

## Schlussbericht

**Thema: „Entwicklung von Probenahme-Modulen für gasförmige, flüssige und feste CBRN-Gefahrstoffe zum Einsatz in unbemannten Flugsystemen (UAS)“**

im Rahmen des Verbundprojektes

„Gefahrstoff-Probenahme (CRNN) mit unbemannten Flugsystemen“

Durch STEP wurden im Projekt -wie geplant- drei an UAS ankoppel- und nutzbare Probenahme-Module entwickelt und erfolgreich getestet

- I. zwei Modulvarianten zur Luftprobenahme
- II. ein Modul für die Probenahme von flüssigen Proben
- III. zwei Modulvarianten für die Feststoffprobenahme

### **I a Entwicklung Modul zur Luftprobenahme (Variante Beutel)**

Nach Vorgaben und in Abstimmung mit den Projektpartnern Oritest und ZAFT wurde die Grundkonzeption für die Luftprobenahme erarbeitet.

Untersucht wurden hierbei

- Geeignete Probenbehältnisse (geschützt und ggf. beheizt)
- Gasfüll- und Gas-Spül-Baugruppe
- Steuerungs- und Kommunikations-Konzepte / Mikrocontroller-Baugruppe
- Stromversorgungs- / Ansteuerungs-Baugruppen für Mikrocontroller sowie Aktoren (Pumpe, Ventile etc.) und Sensoren
- Zusätzliche Messdetektoren: PID; ggf. CO-Sensor und WT-Sensor
- Energie- und Kommunikationskonzept / Verbindung zur Drohne (Stromversorgung und Datenaustausch)
- Mechanische Trägerbaugruppe „Luftprobenahme-Modul“ für Anbau an Drohne
- Konzept für Probenahme außerhalb der Luftverwirbelung z.B. durch Rotoren

Des Weiteren wurden konzeptionelle Lösungen für Probenbehältnisse und einer Gasfüll- und Gas-Spül-Baugruppe durch Erstellung von Gasfluss-Plänen und Versuchsmodell-Aufbauten erarbeitet:

- 4 Probenahme-Beutel a 0,5 oder max. 1 L Volumen mit manuellem Absperrhahn (Öffnen/Schließen) und Septum-Port (durch Ersatz-Septen austauschbar)
- Geschützte Unterbringung in Sprungdeckeldosen
- Zusammenfassung der 4 Sprungdeckeldosen zu einer „Batterie“ von Probegefäßen
- Je Beutel ein 3/2 Wegeventil Typ S070 von SMC in Summe 6 Stück
- Rückschlagventile (Typ AKH mit Steckverbindung von SMC) 3 Stück
- Digitaler Druckschalter für Füllvolumenüberwachung
- Zusätzlicher Spülkreislauf mit Staub- und Luft-Filter
- Probenahme-Pumpe
- Staubfilter
- Luftfilter (Aktivkohle plus Molsieb-Filter)
- Messsensoren im Bypass schaltbar: Photoionisation-Detektor (PID), CO-Sensor, ggf. Wärmetönungs-Sensor (WTS)

Es wurden einzelne Komponenten in Form von Experimentalaufbauten gefertigt und auf Eignung untersucht:

- Für die Steuerungs- und Kommunikations-Konzepte / Mikrocontroller-Baugruppe wurden Lösungsansätze erarbeitet und evaluiert. Dabei wurden die folgenden grundlegenden Arbeiten realisiert:
- Erarbeitung der Spezifikation in Form eines Pflichtenheftes
- Auswahl eines passenden Mikrocontrollers incl. Entwicklungsboards und der zugehörigen Software-Entwicklungsumgebung
- Erarbeitung eine Liste mit allen notwendigen peripheren Komponenten, wie z.B. Pumpen, Ventile, Sensoren, Zusatzspeicher
- Erarbeitung des Anschluss-Schemas für externe Komponenten am Entwicklungsboard des Mikrocontrollers
- Entwicklung des Software- Grundkonzeptes, basierend auf einer internen Real-Time-Clock
- Erarbeitung grundlegender Befehle zur Ansteuerung des Probenahme-Moduls über die serielle Schnittstelle / UART
- Einarbeitung in die Grundlagen zum MAVLink- Protokoll zur software-seitigen Verbindung des Probenahme-Moduls mit der Drohnen- Flugsteuerung

Als Mikrocontroller (MC) für das Probenahme-Modul wurde der 32-Bit-MC TMS320F28379D von Texas Instruments (TI) ausgewählt. Der MC wird mit 200 MHz getaktet und verfügt u.a. über nachfolgende Parameter:

- 1 Mbit Flash-Programmspeicher, 2 Prozessorkerne, RAM, aber keinen internen EPROM
- 3 SPI-Ports, 4 UART-Ports, 2 I2C-Ports, 8 12-Bit-ADC-Kanäle
- Max. 169 allgemeine Ein-/Ausgänge

Zur Erprobung wurde das LAUNCHXL- Entwicklungsbord von TI verwendet (Abb.1)

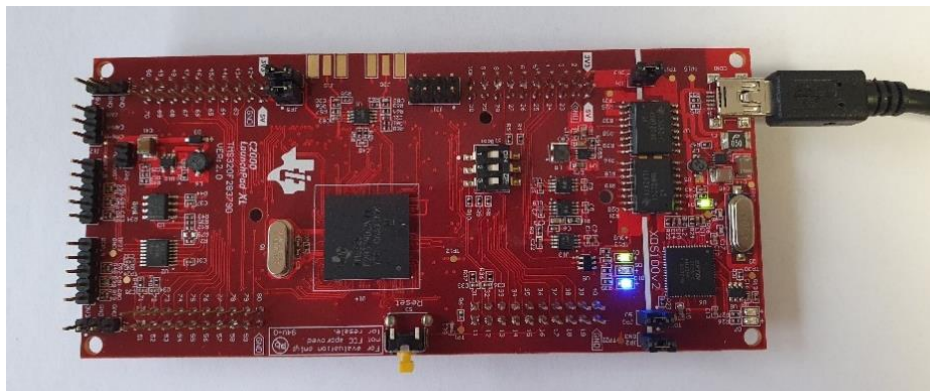


Abb. 1: LAUNCHXL- Entwicklungsbord von TI

Zur Programm-Entwicklung in C / C++ wurde das von TI frei verfügbare Code-Composer-Studio verwendet. Die Entwicklung der MC-Software umfasste folgende Komponenten:

- Entwicklung MC- Software zur 'Reinigung', 'Spülung' und 'Befüll-Automatik' der 4 Probebeutel über Befehle vom übergeordneten System (Notebook des Pilotassistenten) übertragen durch Steuersystem PixHawk / MAVLink oder RC-Fernsteuerung
- Entwicklung MC-Software zur Ansteuerung einzelner Komponenten (Pumpe, Ventile...)
- Entwicklung MC-Software zum Empfang der alternativen Kanal-Informationen eines RC-Empfänger GRAUPNER GR18 über das digitale Graupner-Interface zum optionalen Ansteuern der Pumpe und der Probenahmen 1 - 4.
- Entwicklung MC-Software zur Anmeldung und Kommunikation mit dem PixHawk-Controller über das MAVLink-Protokoll

- Test der Befüllung der 4 Probebeutel mit Befehlen über die serielle Schnittstelle und optional mit der RC- Fernsteuerung.

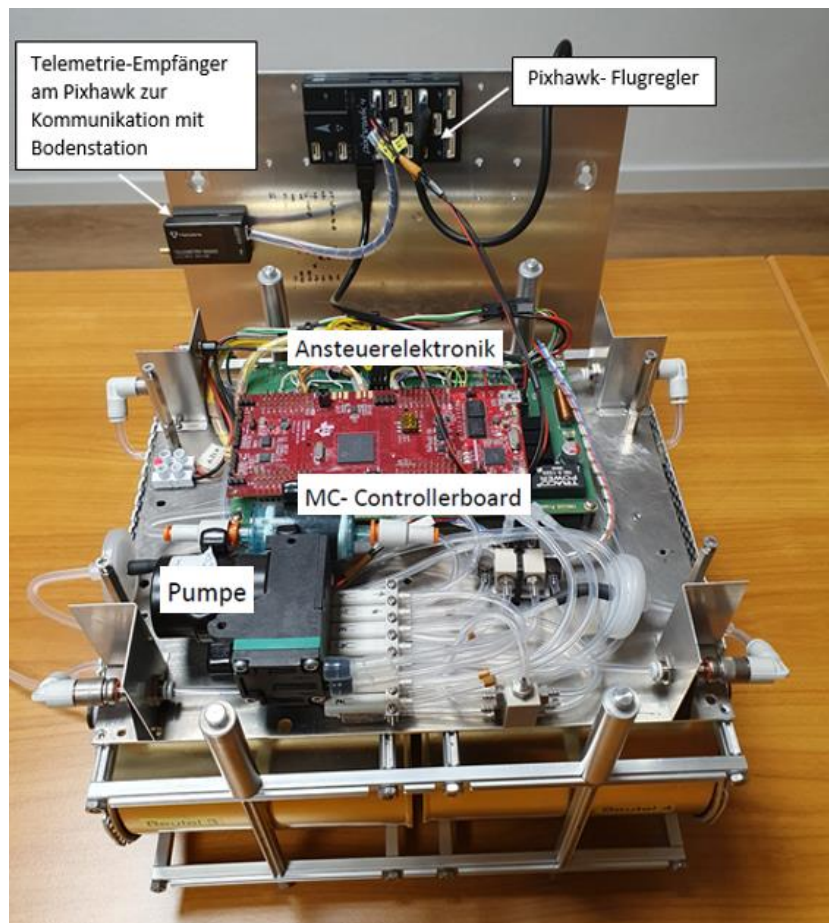


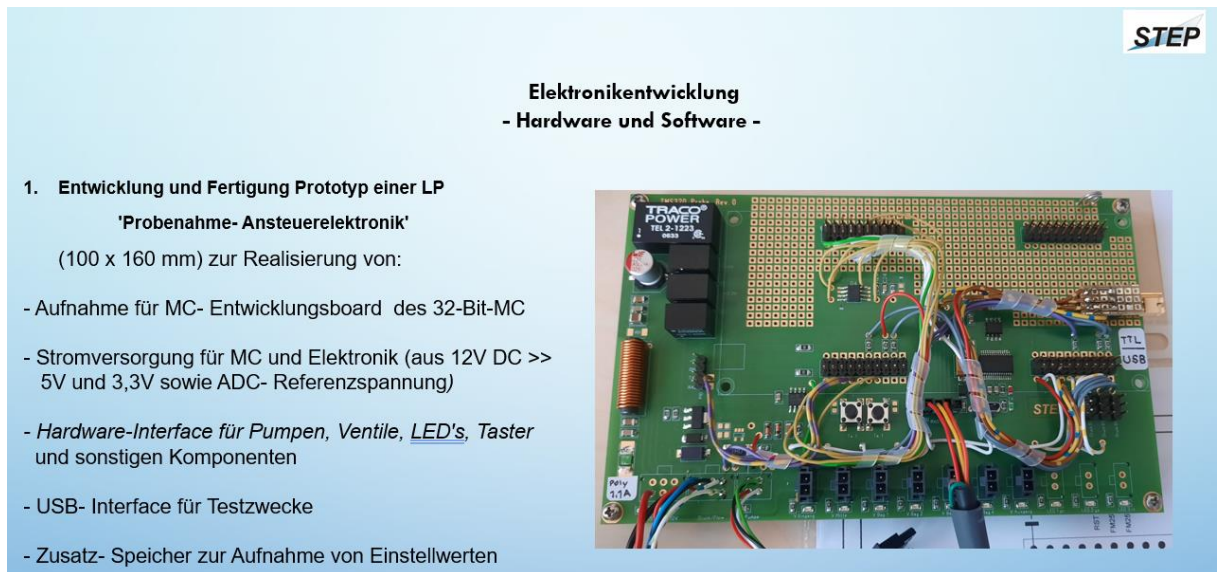
Abb. 2: Luftprobenahme-Modul mit Elektronikmodul

