

## Sachbericht – Teil I: Kurzbericht

### Projektbezeichnung:

**Verbundprojekt:** Echtzeitdetektion toxischer Substanzen in Staubpartikeln zur Identifikation sicherheitsrelevanter Inhalte aus Sendungen und Gepäckstücken (HazarDust)

**Förderkennzeichen:** 13N15567

**Projektlaufzeit:** 01.01.2021 – 31.05.2024

---

### 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technischer Stand

Das Projekt HazarDust adressiert die Echtzeitdetektion gefährlicher Stäube im Logistikbereich, insbesondere im Zusammenhang mit sicherheitskritischen Substanzen wie Drogen oder toxischen Chemikalien. Ziel ist die Entwicklung eines Einzelpartikelmassenspektrometers (SPMS), das die chemische Signatur von Partikeln in Echtzeit analysieren kann. Dies schließt auch die Entwicklung einer robusten Probennahmetechnik, geeigneter Ionisationsverfahren und intelligenter Datenauswerterroutinen ein.

Der Stand der Technik vor Projektbeginn zeigte Schwächen bei bestehenden Screening-Methoden (z. B. Wischproben), die zeitaufwändig und für Echtzeitanalysen ungeeignet sind. Das SPMS basierte bislang auf Anwendungen in der Umweltforschung und wurde nicht für Sicherheitsfragen oder Logistikanwendungen genutzt.

---

### 2. Ablauf des Vorhabens

Das Teil-Projekt von Photonion gliedert sich folgende Arbeitspakete:

- **AP 1:** Definition von Spezifikationen und Gesamtkonzept
- **AP 3:** Weiterentwicklung von Ionisationsverfahren und der SPMS-Hardware
- **AP 5:** Entwicklung von Messsoftware und Datenauswertung
- **AP 6:** Systemintegration und Demonstratorentwicklung
- **AP 8:** Messkampagnen zur Validierung der Technologie

In den ersten beiden Projektjahren lag der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung der SPMS-Komponenten, darunter Hardware-Modifikationen und Softwarelösungen. Später folgten intensive Messkampagnen und Tests des Demonstrators unter realen Bedingungen, unter anderem am Zollterminal des DHL-Hubs in Leipzig.

### 3. Wesentliche Ergebnisse

- **Technische Fortschritte:**

- Erfolgreiche Entwicklung eines transportablen SPMS-Demonstrators mit vollständiger Integration aller Systemkomponenten.
- Optimierung der Massenauflösung und Empfindlichkeit durch Implementierung innovativer Hochspannungsnetzteile und Optimierung der Ionisationsmethoden, sowie der Integration einer Delayed Ion Extraction.
- Entwicklung und Implementierung intelligenter Datenverarbeitungsroutinen auf Basis maschineller Lernansätze.

- **Softwarelösungen:**

- Entwicklung einer benutzerfreundlichen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zur einfachen Steuerung des SPMS-Systems.
- Echtzeit-Datenanalyse und Mustererkennung durch selbstlernende Algorithmen zur Identifikation toxischer Substanzen.
- Integrierte automatische Fehlerdiagnose zur Überwachung und Minimierung von Ausfallzeiten.
- Umfassende Datenverarbeitung und -visualisierung, einschließlich Baselinekorrektur und Massennachkalibrierung.
- Nahtlose Integration mit der SPMS-Hardware zur koordinierten Steuerung und effizienten Messung.

- **Validierung und Praxistests:**

- Durchführung von Laborversuchen zur Detektion von Betäubungsmitteln, einschließlich der Analyse von Staubproben, Abluft und Partikelgrößen, sowie dem Aufbau einer Datenbank zur Erkennung chemischer Signaturen für die Mustererkennung.
- Messkampagne am DHL-Hub in Leipzig zur Analyse von realen Partikelproben aus Logistikzentren.
- Erste Ergebnisse zeigen vielversprechende Detektionsfähigkeiten für Substanzen wie Ketamin.
- Experimente im ehemaligen Drogenlabor in Kevelaer (heute Ausbildungsstätte des BKA) zur Untersuchung von Staubproben mit Rückständen früherer Drogenproduktion sowie der Analyse von Abluft und Staubemissionen funktionsfähiger Tablettiermaschinen.

#### 4. Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Projekt HazardDust vereint die Expertise verschiedener Forschungseinrichtungen und industriellen Partnern mit Anwendern aus dem Bereich der Sicherheitsbehörden. Die **Universität Rostock** spielte eine zentrale Rolle bei der Weiterentwicklung der Einzelpartikel-Massenspektrometrie (SPMS) und der Optimierung der Ionisationsmethoden. In Kooperation mit der **Photonion GmbH** wurden die SPMS-Hardware und die Sampling-Techniken weiterentwickelt, insbesondere das neuartige Skimmer-Düsensystem, das eine effizientere Überführung größerer Partikel in das Analyseverfahren ermöglicht. Das **Bundeskriminalamt (BKA)** sowie **Zollbehörden** waren maßgeblich an der Durchführung von Feldtests beteiligt, um die Technologie unter realen Bedingungen zu validieren. Auch die **ParteQ GmbH** war als Partner involviert und trug zur Verbesserung der Aerosolmesstechnik bei, was die Effizienz der Partikelsammlung und -anreicherung steigerte. Darüber hinaus konnte das System in Zusammenarbeit mit **Logistikunternehmen** wie **DHL** in praktischen Anwendungsszenarien getestet und optimiert werden. Diese partnerschaftliche Zusammenarbeit ermöglichte es, das System kontinuierlich weiterzuentwickeln und sicherzustellen, dass es den Anforderungen der Praxis gerecht wird. Durch die enge Zusammenarbeit konnten Synergien zwischen Grundlagenforschung und technischer Umsetzung geschaffen werden.

---

#### Fazit

Das Projekt HazardDust konnte bedeutende Fortschritte in der Entwicklung eines innovativen Sicherheitsnachweissystems erzielen. Der entwickelte Demonstrator zeigt großes Potenzial für den Einsatz in der Logistik und darüber hinaus in sicherheitskritischen Anwendungen. Die Verwertung der Ergebnisse durch kommerzielle Anwendungen wird angestrebt, insbesondere durch Lizenzierungen und weitere technologische Anpassungen.

Schlussbericht (Teil 2) zum Vorhaben

# »HazarDust« Echtzeitdetektion toxischer Substanzen in Staubpartikeln zur Identifikation sicherheitsrelevanter Inhalte aus Sendungen und Gepäckstücken



**Förderkennzeichen:** 13N15567  
**Projektlaufzeit:** 01.01.2021 – 31.05.2024

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird / wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen von „KMU-innovativ: Forschung für die zivile Sicherheit“ (13N15567) gefördert und durch die VDI Technologiezentrum GmbH betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Photonion GmbH

Hagenower Str. 73  
19061 Schwerin

Phone: +49 (0)385 3993 288

Fax: +49 (0)385 3993 281

E-Mail: [info@photonion.de](mailto:info@photonion.de)

Autoren: Dr. Sven Ehlert, Dr. Andreas Walte

Schwerin, November 2024

# 1. Inhaltsverzeichnis

<b>1. Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Projektziel .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Projektkonsortium .....</b>	<b>7</b>
<b>4. Wissenschaftliche und technologische Ergebnisse .....</b>	<b>10</b>
<b>5. Zusammenfassung &amp; Ausblick.....</b>	<b>26</b>
<b>6. Publikationen &amp; Poster .....</b>	<b>29</b>

## 2. Projektziel

Das Verbundprojekt HazarDust hat sich zum Ziel gesetzt, eine neuartige Technologie für die Echtzeitdetektion toxischer Substanzen in Staubpartikeln zu entwickeln, die es ermöglicht, sicherheitsrelevante Inhalte in Sendungen und Gepäckstücken effizient, präzise und zuverlässig zu identifizieren. Dabei werden insbesondere die besonderen Anforderungen an die Sicherheits- und Logistikbranche adressiert, die in den letzten Jahren durch den zunehmenden internationalen Warenaustausch und die gestiegenen Sicherheitsanforderungen erheblich an Bedeutung gewonnen haben. Ziel ist es, bestehende Screeningmethoden, die oft zeitaufwendig, ressourcenintensiv und auf kleine Probenmengen beschränkt sind, durch ein innovatives und leistungsfähiges Verfahren zu ergänzen, das größere Probenmengen in Echtzeit analysieren kann.

