musyanovych@imm.fraunhofer.de">anna.musyanovych@imm.fraunhofer.de</a>
<b>Co-Projektleiter</b>	Dr. Ralph Sperling <a href="mailto:ralph.sperling@imm.fraunhofer.de">ralph.sperling@imm.fraunhofer.de</a>
<b>Thema (Akronym):</b>	<p><b>Verbundprojekttitel (1.04.2021-28.02.2022):</b> Mikrofluidische Plattform mit Nanosensor-Arrays basierend auf mehreren Nachweisprinzipien für die Multikomponenten-Analyse von Schadstoffen und toxischen Metallionen in Wasser (EMPOLSENS)</p> <p><b>Teilprojekttitel (1.04.2021-1.03.2022):</b> Design und Herstellung von mikrofluidischen Mehrkanalchips mit integriertem optischen Detektor, sowie die Entwicklung von Modifikationsprotokollen für die Kanälen Funktionalisierung.</p> <p><b>Verbundprojekttitel (1.09.2022-30.06.2024):</b> Mikrofluidische Plattform mit Nanosensor-Arrays basierend auf mehreren Nachweisprinzipien für die Multikomponenten-Analyse von Schadstoffen in Wasser (EMPOLSENS)</p> <p><b>Teilprojekttitel (1.09.2022-30.06.2024):</b> Design und Herstellung von mikrofluidischen Mehrkanalchips mit integriertem optischen Detektor, sowie die Entwicklung eines Nachweisassays für ein ausgewähltes Pestizid in Wasser.</p>
<b>Laufzeit des Vorhabens:</b>	01.04.2021 bis 30.06.2024
<b>Berichtszeitraum:</b>	01.04.2021 bis 30.06.2024

---

## Einleitung

Das EMPOLSENS-Projekt zielte auf das Design, die Herstellung und die Leistungsbewertung eines in die Mikrofluidik integrierten, miniaturisierten tragbaren Sensors mit mehreren Detektionsmodulen zur Bestimmung von Schadstoffen wie Antibiotika und Hormonen, sowie der häufigsten toxischen Metallionen (Hg, As, Pb und Cd) in Leitungswasser und natürlichen Wasserquellen. Eine Kombination aus optischer und impedimetrischer Detektion auf einer Plattform mit intelligenter Datenverarbeitung ermöglicht die Bestimmung in einem breiten Konzentrationsbereich von  $\mu\text{M}$  bis nM und darunter (mit einer Vorkonzentrationseinheit). Der Nachweis von Schwermetallionen sollte mittels Fluoreszenz erfolgen. Das Konzept sollte in einen mobilen Demonstratoraufbau umgesetzt werden, um die Funktionalität zu zeigen und als Basis für zukünftige Weiterentwicklungen zu dienen.

Das Fraunhofer IMM verfügt über langjährige Erfahrung in der Entwicklung von optischen Detektionskonzepten durch Integration von fluidischen und optischen Funktionen in Polymer-Mikrofluidik-Chips. Im Rahmen des Projekts hat das Fraunhofer IMM an der Entwicklung von mikrofluidischen Mehrkanalchips mit integrierten optischen Detektoren auf Basis von Silizium-Photomultipliern (SiPM) für die Wasseranalytik auf Schwermetalle gearbeitet, sowie an der Entwicklung von Demonstratoraufbau mit integrierten Detektionsmodulen der belgischen Partner aus UHasselt, beteiligt.

Aufgrund des Angriffs Russlands auf die Ukraine wurde das Projekt ab dem 01.03.2022 „eingefroren“ und nach der Anpassung der Arbeitspakete ab dem 01.09.2024 ohne den russischen Partner fortgesetzt. Der Nachweis von Schwermetallen wurde durch den Nachweis von anwendungsrelevanten Pestiziden ersetzt, um das Projektkonzept bilateral mit dem belgischen Partner UHasselt zu validieren.

## 1. Erzielte Ergebnisse

### 1.1. *Design von mehrkanaligen mikrofluidischen Chips mit integrierten optischen Detektoren für die Wasseruntersuchungen*

Das Konzept und der Versuchsaufbau wurden zunächst mit einem 1-Kanal-Chip getestet, um später durch Parallelisierung den Nachweis mehrerer Analyten gleichzeitig zu ermöglichen. Zu diesem Zweck war geplant, mehrere, vorerst unabhängige Detektionskanäle auf dem Chip zu realisieren und das Sensormodul mit der entsprechenden Anzahl von optischen Detektoren auszustatten. Zur Steuerung des Sensormoduls wurde eine entsprechende Elektronikplatine entwickelt. Die Elektronik besteht aus einer Mikrocontroller-basierten Steuerplatine für bis zu sechs Sensoren und zunächst zwei Miniplatinen mit jeweils einem Silizium-Photomultiplier (SiPM) als Detektor mit nachgeschaltetem Transimpedanzverstärker (TIA – *engl.* transimpedance amplifier) zur Signalverstärkung. Das zunächst analog vorliegende Messsignal wird anschließend digitalisiert, vom Microcontroller erfasst und mittels USB-Schnittstelle auf einen PC bzw. Notebook übertragen. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Komponenten des Sensormoduls in einer Explosionsdarstellung. Im grauen Gehäuse soll die Platine untergebracht werden. Eine erste Version des mikrofluidischen Chips ist in Abbildung 2 gezeigt.

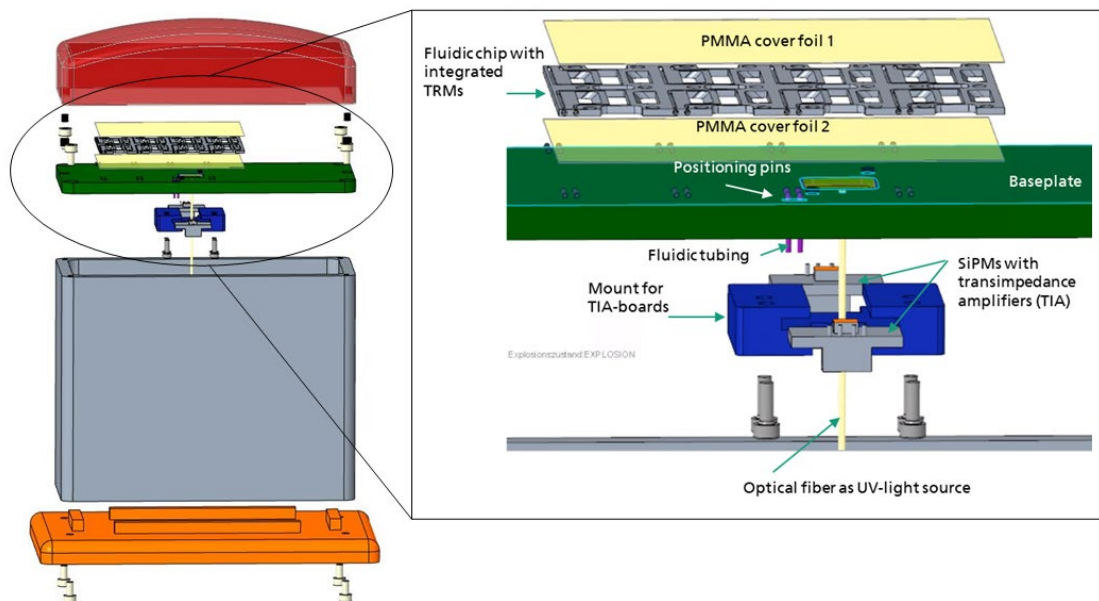


Abbildung 1: Aufbau des gesamten Sensormoduls bestehend aus Chiphalter („Baseplate“, grün) und Gehäuse (grau bzw. orange) mit Deckel (rot). Rechts ist der Chiphalter mit einem 8-Kanal Chip gezeigt, die SiPM-Sensoren mit auf der Platine integrierten TIAs werden mit einer entsprechenden Halterung (blau) von unten auf den Chip blickend montiert. Die fluidischen Anschlüsse sind als kurze Schlauchstücke angedeutet (fluidic tubing), die aus dem Gehäuse nach außen geführt werden.