Erarbeitung konzeptioneller Lösungsansätze Hardwarekomponenten Stromversorgungs- / Ansteuerungs-Baugruppen für Mikrocontroller sowie für Aktoren (Pumpe, Ventile etc.) und Sensoren (Abb. 2 und 3): Folgende Arbeiten wurden realisiert

- Ableitung des Konzeptes der Stromversorgung aus der Grundkonzeption des Probenahme-Modules
- Entwicklung Spannungsversorgung von 12V / 5V DC auf 3,3V für Controller-Baugruppe incl. Anzeige, evtl. Zusatzbaugruppe zum Anschluss eines eigenen Akkus für autarken Betrieb des Probenahme-Moduls ohne Drohne
- Entwicklung und Erprobung Hardwarekomponenten zur Adaption UART (serielle Schnittstelle) auf USB zur testweisen Kommunikation über PC
- Hardware zur Ansteuerung der Pumpe
- Entwicklung Elektronik zur Ansteuerung der Ventile
- Entwicklung Elektronik zum Anschluss eines Flow-Sensors am ADC-Eingang des Mikrocontrollers (MC)
- Hardwareentwicklung zum Anschluss eines Drucksensors am ADC-Eingang des MC
- Hardwareentwicklung zum Anschluss des PID-Moduls über serielle Schnittstelle incl. Spannungsversorgung
- Hardware zum Anschluss andere Sensoren
- Hardware zum Anschluss von Signalgebern, LED's
- Hardware zum Anschluss von Eingabe- Elementen, Tastern / Schalter

- Hardware zum Anschluss von EPROM-Speichern am MC

Einzelne Elektronikschaltungs-Komponenten wurden simuliert und in Form von Experimental-aufbauten gefertigt und getestet.



**Elektronikentwicklung**  
- Hardware und Software -

**1. Entwicklung und Fertigung Prototyp einer LP**

**'Probenahme- Ansteuerelektronik'**

(100 x 160 mm) zur Realisierung von:

- Aufnahme für MC- Entwicklungsboard des 32-Bit-MC
- Stromversorgung für MC und Elektronik (aus 12V DC >> 5V und 3,3V sowie ADC- Referenzspannung)
- *Hardware-Interface für Pumpen, Ventile, LED's, Taster und sonstigen Komponenten*
- USB- Interface für Testzwecke
- Zusatz- Speicher zur Aufnahme von Einstellwerten

Abb. 3: Hardware „Probenahme-Ansteuerelektronik“

Für die grundlegende Hard- und Software-Entwicklung wurde ferner eine Adapter-Leiterplatte mit Stromversorgung, USB- Anschluss, EPROM-Modul versuchsseitig entwickelt und aufgebaut (Abb. 4)

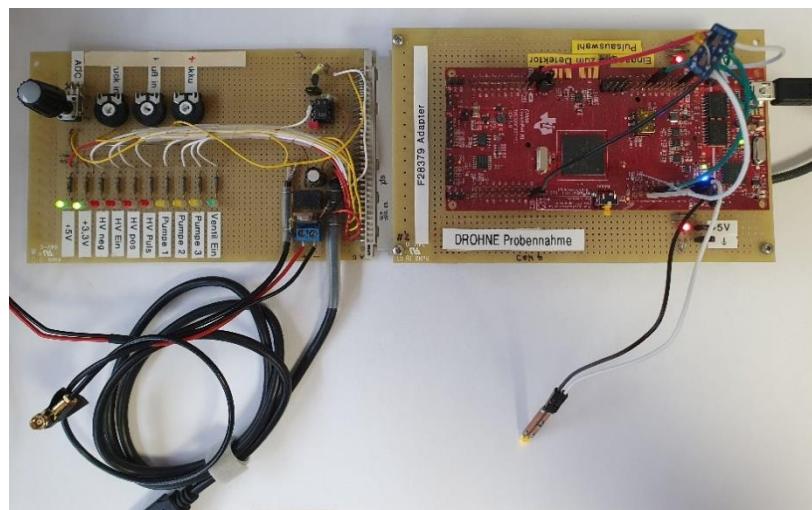


Abb. 4 Testadapter zur Simulation Ansteuerung - MC

Erarbeitung Konzept, Auswahl und Test Ionisierungsquellen, Beginn Entwicklung Schaltungskomponenten PID-Detektor (Abb. 5). Folgende Arbeiten wurden hierfür realisiert:

- Erarbeitung eines Konzeptes zur Entwicklung eines kleinen, leichten PID-Detektors
- Recherche, Auswahl und Versuchstest zu kleinen VUV-Ionisierungsquellen im Energiebereich 10,6 und 11,4 eV
- Ableitung des Stromversorgungskonzeptes
- Entwicklung Schaltungskonzept für erforderlichen Messverstärker

- Konzept für konstruktiven Aufbau des Detektors

**Entwicklung und Integration von Mess-Sensoren / -Detektoren**

**STEP**

- Stand PID -

Tabelle 1: Parameter VUV Ionisationsquellen für PID-Detektor

	10,6 eV VUV-Quelle	11,7eV VUV-Quelle
Wellenlänge	116,6 nm	104,8 & 106,7 nm
Energie	10,6 eV	11,83 eV
Füllgas	Krypton	Argon
Spannungsversorgung	DC	DC
Zündspannung	< 500 V	< 500 V
Betriebsspannung	300 V	250 V
Betriebsstrom	0,2 bis 3,5 mA	0,2-0,5 mA
Lebensdauer		
bei Raumtemperatur	> 10.000 h	> 800 h
bei 250°C	> 600 h	
Einsatztemperaturbereich	- 20 °C bis 350° C	-20°C bis 45°C

STEP Seriendetektor für GC-PID mit Verstärker



Empfindlichkeit:  
0,5 ppb für Benzol

Entwicklungsstand Mini-PID-Modul zur Integration in Luftprobenahme-Modul



**Technische Parameter**

- 10,6 eV VUV-Quelle
- Empfindlichkeit:  
ab ca. 200 ppb für Benzol
- Masse: < 100 g
- 54 x 39 x 28 mm (LxBxH)

**Testergebnisse**  
siehe Messergebnisse  
Vortests bei STEP  
02.11.2022

14

Abb. 5: Übersicht Entwicklung Photoionisation-Detektor (PID)

Beginn Einarbeitung und Abstimmung zum MAVLink-Protokoll zur softwareseitigen Verbindung des Probenahme-Moduls mit der Drohnen-Flugsteuerung

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Tholeg und ZAFT erfolgten erste konzeptionelle Abstimmungen und Festlegungen zu den Schnittstellen zwischen Drohne und Probenahme-Modul, deren Umsetzung in Form von Steckverbindern sowie der Integration der kompletten Kommunikation in das MAVLink-Protokoll (Abb. 6)

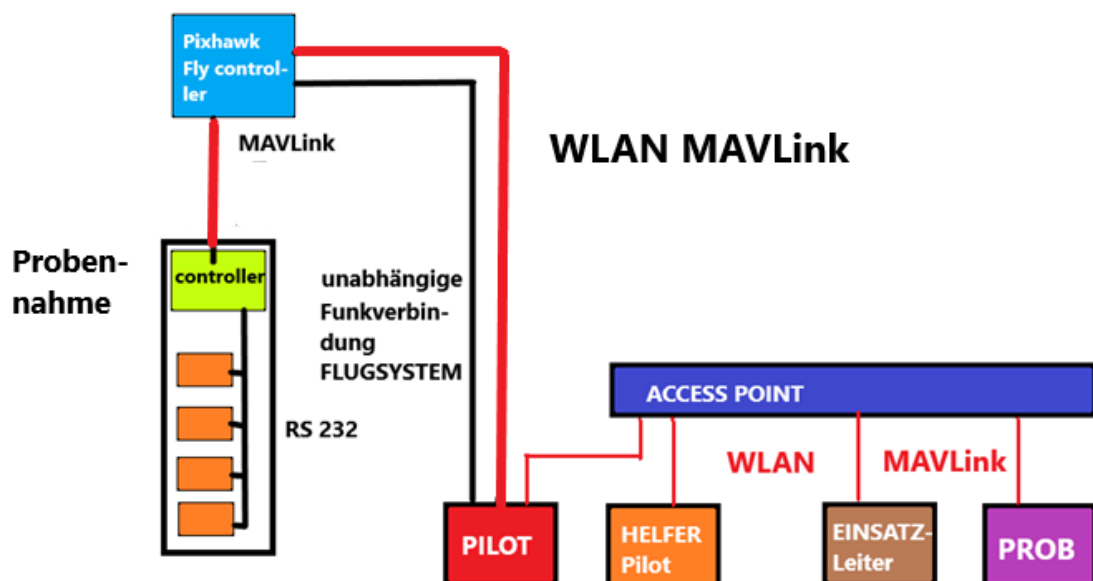


Abb. 6: Schema des Schnittstellen-Konzeptes zwischen Drohne und Probenahme

Abschätzung des Platzbedarfes und Gewichtes anhand von Experimental-Aufbauten und Vergleich mit den Anforderungen der Drohne:

Ausgehend von den konzeptionellen Überlegungen wurde anhand von Versuchsaufbauten der wichtigsten Komponenten der Platzbedarf und die zu erreichende Masse ermittelt und überprüft. Die Ergebnisse zeigten, dass mit dem vorgesehenen Grundkonzept des Probenahme-Modules die von den Parametern der Drohne definierten Anforderungen eingehalten werden können.