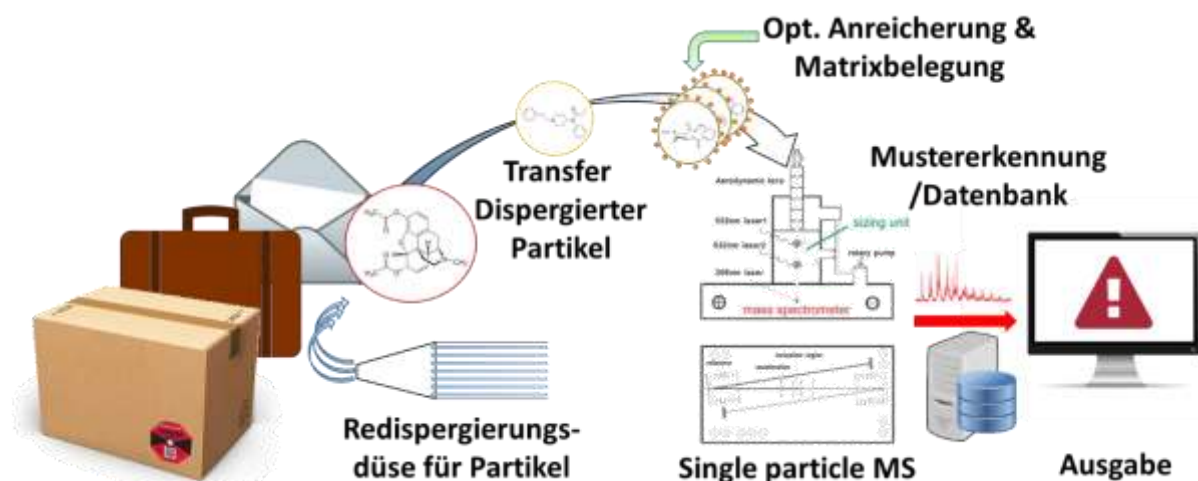


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Nachweisprozesses von der Redispergierung der Oberflächenpartikel bis zur Ergebnisausgabe

Aktuelle Technologien wie Wischproben oder Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) haben sich in der Praxis als begrenzt einsetzbar erwiesen, insbesondere bei komplexen Partikelgemischen oder bei der Untersuchung von großen Volumina in Logistikzentren oder im internationalen Postverkehr. Diese Verfahren erfordern oft manuelle Probenahmen und sind für den Einsatz in einem durchgängigen, automatisierten Logistikprozess ungeeignet. Gleichzeitig steigt das Risiko durch hochtoxische Substanzen wie synthetische Opioide, z. B. Fentanyl und dessen

Derivate, die bereits in geringsten Mengen erhebliche Gesundheitsgefahren darstellen. Die Kombination aus den limitierten Möglichkeiten aktueller Verfahren und den steigenden Anforderungen in Sicherheits- und Logistikumgebungen macht deutlich, dass ein neuartiger technologischer Ansatz dringend notwendig ist.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, setzt das Projekt HazarDust auf die Weiterentwicklung und Anpassung der Einzelpartikelmassenspektrometrie (SPMS). Diese Technologie ist in der Lage, chemische Signaturen einzelner Partikel mit höchster Präzision in Echtzeit zu analysieren. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Detektion sicherheitsrelevanter Substanzen direkt aus der Luftprobe, ohne die Proben vorbereiten oder filtern zu müssen. Ein zentrales Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines transportablen Demonstrators, der alle erforderlichen Module, von der Probennahme bis zur Datenanalyse, in einem kompakten und robusten System integriert.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung intelligenter Datenauswertungsroutinen, die auf maschinellen Lernverfahren und neuronalen Netzwerken basieren. Diese sollen es ermöglichen, die große Menge an Massenspektrometerdaten in Echtzeit zu verarbeiten, bekannte Substanzen präzise zu identifizieren und auch unbekannte Verbindungen zuverlässig zu klassifizieren. Ergänzt wird diese Software durch ein optimiertes Probennahmesystem, das Partikelverluste minimiert und die Überführung der Proben in das SPMS-System effizient gestaltet.

Die Anwendungsfelder dieser Technologie sind vielfältig. Vorrangig soll die Echtzeitdetektion toxischer Substanzen in Logistikzentren und bei Zollsicherheitskontrollen realisiert werden, etwa bei der Untersuchung von Paketen und Gepäckstücken. Darüber hinaus könnte die Technologie in der forensischen Analytik zum Einsatz kommen, etwa bei der Untersuchung von Asservaten durch Sicherheitsbehörden. Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet ist die Verbesserung der Arbeitssicherheit, indem Beschäftigte in kritischen Umgebungen, wie etwa in der Abfallentsorgung oder bei der Entsorgung gefährlicher Substanzen, vor hochtoxischen Partikeln geschützt werden.

Langfristig soll das Projekt HazarDust nicht nur die zivile Sicherheit erheblich verbessern, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Projektpartner stärken. Ziel ist es, die Technologie zur Marktreife zu führen und damit sowohl national als auch international neue Standards für die Detektion gefährlicher Substanzen zu setzen. Durch die innovative Kombination aus modernster Massenspektrometrie, intelligenter Datenverarbeitung und praxisnaher Integration in logistische Prozesse soll Deutschland eine führende Rolle im Bereich sicherheitsrelevanter Detektionsverfahren einnehmen. Dies trägt nicht nur zur Verbesserung der öffentlichen Sicherheit bei, sondern eröffnet auch neue wirtschaftliche Perspektiven für die beteiligten Partner und die Sicherheitsbranche insgesamt.

### 3. Projektkonsortium

Das Konsortium des Projekts **HazarDust** vereint führende Akteure aus Forschung, Industrie und Sicherheitsbehörden, um eine innovative Lösung für die Echtzeitdetektion toxischer Substanzen in Staubpartikeln zu entwickeln. Die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Technologieentwicklern und Anwendern gewährleistet, dass sowohl wissenschaftliche Exzellenz als auch praktische Anforderungen optimal berücksichtigt werden.

#### Koordination und Leitung

Die **Photonion GmbH**, ein innovatives mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Schwerin, fungiert als Verbundkoordinator. Mit langjähriger Erfahrung in der Entwicklung und Anpassung massenspektrometrischer Analysegeräte übernimmt Photonion die zentrale Verantwortung für die technische Umsetzung und Integration des Einzelpartikelmassenspektrometers (SPMS). Dr. Andreas Walte leitet das Konsortium und sorgt für eine enge Abstimmung zwischen den Partnern sowie für die Einhaltung der Projektziele.



#### Projektpartner

##### 1. Universität Rostock

Die Universität Rostock, insbesondere die Arbeitsgruppe für Analytische Chemie unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Zimmermann, bringt ihre umfangreiche Expertise in der Einzelpartikel-Massenspektrometrie und der Entwicklung innovativer Ionisationsverfahren ein. Als wissenschaftlicher Hauptpartner liegt der Fokus auf der Grundlagenforschung, der Entwicklung neuer Technologien für die chemische Analyse und der Validierung der Systeme.



##### 2. ParteQ GmbH

Die ParteQ GmbH, ein Unternehmen spezialisiert auf Aerosoltechnologie, ist verantwortlich für die Entwicklung und Optimierung der Probennahmesysteme. Ihre Aufgabe ist es, Partikel effizient aus der Umgebungsluft zu sammeln und für die



massenspektrometrische Analyse aufzubereiten. Dabei fließen ihre Erfahrungen in der Aerosolphysik und Partikelhandhabung direkt in die Systementwicklung ein.

### 3. Bundeskriminalamt (BKA)

Das Bundeskriminalamt (BKA) übernimmt die Rolle des Anwendungspartners und sorgt dafür, dass die entwickelten Technologien den Anforderungen der Sicherheitsbehörden gerecht werden. Es stellt Testsubstanzen, Szenarien und praxisnahe Anwendungsfälle bereit, um die Leistungsfähigkeit des Systems unter realen Bedingungen zu evaluieren.