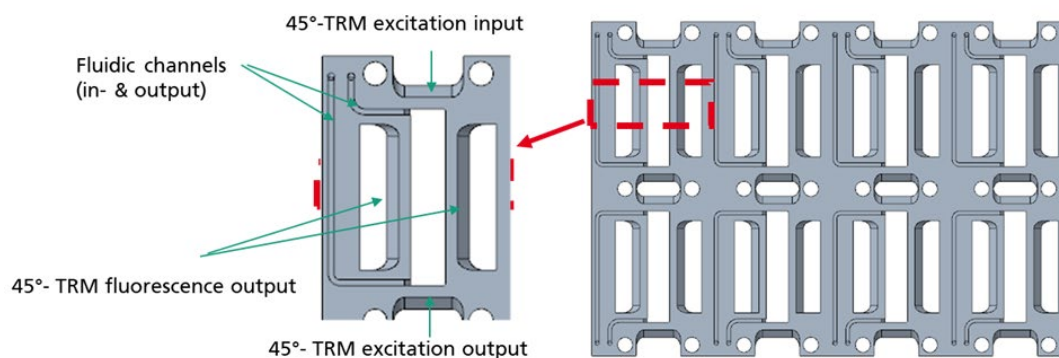


Abbildung 2: Design des mikrofluidischen Mehrkanalchips, mit einer Ausschnittsvergrößerung eines einzelnen Detektionskanals (links). Der Hauptkanal ist ca. 4 mm x 15 mm groß und ist auf allen vier Seiten von 45° angeschrägten Strukturen umgeben (TRM – engl. total reflection mirror), die das Anregungslicht lateral in den Kanal einkoppeln bzw. das Fluoreszenzlicht nach unten zum Detektor leiten.

Es wurden geeignete SiPM-Detektoren und LEDs ausgewählt und beschafft, um den Versuchsaufbau zu realisieren und die Funktion zunächst mit Fluorescein zu testen.

## 1.2. Identifizierung/Auswahl eines anwendungsrelevanten Pestizids für die Entwicklung eines optischen Nachweisassays

Nach einer intensiven Literaturrecherche und unter Berücksichtigung der physikalisch-chemischen Eigenschaften wurde Acetamiprid (ACP) als ein anwendungsrelevantes Pestizid ausgewählt. Acetamiprid (Abbildung 3) ist eine heterocyclische aromatische chemische Verbindung, die in zahlreichen Pflanzenschutzmitteln enthalten ist und zur Stoffgruppe der Neonicotinoide zählt. Im Gartenbau bzw. im konventionellen Obst- und Gemüseanbau wird der Wirkstoff ACP als schnell wirkendes Insektizid gegen beißende und saugende Insekten verwendet und besitzt seit 2005 eine EU-Zulassung. Der Wirkstoff wird in flüssiger Form zum Versprühen, sowie als Granulat auf dem Feld angewendet, so dass ein Teil des Wirkstoffs im Oberflächen- und potenziell Grundwasser landet und dort eine unerwünschte Belastung darstellt. Weiterhin wird ACP von herkömmlichen Kläranlagen nicht entfernt, was eine zusätzliche Problematik bzw. Fragestellung für Untersuchungen darstellt.

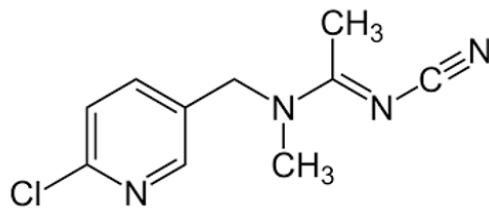


Abbildung 3: Chemische Struktur von Acetamiprid (ACP).

Im Dezember 2013 zeigt die EFSA (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit) einen möglichen Zusammenhang zwischen ACP und Entwicklungsneurotoxizität<sup>1</sup>. Dies schädigt die Entwicklung von Neuronen und Hirnstrukturen in der Entwicklung beim Menschen. Aus diesem Grund wurden die toxikologischen Referenzwerte von 0,1 bis 0,025 mg/kg Körpergewicht reduziert. Zusätzlich gibt das Umweltbundesamt einen Richtwert für Oberflächenwasser an, der nicht überschritten werden soll. Dieser liegt bei 0,5 µg/L (2,25 µmol/L)<sup>2</sup>.

Für den Nachweis von ACP wurde der Nachweis mittels Fluoreszenz als gangbarer Weg identifiziert. Aus der Literatur ist bekannt, dass ACP bei Bestrahlung mit UV-Licht durch photochemische Zersetzungsprozesse fluoreszierende Spezies produziert,<sup>3,4</sup> die nach entsprechender Anregung direkt detektiert werden können. In Vorversuchen stellte sich heraus, dass eine Bestrahlungsdauer von ca. 10 min ausreichend ist, um ein messbares Fluoreszenzsignal zu generieren.

In Abbildung 4 sind Extinktionsspektren zu sehen, die vor und nach unterschiedlichen Bestrahlzeiten aufgenommen wurden, mit der höchsten Bande nach 10 min Bestrahlungsdauer. Eine längere Bestrahlung führt wieder zu einem Rückgang der erzeugten Fluoreszenz, wahrscheinlich durch weitere photochemische Degradation der zuvor erzeugten Spezies. Im nächsten Schritt wurden von der Probe nach 10 min UV Bestrahlung Fluoreszenzspektren aufgenommen (Abbildung 5). Im 2D-Scan wird schrittweise die Anregungswellenlänge durchgeföhren (Y-Achse), das Emissionsspektrum ist entlang der X-Achse aufgetragen. Die Intensitätswerte werden dabei in Farben umgesetzt, jedes gemessene Emissionsspektrum entspricht dabei einem horizontalen Balken bei der jeweiligen Anregungswellenlänge auf der Y-Achse. Die scharf begrenzten Stufen stellen dabei das Anregungslicht dar (1. und 2. Beugungsordnung), leicht wellenlängenverschoben darunter wird ein Raman-Peak sichtbar. Das eigentliche Fluoreszenzlicht sind die größeren (breitbandigen) Bereiche dazwischen, in orange eingerahmt. Der Bereich mit der größten Intensität findet sich bei 300 nm Anregungswellenlänge, im Emissionsbereich 350 – 450 nm; das dazugehörige Einzelspektrum ist rechts dargestellt.

<sup>1</sup> EFSA Journal 2013;11(12):3471. DOI: 10.2903/j.efsa.2013.3471

<sup>2</sup> Umweltbundesamt. "Pestizide." Zugriff am: 3. Januar 2024. [Online.] Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/fluesse/zustand/pestizide-0>

<sup>3</sup> Bakhom et al., Environ Sci Pollut Res (2020) 27:45238, DOI: 10.1007/s11356-020-10406-x

<sup>4</sup> Nicol et al., Chemosphere (2020) 248:126040, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126040

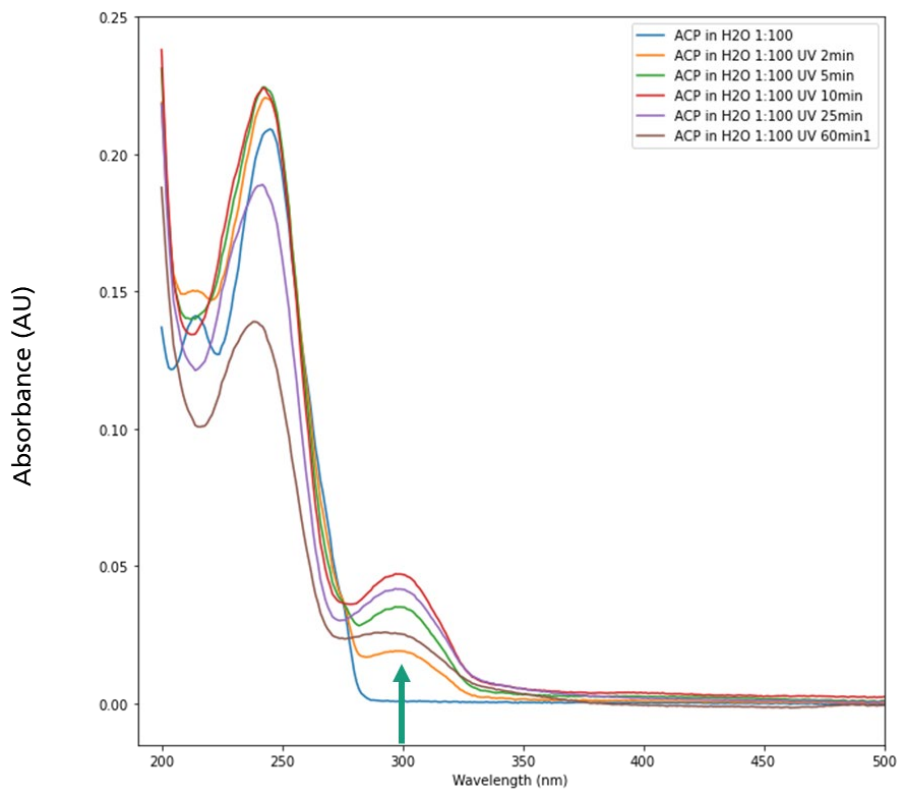


Abbildung 4: Extinktionsspektren einer wässrigen Lösung von ACP (2,8 µg/ml). Die Bande bei 240 – 250 nm liegt im sehr kurzwelligen UV-Bereich, die Bande um 300 nm ist experimentell leichter zugänglich und entsteht bei der Bildung von fluoreszierenden Zersetzungsprodukten, bzw. stellt von diesen die Anregungswellenlänge dar.

