

Ergebnisbericht

Potenzialanalyse kompakter Spürroboter für Einsatzkräfte

Projekt FO999914213

KIRAS F&E-Dienstleistungen (FED) 2023

erstellt von

Technische Universität Graz, Institute of Software Engineering and Artificial Intelligence
Disaster Competence Network Austria - Kompetenznetzwerk für Katastrophenprävention
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH
Landesfeuerwehrverband Oberösterreich
Landesfeuerwehrverband Steiermark

Das Projekt Spürroboter wurde gefördert bzw. finanziert im Rahmen des Sicherheitsforschungs-Förderprogramms KIRAS durch das Bundesministerium für Finanzen und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft abgewickelt.

Zusammenfassung

Die Erkennung gefährlicher Stoffe in Notfallsituationen ist eine entscheidende, aber gefährliche Aufgabe für Einsatzkräfte. Mobile Sensorroboter können dieses Risiko verringern. Dennoch sind einsatzbereite Systeme selten. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse einer Forschungsaktivität vor, die einen einsatzfähigen Spürroboter zur Erkennung gefährlicher Stoffe bereitstellen sollen. Besonderes Augenmerk wird auf die Integration in den Feuerwehrbetrieb gelegt, indem Standardarbeitsanweisungen bereitgestellt und die Abhängigkeit von GNSS oder externer Kommunikationsinfrastruktur beseitigt werden. Durch die Verwendung handelsüblicher Komponenten für Mobilität und Sensorik, kombiniert mit integrierter Datenverarbeitung, Kommunikation und Visualisierung, ermöglicht das System eine ferngesteuerte Umweltüberwachung in Echtzeit. Erste Feldtests mit österreichischen Feuerwehreinheiten zeigen vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich Mobilität, Benutzerfreundlichkeit und Einsatzwirksamkeit. Das Projekt zielt darauf ab, das „Tal des Todes“ zwischen Forschung und praktischem Einsatz durch praxistaugliches Design, die Bereitstellung von Schulungskonzepten und realistische Validierung zu überbrücken.

Motivation

Im Juni 2023 führte eine Tiefbohrung in Ansfelden, Österreich, zum unbeabsichtigten Austritt von Gas aus einem natürlichen Gasvorkommen. Obwohl das Vorhandensein von Gas zuvor mit tragbaren Detektionsgeräten bestätigt worden war, wurde die Messung manuell innerhalb der Gefahrenzone durchgeführt, wodurch das Einsatzpersonal einem erheblichen Risiko ausgesetzt war. Die Situation eskalierte zu einer Explosion in einem nahegelegenen Wohngebäude (siehe Abbildung 1). Bei einem weiteren Vorfall im Oktober 2023 wurden etwa 1.000 Liter Salpetersäure aufgrund eines technischen Defekts an einem Industriestandort in Trieben, Österreich, versehentlich freigesetzt. Der Gefahrstoff musste von speziell ausgebildeten Feuerwehrleuten, die mit Vollschutzanzügen und umluftunabhängigen Atemschutzgeräten ausgestattet waren, eingedämmt und beseitigt werden.



Abbildung 1 Gasexplosion nach Tiefbohrarbeiten in Ansfelden, Österreich.

In beiden Fällen hätte ein mobiler Spürroboter für Gefahrstoffe während der Untersuchung wertvolle Zeit gespart, da die Feuerwehrleute einen Schutzanzug anlegen und die Messungen unter solch schwierigen und gefährlichen Bedingungen durchführen mussten. Insbesondere hätten die Einsatzkräfte den Gefahrenbereich nicht betreten und ihr Leben riskieren müssen. Gefährliche Stoffe stellen eine Gefahr für Leben und Gesundheit der Einsatzkräfte dar. Um die Konzentration für die Gefahrenbewertung zu messen, verwenden Feuerwehren verschiedene Handmessgeräte, die von einfachen CO-Warnmeldern bis hin zu komplexen Multisensor-Messgeräten reichen, deren Bedienung oft nur mit einer speziellen Schulung möglich ist. Der übliche manuelle Messvorgang setzt Einsatzkräfte der Gefahrenzone aus und erfordert das zeitaufwändige Anlegen von Schutzanzügen. Mobile Robotersysteme stellen hier eine Lösung dar, um das Risiko für das Personal zu verringern und die Effizienz zu steigern.