#### Assoziierte Partner

Neben den Kernpartnern bringt das Projekt zusätzliche Expertise und Anwendungsbezug durch assoziierte Partner ein:

**Deutsche Post DHL Group:** Als führender Logistikdienstleister bietet DHL die Möglichkeit, das System in realen Betriebsumgebungen zu testen, insbesondere im Zollterminal am DHL-Hub Leipzig.



**Flughafen Rostock-Laage:** Der Regionalflughafen stellt zusätzliche Testmöglichkeiten und unterstützt die Evaluierung des Systems für Anwendungen in der Luftfracht und Gepäckabfertigung.



**Generalzolldirektion:** Die Zollbehörde liefert wertvolles Feedback zu sicherheitsrelevanten Anforderungen und unterstützt die Integration in bestehende Kontrollprozesse.



#### Zusammenarbeit und Synergien

Die Partner bringen unterschiedliche Kompetenzen und Erfahrungen ein, die das Projekt als Ganzes stärken:

**Photonion** übernimmt die technische Systemintegration und die Entwicklung der Messsoftware. Die **Universität Rostock** konzentriert sich auf die Grundlagenforschung und die Validierung der neuen Technologien. **ParteQ** liefert

innovative Lösungen für die Probennahme und Aerosolhandhabung. Das **BKA** und die assoziierten Partner testen das System unter realistischen Bedingungen und stellen sicher, dass es den Anforderungen der Praxis entspricht.

Die enge Kooperation im Projektkonsortium schafft eine starke Grundlage, um die anspruchsvollen technischen und wissenschaftlichen Ziele zu erreichen und die Ergebnisse in praxistaugliche Lösungen zu überführen. Durch die Verbindung von wissenschaftlicher Innovation und anwendungsorientierter Entwicklung wird HazardDust einen wichtigen Beitrag zur zivilen Sicherheit und zur Weiterentwicklung des Sicherheitsmarktes leisten.

## 4. Wissenschaftliche und technologische Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts HazarDust hat die Photonion GmbH als technologischer Kernpartner und Systemintegrator entscheidende Beiträge zur Entwicklung und Implementierung des Einzelpartikelmassenspektrometers (SPMS) geleistet. Ziel war es, ein leistungsfähiges, transportables System zur Echtzeitdetektion gefährlicher Stäube zu entwickeln, das sich durch hohe Sensitivität, Präzision und Benutzerfreundlichkeit auszeichnet. Die Ergebnisse dieses Teilvorhabens belegen, dass sämtliche technologischen und wissenschaftlichen Ziele erreicht wurden und die entwickelten Systeme eine hohe Anwendungsreife aufweisen.

### Systementwicklung und Integration

Eines der Hauptziele von Photonion bestand in der Konzeption und Entwicklung eines transportablen Demonstrators, der alle Komponenten für die Echtzeitanalyse toxischer Stäube integriert. Dieser wurde in mehreren Iterationsschritten entwickelt, getestet und optimiert. Die Anpassung der Hardware an die speziellen Anforderungen sicherheitsrelevanter Anwendungen war dabei ein zentraler Aspekt.

Ein wesentlicher Meilenstein war die Weiterentwicklung der SPMS-Technologie, die ursprünglich in der Umweltanalytik eingesetzt wurde. Besondere Herausforderungen stellten die Partikelgrößen dar, die bei Sicherheitsanwendungen typischerweise zwischen 2 und 100 Mikrometern liegen. Diese Größenbereiche erforderten umfangreiche Modifikationen der Partikelzuführung, Ionisation und Signalverarbeitung. Photonion entwickelte ein spezielles Skimmer-Düsensystem, das größere Partikel effizient in die Analysechamber des SPMS überführt. Im Vergleich zu herkömmlichen aerodynamischen Linsen, die primär für kleinere Partikel optimiert sind, konnte durch diese Modifikation die Nachweisrate erheblich gesteigert werden.

Parallel dazu wurde ein innovatives Sampling- und Probennahmesystem entwickelt, das in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konzipiert wurde. Dieses System kombiniert eine Druckluft-basierte Partikelaufrichtung mit einem neuartigen Aerosolkonzentrator. Der Konzentrator, basierend auf einem weiterentwickelten Design eines älteren Systems der Universität Rostock, ermöglicht die effiziente

Sammlung und Konzentration von Partikeln aus Luftproben. Diese Kombination aus Sampling- und Konzentrationstechnik gewährleistet, dass auch geringste Mengen an Zielsubstanzen für die SPMS-Analyse zugänglich gemacht werden.

**Einlass mit  
Aerodynamischem  
Linsensystem**



**Einlass mit Düse-  
Skimmer Kombination  
für größere Partikel**



*Abbildung 2 Da aerodynamische Linsen, die in den letzten Jahren aufgrund ihrer Effizienz bei kleinen Partikeln weit verbreitet sind, bei größeren Partikeln im Mikrometer-Bereich erhebliche Verluste verursachen, wurde das SPMS mit einem angepassten Düse-Skimmer-Einlass ausgestattet und optimiert. Die Aerodynamische Linse ist effizient für Partikel 0.1-2.5  $\mu\text{m}$ , für größere Partikel kommt es zu einem zunehmenden Partikelverlust. Die Düse-Skimmer-Kombination ist weniger effizient aber hat eine bessere Transmission für größerer Partikel.*

## Softwareentwicklung und Datenanalyse

Die Entwicklung einer leistungsstarken Software für die Steuerung und Auswertung des SPMS-Systems war ein weiterer zentraler Arbeitsschwerpunkt von Photonion. Ziel war es, eine intuitive Bedienung des komplexen Geräts zu ermöglichen und gleichzeitig eine effiziente Datenverarbeitung zu gewährleisten.

Die entwickelte Software zeichnet sich durch mehrere innovative Funktionen aus. Eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) erlaubt eine einfache Steuerung aller Gerätemodule und zeigt gleichzeitig kritische Systemparameter an, wodurch Ausfälle während des Betriebs minimiert wurden. Besondere Aufmerksamkeit wurde der Echtzeit-Datenverarbeitung gewidmet. Durch die Implementierung selbstlernender Algorithmen auf Basis neuronaler Netzwerke konnten chemische Signaturen gefährlicher Substanzen präzise identifiziert werden. Die Algorithmen, trainiert auf umfangreichen Datenbanken, ermöglichen eine schnelle und zuverlässige Unterscheidung zwischen Zielsubstanzen und Hintergrundpartikeln.

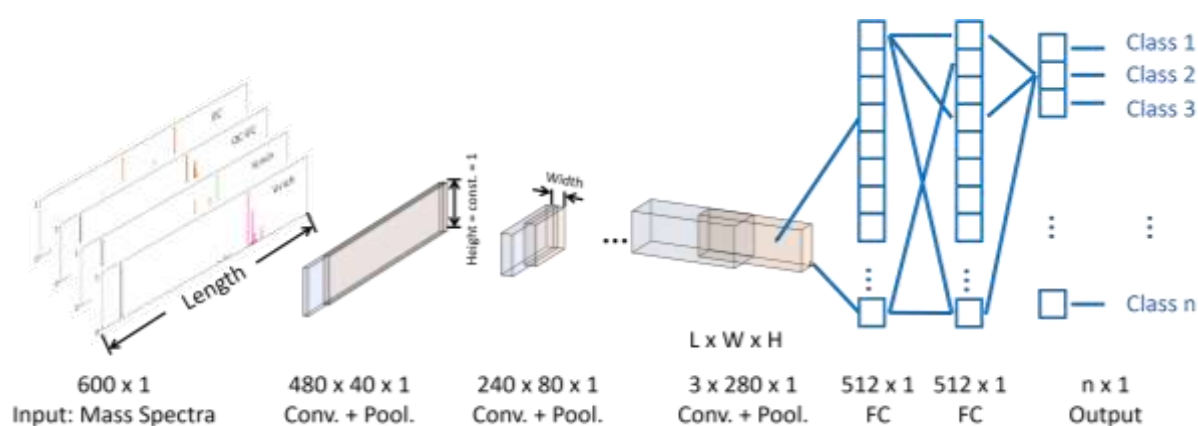


Abbildung 3 Für das Echtzeit-Screening gefährlicher Partikel wurde eine 1D-CNN-Architektur entwickelt, die durch automatische Merkmalsextraktion und schnelle Klassifikation anhand gelabelter Massenspektren eine flexible und präzise Echtzeit-Musteranalyse ermöglicht.<sup>1</sup>