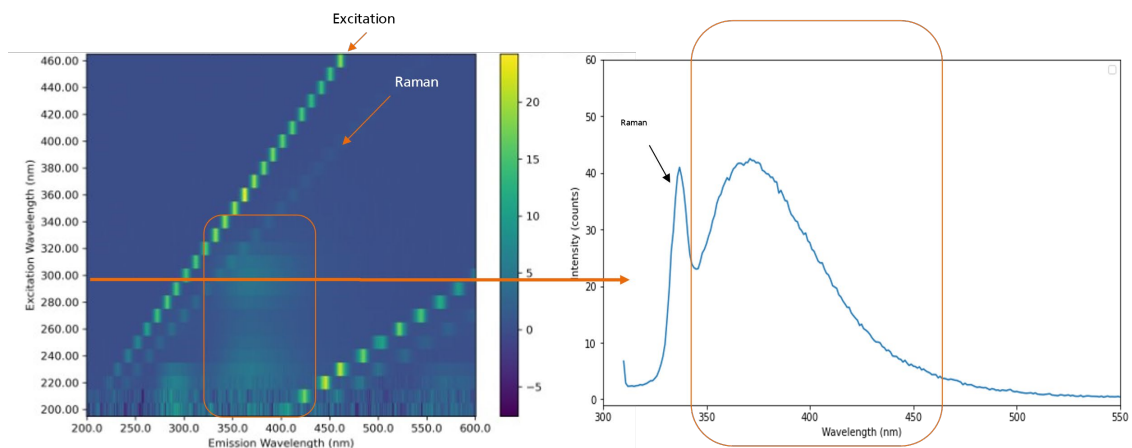


Abbildung 5: Fluoreszenz von ACP. Links: 2-D Scan der Anregung und Emission. Links: Maximales Fluoreszenzsignal bei 300 nm Anregungswellenlänge, entsprechend dem Maximum der Extinktionsbande. Der scharfe Peak bei 340 nm ist Raman-Streuung und verschiebt sich mit der Anregungswellenlänge, während sich die Wellenlänge des breiten Fluoreszenzpeaks nicht ändert (orange eingerahmt).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Analyt ACP mittels UV-Behandlung und nachgeschalteter Fluoreszenzdetektion nachgewiesen werden kann. Die Anregungswellenlänge liegt im UV-Bereich bei 300 nm, die Emission zwischen 350 – 450 nm, also am Übergang von UV zum sichtbaren Bereich, und ist mit dem bestehenden Design des Detektionsaufbaus bzw. mikrofluidischen

---

Chipsystems kompatibel. In den folgenden Arbeiten soll das Nachweisassay auf die mikrofluidische Plattform übertragen werden, um als mobiles System für Vor-Ort-Analysen zur Verfügung zu stehen.

### 1.3. Design von mikrofluidischen Chips für den Nachweis von Fluorescein und ACP in Wasser

#### 1.3.1. Mikrofluidischer Polymerchip

Die ersten Tests wurden mit Fluorescein und ACP unter Verwendung des in Abbildung 2 dargestellten Chipdesigns durchgeführt. Die Empfindlichkeit war jedoch nicht zufriedenstellend, um kleine Konzentrationen des Analyten zu messen. Daher wurden folgenden Veränderungen vorgenommen, um das Chipdesign in Bezug auf Effizienz und Fertigung zu verbessern und das Detektionslimit zu verringern:

- Chipdicke von 2 mm auf 3 mm erhöht, um das Detektionsvolumen zu vergrößern
- Vergrößerung der Spiegelflächen, um mehr Licht ein- und auskoppeln zu können
- Boden deckt den kompletten Chip ab (keine Deckelfolien am Boden notwendig)
- Anpassung der Maße auf Detektoren und Lichtquelle

Das neue Chipdesign wurde aus speziellem, UV-transparentem Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt. Im Abbildung 6A ist der neue Chip als 3D-Modell dargestellt, welcher sechs einzelne Messzelle beinhaltet. Der Chip ist grob in drei Teile gegliedert. Einerseits die Messzelle bzw. Kanal, durch den der Analyt geleitet wird, andererseits ein Eingang für die LED und einer für den Detektor. Die Lichtquelle strahlt senkrecht von unten auf Chip und wird in von einem von einem 45° Spiegel abgelenkt, d.h. im rechten Winkel auf die Messzelle reflektiert. An diesem Punkt trifft das Licht auf den Analyten und es entsteht Fluoreszenz im Inneren des Messkanals.

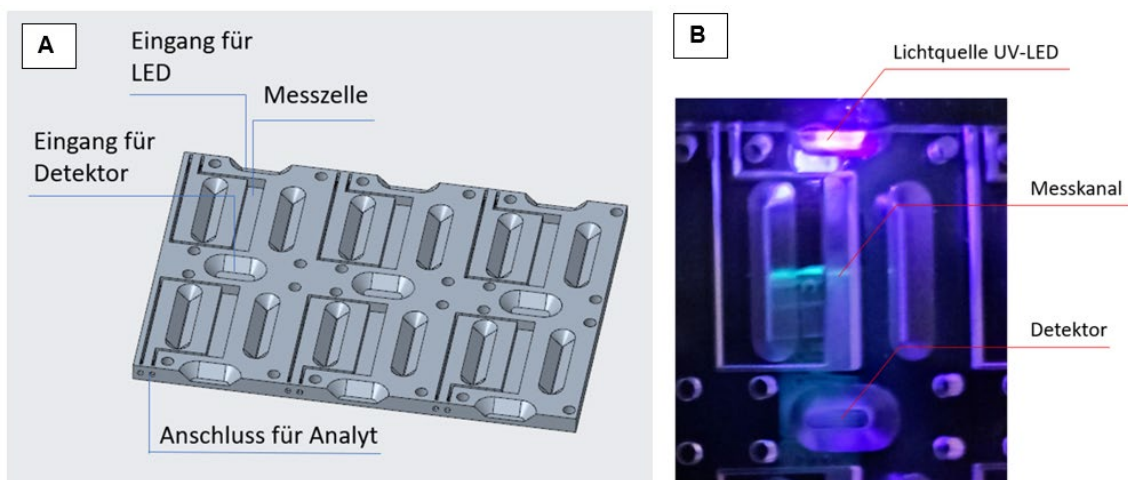


Abbildung 6 A: 3D-Modell des modifizierten mikrofluidischen Chips (Sensorplattform) mit sechs Messzellen; B: Foto einer einzelnen mikrofluidischen Zelle mit eingeschalteter UV-LED.

Das Fluoreszenzlicht wird von einem Detektor erfasst, der sich entweder direkt unterhalb des Kanals befinden kann oder unterhalb eines weiteren 45° Spiegels, der das Licht nach unten auskoppelt (Abbildung 7). Vor dem Detektor befindet sich ein optischer Bandpassfilter, der die Anregungswellenlängen herausfiltert und somit nur das Fluoreszenzsignal des zu analysierenden Stoffes durchlässt. Im Verlauf des Projekts wurde festgestellt, dass die Fluoreszenzemission unterhalb der Messzelle signifikant höher ist als am Ende der Messzelle. Daher wurde ein zweiter Detektor mit Bandpassfilter auch direkt unterhalb der Messzelle, d.h. dem mikrofluidischen Detektionskanal, angebracht.

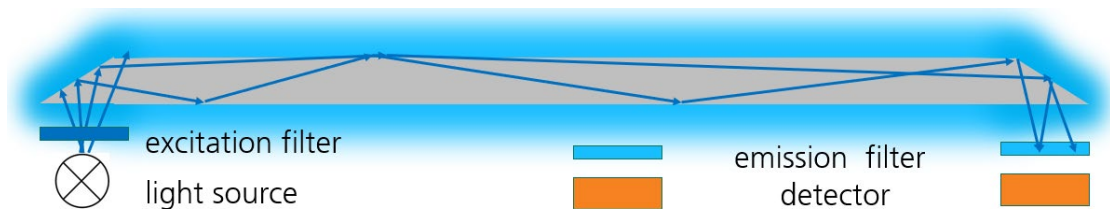


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messprinzips im modifizierten mikrofluidischen Polymerchip (Seitenansicht).

Ein Beispiel für die Messung einer Fluorescein-Lösung ist in Abbildung 8 gezeigt. Dargestellt sind jeweils die Daten der Messung mit Wasser und der Messung des Analyten. Der Signalhub ist durch den schwarzen Pfeil markiert.

Der „Proof of Principle“ für den Nachweis von Fluorescein als Modellsubstanz in einem mikrofluidischen Kanal konnte erfolgreich etabliert werden. Die Nachweisgrenze liegt unter  $3 \cdot 10^{-6}$  mol/L.