Es gibt einen umfangreichen Forschungsbestand im Bereich von Robotersystemen zur Unterstützung von Einsatzkräften. Obwohl in Labors oder experimentellen Evaluierungen bemerkenswerte Ergebnisse erzielt wurden, sind reale Einsätze im Rahmen von Missionen, insbesondere solche, die von Einsatzkräften selbst durchgeführt werden, abgesehen von gezielten Versuchen selten [1]. Die Gründe dafür sind vielfältig, wie z. B. zu komplexe und empfindliche Systeme, für deren Betrieb Spezialisten aus der Wissenschaft benötigt werden, Forschungsprototypen, die nicht für den Feldeinsatz ausgelegt sind, oder starke Annahmen hinsichtlich der vorhandenen Infrastruktur, wie z. B. Kommunikation oder GNSS. Darüber hinaus gibt es

das „Tal des Todes“, in dem es an Ressourcen mangelt, um vielversprechende Forschungsergebnisse in praxistaugliche Produkte umzusetzen, die einen echten Mehrwert für die Einsatzkräfte bieten [2].

Um Einsatzkräften wie z.B. Feuerwehrleuten einen echten Mehrwert zu bieten, wurde in Österreich eine anwendungsorientierte Studie ins Leben gerufen, um einen im Einsatz einsetzbaren Spürroboter für Gefährliche Stoffe für einen definierten, eng gefassten Anwendungsfall zu entwickeln, der sich nahtlos in reale Einsätze integrieren lässt. Zur Erreichung dieses Ziels werden drei Kernaufgaben durchgeführt:

- Bereitstellung eines kostengünstigen und benutzerfreundlichen Spürroboters, der ohne externe Infrastruktur wie GNSS, WLAN oder Mobilfunknetz betrieben werden kann. Obwohl Roboter in Kombination mit Schadstoffmessgeräten mittlerweile in professionellen und industriellen Feuerwehren verfügbar sind, sind sie in der Regel schwer, teuer und komplex in der Bedienung, was bisher den breiten Einsatz solcher Systeme verhindert hat. Benötigt werden Systeme, die mit den Drohnen aus dem Consumer-Bereich vergleichbar sind, die auf Knopfdruck gestartet werden können, innerhalb weniger Sekunden einsatzbereit sind und mit minimalem Schulungsaufwand über Smartphone oder Tablet gesteuert werden können.
- Entwicklung von Taktiken und Schulungen für Spürroboter. Es werden plausible und realistische Einsatzszenarien identifiziert und geeignete Taktiken und Abläufe für den Einsatz solcher Assistenzroboter entwickelt. Darüber hinaus muss ein Schulungskonzept, vergleichbar mit der Drohnenausbildung der österreichischen Einsatzorganisationen, das Technologie, Recht und Taktik berücksichtigt, für die breite Einführung des neuen Einsatzmittels entwickelt werden.
- Beschaffung und Instandhaltung. Es werden entsprechende funktionale Leistungsspezifikationen erarbeitet, um die systematische Beschaffung geeigneter Ausrüstung zu ermöglichen. Zudem müssen entsprechende Vorgaben für die Inspektion und Instandhaltung der Systeme erarbeitet werden, um die ständige Verfügbarkeit der Einsatzrüstung zu gewährleisten.

Im Rahmen der Studie wird ein Prototyp mit hohem TRL (Level 7 oder höher) unter Verwendung handelsüblicher Komponenten (Roboterplattform, Sensoren, Rechner und Schnittstellen) entwickelt. Die Feldtests werden in zwei Phasen durchgeführt: zunächst Validierung mit Berufsfeuerwehrleuten in einer kontrollierten Umgebung, erfolgt von einer groß angelegten Evaluierung während zweier Katastrophenschutzübungen mit Freiwilligen Feuerwehren. Dies wird zu umsetzbaren Empfehlungen für die landesweite Einführung von robotergestützten Spürsystemen im Feuerwehriebetrieb führen. Die erste Validierung fand Ende Juli 2025 im Feuerwehr-Ausbildungszentrum in Lebring, Österreich, statt, gefolgt von zwei groß angelegten Notfallübungen in Industrieunfall-Szenarios. Eine im September 2025 in der Steiermark und eine im Februar 2026 in Oberösterreich.