Für das Online-Screening gefährlicher Partikel und die **Echtzeit-Risikobewertung** sind schnelle maschinelle Lernalgorithmen erforderlich, die auf Datenbanken mit gelabelten Partikeln basieren. Im Rahmen des HazarDust-Projekts wurden überwachte Deep-Learning-Ansätze untersucht, um ein automatisches, schnelles und zuverlässiges Screening sowie die Klassifizierung von Partikeln zu ermöglichen. Dabei kamen **Convolutional Neural Networks (CNNs)** zum Einsatz, die sich besonders für die Verarbeitung hochdimensionaler Daten und die Mustererkennung in komplexen Datenstrukturen eignen. Zu den wesentlichen Merkmalen dieses Ansatzes zählen:

- Automatische Extraktion relevanter Merkmale während des Trainingsprozesses,

<sup>1</sup> Wang et al. 2023, IEEE Sensors Letters

- Schnelle und präzise Klassifizierung, unterstützt durch eine Benchmark-Datenbank mit gelabelten Massenspektren,
- Vollständig automatisierte und flexible Echtzeit-Musteranalyse.

Die verwendete **1D-CNN-Architektur** basiert auf normalisierten Massenspektren als Eingabedaten. Dabei übernehmen Faltungsschichten (Convolutional Layers) die Extraktion von Merkmalen innerhalb der Massenspektren, während vollständig verbundene Schichten (Fully Connected Layers) die Klassifikation der Partikel ermöglichen. Dieses Modell gewährleistet eine effiziente und präzise Analyse von Massenspektren in Echtzeit und bietet eine leistungsstarke Grundlage für das Screening sicherheitskritischer Partikel.



Abbildung 4 Steuersoftware in LabVIEW™: Modulare Integration von Hardwarekomponenten und automatisierte Datenanalyse für präzise Echtzeitkontrolle.

Im Rahmen des HazarDust-Projekts wurde die Steuer- und Auswertesoftware auf Basis der Programmiersprache LabVIEW™ entwickelt. Diese zeichnet sich durch ihre modulare und flexible Struktur aus, die eine einfache Anpassung an spezifische Anforderungen sowie eine hardwarenahe Steuerung ermöglicht. Zu den zentralen Funktionen gehört die automatische Erkennung von Leerspektren, Rauschen oder Fehlschüssen, unterstützt durch die Verarbeitung von Partikel-Zeit-Flug-Daten (PToF-Werte). Die Software wurde so gestaltet, dass sie als Subroutine in eine übergeordnete grafische Benutzeroberfläche (GUI) eingebettet werden kann. LabVIEW™ dient dabei sowohl als Hauptsteueroberfläche als auch als Integrationsplattform für Subroutinen und Dynamic Link Libraries (DLLs) aus anderen Programmiersprachen.

Die Software ermöglicht die präzise Steuerung und Synchronisation wichtiger Hardwarekomponenten, darunter Spannungsversorgung, Timing-Systeme,

Druckmessröhren, Delay-Generatoren, Partikelgrößeneinheiten und Datenerfassungsgeräte. Dieses umfassende Softwaredesign gewährleistet eine nahtlose Interaktion aller Systemkomponenten und trägt wesentlich zur Effizienz und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bei. Ein weiteres Feature der Software ist die automatische Fehlerdiagnose, die Bediener rechtzeitig auf mögliche Probleme, wie Verstopfungen im Einlasssystem, hinweist. Diese Verbesserungen trugen wesentlich dazu bei, den Betrieb des Systems auch unter anspruchsvollen Feldbedingungen zu gewährleisten.

### **Laserionisation und Spektrometrie**

Photonion hat in enger Abstimmung mit der Universität Rostock und anderen Partnern verschiedene Laserionisationsverfahren getestet und optimiert. Ziel war es, ein Verfahren zu entwickeln, das sowohl fragmentarme Signaturen erzeugt als auch eine hohe Sensitivität für aromatische Zielstrukturen gewährleistet. Letztlich erwies sich ein Lasersystem mit einer Wellenlänge von 248 nm als besonders geeignet, da es die resonante Ionisation aromatischer Ringstrukturen ermöglicht und so eine klare Differenzierung zwischen Zielsubstanzen und Streckmitteln wie Cellulose oder Zucker gewährleistet.

Neben der Laserdesorption und Ionisation (LDI) wurden auch zweistufige Verfahren erprobt, die die Verdampfung der Zielsubstanzen von Partikeloberflächen mit anschließender Ionisation kombinieren. Diese Verfahren boten jedoch in der Praxis nur einen geringen Mehrwert gegenüber der einstufigen LDI, weshalb der Fokus auf der Optimierung dieser Methode lag.

### **Sampling- und Anreicherungsverfahren**

Eine weitere herausragende Innovation war die Entwicklung eines modularen Sampling-Systems, das Druckluftpulse zur Aufwirbelung von Partikeln nutzt. In Kombination mit einem speziell entwickelten Aerosolkonzentrator konnten selbst kleinste Mengen gefährlicher Substanzen effizient gesammelt und angereichert werden.

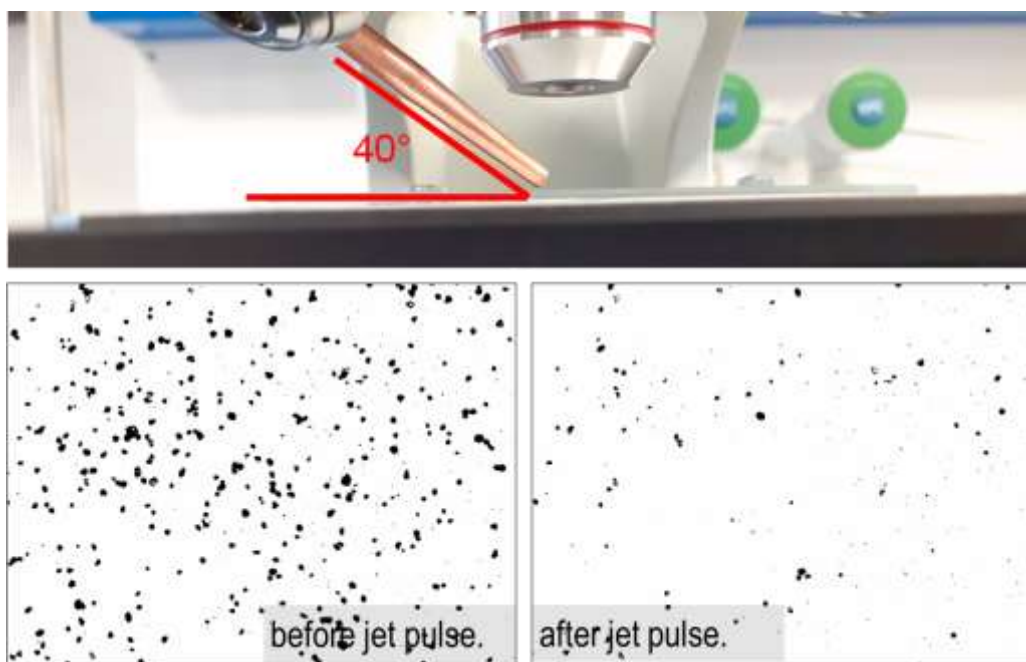


Abbildung 5 Parameters for optimal particle removal from typical surfaces were determined. Various commercially available nozzles were tested. Best results were achieved for hypersonic multijet nozzles which allows the removal and aerosolization of particles down to submicron diameter with high efficiency. From a 300 l/min sampling flow, particles are concentrated in a 1 l/min stream to the SPMS.