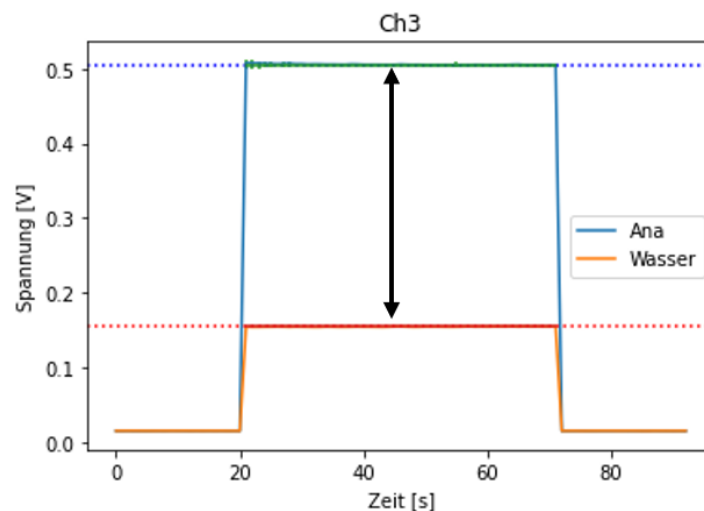


Abbildung 8: Beispiel einer einzelnen Messung mit Fluorescein als Analyt („Ana“) und Reinstwasser als Referenz. Der Signalausschlag bei der Messung mit Wasser ergibt sich aus Streulicht aus der Anregungslichtquelle, der eigentlich Signalhub (schwarzer Doppelpfeil) kann durch Subtraktion bzw. die zugrundeliegende Konzentration durch eine entsprechende Kalibriergerade mit Offset erhalten werden.

---

Nachdem das erste Sensormodul aufgebaut und die Komponenten funktionsfähig waren, und desweiteren die Nachweisreaktion für ACP grundlegend charakterisiert war, wurde das System im weiteren Projektverlauf weiterentwickelt bzw. optimiert. Der erste Aufbau basiert auf dem modifizierten mikrofluidischen Chip und im zweiten Aufbau wurde eine Quarzküvette als feste oder durchströmte Messzelle installiert, um möglichst viel Fluoreszenzlicht erfassen zu können. Um ein flexibleres Vorgehen zu ermöglichen, wurde als Ersatz für das ursprünglich entworfene Gehäuse mit Chiphalter ein neues modulares Design gewählt, um die optischen Komponenten (SiPM, Anregungs-LED, optische Filter) zu montieren und passend zum mikrofluidischen Chip bzw. der Küvettegeometrie zu positionieren. Die SiPM-Sensoren und Elektronikplatine blieben unverändert, während die Software und Auswerteverfahren fortlaufend weiterentwickelt wurden.

### Modifiziertes Chipdesign

Aufgrund unterschiedlicher Herausforderungen wurden im Verlauf des Projekts verschiedene Chip-Designs erstellt und getestet. Das Design des Chips wurde so verändert, dass das einfallende Licht den kürzest möglichen Weg durch das PMMA-Material geht, da ein Teil des sehr kurzwelligigen Anregungslichts beim Durchgang absorbiert wird. Dies wurde implementiert, um den Anteil an abgeblockter Intensität zu reduzieren und somit eine höhere Anregungsintensität auf dem Analyten zu gewährleisten. Die entsprechende Anpassung ist in Abbildung 10 veranschaulicht und umgesetzt. Der Messkanal wird nun auf die Unterseite des Chips verlegt, wodurch der Detektor unterhalb der Messzelle ausschließlich durch eine dünne Folie von der zu analysierende Flüssigkeit getrennt ist. Darüber hinaus wurden Änderungen an den Eingängen der Kanäle vorgenommen, da sich in der Praxis an diesen Stellen die Deckelfolie leicht vom Chip gelöst hat.

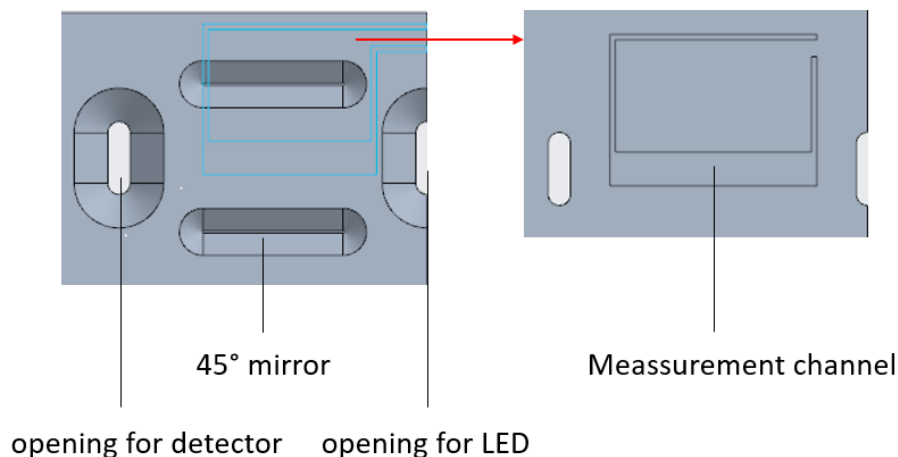


Abbildung 9: Konstruktionsanpassung des Messkanals, der in der neuen Version vergrößert wurde, um das Detektionsvolumen zu erhöhen.

Für den Versuchsaufbau wurde ein 3D-gedrucktes Gestell konstruiert, welches die einzelnen Bauteile miteinander verbindet. Zusätzlich wird das Gestell eingehaust, um sicherzustellen, dass kein Umgebungslicht auf den Detektor trifft und somit die Messung verfälscht. Die Konstruktionszeichnung der Halterung ist in Abbildung 8 dargestellt.

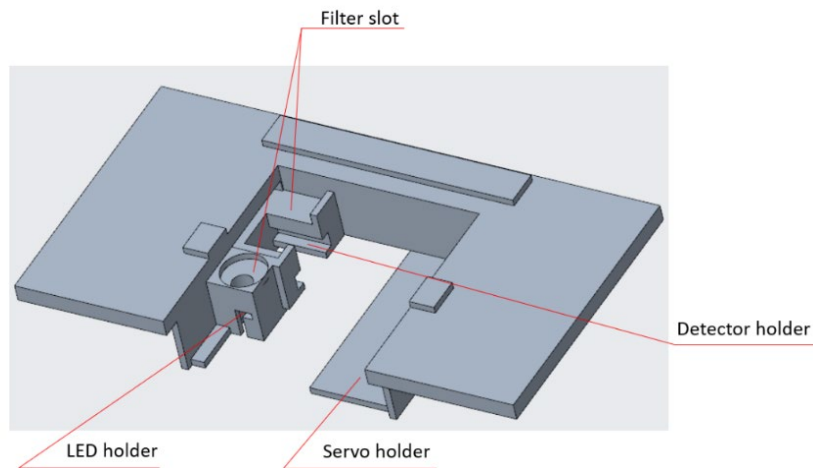


Abbildung 10: Halterung zur Montage der einzelnen optischen Komponenten (LED; Filter, SiPM Detektor), auf das schließlich der mikrofluidische Chip gesetzt wird.

Unter Verwendung von Comsol wurde ein Strömungsprofil in zwei unterschiedlichen Strukturen von Messkanälen erstellt und analysiert. Comsol ist eine Software, die zur Simulation von physikalischen Vorgängen dient. Dabei spielt die Positionierung des Messkanals relativ zu den optischen Komponenten für die Fluidik keine Rolle, sondern ausschließlich der inneren Geometrie der Kanäle. Der Farbverlauf gibt die Strömungsgeschwindigkeit an und reicht von Blau (0 m/s) bis Rot (0.2 m/s). In Abbildung 11A ist zu sehen, wie die aktuelle Geometrie einer Messzelle simuliert wird. Hierbei zeigt sich, dass im Kanal eine geringe Strömungsgeschwindigkeit von 20 mm/s herrscht. Jedoch kommt es beim Eingang des Kanals zu Verwirbelungen und die Ecken werden nicht optimal durchspült. Aus diesem Grund ist die Flüssigkeitsverteilung nicht homogen und an den rot markierten Stellen wird die Flüssigkeit nur langsam ausgetauscht. Diese Herausforderungen können durch die Verwendung eines linearen Messkanals überwunden werden (Abbildung 11B).