Aufbau kompletter Luftprobenahme-Modul (Hauptvariante Beutel), Anbau an Drohne und Erprobung im Flugtest:

Es wurde ein komplettes Funktionsmuster, bestehend aus Elektronikmodul und Probenahme-Modul aufgebaut und an eine Drohne des Projektpartners Tholeg montiert.

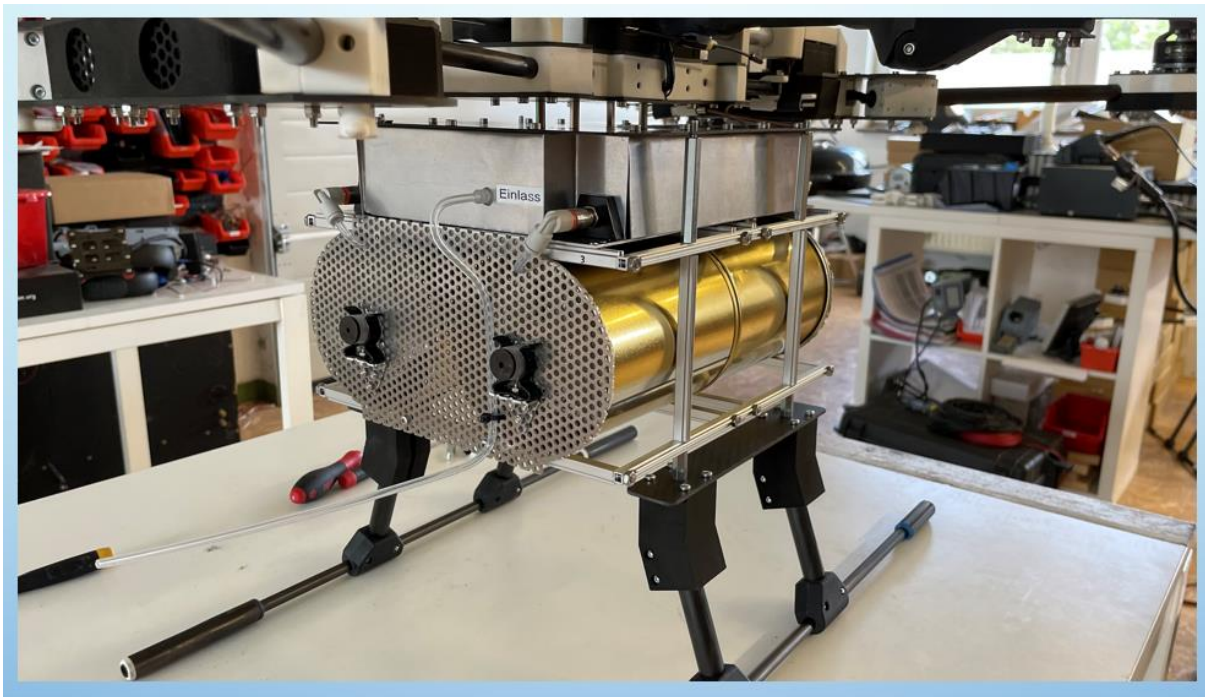


Abb. 7: Versuchsmuster Luftprobenahme-Modul (Variante 4-Beutel)

Sowohl in Vortests mit ZAFT bei STEP als auch im Rahmen eines Meilenstein-Treffens am 10. und 11.11. 2022 am Flugplatz Welzow wurde das Versuchsmuster (Abb. 7 und 8) erfolgreich getestet.



Abb. 8: Versuchsmuster Luftprobenahme-Modul (Variante 4-Beutel) an Drohne von Tholeg

An mehreren Messpunkten in unterschiedlichen Entfernungen von der eingerichteten Emissionsstelle wurden jeweils erfolgreich Luftproben genommen, deren Konzentrationen anschließend u.a. mit STEP-Messgeräten der Typen GC-Photoionisationsdetektor (GC-PID) bzw. Ionenmobilitäts-spektrometer (IMS) überprüft wurden (Abb. 9 und 10).

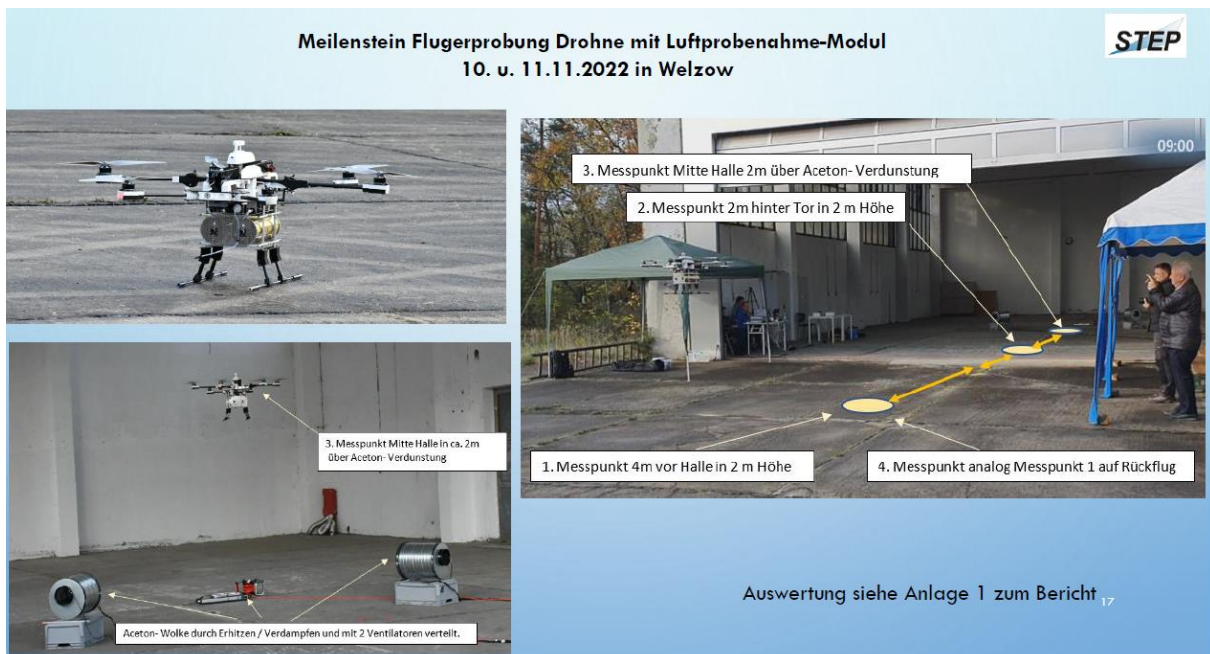


Abb. 9: Versuchsmuster Luftprobenahme-Modul (Variante 4-Beutel) an Drohne von Tholeg

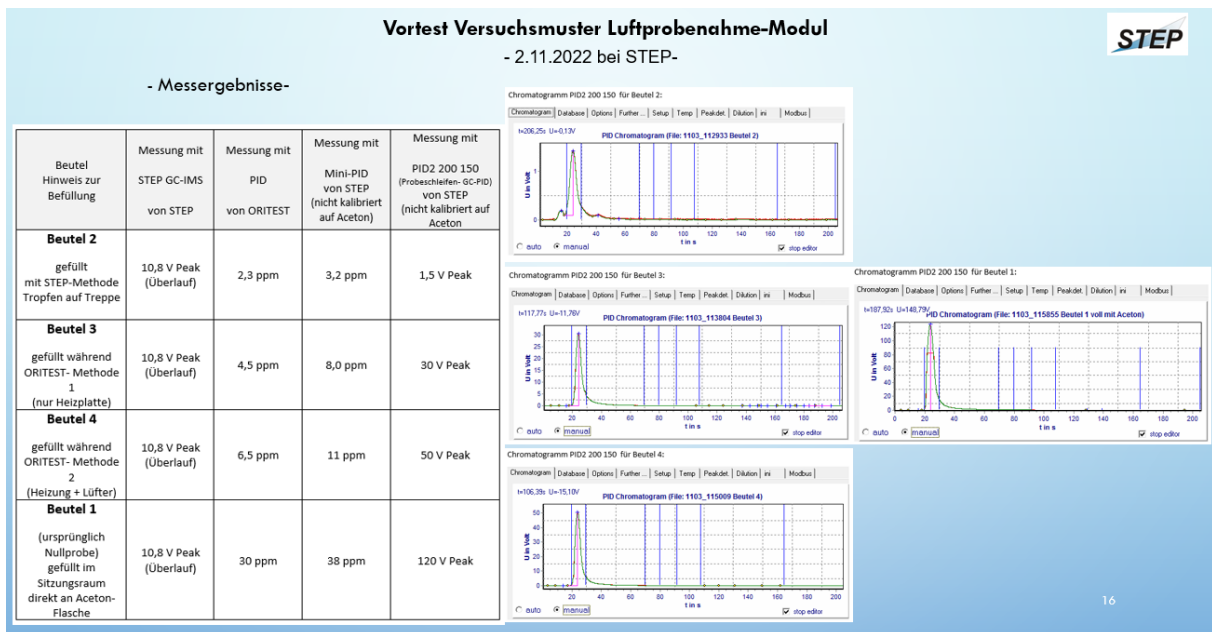


Abb. 10: Messergebnisse Konzentrationen der Luftprobenahme beim Test des Versuchsmusters

### I b Luftprobenahme-Modul (Variante Spritzen)

Im Verlauf der Entwicklung des Modules zur Flüssigkeits-Probenahme entstand die Idee, eine zweite Variante unter Verwendung von Spritzenkörpern auch für die Luftprobenahme zu entwickeln und als Versuchsmuster aufzubauen und zu erproben. Vorteile dieser Variante könnten in der späteren Praxis die einfachere Handhabung gegenüber Beutel sowie geringere Kosten für Verbrauchsmaterialien sein (Abb. 11).