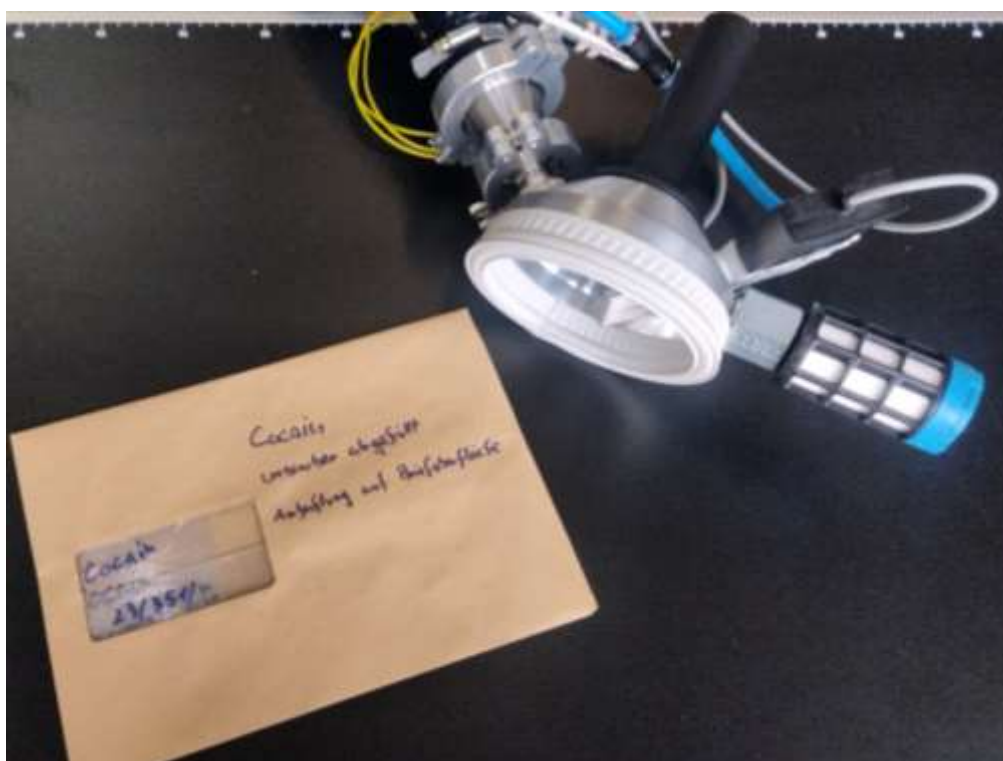


Abbildung 6 Erprobung der Aufwirbelung und Echtzeitanalyse von Stäuben auf kontaminierten Oberflächen im Rahmen der abschließenden Messkampagne in Kevelaer im April 2024

Leistungsstarker Aerosolkonzentrator: Basierend auf einem älteren Design der Universität Rostock entwickelte Photonion einen leistungsstärkeren Konzentrator, der in der Lage ist, Partikel mit einem Durchmesser von bis zu 100  $\mu\text{m}$  zu verarbeiten. Der Konzentrator zeigte eine bis zu 400 % höhere Effizienz bei der Anreicherung relevanter Partikel im Vergleich zu marktüblichen Systemen.



Abbildung 7 Probennahmesystem des Projecktpartners ParteQ bestehend aus der Desorptionseinheit und der Partikelanreicherung

### Laborexperimente mit verschiedenen Betäubungsmitteln

Im Rahmen des HazardDust-Projekts spielten Laborexperimente mit Betäubungsmitteln eine zentrale Rolle, um die Funktionalität und Zuverlässigkeit des Einzelpartikel-Massenspektrometers (SPMS) unter kontrollierten Bedingungen zu evaluieren und weiterzuentwickeln. Diese Experimente wurden genutzt, um die Nachweisgrenzen, die Sensitivität und die Robustheit des Systems gegenüber realen Proben sicherzustellen.

Die Hauptziele der Laborexperimente bestanden darin, die chemischen Signaturen verschiedener Betäubungsmittel in Staubpartikeln zu charakterisieren und die Erkennungsfähigkeit des SPMS-Systems zu optimieren. Dabei lag ein besonderer Fokus auf:

- Der Identifikation charakteristischer Massenspektren für Substanzen wie Kokain, Ketamin, MDMA und Methamphetamin.

- Der Untersuchung des Einflusses von Streckmitteln und Verunreinigungen auf die Erkennbarkeit der Zielsubstanzen.
- Der Validierung der Leistungsfähigkeit des Systems bei komplexen Partikelgemischen.

Die Experimente wurden unter Sicherheitsvorkehrungen in einem speziell eingerichteten Gefahrstofflabor durchgeführt, das mit einer leistungsstarken Absauganlage und Schutzvorrichtungen ausgestattet war. Die verwendeten Schutzmaßnahmen und Substanzen wurden in Zusammenarbeit mit dem Bundeskriminalamt (BKA) und Zollbehörden bereitgestellt.



*Abbildung 8 Experimenteller Aufbau an der Uni Rostock für die Laborversuche mit Drogenstäuben. Gefahrstoffarbeitsplatz und SPMS-System sind erkennbar.*

Die Staubpartikel wurden durch gezielte Zerkleinerung und Verteilung der Substanzen erzeugt, gefolgt von einer Aufwirbelung mittels Druckluftpulsen, um die Partikel in die Probennahmeeinheit des SPMS zu überführen. Die Massenspektren wurden in Echtzeit erfasst, verarbeitet und analysiert. Dabei wurden verschiedene Mischungen

von Reinsubstanzen mit Streckmitteln wie Cellulose, Phenacetin und Saccharose untersucht.

Die Experimente bestätigten die Fähigkeit des SPMS-Systems, eine Vielzahl relevanter Betäubungsmittel zuverlässig zu detektieren:

**Charakteristische Signaturen:** Für alle getesteten Substanzen konnten eindeutige Massenspektren erfasst werden, häufig mit Signalen des intakten Moleküls und spezifischer Fragmente. Dies erlaubte eine präzise Identifikation der Zielsubstanzen, selbst bei Mischungen mit Streckmitteln.

**Robustheit gegenüber Streckmitteln:** Die Mehrheit der Streckmittel zeigte nur minimale Interferenzen mit den Signaturen der Zielsubstanzen. Insbesondere bei aromatischen Molekülen, wie sie in vielen Betäubungsmitteln vorkommen, ermöglichten resonante Anregungen durch den verwendeten UV-Laser (248 nm) eine hohe Erkennungsrate.

**Partikelgrößen:** Typische Partikelgrößen lagen im Bereich von 2–10 µm. Die Experimente zeigten, dass sowohl Einzelpartikel als auch Agglomerate zuverlässig analysiert werden konnten.

Während der Experimente wurden auch Herausforderungen deutlich, insbesondere der Einfluss von Partikelgrößen und -zusammensetzungen auf die Überführung ins SPMS. Größere Partikel oder Mischungen aus Reinsubstanzen und Streckmitteln zeigten unterschiedliche aerodynamische Eigenschaften, die den Proben transfer beeinflussten. Durch die Anpassung der Druckluftpuls-Parameter und die Optimierung des Partikeltransfers konnte dieses Problem erfolgreich gelöst werden.

Die erfolgreichen Laborexperimente zeigen das Potenzial der SPMS-Technologie zur sicheren Detektion von Betäubungsmitteln in realen Szenarien. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für den Einsatz in Zoll- und Sicherheitskontrollen sowie in der forensischen Analytik. Ein besonderer Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten könnte die Erweiterung auf synthetische Opioide und hochkomplexe Substanzgemische sein, um den zunehmenden Anforderungen in der zivilen Sicherheit gerecht zu werden.