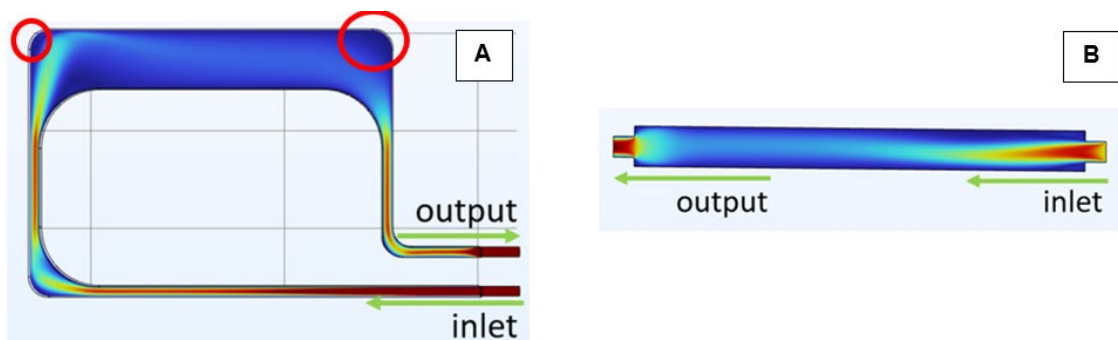


Abbildung 11: Strömungsprofil eines Messkanals auf dem mikrofluidischen Chip (A) und eines einfachen linearen Messkanals (B).

Die Messungen wurden mit ACP-, sowie Fluorescein-Konzentrationsreihen durchgeführt. Dabei wird der berechnete Signalhub über die Konzentration aufgetragen, welche mittels des UV-VIS Spektrometers bestimmt wird. Der mit den Fehlern eingegrenzte Bereich gibt den tatsächlichen Bereich an, in dem sich der Messwert befindet. Die erste gezeigte Messreihe mit Fluorescein liefert eine lineare Trendline mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,91 (Abbildung 12). Der gemessene Bereich erstreckt sich von 0,6  $\mu\text{mol/L}$  bis 70  $\mu\text{mol/L}$ . Alle Messungen wurden dreifach bestimmt. In der Grafik ist zusätzlich die Geradengleichung der Trendline, mit einer Steigung von 0,0058  $\text{V}/(\mu\text{mol/L})$ , angegeben.

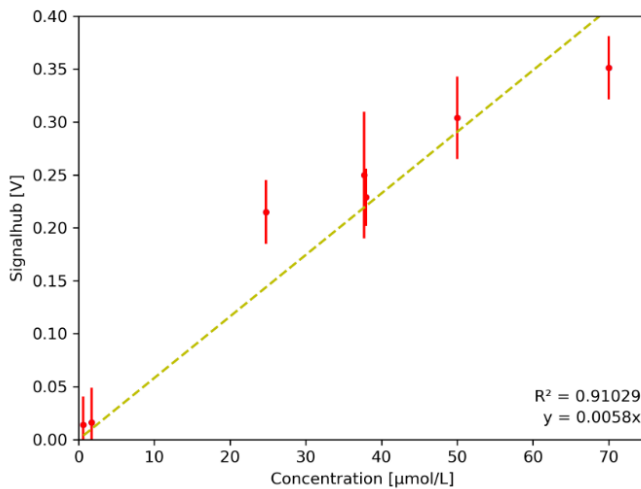


Abbildung 12: Messungen von Fluorescein im mikrofluidischen Chip.

Die Fluoreszenzstärke von ACP ist wesentlich niedriger im Vergleich zu Fluorescein. Zur Optimierung des Strahlengangs wurde mittels der Verlagerung des Messkanals auf die Unterseite des Chips die Absorption, welche durch das verwendete Material (PMMA) des Chips entsteht, minimiert. Durch diese Änderung trifft eine höhere Intensität des Anregungslichtes auf die Messzelle, wodurch die Moleküle stärker angeregt werden und mehr Fluoreszenz ausstrahlen. Durch diese Änderungen wurden die gezeigten Ergebnisse ermittelt und zeigen, dass das grundsätzliche Messprinzip funktioniert. In den Messergebnissen zeigt sich, dass der gemessene Konzentrationsbereich quantitativ unterscheidbare Ergebnisse ab einer Konzentration von 20 µmol/L liefert. Trotz einigen Änderungen zur Verbesserung des Strahlengangs ist die Fluoreszenzsensitivität nicht ausreichend zur quantitativen Bestimmung von ACP im niedrigen Konzentrationsbereichen (unter 20 µmol/L).

### 1.3.2. Aufbau mit einer quadratische Quarzküvette und zylindrischen Durchflusszelle

Um möglichst viel Fluoreszenzlicht des Analyten (ACP) nachweisen zu können, wurde ein Aufbau mit einer Quarzküvette entwickelt (Abbildung 13). Bei diesem Aufbau wird das Licht einer Lichtquelle durch einen Filter auf eine quadratische Quarzküvette oder eine zylindrische Durchflusszelle geleitet, die die analysierte Probe enthält. Der Detektor befindet sich hinter einem zweiten Filter, der in einem Winkel von 90° angeordnet ist. Wenn das Anregungslicht mit einem geraden Strahlengang die Messzelle durchläuft und nicht stark seitlich gebrochen wird, wird es durch den vorgeschalteten Langpassfilter blockiert. Das verbleibende Anregungslicht läuft in einer geraden Linie hinter der Messzelle und kommt daher nicht zum Detektor.

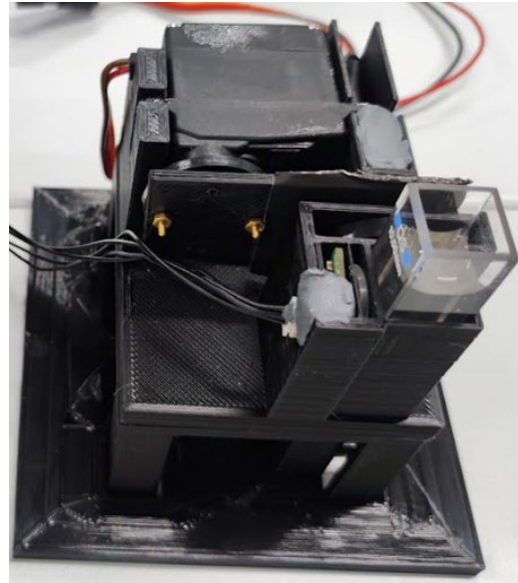
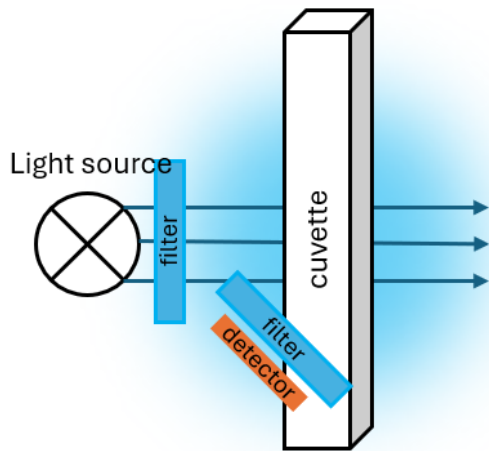


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messprinzips in der quadratische Quarzküvette und der dazugehörige Aufbau, der ansonsten die gleichen Komponenten enthält.

In Abbildung 14A ist eine Messreihe für Fluorescein gezeigt. Die Lichtquelle wird mit 8.5 mA betrieben, allerdings man konnte feststellen, dass der Detektor mit zunehmendem Signal in Sättigung geht. Aus diesem Grund werden die Messwerte mit einem Korrekturfaktor dargestellt (AU: arbitrary units). Hierbei ergibt die lineare Regression ein Bestimmtheitsmaß von 0,99 und eine Steigung von 0,000025 AU/( $\mu\text{mol/L}$ ). Der Messbereich für ACP-Konzentrationen erstreckt sich von 100 nmol/L bis 19  $\mu\text{mol/L}$  (Abbildung 14 B).

Die Ergebnisse zeigen den Einfluss des nicht linear arbeitenden Detektors und aus diesem Grund wird bei dieser Messung ebenfalls eine Korrektur vorgenommen. Daraus ergibt sich eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,97 und einer Steigung von  $3 \cdot 10^{-7}$  AU/( $\mu\text{mol/L}$ ).

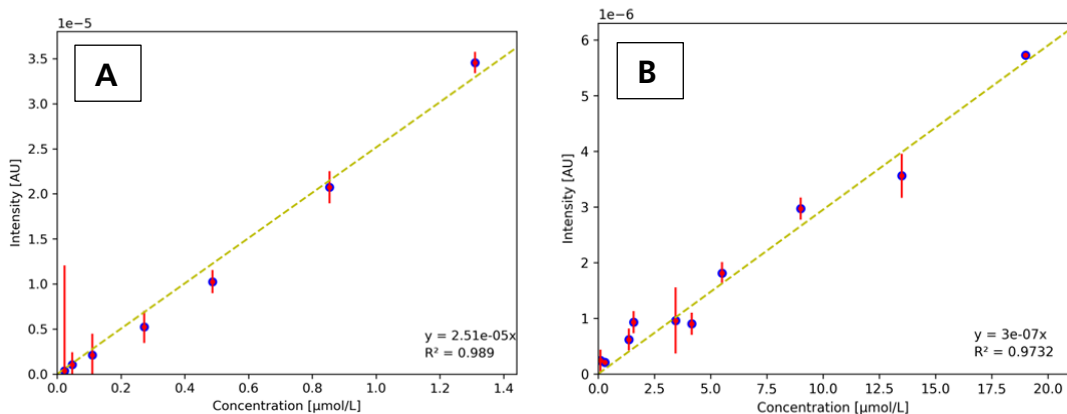


Abbildung 14: Messungen von Fluorescein (A) und ACP (B) in der quadratische Quarzküvette (mit Korrekturfaktor).