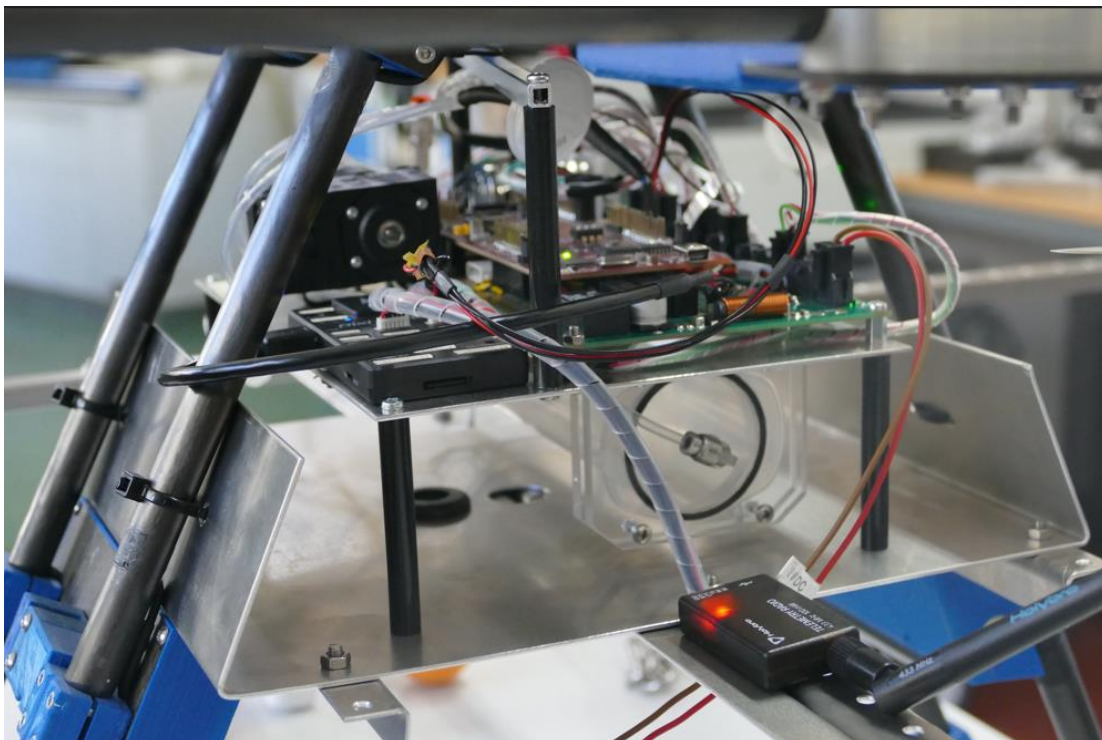


Abb. 11: Versuchsmuster Luftprobenahme Variante Spritzenkörper

## II. Entwicklung Modul zur Flüssigkeits-Probenahme

Die Grundkonzeption für die Flüssigprobenahme erfolgte in Abstimmung mit dem Projektpartner Oritest. Es erfolgten umfangreiche Erprobungen und Tests zu einzelnen Versuchsaufbauten und zum kompletten Versuchsmuster „Flüssigprobenahme-Modul“

- Auswahl geeigneter Probenbehältnisse (geschützt und ggf. beheizbar)
- Probenahme-Behälter: Test Ausgasung Material der Probenahme-Behälter mit STEP Ionenmobilitäts-Spektrometer und STEP GC-PID
- Ansaugleistung und Zeit der Befüllung in Abhängigkeit von der Ansaughöhe
- Ankopplung verschiedener Probenahme-Schläuche etc.
- Definiertes Aufsetzen Probenahme auf Flüssigprobe, Freigabe und Auslösung Probenahme mittels Schwimmerschalter
- Anbringung und Schutz Probenahme-Schlauch bei Start und Landung der Drohne
- Einbindung in Steuerungs- und Kommunikations-Konzept u. Mikrokontroller-Baugruppe, Stromversorgung und Ansteuerung aller Aktoren und Sensoren / Detektoren durch die erweiterte Hardware-Elektronik
- Test der MC-Hard und -Software mit Hardware-Elektronik und Abstimmung der Anforderungen mit der übergeordneten Software des Projektpartners ZAFT
- Ausstattung mit zusätzlichen Detektoren: PID; CO-Sensor, WT-Sensor
- Energie- und Kommunikationskonzept / Verbindung zur Drohne (Stromversorgung und Datenaustausch)

Das Konzept wurde überarbeitet und erweitert zur Integration von Sensoren und Detektoren mit Schwerpunkt Mini-PID und Wärmetönungssensor. Gemeinsam mit dem Projektpartner Oritest wurden nach umfangreicher Recherche folgende Sensoren ausgewählt (Auswahl und Test siehe Bericht Projektpartner Oritest)

### A) Mini-PID

- Ionisierungsenergie: 10,6 eV VUV-Quelle
- Messbereich: ca. 200 ppb bis 2000 ppm Isobuten
- Masse: < 100 g
- Abmessungen: 54 x 39 x 28 mm (L x B x H)
- Tests erfolgten an VOC-Kalibriergemischen Benzol/Toluol/Xylol

### B) Wärmetönungssensor MPS003-S40505-EX

Entwicklung / Konstruktion und Aufbau Versuchsmuster Probenahme-Behältnisse und einer kompletten Flüssigprobenahme-Baugruppe bestehend aus

- 2 Stück konstruktiv modifizierten Probenahme-Spritzenkörpern a 150 ml Volumen
- 2 Stück Rückschlagventile (Typ AKH mit Steckverbindung von SMC)
- Probenahme-Pumpe
- 2 Stück 1 bis 2 m 1/8" Ansaugschlauch aus PFA mit Blei-Gewicht
- Schwimmerschalter zur Überwachung des Eintauchens in Proben-Entnahmestelle sowie Steuerung der Ansaugpumpe
- optional: 2 Stück Füllstands-Sensoren zur Überwachung Probe im Ansaugschlauch
- Schwimmermodul zum einstellbaren gleichmäßigen Eintauchen des Ansaugschlauches in die Flüssigprobe
- Zusammenfassung in mechanische Trägerbaugruppe „Flüssigprobenahme-Modul“ für Anbau an Drohne

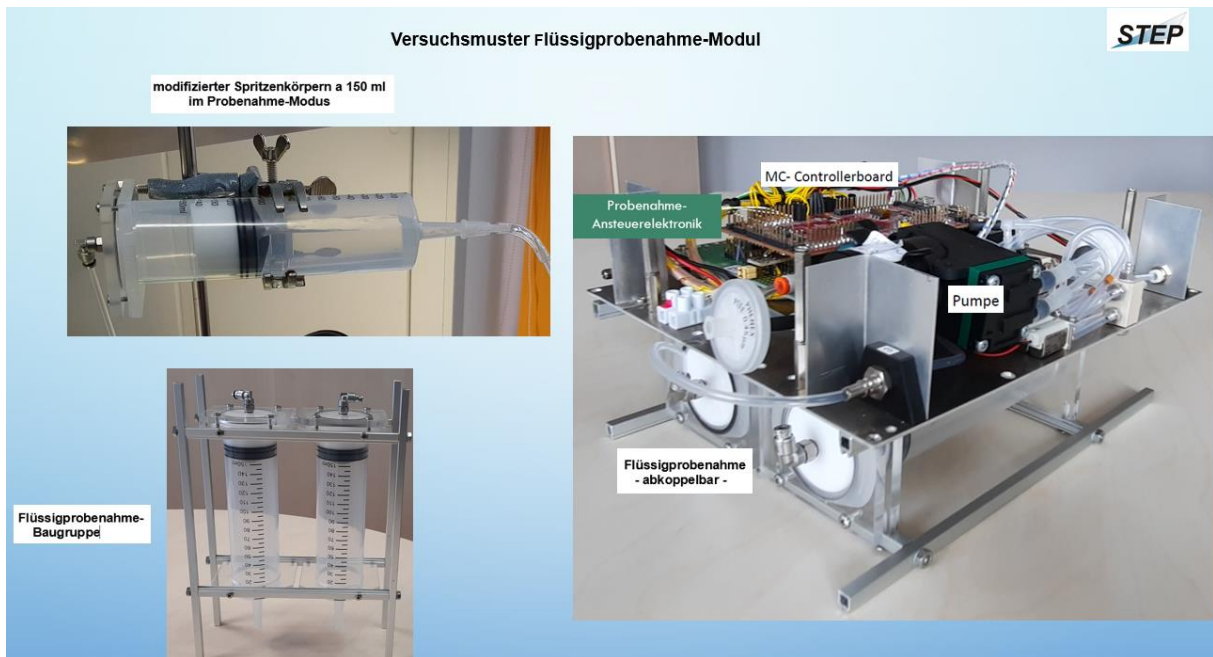


Abb. 12: Versuchsmuster Flüssigprobenahme-Modul – 1. Teilansicht

Der Spritzenkörper besteht aus einer umgebauten Spritze, welche durch Erzeugung von Unter- bzw. Überdruck im hinteren Teil der Spritze betätigt werden kann. Durch diese Vorgehensweise wird nur die Spritze (und das Schwimmermodul) durch die Flüssigprobe kontaminiert, Pumpe und Ventile bleiben frei von Kontaminationen (Abb. 12 und 13).

Im Endprodukt wird der Spritzenkörper auf einfache Weise durch Klick-Verschlüsse wechselbar sein, sodass er sich nach der Probenahme incl. Flüssigkeit leicht entnehmen und tauschen lässt.



Abb.13: Versuchsmuster Flüssigprobenahme-Modul – 2. Teilansicht

Das Schwimmermodul ermöglicht ein gleichmäßiges Eintauchen des Ansaugschlauches in die Flüssigprobe. Die drei seitlich abgesetzten Schwimmkörper verhindern ein Kippen des Moduls während der Probenahme. Die Eintauchtiefe der Schwimmkörper und die Länge des Probenahme-

Schlauches werden auf die gewünschte Eintauchtiefe abgestimmt. Das Modul ist mittels dreier Stahlseile an der Drohne aufgehängt und schwebt während des Fluges 1-3m (je nach Länge der Stahlseile) unterhalb der Drohne (Abb. 14).