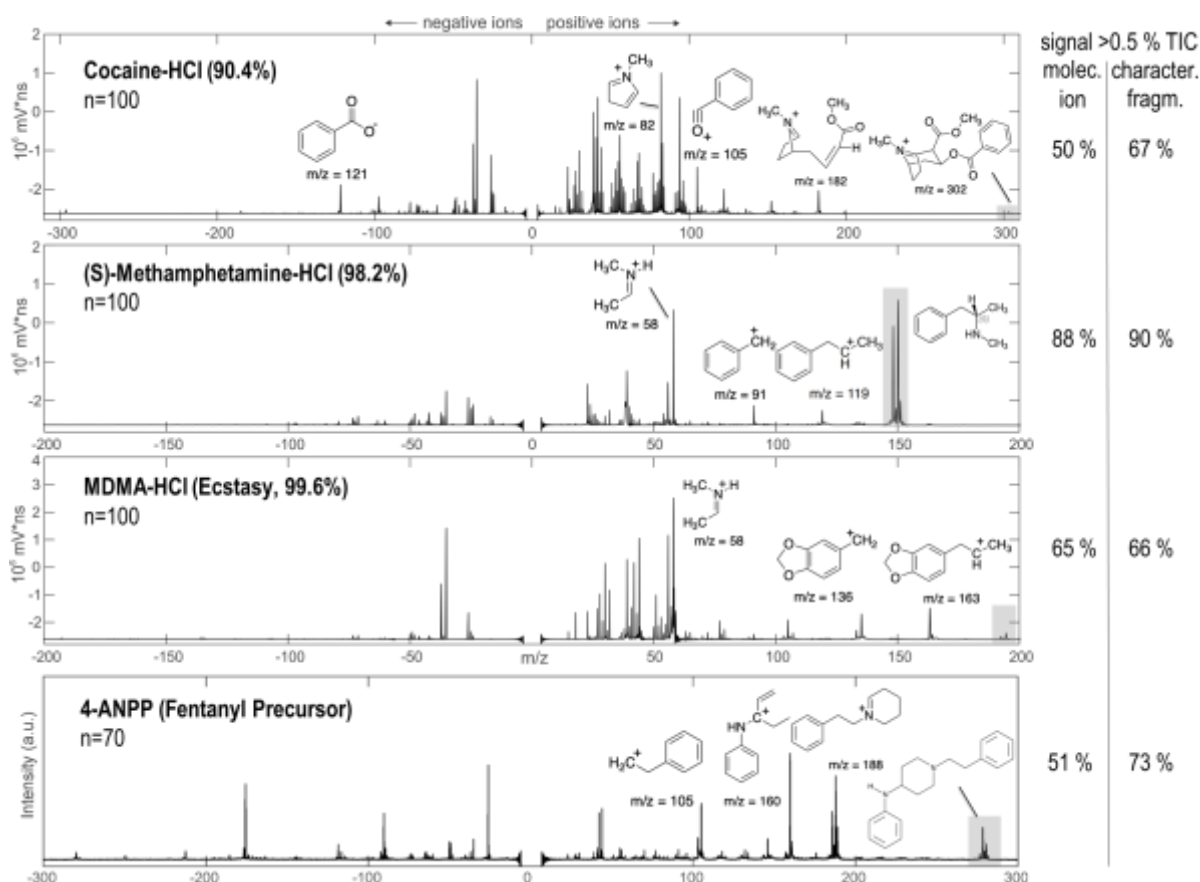


Abbildung 9 Mittelwertspektren von Betäubungsmitteln: Charakteristische Fragmente und intakte Molekülionen wurden zuverlässig detektiert, wobei der Großteil der Partikel Signaturen aufwies, die für die Mustererkennung ausreichend sind – einschließlich des Fentanyl-Vorläufers 4-ANPP. <sup>2</sup>

## Messkampagnen und Praxistests

Die entwickelten Technologien wurden in mehreren Laborexperimenten und Feldtests umfassend validiert. Besonders hervorzuheben sind zwei große Messkampagnen:

### Messkampagne am DHL-Hub Leipzig:

Im November 2023 wurde das SPMS-System unter realen Bedingungen im Kontrollbereich des Deutschen Zolls in der Halle des DHL-Hubs getestet. Dabei wurden Partikel aus über 400 Sendungen analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass das System in der Lage war, Substanzen wie Kokain und Ketamin zuverlässig zu detektieren, ohne dass es zu falsch-positiven Ergebnissen kam. Dies belegt die

<sup>2</sup> AAAR Conference Portland /Oregon, Oct. 2023

Praxistauglichkeit des Systems und seine Robustheit unter komplexen Umgebungsbedingungen.



*Abbildung 10 Einsatz des SPMS-Systems im DHL-Hub: Erfolgreiche Analyse von Partikeln aus über 400 Sendungen, mit zuverlässiger Detektion von Substanzen wie Kokain und Ketamin unter realen Bedingungen, ohne falsch-positive Ergebnisse.*

### **Messkampagne im BKA-Trainingszentrum Kevelaer:**

Im Frühjahr 2024 fanden im Rahmen der verlängerten Projektlaufzeit Experimente in einem ehemaligen Drogenlabor in Kevelaer statt, das heute als Ausbildungsstätte des BKA genutzt wird. Der Fokus lag auf der Untersuchung von Staubproben mit Rückständen früherer Drogenproduktion sowie auf der Analyse von Abluft und Staubemissionen funktionsfähiger Tablettiermaschinen. Ergänzend wurden Oberflächenproben genommen und die Aufwirbelung kontaminierter Stäube mithilfe gepulster Druckluft untersucht. Eine abschließende Auswertung und finale Publikation der Messdaten, ist bis November 2024 noch nicht vollständig abgeschlossen. Die ersten Ergebnisse zeigten eine hohe Empfindlichkeit und Spezifität für Zielsubstanzen, selbst in anspruchsvollen Umgebungen mit hoher Staubbelastung.



Abbildung 11 Experimentelle Aufbauten im ehemaligen Drogenlabor: Das SPMS-System mit Desorptionsprobenahme und Anreicherungseinheit zur Partikelanalyse von desorbierten Partikeln von Oberflächen sowie die Tablettiermaschine (links) zur Untersuchung von Staubemissionen.

## Innovative Erkenntnisse und technologische Meilensteine

Das HazarDust-Projekt, insbesondere das Teilvorhaben der Photonion GmbH, konnte mehrere innovative technologische Fortschritte und wissenschaftliche Erkenntnisse erzielen, die sowohl die praktische Anwendbarkeit als auch die technologische Basis der Einzelpartikel-Massenspektrometrie (SPMS) deutlich erweiterten. Diese Fortschritte decken ein breites Spektrum von Hardware- und Softwareentwicklungen bis hin zu Erkenntnissen über die physikalischen und chemischen Eigenschaften der untersuchten Zielsubstanzen ab. Flexibilität des Systems: Das modulare Design ermöglicht eine Anpassung an unterschiedliche Szenarien, von der Gepäckkontrolle in Flughäfen bis hin zur Überwachung von Umgebungsstaub in Drogenlaboren.

## 1. Weiterentwicklung der SPMS-Technologie

Die ursprüngliche SPMS-Technologie, die vor allem in der Umweltforschung Anwendung fand, wurde grundlegend angepasst, um sicherheitskritische Substanzen in Staubpartikeln nachzuweisen. Besonders die Anforderungen an die Detektion größerer Partikel (2–100  $\mu\text{m}$ ) sowie die Herausforderung, toxische Substanzen in komplexen Staubgemischen zu identifizieren, erforderten umfassende Modifikationen.

### **Optimierung der Ionenoptik:**

Verbesserte Massenauflösung: Durch Anpassungen der Ionenoptik und die Implementierung verzögerter Ionenextraktion konnten auch bei größeren Partikeln exakte Massenspektren generiert werden.

Eine der bedeutendsten Entwicklungen war die Implementierung der verzögerten Ionenextraktion. Durch die gezielte zeitliche Steuerung der Ionenauslenkung konnten störende Effekte, wie hohe kinetische Energien der Ionen aufgrund Coulomb-Interaktionen, reduziert werden. Diese Modifikation führte zu einer signifikanten Verbesserung der Massenauflösung und ermöglichte eine präzisere Analyse größerer Partikel.