Die Anwendung einer Quarzküvette als Messkanal führte zu einem stärkeren Fluoreszenzsignal und daher einer höheren Nachweisempfindlichkeit als der mikrofluidische Chip aus PMMA. Aus diesem Grund wurde eine weitere Variante des Aufbaus mit einer zylindrischen Durchflusszelle aus Quarzglas entwickelt. Abbildung 15 zeigt eine schematische Darstellung der Halterung (A) und das komplette Messsystem (B). Diese enthält die gleichen Komponenten wie der Aufbau mit der quadratischen Quarzküvette, jedoch wurde anstelle Küvette eine Quarzröhre verwendet. Jede Komponente besitzt eine eigene Halterung. Der Aufbau steht auf vier Beinen, da ganze Länge der Durchflusszelle aufnehmen zu können. Dadurch wird sichergestellt, dass sich der Analyt oder die Referenz an der Stelle befindet, an der das Anregungslicht auf die Messzelle trifft. Dabei ist die LED in einem 45° Winkel vertikal zur Messzelle ausgerichtet, was zu einer Reduzierung des Hintergrundsignals führt. Die Messungen und die Datenerfassung können mit der dafür entwickelten Software nun vollautomatisch und im Durchfluss durchgeführt werden.

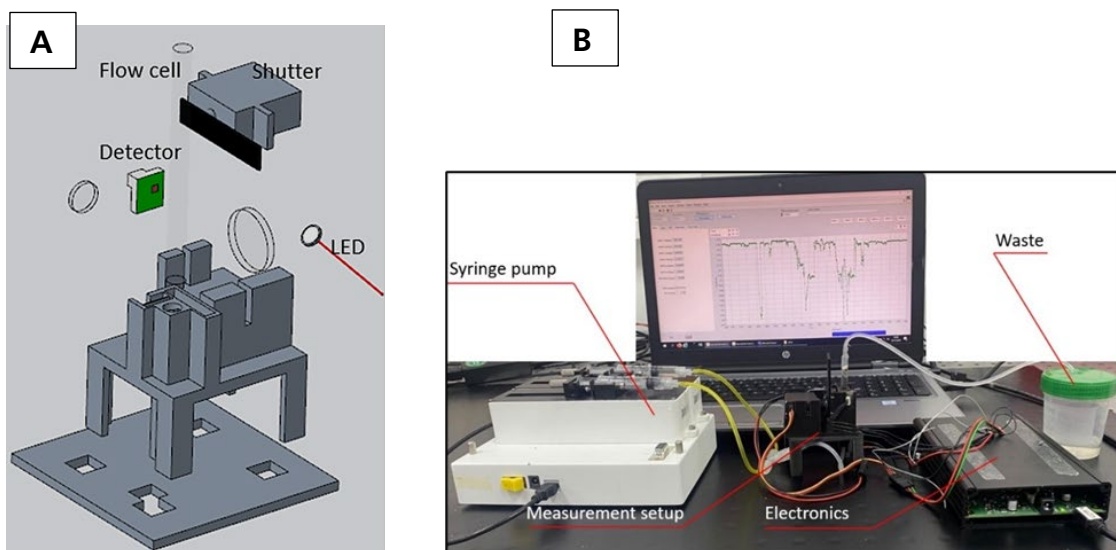


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Halterung (A) und das komplette Messsystem (B) für die zylindrische Durchflusszelle.

Der Aufbau mit einer integrierten zylindrischen Durchflusszelle aus Quarz, mit einem Innendurchmesser von 3.7 mm und einer Wandstärke von 1.15 mm, liefert differenzierbare Ergebnisse im  $\mu\text{mol}$ -Bereich und eine höhere Sensitivität als der mikrofluidische Chip. Der Graph für Fluorescein (Abbildung 16A) zeigt eine lineare Regression mit einer Steigung von  $0,0261 \text{ V}/(\mu\text{mol/L})$  und einem Bestimmtheitsmaß von 0,96. Hierbei wird die Differenzierbarkeit der Konzentrationen im  $\mu\text{mol}$ -Bereich untersucht. Dabei erstreckt sich der Messbereich von  $0,5 \mu\text{mol/L}$  bis  $2,17 \mu\text{mol/L}$ . Der Graph für ACP-Konzentrationsreihe (Abbildung 16B) zeigt eine lineare Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,97 und einer Steigung von  $0,0057 \text{ V}/(\mu\text{mol/L})$ . Der Messbereich erstreckt sich von  $0,125 \mu\text{mol/L}$  bis  $2,51 \mu\text{mol/L}$ . Aus den Messdaten ergibt sich eine Nachweisgrenze von  $943 \text{ nmol/L}$  für ACP. Dieser Wert befindet sich unterhalb der Richtwerte für ACP, ist allerdings für eine quantitative Aussage noch nicht ausreichend.

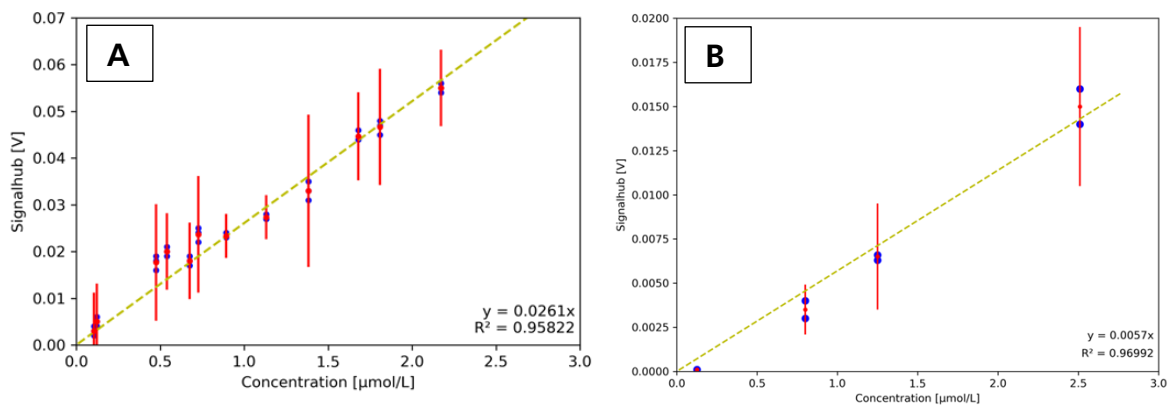


Abbildung 16: Messungen von Fluorescein (A) und ACP (B) in der zylindrischen Quarzdurchflusszelle.

Die Ergebnisse der Messungen mit Acetamidrid, unter Verwendung des Korrekturfaktors, zeigen eine deutliche Verbesserung der Sensitivität im Vergleich zur Messreihe in der zylindrischen Durchflusszelle. Der dabei entstehende Nachweisgrenze ist mit 2,7 nmol/L um den Faktor 350 niedriger als der in der zylindrischen Messzellen. Dies ist auf das geringere Hintergrundrauschen zurückzuführen. Die Standardabweichung des Signalhubs ist mit  $2,9 \cdot 10^{-6}$  V deutlich kleiner als die Standardabweichung des Aufbaus der zylindrischen Durchflusszelle mit 0,0016 V.

In der Abbildung 17 wird die Simulation des Strahlenverlaufs des Anregungslichtes in einem Aufbau mit integrierter Durchflusszelle dargestellt.

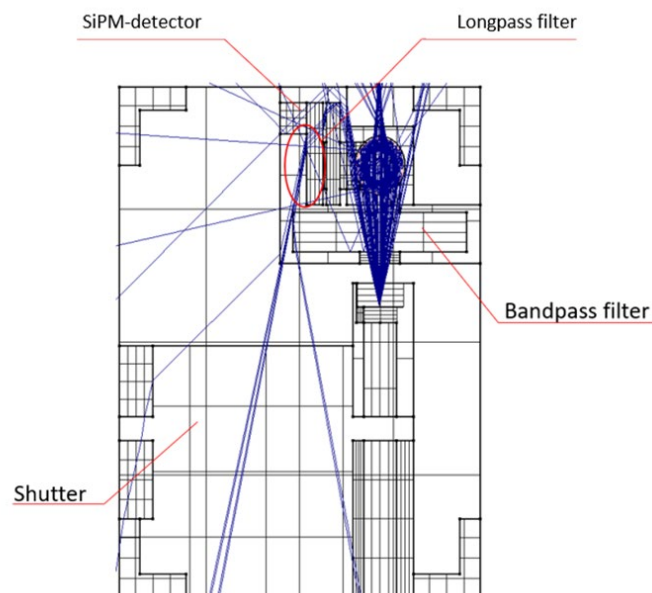


Abbildung 17: Simulation des Strahlengangs im Aufbau mit integrierter zylindrischer Durchflusszelle (Draufsicht).