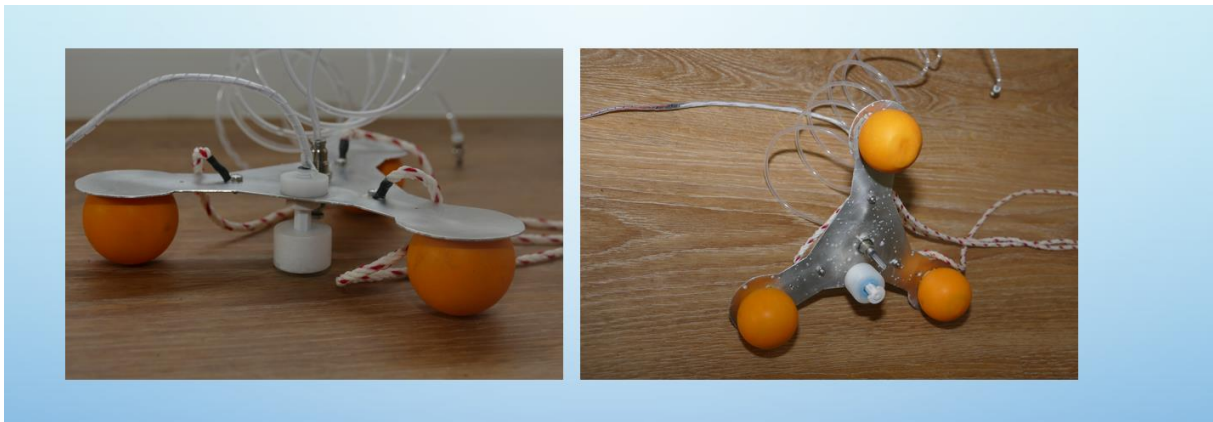


Abb.14: Schwimmermodul

Am Schwimmermodul ist der Schwimmerschalter (Abb. 15) befestigt. Dieser dient zur Detektion des Eintauchens in die Flüssigkeit und löst, gesteuert über das Elektronik-Modul die Flüssigprobenahme aus. Falls das Schwimmermodul und damit der Ansaugschlauch durch unruhigen Drohnenflug aus der Flüssigkeit herausbewegt wird, unterbricht der Schwimmerschalter die Probenahme.



Abb.15: Schwimmerschalter

#### Trägerbaugruppe zur Befestigung des Schwimmer-Modul an Drohne

Die Befestigung des Elektronik-Moduls erfolgt unterhalb der Drohne auf einem an die Drohne angepassten, leichten Befestigungsblech. Das Schwimmermodul wird mittels dreier Stahlseile schwebend an 3 Auslegern an der Drohne aufgehängt. In weiteren Flugversuchen muss noch exakt ermittelt werden, in welchem Winkel die Stahlseile geführt werden müssen, um ein zu starkes Pendeln und Schwingen des Schwimmermoduls zu verhindern.

Der Probenahme-Schlauch ist spiralförmig gewickelt, um eine Längen Anpassung beim Start sowie bei der Probenahme zu ermöglichen (Abb. 16 und 17)

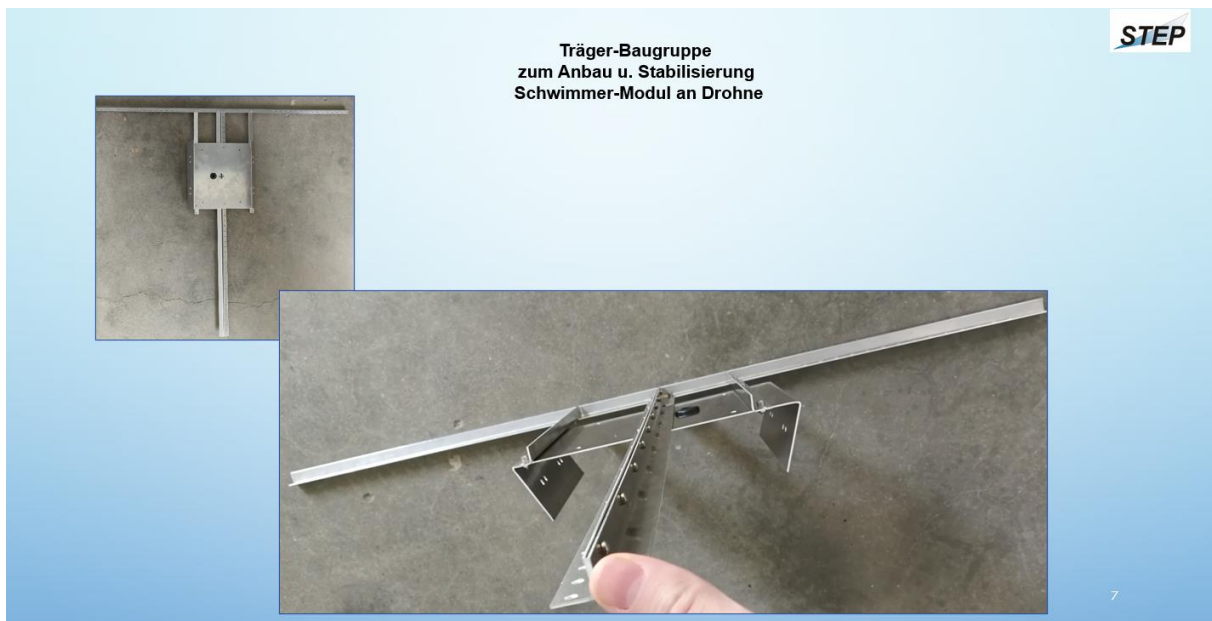


Abb. 16 Träger-Baugruppe zum Anbau und Stabilisierung Schwimmer-Modul an Drohne

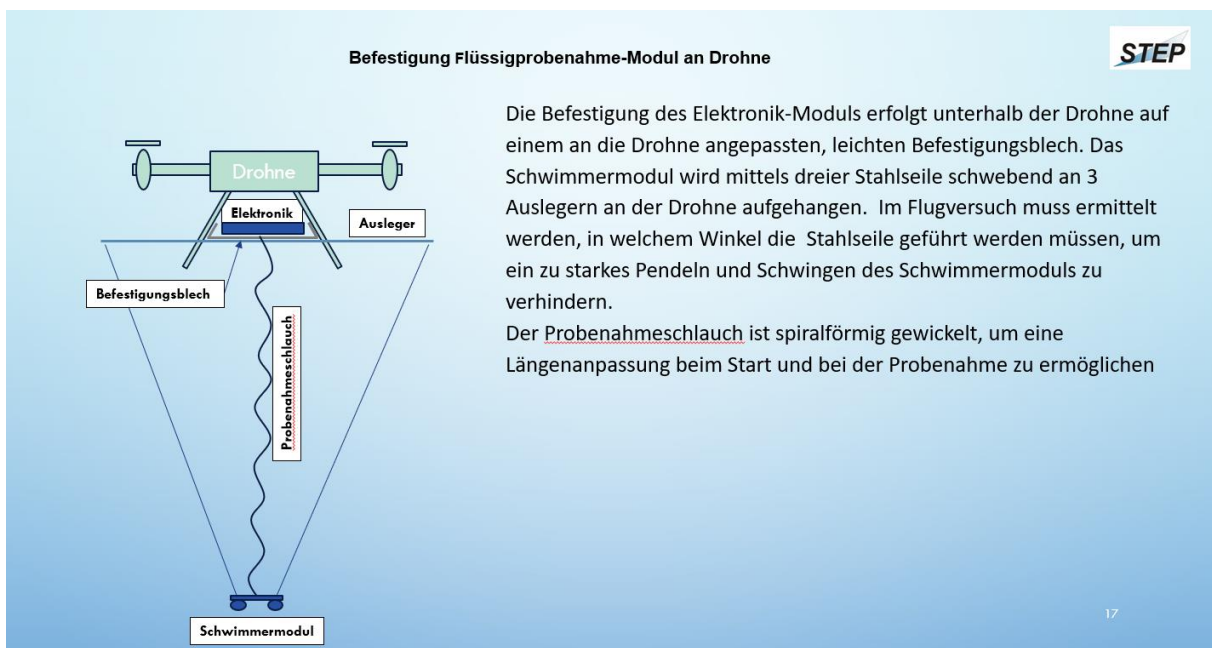


Abb.17: Befestigung Flüssigprobenahme-Modul an Drohne

#### Kontaminationsrisiko durch Flüssigprobe

Die Flüssigprobe kontaminiert alle Teile der Probenahme, welche mit der Flüssigkeit in Berührung kommen. Besonderes Augenmerk wurde darauf gerichtet, die Probenahme-Einheit so zu konstruieren, dass möglichst wenige Teile mit der Flüssigkeit in Berührung kommen und schnell gewechselt werden können.

Kontaminiert werden der Spritzenkörper, welcher auch die Flüssigprobe enthält und zur weiteren Analyse im Endprodukt leicht wechselbar gestaltet wird. Außerdem wird das Schwimmermodul und der Spiralschlauch zum Spritzenkörper kontaminiert. Sie müssen nach jeder Probenahme entsorgt werden. Das Schwimmermodul besteht deshalb aus wenigen, preisgünstigen Bauteilen: Schlauchhalterung, Filter, Rückschlagventil, Schwimmer und Schwimmerschalter.

Alle anderen Bauteile des Flüssigprobenahme-Moduls kommen nicht direkt mit der Flüssigprobe in Berührung, müssen allerdings durch geeignete konstruktive Maßnahmen vor einer indirekten Kontamination durch Spritzwasser/Vernebelung etc. geschützt werden.

Entwicklung Elektronik-Baugruppen und Integration der neuen Anforderungen des Flüssigprobenahme-Modules in das Steuerungs- und Kommunikations-Konzept und die Mikrocontroller-Baugruppe

Für die Flüssigprobenahme mittels Spritzenmodul wurde das Elektronikmodul, basierend auf dem Elektronikmodul des Luftprobenahme-Modules kompatibel weiterentwickelt, sodass der für die Luftprobenahme notwendige Funktionsumfang weiterhin gegeben ist.