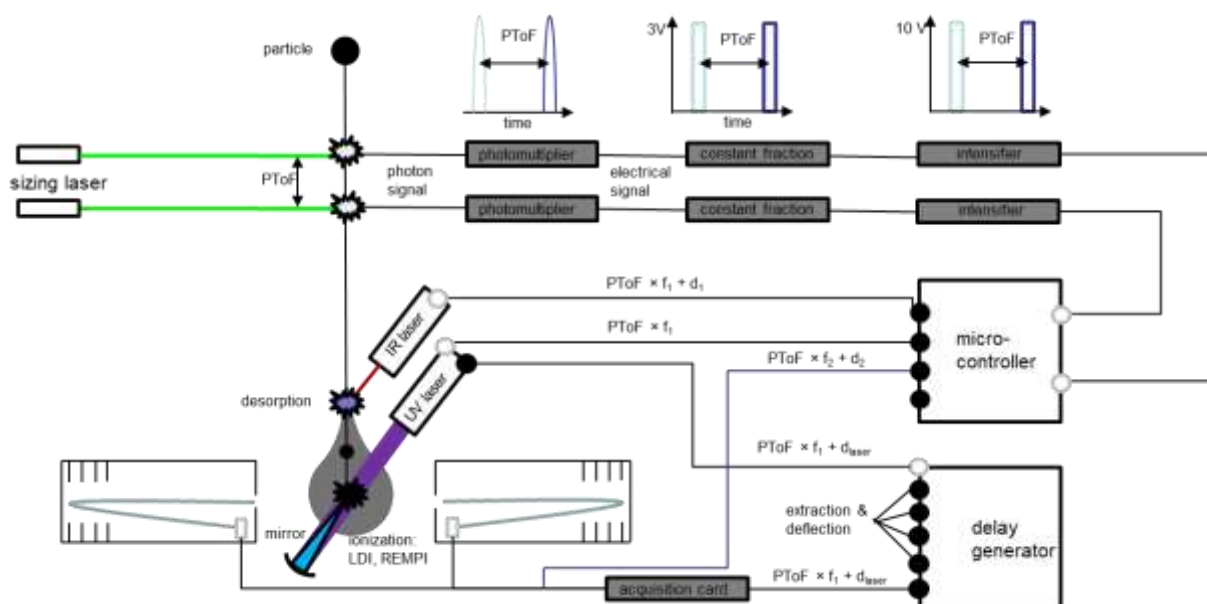


Abbildung 12 Schematische Darstellung optimierte SPMS-Technologie: PToF-Zuordnung zur Bestimmung von Geschwindigkeit und Partikelgröße, überarbeitete Hochspannungsnetzteile, Delayed Extraction und BN-Gates für präzise Partikelanalyse.

Simulationsstudien mit der SIMION-Software unterstützten die Anpassung der Geometrie und der elektrischen Felder der Ionenoptik, wodurch auch der Nachweis empfindlicher Zielmoleküle optimiert werden konnte.

## **2. Innovationen in der Laserionisation**

Photonion leistete wichtige Beiträge zur Weiterentwicklung der Laserionisationstechniken, die für die SPMS-Technologie von zentraler Bedeutung sind:

### ***Optimierung der Wellenlänge und Pulsparameter:***

Die Wahl einer Laserwellenlänge von 248 nm (KrF-Excimerlaser) stellte sich als optimal heraus, da diese resonante Anregung aromatischer Strukturen ermöglicht. Dies führte zu klaren chemischen Signaturen der Zielsubstanzen, während Interferenzen mit Streckmitteln minimiert wurden.

Eine experimentelle Untersuchung der Pulsenergie und Strahlqualität ermöglichte die Entwicklung eines universellen Laserionisationsschemas, das sowohl für einfache als auch komplexe Substanzgemische geeignet ist.

### ***Zweistufige Ionisationsverfahren:***

Zweistufige Verfahren, bei denen Moleküle zunächst von der Partikeloberfläche verdampft und anschließend ionisiert werden, wurden umfassend getestet. Während diese Verfahren in der Grundlagenforschung vielversprechende Ergebnisse lieferten, zeigte sich in praktischen Anwendungen nur ein geringer Vorteil gegenüber der einfacheren Laserdesorption/Ionisation (LDI). Daher konzentrierte sich Photonion auf die Optimierung der einstufigen Verfahren.

## **3. Flexibles Sampling für unterschiedliche Einsatzszenarien:**

Das Sampling-System wurde so konzipiert, dass es sich an verschiedene Einsatzorte anpassen lässt, von der Gepäckkontrolle in Flughäfen bis hin zu kontaminierten Oberflächen in ehemaligen Drogenlaboren. Feldtests zeigten, dass das System in der Lage ist, Partikel auch in staubigen Umgebungen mit hoher Hintergrundbelastung zuverlässig zu sammeln.

#### 4. Selbstlernende Algorithmen und Datenbanken

Ein zentraler technologischer Fortschritt war die Entwicklung intelligenter Datenverarbeitungslösungen:

##### ***Echtzeit-Mustererkennung:***

Photonion implementierte Algorithmen auf Basis neuronaler Netzwerke, die in der Lage sind, chemische Signaturen in Echtzeit zu analysieren und zu klassifizieren. Die Algorithmen nutzen eine umfassende Datenbank mit typischen Massenspektren relevanter Substanzen, die während des Projekts erstellt wurde.

##### ***Datenbankgestützte Mustererkennung:***

Aufbau einer umfangreichen Datenbank charakteristischer Massenspektren, die als Grundlage für maschinelles Lernen und die automatisierte Identifikation von Substanzen dient.

##### ***Automatische Fehlerdiagnose:***

Die Software kann potenzielle Fehlerquellen wie Verstopfungen im Einlasssystem oder Instabilitäten in der Laserpulsenergie frühzeitig erkennen und den Bediener warnen.

#### 5. Nachweis gefährlicher Substanzen in komplexen Umgebungen

Feldtests und Messkampagnen bestätigten die Leistungsfähigkeit des Systems auch unter schwierigen Bedingungen:

##### ***Kokain- und Ketaminfunde im DHL-Hub:***

In einer realen Anwendungssituation im DHL-Hub in Leipzig konnte das System erstmals Kokain und Ketamin in Sendungen nachweisen. Die chemischen Signaturen waren so eindeutig, dass keine falsch-positiven Ergebnisse festgestellt wurden, selbst bei hoher Hintergrundpartikelbelastung.

##### ***Staubanalysen im BKA-Trainingszentrum:***

Die erfolgreiche Analyse von Emissionen aus Tablettiermaschinen und kontaminierten Oberflächen unterstreicht die Vielseitigkeit des Systems.

## Zusammenfassung der Meilensteine

- Entwicklung eines transportablen, modularen SPMS-Demonstrators.
- Optimierung der Ionenoptik und Einführung eines Skimmer-Düsensystems für größere Partikel.
- Implementierung eines universellen Laserionisationsschemas bei 248 nm.
- Aufbau einer umfassenden Datenbank für die Mustererkennung.
- Nachweis der Praxistauglichkeit in realen Szenarien.
- Die Ergebnisse von Photonion bilden eine exzellente Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen der Technologie. Sie eröffnen neue Möglichkeiten für sicherheitskritische Anwendungen und unterstreichen das Potenzial der SPMS-Technologie als effektives Werkzeug zur Detektion gefährlicher Substanzen.

## Beitrag zur zivilen Sicherheit und zukünftige Perspektiven

Das von Photonion entwickelte System stellt einen wichtigen Fortschritt für die Detektion toxischer Substanzen in sicherheitskritischen Bereichen dar. Es verbessert nicht nur die Arbeitssicherheit in Logistik- und Zollumgebungen, sondern eröffnet auch neue Einsatzmöglichkeiten in der forensischen Analytik und im Umweltschutz.

Die Technologie bietet zudem großes Potenzial für zukünftige Weiterentwicklungen, etwa in Richtung automatisierter Kontrollsysteme für Gepäckbänder oder der Detektion synthetischer Opioide. Die Ergebnisse von HazarDust bilden eine solide Grundlage für die Weiterführung dieser Arbeiten in nachfolgenden Forschungsprojekten.

## 5. Zusammenfassung & Ausblick

Das Projekt HazarDust hat gezeigt, dass die Einzelpartikel-Massenspektrometrie (SPMS) eine leistungsstarke und innovative Technologie zur Echtzeitdetektion toxischer Substanzen darstellt. Insbesondere das von der Photonion GmbH entwickelte SPMS-System konnte als modularer und transportabler Demonstrator erfolgreich realisiert werden. Die umfassenden technischen und wissenschaftlichen Fortschritte haben die Grundlage für ein praxistaugliches Gesamtsystem geschaffen, das in sicherheitskritischen Anwendungen neue Maßstäbe setzt.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Projektziel, ein System zu entwickeln, das sicherheitsrelevante Substanzen in Staubpartikeln zuverlässig und effizient erkennt, wurde vollumfänglich erreicht. Alle technologischen Kernkomponenten, einschließlich Sampling, Partikeltransfer, Ionisation, Datenverarbeitung und Systemintegration, wurden erfolgreich umgesetzt und optimiert.