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich durch die runde Geometrie der Messzelle und den unterschiedlichen Brechungsindizes, sich das Anregungslicht optimal in der Messzelle verteilt. Dennoch zeigt sich auch, dass ein gewisser Teil des Anregungslichtes mit einem flachen Winkel auf

den Langpassfilter vor dem Detektor trifft. Die Leistung des Filters ist abhängig von dem Einstrahlwinkel. Aus diesem Grund wird ein Teil des Anregungslichtes vom Detektor aufgenommen. Aufgrund des Auftreffwinkels der Strahlen nimmt die Filterwirkung stark ab, wodurch unerwünschte Strahlen an den Detektor gelangen. Dies führt zu einem verstärkten Signal am Detektor, wodurch die signifikanten Strahlen, die durch den Fluoreszenzeffekt entstehen, nicht eindeutig differenzierbar sind. Um diesen Effekt zu umgehen, wurde die LED testweise in einem  $45^\circ$  Winkel zur Detektorebene angebracht, wodurch die Bande des Anregungslichtes oberhalb des Detektors entsteht. Das Hintergrundsignal wird somit deutlich verkleinert. Die Messergebnisse werden dadurch deutlicher, allerdings wurde im Vergleich zum Setup mit der quadratischen Küvette keine ausreichende Sensitivität erreicht. Daher wurde eine quadratische Durchflussküvette aus Quarzglas in den endgültigen Aufbau verwendet.

### 1.3.3. Aufbau mit einer quadratischen Durchflussquarzküvette

Der finale Aufbau wurde zusätzlich mit UV-Leistungs-LEDs (310 nm) ausgestattet, um die initiale photochemische Zersetzungsreaktion von ACP bzw. die Bildung der fluoreszierenden Abbauprodukte direkt im Gerät zu realisieren, ohne dass die Probe oder Küvette manuell gewechselt werden muss, was nach Injektion der Probe einen automatisierten Prozessablauf ermöglicht. In Abbildung 18 sind drei Messreihen mit unterschiedlichen ACP-Konzentrationen dargestellt. Dabei wird der Effekt der Dauer der UV-Bestrahlung auf die gebildete Spezies untersucht. Es wird die Absorbanz bei 310 nm der unterschiedlichen Konzentrationen über die Zeit aufgetragen, die charakteristisch für die Abbauprodukte ist und gleichzeitig ihre Anregungswellenlänge darstellt. Je höher die ursprüngliche Konzentration von ACP in der zu untersuchenden Lösung, desto stärker ist die Absorbanz der zu untersuchenden fluoreszierenden Spezies ausgeprägt. Die Maxima werden für unterschiedliche Ausgangskonzentrationen nach unterschiedlichen Zeiten erreicht. Der Graph zeigt, dass die höchste untersuchte ACP-Mengen ihr Maximum nach 30 min erreicht. Im Gegensatz dazu erreicht die kleinste ACP-Konzentration ihr Maximum bereits nach 10 min UV-Bestrahlung.

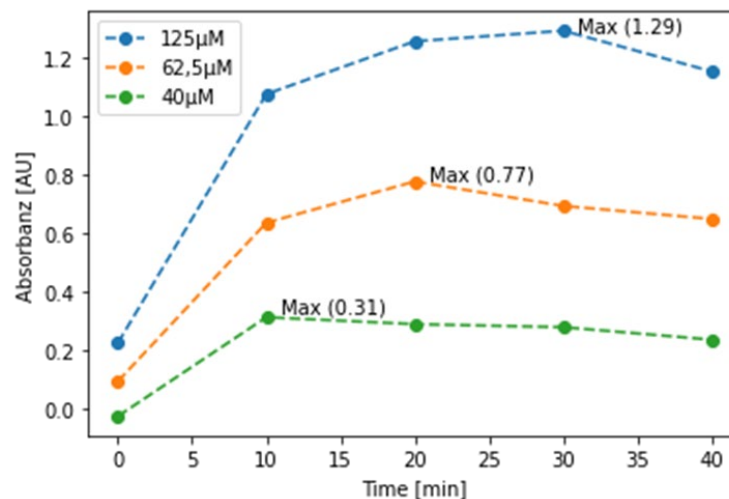


Abbildung 18: Einfluss der Dauer der UV-Bestrahlung auf die Absorbanz bei verschiedenen Konzentrationen von ACP.

---

#### 1.4. Nachweis von Acetamidrid in Abwasser

Nachdem die Messungen in Reinstwasser zu verwertbaren Ergebnissen gekommen sind, wird nun gefiltertes Abwasser von einem belgischen Klärwerk (Aquafin, Hasselt) und Oberflächenwasser aus dem Main-Rhein-Gebiet untersucht. Das Ziel besteht darin, die Konzentration von ACP im Abwasser quantitativ zu bestimmen.

Zu Beginn wird mit einem Versuch die Differenzierbarkeit von ACP im Abwasser in der zylindrischen Durchflusszelle betrachtet. Diese ist im einstelligen  $\mu\text{mol/L}$  Bereich gegeben, wie in Abbildung 19 zu sehen ist. Dabei sind die aufgenommenen Signalhübe der Rohdaten mit 0,0007 bis 0,01 V jedoch äußerst niedrig. Dennoch ist mit der zylindrischen Durchflusszelle eine Unterscheidung im  $\mu\text{mol}$ -Bereich möglich. Im Gegensatz dazu stellt die Messung mit der quadratischen Küvette durch größere Signalhübe eine höhere Sensitivität dar. Die Kalibriergerade in Reinstwasser und in gefiltertem Oberflächenwasser weisen keinen Unterschied auf. Somit zeigt sich, dass durch eine Filterstufe die gleichen Ergebnisse erreicht werden wie in Reinstwasser.

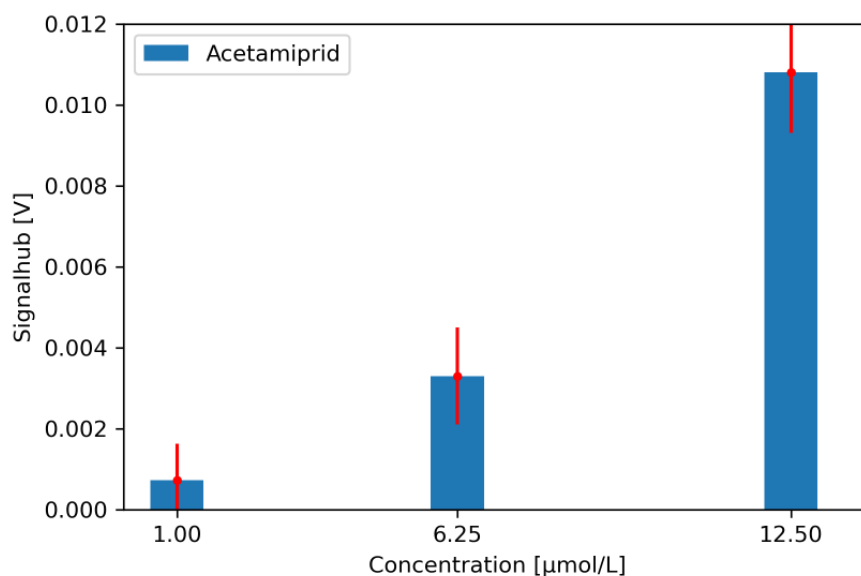


Abbildung 19: Messungen von verschiedenen ACP-Konzentrationen in Abwasser (mit Korrekturfaktor).

Die Messungen von ACP im Abwasser in einer quadratischen Küvette sind in Abbildung 20 dargestellt. Dabei ergibt sich eine Messreihe mit einem linearen Trend und einer hohen Sensitivität. Dabei zeigt die lineare Regression eine Steigung von  $3 \cdot 10^{-7} \text{ AU}/(\mu\text{mol/L})$  und ein Bestimmtheitsmaß von 0,99.

In den letzten Monaten des Projektes wurde die Nachweisgrenze für die ACP-Bestimmung ermittelt und die Messmethode optimiert. Die beiden Messaufbauten des Fraunhofer IMM und der belgischen Partner wurden anschließend zu einem System kombiniert, das die Bestimmung von ACP mit beiden Detektionsprinzipien ermöglicht. Da die belgischen Partner sich auf den Nachweis von Östrogen im Abwasser fokussiert haben, wurde der Nachweis von ACP auch in der Anwesenheit von Östrogen durchgeführt, um den Einfluss des Östrogens auf den Nachweisempfindlichkeit von ACP zu untersuchen. Die Fluoreszenzergebnisse zeigten, dass die Messungen, sowie die Nachweisgrenze durch das anwesende Hormon nicht beeinflusst wurde.