Dieses Flüssigprobenahme- Elektronikmodul (Abb. 18 bis 21) besteht aus:

- Hauptplatine mit Stromversorgung, Leistungselektronik, Adapter für die Microcontroller-LP Hardware-Interface für Pumpen, Ventile, LED's, Taster und sonstigen Komponenten
- Microcontroller-LP ‚LAUNCHXL-F28379D‘, basierend auf TI-MC TMS320F28379D
- Flugcontroller ‚Pixhawk C4‘ mit GPS-Sensor und Telemetrie-System zwecks Kommunikation mit Bodenstation (Abb. 8)
- Photoionisationsdetektor Modul PIM CPN mit separater Ansaugpumpe



Abb. 18: Probenahme-Elektronikmodul

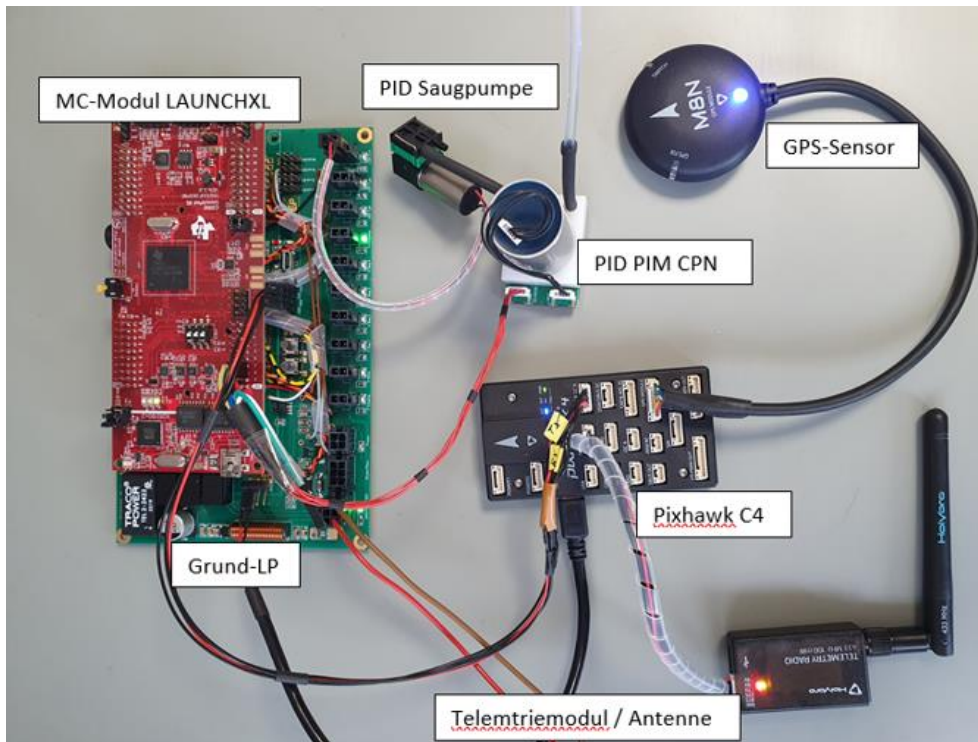


Abb. 19: Probenahme-Elektronikmodul – Einzelkomponenten

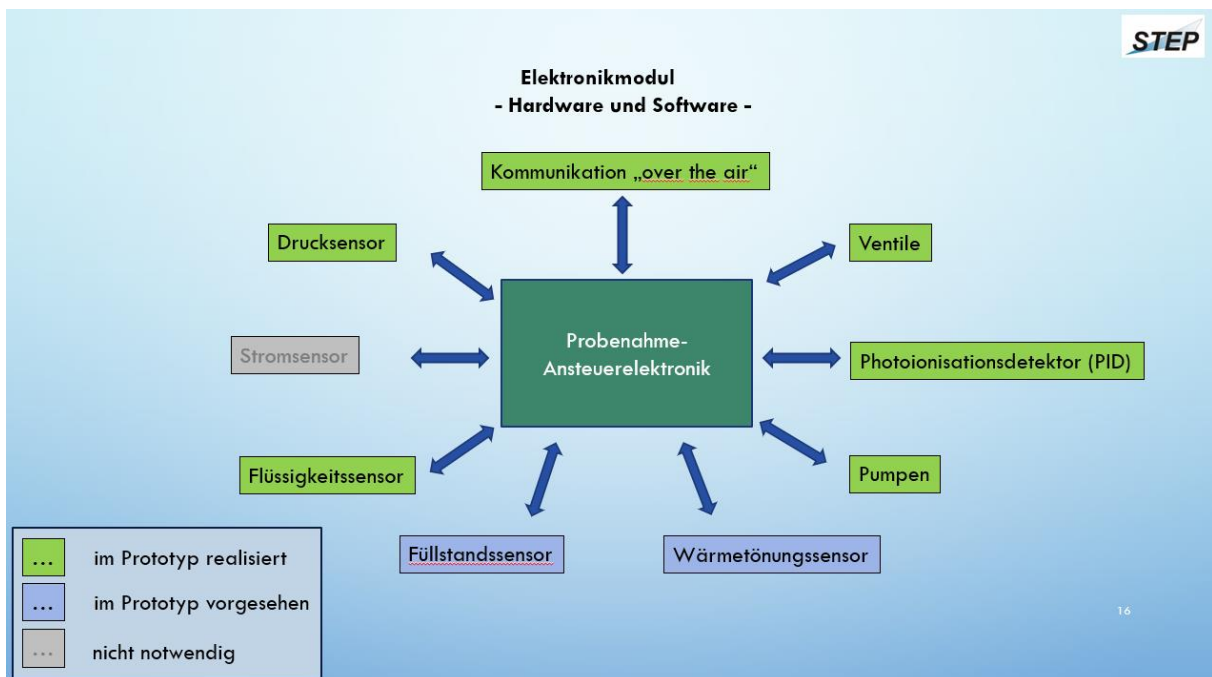


Abb.20: Übersichtsschema Hard- und Softwarekomponenten des Flüssigprobenahme-Modul

### Mikrocontroller-Software

Die Software basiert auf der Softwareversion des Luftprobenahme-Systems. Befehle vom PC der Bodenstation werden über die Telemetrie/MAVLink-Protokoll des Pixhawk-Controllers an den MC des Flüssigprobenahme-MC's gesendet, wo der Befehl zeitnah umgesetzt wird. Im Ergebnis wird eine Antwort mit Statusinformationen (im Fehlerfall mit Fehlerinformation) an die Bodenstation zurückgesendet.

Die MC- Software wurde um folgende Komponenten / Funktionen erweitert:

- Ansteuerung Pumpe und Ventile geeignet für die Ansaugung von der Flüssigprobe in die 2 Probenahme-Behälter
- Einbindung des PID- Moduls zur Messung der Schadstoffkonzentration während des Fluges, um folgende Messwerte im Abstand von ca. 1s zu erfassen und über das MAVLink-Protokoll an die Bodenstation zu übermitteln
  - Konzentration in ppm
  - Strom in pA
  - Gas-Temperatur in °C
  - Gas- Feuchte in %rH
  - Gas- Flow in %
  - Status- Byte des PID
- Funktionen zur Initialisierung einer 2. UART /seriellen Schnittstelle
- Interrupt gesteuerter Empfang der Antwort des PID-Moduls

Folgende neue Befehle wurden implementiert:

<code>~ALiquidProbe#</code>	Initialisierung des Elektronikmoduls für Flüssigproben- Spritzenmodul, da Ventile / Ein-/ Ausgänge gegenüber dem Luftprobenahme-Modul andere Funktionalität besitzen.
<code>~DLiquidProbe#</code>	De-Initialisierung des Elektronikmoduls für Flüssigproben- Spritzenmodul
<code>~LoadLiquidProbeX#</code>	Befüllen eine der beiden Spritzen X (1/2) mit Flüssigkeit in Abhängigkeit des Schwimmersensors. Die Befüllung ist Zeitgesteuert. Über Ventile wird nur dann gesaugt, wenn der Schwimmerschalters sich in der Flüssigkeit befindet. Während der Befüllung wird pro Sekunde der Status zurückgesendet: <code>~LiquidProbeX Suction YY sec#</code> (YY ... zurücklaufende Zeit in sec)
<code>~ReloLiquidProbeX#</code>	Entladen/Zurückpumpen der Probe aus Spritze X (1 / 2)
<code>~GetStateOfFloatSwitch#</code>	Abfrage Zustand Schwimmerschalter, wichtig als Info für Piloten, dass Flüssigprobenahme möglich ist.
<code>~EmptyFillTubeX#</code>	Befehl zum Leeren des Füllschlauches, um ein Rücklaufen der Probe aus der Spritze beim Rückflug zu verhindern.
<code>~PIDStart#</code>	Initialisierung des PID-Moduls, Einschalten UV-Lampe, Herstellen Messbereitschaft des PID
<code>~PIDGetValues#</code>	Abfrage der Messwerte des PID-Moduls, bestehend aus <ul style="list-style-type: none"><li>- Substanz-Konzentration in [ppm]</li><li>- Kompensations-Strom in [pA]</li><li>- Temperatur in °C</li><li>- rel. Luftfeuchte in [%rH]</li><li>- Gasfluss durch PID in [%]</li></ul>
<code>~PIDStop#</code>	Beenden Messbereitschaft PID- Modul, Ausschalten UV-Lampe
<code>~PIDGetState#</code>	Abfrage PID-Zustand von Flow, UV-Lampentest, Überladung, Fehler
<code>~PIDGetError#</code>	Abfrage Fehlerzustand

~PIDReboot#	PID neu initialisieren nach Fehler
~PIDLampCheck#	Abfrage UV-Lampen- Zustand
~PIDGetDeviceName#	Abfrage PID-Name/Typ
~PIDGetDeviceSerialNo#	Abfrage PID-Seriennummer
~PIDGetDeviceSoftware#	Abfrage PID-Software-Version
~PIDGetDeviceHardware#	Abfrage PID-Hardware-Version

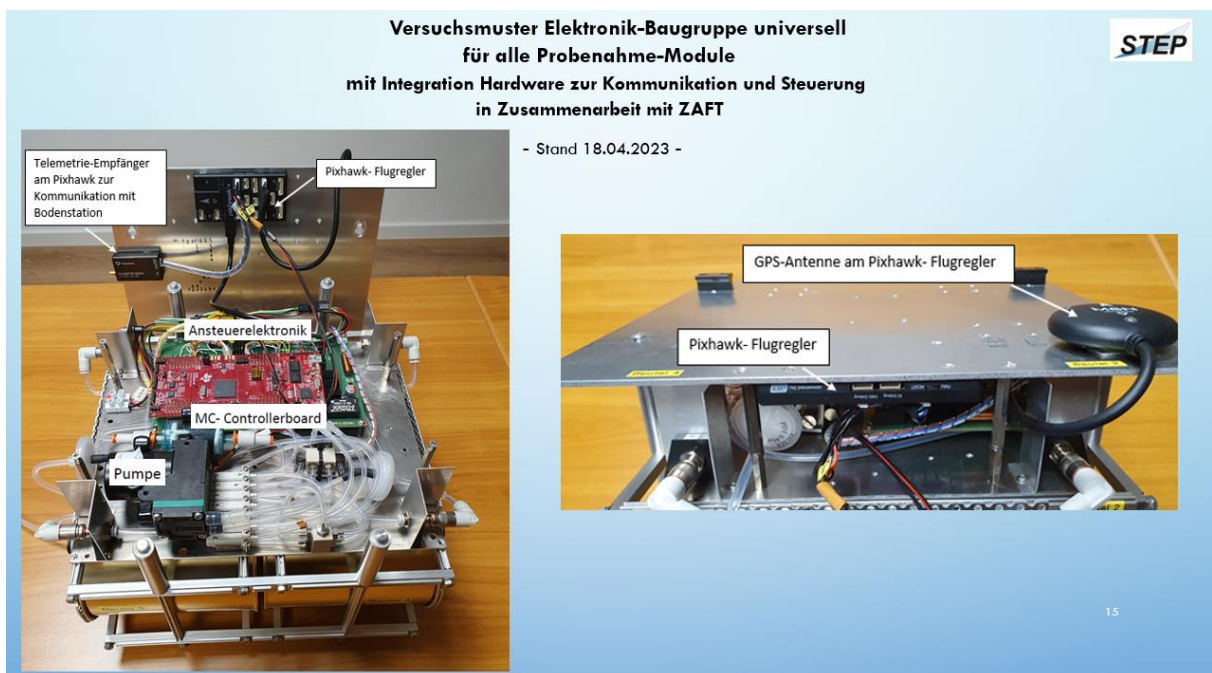


Abb.21: Versuchsmuster Elektronik-Modul für alle 3 zu entwickelnden Probenahme-Techniken