### Technologische Highlights:

- Entwicklung eines effizienten Sampling- und Probennahmesystems, das Partikel unterschiedlichster Größe sicher erfasst und konzentriert.
- Einführung eines optimierten Skimmer-Düsensystems, das größere Partikel mit hoher Effizienz in das SPMS-System überführt.
- Einsatz eines universellen Laserionisationsschemas, das klare chemische Signaturen erzeugt und Interferenzen mit Streckmitteln minimiert.
- Implementierung intelligenter Datenverarbeitungslösungen, die chemische Muster in Echtzeit erkennen und klassifizieren können.

### Praxisrelevanz und Beitrag zur zivilen Sicherheit:

In umfangreichen Laborexperimenten und realen Feldtests, wie am DHL-Hub Leipzig und im BKA-Trainingszentrum, wurde die Praxistauglichkeit des Systems eindrucksvoll demonstriert. Das System erwies sich als robust und zuverlässig, auch in Umgebungen mit hoher Hintergrundbelastung und komplexen Aerosolen. Die Technologie bietet erhebliches Potenzial, die Sicherheitsstandards in Logistikzentren,

Flughäfen und anderen sicherheitskritischen Bereichen zu verbessern. Durch die Echtzeitfähigkeit des Systems wird die Arbeitssicherheit für Zoll- und Logistikpersonal erheblich erhöht, indem Risiken durch toxische Substanzen minimiert werden.

### **Ausblick und zukünftige Entwicklungen**

Die Ergebnisse des HazardDust-Projekts markieren einen bedeutenden Schritt in der Entwicklung fortschrittlicher Detektionstechnologien. Dennoch gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die SPMS-Technologie weiterzuentwickeln und ihre Anwendungsfelder zu erweitern.

#### ***Automatisierung und Skalierung:***

Ein nächster logischer Schritt ist die Automatisierung des Sampling-Systems für den Einsatz in Hochdurchsatzumgebungen, wie Gepäckbändern an Flughäfen oder Paketzentren. Hierbei könnten automatische Druckluftpuls- und Absaugsysteme integriert werden, um die Detektion noch effizienter zu gestalten. Die Skalierung des Systems für größere Luftvolumina oder spezialisierte Einsatzszenarien wie Grenzkontrollpunkte könnte die Flexibilität und den Nutzen der Technologie weiter erhöhen.

#### ***Detektion neuer Substanzklassen:***

Die Erweiterung der Datenbank und die Entwicklung angepasster Laserionisationsmethoden könnten die Erkennung synthetischer Opiode und anderer gefährlicher Substanzen weiter verbessern. Besonders für Substanzen wie Fentanyl und dessen Derivate besteht ein hoher Bedarf an zuverlässigen Nachweisverfahren. Neben chemischen Substanzen könnte die SPMS-Technologie für die Analyse biologischer Aerosole, wie luftgetragener Pathogene, angepasst werden.

#### ***Optimierung der Datenanalyse:***

Die Integration moderner Algorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens könnte die Mustererkennung weiter beschleunigen und verbessern. In Kombination mit Echtzeit-Mustererkennung könnten Warnsysteme entwickelt werden, die sofortige Alarme bei der Detektion gefährlicher Substanzen auslösen.

## **Kommerzialisierung und Marktanwendungen:**

Die Überführung der Ergebnisse in marktreife Produkte bietet ein großes Potenzial. Insbesondere in Zusammenarbeit mit Logistikunternehmen, Flughäfen und Sicherheitsbehörden könnten maßgeschneiderte Lösungen entwickelt werden. Der Aufbau von Partnerschaften mit internationalen Organisationen könnte die Technologie global etablieren und den Export fördern.

## **Fazit**

HazarDust hat eindrucksvoll bewiesen, dass die SPMS-Technologie für die zivile Sicherheit eine neue Dimension der Detektion ermöglicht. Das Projekt hat nicht nur wissenschaftliche und technologische Meilensteine erreicht, sondern auch den Weg für praktische Anwendungen in sicherheitskritischen Umgebungen geebnet.

Die im Projekt entwickelten Systeme und Technologien bieten ein enormes Potenzial, um die Sicherheitsstandards im Umgang mit gefährlichen Substanzen nachhaltig zu verbessern. Sie leisten damit nicht nur einen Beitrag zum Schutz von Personal und Infrastruktur, sondern eröffnen auch neue wirtschaftliche Perspektiven für die beteiligten Partner. Mit den erreichten Ergebnissen ist die Grundlage gelegt, die SPMS-Technologie in zukünftigen Projekten weiterzuentwickeln und ihre Anwendungsbreite zu erweitern.

## 6. Publikationen & Poster

Das HazarDust-Projekt hat zu mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen geführt, die die erzielten Ergebnisse dokumentieren und weiterführende Einblicke in die technologischen und wissenschaftlichen Entwicklungen bieten. Die folgenden Arbeiten sind im Rahmen des Projekts entstanden oder befinden sich in der Vorbereitung:

### Veröffentlichte Artikel:

Wang, G., Ruser, H., Schade, J., Passig, J., Adam, T., Dollinger, G., and Zimmermann, R.: Machine learning approaches for automatic classification of single-particle mass spectrometry data, *Atmos. Meas. Tech.*, 17, 299–313, 2024.

J. Passig et al., "Real-time Detection of Chemical Compounds in Dust Particles Using a Single-Particle Mass Spectrometer and its Potential for Safety Applications," 2023 IEEE SENSORS, Vienna, Austria, 2023

Passig, Johannes, Thomas Adam, and Ralf Zimmermann. "Unraveling Pollutant Distributions on the Single-Particle Level: A New Aspect in Air Pollution Research.", *BUNSEN-MAGAZIN*, 24. JAHRGANG, 2/2022

### Konferenzbeiträge und Tagungsabstracts:

Passig, J. et al.: " Real-Time Detection of Hazardous Dusts from Narcotics and Explosives using Single-Particle Mass Spectrometry." Talk at PITTCAN, 2025.

Wang, G. et al.: " Automatic Classification of Ship Emissions using Single-Particle Mass Spectrometry and Deep Learning." Presented at the European Aerosol Conference, 2024.

Ehlert, S. et al.: "Towards the Real-Time Detection of Hazardous Dusts from Narcotics and Explosives." Poster Presentation at the International Mass Spectrometry Conference, 2024.

Zimmermann, R. et al.: " Mass Spectrometry of Individual Aerosol Particles Using Resonance Effects in Laser Ionization." Talk at PITTCAN, 2024.

Passig, J. et al.: "Towards the Real-Time Detection of Hazardous Dusts from Narcotics and Explosives." Poster Presentation at AAAR Conference, 2023.

Ruser, H. et al.: " Real-time detection of chemical compounds in dust particles using a single particle mass spectrometer and its potential for safety applications." Talk at the IEEE Sensors Conference, 2023.

Zimmermann, R. et al.: " Single Particle Mass Spectrometer (SPMS) as a Tool for Real-Time Detection of Safety-Related Substances in dust particles." Talk at PITTCON, 2023.

Zimmermann, R. et al.: " Real-Time Detection of Safety-Related Substances in Dust Particles using a Single Particle Mass Spectrometer." Talk at Virtual PITTCON, 2022.

Walte, A. et al.: " Real-Time Detection of Safety-Related Substances in Dust Particles using a Single Particle Mass Spectrometer." Talk at the International Mass Spectrometry Conference, 2022.

#### **Preprints und in Vorbereitung befindliche Artikel:**

Hakkim, A., Schmidt, M., Zimmermann, R. et al.: "Novel Sampling Techniques for Hazardous Dust Analysis." Analytical Methods (in Vorbereitung).

Schmidt, M., Hakkim, H., Anders, L., Kalamašņikovs, A., Kröger-Badge, T., Irsig, R., Graf N., Kelnberger R., Passig J. & Zimmermann, R. (2024). A solid-state IR laser for two-step desorption/ionization processes in single-particle mass spectrometry. EGUsphere, 2024, 1-23.