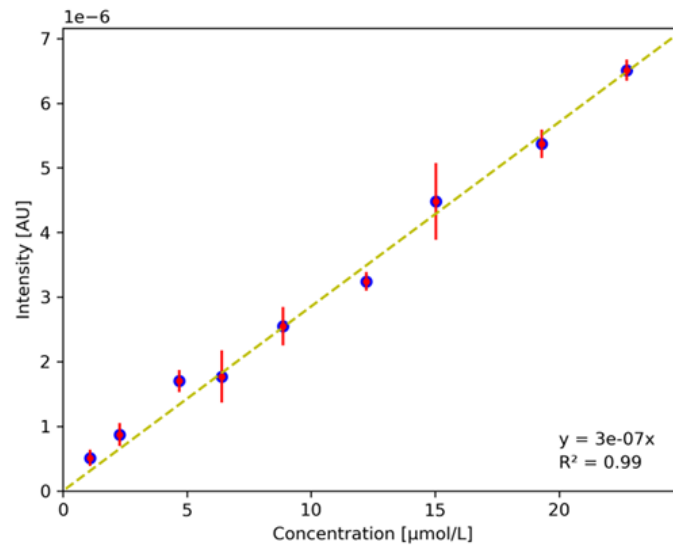


Abbildung 20: Messungen von verschiedenen ACP-Konzentrationen in gefiltertem Oberflächenwasser mit der quadratischen Küvette (mit Korrekturfaktor).

Seitens des Fraunhofer IMM wurde der bestehende Aufbau mit einer quadratischen Durchflussküvette ausgestattet und in einem lichtdichten Gehäuse montiert (Abbildung 21). Zusätzlich wurde für die Messungen mit dem System von UHasselt ein beheizbarer Halter für entsprechenden Messzellen aufgebaut und in ein baugleiches Gehäuse integriert.

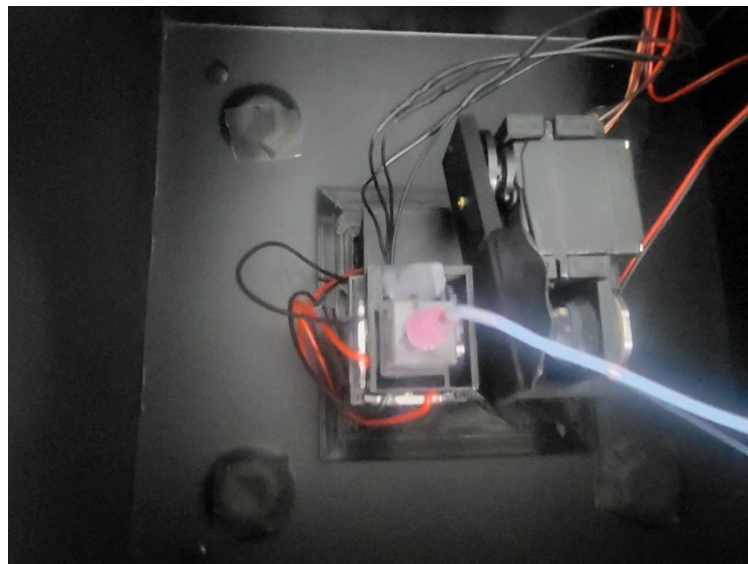


Abbildung 21: Optisches Detektionsmodul in lichtdichtem Gehäuse, in finaler Konfiguration. In der Mitte ist die Quarz-Durchflussküvette mit Anschlusskapillaren zu sehen. Die Grundfläche des Optikmoduls beträgt ca. 100 mm x 100 mm.

---

Für die abschließenden Messungen wird die Probe durch Injektionsports über Schlauchleitungen sowohl in die optische Messzelle zur Fluoreszenzdetektion als auch in die Messzelle der Uni Hasselt injiziert. Diese befindet sich gemeinsam mit zwei Referenzzellen in einem beheizten und isolierten Gehäuse, die Temperatur wird mit Hilfe von PID-Reglern konstant auf 30 °C gehalten. Das gesamte System besitzt eine Grundfläche von ca. 510 x 290 mm, entsprechend dem unteren 19"-Basisgehäuse, in dem sich Elektronikkomponenten der beiden Subsysteme befinden. Auf der zweiten Ebene befinden sich zwei identische Gehäuse aus Edelstahl, die die beiden Messkammern von Fraunhofer IMM und UHasselt enthalten (Abbildung 22).

Aufgrund der IT-Richtlinien beider Institute bzw. der involvierten Softwarelizenzen mussten für diesen Aufbau zwei getrennte Notebooks eingesetzt werden, um die Messdaten aufzunehmen und auszuwerten. Grundsätzlich ist das System leicht zu transportieren und könnte zu einem noch kompakteren Prototyp weiterentwickelt werden, der schließlich nur durch einen einzigen Rechner angesteuert wird. Ein Touchscreen zur Bedienung bzw. Anzeige der Ergebnisse könnte dann in das Gehäuse integriert werden. Mit dem kombinierten System konnten die oben beschriebenen Messungen, die am optischen Aufbau bzw. dem System von UHasselt jeweils einzeln durchgeführt wurden, ohne Probleme reproduziert werden.

Im Vergleich mit dem System von UHasselt, das auf molekular eingepprägten Strukturen basiert, deren Analytbeladung mit Hilfe von Impedanzspektroskopie charakterisiert wird und sehr niedrige Konzentrationen bis in den nmol Bereich bestimmen kann, kann das hier dargestellte optische Detektionssystem solch geringe Konzentrationen zwar nicht erfassen, ermöglicht es jedoch insbesondere höhere Konzentrationen um und über dem vorgegebenen Richtwert zu bestimmen, die über dem Messbereich des anderen Systems liegen. Mit dem kombinierten System lässt sich daher ein größerer Messbereich abdecken, als es die einzelnen Systeme leisten könnten.



Abbildung 22: Kombiniertes System mit den Detektionsmodulen von Fraunhofer IMM (links) und UHasselt (rechts). Die Elektronikkomponenten befinden sich im 19"-Tischgehäuse (unten). Durch die in der Mitte befindlichen Injektionsports kann die Probe in die jeweiligen Messzellen geleitet werden.

---

## **2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Im Rahmen der Durchführung des Projektes sind Kosten in Form von Personal-, Material- und Reisekosten entstanden, über die im Detail im Verwendungsnachweis berichtet wurde.

## **3. Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten**

Die im Bericht beschriebenen Projektarbeiten waren nötig, um die optische Sensorplattform zu entwickeln, um (nach Anpassung der Projektziele) das Pestizid Acetamiprid mit Hilfe von photoinduzierter Fluoreszenz nachzuweisen. In mehreren Iterationen wurde das System weiter verbessert und die UV-Bestrahlungsprozess integriert, sowie am Ende mit dem komplementären Messsystem der UHasselt kombiniert. Mit Hilfe einer kostenneutralen Verlängerung von drei Monaten konnte die Projektziele bzw. Meilensteine erreicht werden.

## **4. Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das am IMM entwickelte Prototypsystem ermöglicht durch seine kompakte Größe, Wasserproben vor Ort auf ACP zu untersuchen, z.B. Oberflächenwasser mit einem mobilen Messlabor. Ein weiteres Anwendungsfeld stellen Klärwerke und Abwasserreinigungsanlagen dar, die durch solch kompakte und kostengünstig realisierte Systeme ausgestattet werden können. Auch Abwässer aus landwirtschaftlichen Betrieben, z.B. bei der Obst- und Gemüseverarbeitung anfallendes Waschwasser, könnten mit dem System auf ACP-Rückstände überwacht werden. Momentan werden mögliche Projektpartner und Einsatzszenarien für ein entsprechendes Folgeprojekt identifiziert, um das System in einer realen Anwendungsumgebung einsetzen zu können.

## **5. Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Projektdurchführung sind unseres Wissens nach keine unmittelbar relevanten Fortschritte in dem Forschungsbereich an anderen Stellen bekannt geworden. Eigene Patentanmeldungen sind aus dem Projekt nicht hervorgegangen, jedoch wurden einige eingesetzte technische Lösungen, die aus vorangegangenen Projekten entstanden waren, bereits vor Beginn dieses Projektes geschützt<sup>5</sup>.

## **6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF**

Im Rahmen des Projektes wurde eine Masterarbeit angefertigt<sup>6</sup>, zusätzlich ist eine wissenschaftliche Veröffentlichung der Projektergebnisse gemeinsam mit UHasselt in Vorbereitung.

---

<sup>5</sup> WO2018073112A1, EP1963821A1

<sup>6</sup> Marvin Schmitt, *Entwicklung eines mobilen Aufbaus zur Fluoreszenzdetektion von Umweltschadstoffen*, Hochschule Rhein-Main, 2024