Umfangreiche Erprobungen und Tests zu einzelnen Versuchsaufbauten und zum kompletten Prototyp Flüssigprobenahme-Modul

Am 11.04.2024 wurde der Gesamtaufbau im Rahmen eines Meetings bei STEP in folgenden Schritten erfolgreich getestet (Abb. 22 – 24):

- Anpassung der Konstruktion des Flüssigprobenahme- Moduls zur flugfähigen Ankopplung an einen Multicopter der FW Dortmund (STEP/FW Dortmund/Oritest)
- Simulation eines Anfluges der Drohne (ZAFT/STEP/FW Dortmund) zum Wasserbecken
- Aufnahme einer Flüssigprobe (Wasser) in einem Wasserbecken im Außenbereich der STEP GmbH und somit Erprobung Hard- u. MC-Software Flüssigprobenahme-Modul (STEP/ZAFT)
- Erprobung der Steuerung/Bedienung des Moduls auf Basis des Mavlink- Protokolls
- per Übertragung mittels PX4 Controller und 433MHz Funkverbindung (ZAFT) im bodennahen Bereich (STEP/ZAFT)

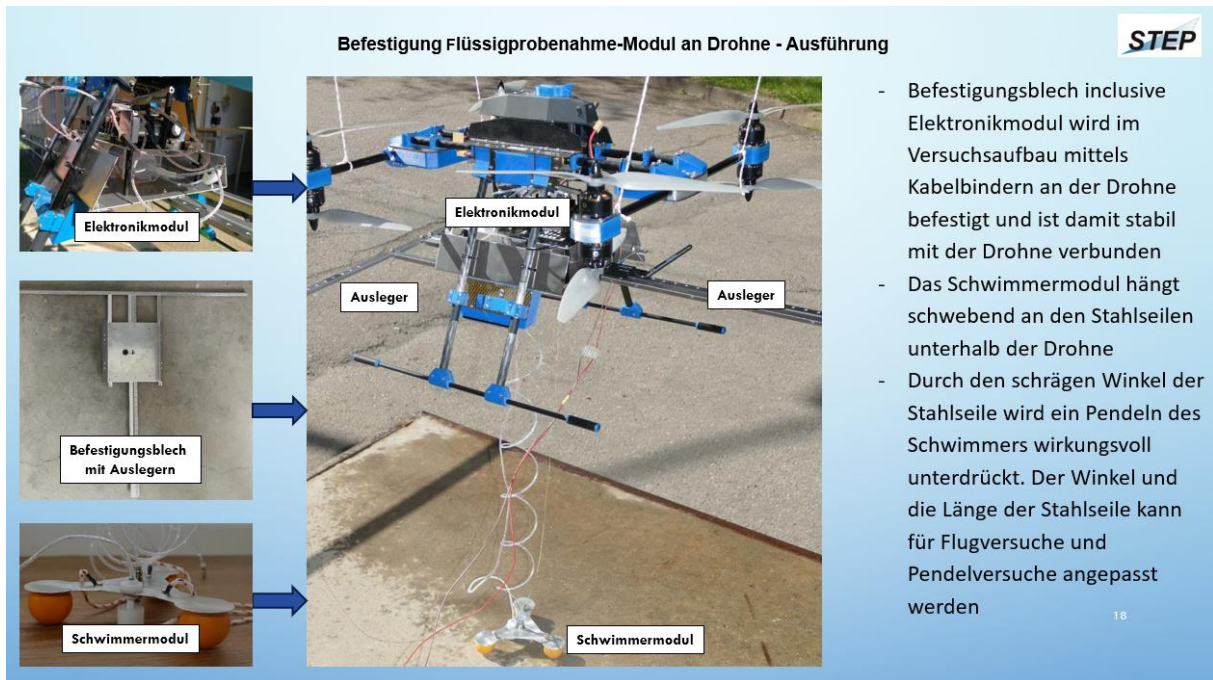


Abb.22: Ankopplung Flüssigprobenahme-Modul an Drohne Projektpartner FW Dortmund

Der Ansaugschlauch am Schwimmermodul taucht ca. 1 cm in die Flüssigkeit ein und der Schwimmerschalter schaltet korrekt beim Eintauchen.

Die Flüssigkeit konnte erfolgreich in das Spritzenmodul gesaugt werden. Die Elektronik sorgt für Abschaltung und Belüftung, wenn das Schwimmermodul sich nicht im Wasser befindet.

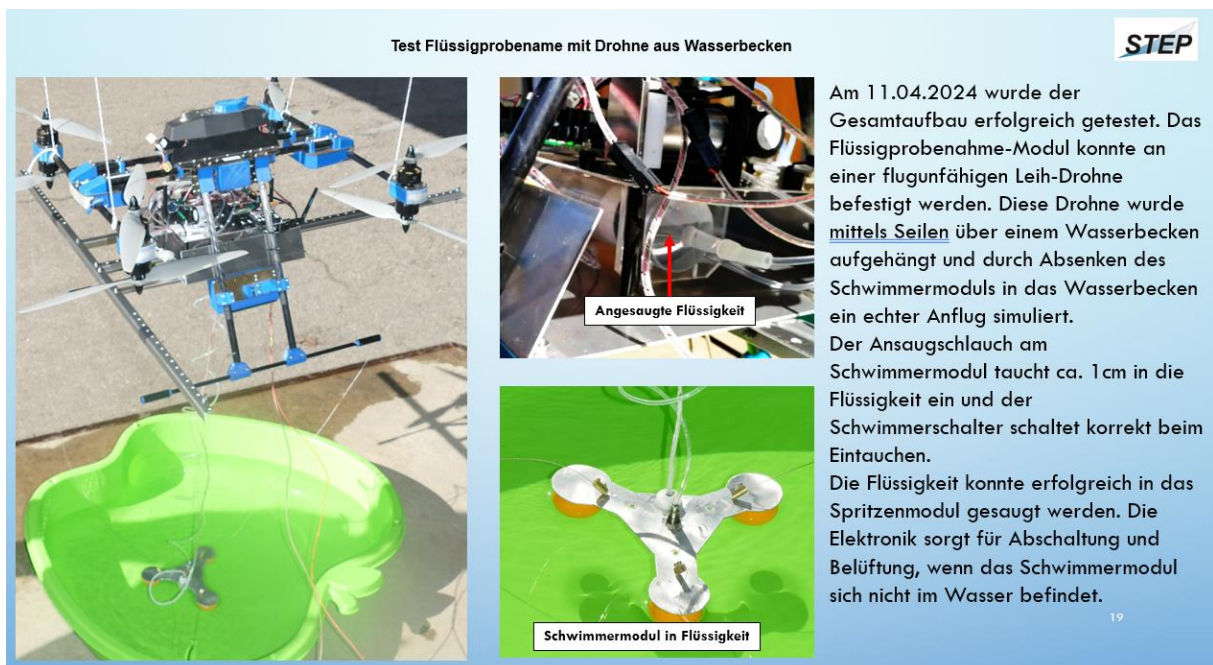




Abb.23: Test Flüssigprobenahme im Erprobungsmeeting bei STEP am 11.04.2024

Protokoll				
Einsendende Stelle: FW Dortmund		 Stadt Dortmund Institut für Feuerwehr- und Rettungstechnologie		
Einsatzort: Siedlungsstraße 5, 09509 Pockau-Lengefeld	Probennummer: 11-04-24/001 <small>(ggf. Etikett aufkleben)</small>			
Datum / Uhrzeit: 11.04.2024 / 11:37				
Entnahmestelle (z.B. Koordinaten/Adresse/Raumnummer) Aussenbereich STEP				
<small>Beschreibung: Wasser Testmessung</small>				
Probeanweisung				
<input type="checkbox"/> C	Nr.:	<input type="checkbox"/> B	Nr.:	
Luft		Nr.		
<input type="checkbox"/> Tenax®	<input type="checkbox"/> Silicagel	Nr.		
		Nr.		
		Blindprobe		
<input checked="" type="checkbox"/> Flüssigkeit		ggf.: Tiefe der Probenahme: 0,05m		
<input type="checkbox"/> Boden	Fläche angeben:      cm x      cm			
<input type="checkbox"/> Wisch	Lösungsmittel:			
<input type="checkbox"/> Feststoff	<input type="checkbox"/> Bewuchs	<input type="checkbox"/> Paste / Belag		
<input checked="" type="checkbox"/> Sonstiges: Test Probenahmemodul				
Beschreibung der Probe (Farbe, Aussehen, Geruch, Mehrphasengemisch, ...)				
Wasser in Becken unter der Drohne				
Messung vor Ort				
Impulsrate / Dosisleistung an der Oberfläche: _____ <input type="checkbox"/> n <input type="checkbox"/> µ <input type="checkbox"/> m Sv/h				
pH-Wert:		IMS:		
Bodentemperatur:    °C		Wassertemperatur:    15°C		
Probenentemperatur:    15°C		PID:                    1500ppm		
Sonstiges:				
Bitte wenden 				

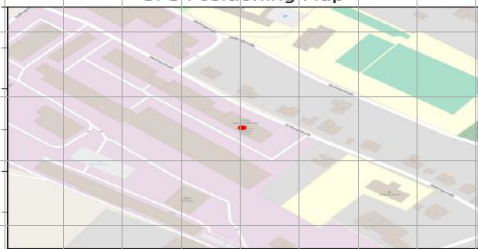
Lageskizze		
GPS Positioning Map		
		
Maßstab/ Kästchenseite		
Wetter (im Bereich der Probenahme)		
Lufttemperatur: 18°C	Bewölkung:	2/8tel
Luftfeuchtigkeit: 52%	Windstärke:	2
Niederschlag: <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja	Windrichtung aus	Nord
Dekontamination		durchgeführt: <input checked="" type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ja
Mittel / Wirkstoff: H2O	Durchführung: <input type="checkbox"/> Tauchdesinfektion <input type="checkbox"/> Scheuer/Wischdesinfektion	
Konzentration:	Einwirkzeit: min	
Bemerkungen		
Unterschrift: Protokollführer		/      /      / Probennehmer

Abb.24: Simulation eines Anfluges der Drohne zum Wasserbecken

### III. Entwicklung Modul zur Feststoff-Probenahme

#### Feststoffprobenahme-Modul

Erstellung Grundkonzeption, Entwicklung / Konstruktion und Aufbau Prototyp Probenahme-Behältnisse und eines kompletten Feststoffprobenahme-Modul.

In Abstimmung mit den Projektpartnern Oritest und FW Dortmund wurden zwei Entwicklungsrichtungen definiert:

- a) Feststoffprobenahme durch *Thermodesorption des Feststoffes* vor Ort, Absaugung der gasförmigen Probe mittels des modifizierten Luftprobenahme-Modules (Variante Spritze)
- b) Feststoffprobenahme durch *Absaugung von Feststoffpartikeln* und Aufnahme in geeigneten Proben-Behältnissen

#### Probenahme durch Thermodesorption des Feststoffes


Nach Vorversuchen durch Oritest wurde von STEP und Oritest ein Versuchsmuster entwickelt und getestet. (Abb.25)

Mittels einer geeigneten Wärmequelle wird der kontaminierte Boden auf 100-200°C erhitzt. Die dabei entstehenden Ausgasungen enthaltener Substanzen können anschließend mit dem Spritzenmodul angesaugt werden und stehen damit zur späteren Auswertung im Labor zur Verfügung. Im Prototyp wird zum Erwärmen eine Halogenlampe mit 50W Leistung verwendet. Damit konnte ein kontaminiertes Glasvlies, welches auf einem Aluminiumkörper lag, bis auf 170°C erhitzt werden.



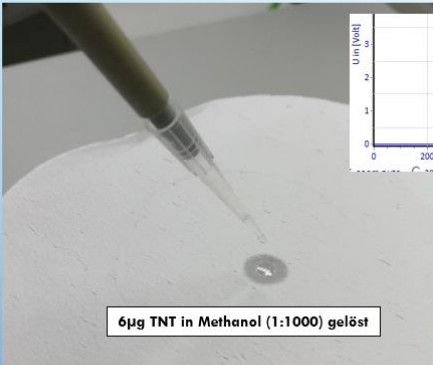
Abb.25: Versuchsmuster Feststoffprobenahme-Modul mittels Thermodesorption

Im Laborversuch wurde diese Verdampfungsprobenahme erfolgreich getestet. Auf ein Glasvlies wurden 6µg TNT (Zersetzung ab 160°C) aufgebracht. Mittels des Verdampfungs-Probenamemoduls wurde das Glasvlies eine Minute erhitzt und anschließend die entstandenen Ausgasungen direkt in den Probenlass eines STEP GC-Ionenmobilitätsspektrometer (GC-IMS) eingesaugt und analysiert. Das TNT konnte bei einem genutzten Volumen der Probeschleife des IMS von 2 ml sehr gut nachgewiesen werden (Abb. 26).

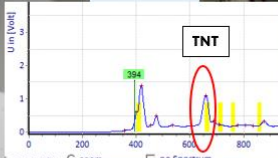


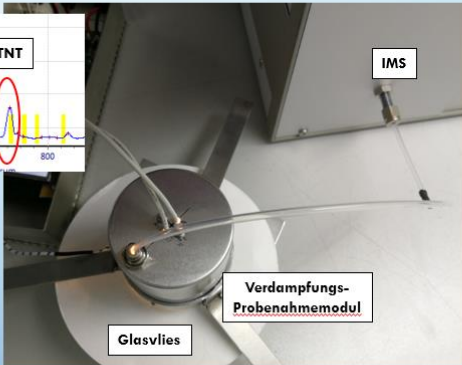
**Laborversuch: Verdampfungsprobenahme von TNT-Sprengstoff**

In einem Laborversuch wurde die Verdampfungsprobenahme erfolgreich durchgeführt. Auf ein Glasvlies wurden 6µg TNT (Zersetzung ab 160°C) aufgebracht. Mittels des Verdampfungs-Probenamemoduls wurde das Glasvlies 1 min erhitzt und anschließend die entstandenen Dämpfe im Ionenmobilitätsspektrometer (IMS) direkt eingesaugt und untersucht. Das TNT konnte eindeutig nachgewiesen werden!



6µg TNT in Methanol (1:1000) gelöst





IMS

Verdampfungs-Probenamemodul

Glasvlies

21

Abb.26: Direkte Verdampfungs-Probenahme von TNT-Sprengstoff mit Versuchsmuster

In einem zweiten Versuch wurden die entstandenen Ausgasungen der Probe auf eine Spritze gezogen, welche ebenfalls im Spritzenmodul verwendet wird. Der Inhalt der Spritze wurde anschließend -bei Raumtemperatur- im GC-Ionenmobilitätsspektrometer vermessen. Es wurde wiederum  $6\mu\text{g}$  TNT als Probe verwendet. Das TNT ließ sich bei diesem Test ebenfalls sehr gut im IMS nachweisen, allerdings mit etwas schwächerem Signal (Abb. 27).

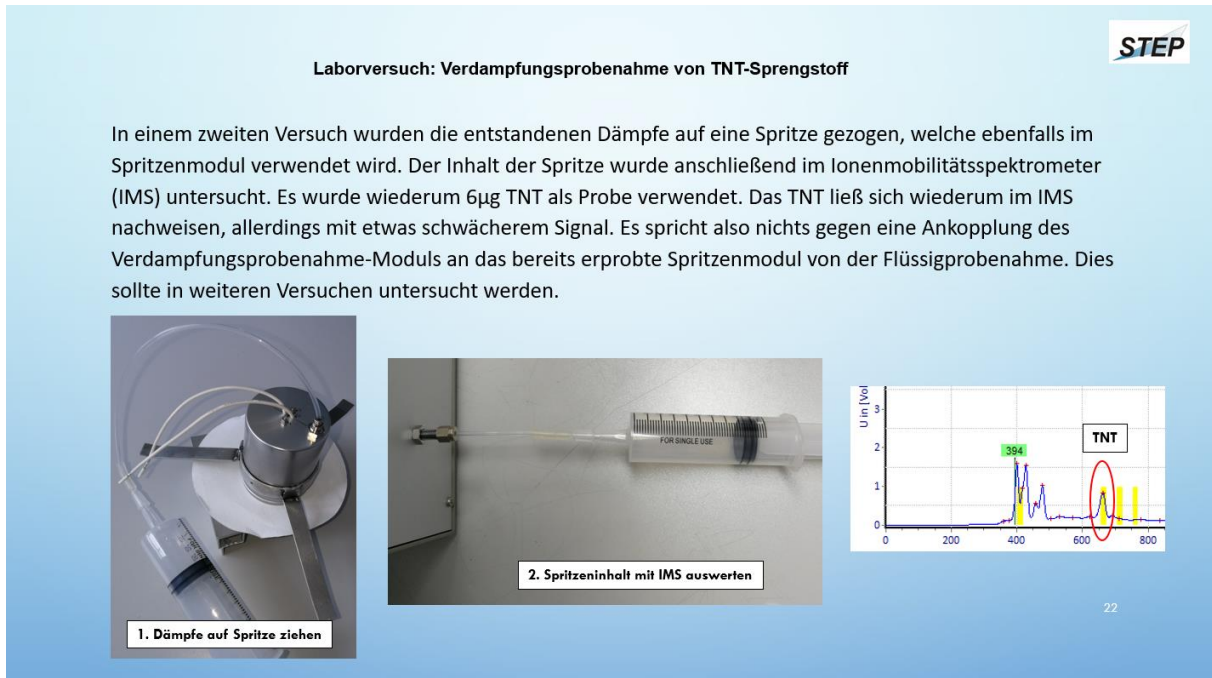


Abb.27: Funktionstest Feststoffprobenahme mittels Thermodesorption über „Zwischenstation“ Spritzenmodul

Es spricht also nichts gegen eine Ankopplung des Verdampfungsprobenahme-Moduls an das bereits erprobte Spritzenmodul wie dieses sowohl im Luftprobenahme-Modul (Variante Spritze) als auch Flüssigprobenahme-Modul verwendet wird.

### Absaugung von Feststoffpartikeln und Aufnahme in geeigneten Proben-Behältnissen

Eine weitere Möglichkeit der Probenahme ist das Sammeln von Feststoffpartikeln mittels eines Staubsaugers. Erste Versuche mit einem handelsüblichen Miniaturstaubsauger verliefen vielversprechend. Mit entsprechenden Anpassungen kann dieser an der Drohne befestigt und von der Probenahme-Elektronik gesteuert werden. Für eine professionelle Anwendung sind allerdings noch weitere Versuche und Anpassungen des Filterteils notwendig, um die gesammelten Partikel entnehmen zu können und alle kontaminierten Teile auszuwechseln (Abb.28).



Abb. 28: Feststoffprobenahme durch Absaugung von Feststoffpartikeln

Die im Rahmen des Vorhabens, insbesondere mit den Projektpartnern ZAFT und Oritest Saxonia erarbeiteten Konzepte, Lösungsansätze und entwickelten Versuchsmuster / Demonstratoren erlaubten die Erreichung der Projektziele.

Weiterführende Recherchen im Projektverlauf zeigen die zunehmende Aktualität der Projektzielstellung. Nennenswerte Entwicklungsergebnisse von Wettbewerbern, die im Moment für die weitere Realisierung und den erfolgreichen Abschluss des Projektes relevant sind, wurden nicht gefunden.

Aufbauend auf die erreichten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse planen die Partner eine schnelle Umsetzung in die Fertigung und anschließende Markteinführung.

Wir danken dem Projektträger für die Bereitstellung der finanziellen Mittel, die Unterstützung und ausgezeichnete Zusammenarbeit.