Im weiteren Verlauf dieses Berichts werden wir die entwickelten Anforderungen, das umgesetzte Systemdesign, die Pläne für die Bewertung sowie detaillierte Ergebnisse zur Validierung und zu den Feldübungen vorstellen.

Systemanforderungen

In [3] definiert der Österreichische Bundesfeuerwehrverband die Taktik im Brandbekämpfungswesen wie folgt: „Einsatz Taktik ist die Lehre vom geplanten und zielgerichteten Einsatz der verfügbaren Kräfte und Mittel. Sie soll sicherstellen, dass ein Einsatzziel mit effizienten Mitteln innerhalb einer angemessenen Zeit erreicht wird, unter Berücksichtigung der Art und des Ausmaßes der Gefahr sowie größtmöglicher Sicherheit.“ Weiterhin definiert er: „Einsatztechnik als sinnvolle Nutzung und korrektes Verhalten im

Umgang mit der Ausrüstung.“ Auf dieser höchsten Abstraktionsebene scheinen Taktik und Technik voneinander unabhängig zu sein, was jedoch nicht zutrifft. In der Praxis wendet eine bestimmte Taktik eine bestimmte Technik an, um das übergeordnete Einsatzziel zu erreichen. Aus taktischer Sicht muss die Technik mit dem taktischen Rahmen übereinstimmen, um das Ziel zu erreichen. Aus technologischer Sicht ermöglicht eine verbesserte Technologie einen verfeinerten Ansatz, der besser mit der obigen Definition übereinstimmt (d. h. das Ziel zu erreichen, effizienter zu arbeiten und die Sicherheit zu gewährleisten usw.). Diese grundlegende Wechselbeziehung ist die treibende Kraft für die gemeinsame Entwicklung von Taktik und Technologie bei Feuerwehreinsätzen. Daher ist es sinnvoll, zunächst eine bestehende Taktik anzupassen, bevor die vorgeschlagene Technologie entwickelt wird. Nach der Entwicklung werden im Praxiseinsatz sowohl die angepasste Taktik als auch die neue Technologie getestet. Die Testergebnisse führen entweder zum nächsten gemeinsamen Entwicklungszyklus oder zeigen eine zufriedenstellende Anwendung, die bei den Feuerwehren eingeführt werden kann.

Taktik

Daher beginnen wir mit der Taktik, um technologische Anforderungen abzuleiten. [3] definiert darüber hinaus eine Vorlage für ein taktisches Rahmenwerk, das für zehn im Feuerwehrwesen übliche Standardeinsätze instanziiert wird, z. B. Hausbrände oder CBRNe-Ereignisse. Gemäß der Vorlage werden während eines bestimmten Einsatzes mehrere verschiedene Messungen durchgeführt. Im Einzelnen definiert die Vorlage für jede Messung, wie sie vorbereitet wird, wie sie durchgeführt wird und unter welchen Bedingungen sie beendet wird. Jeder dieser drei Teile beschreibt Maßnahmen, die vom Feuerwehrpersonal (nach funktionalen Rollen klassifiziert) zu ergreifen sind, einschließlich der zu verwendenden Werkzeuge oder Technologien. Dies eignet sich perfekt für den einfachen Einsatz von Werkzeugen durch Menschen, lässt jedoch Details für komplexe Technologien wie Robotersysteme vermissen. Das Hinzufügen der fehlenden Details und die Zuordnung des Robotersystems zu einer funktionalen Rolle hat einen doppelten Nutzen. Erstens dient es als Ankerpunkt, um die Funktionen des Robotersystems in der Taktik des jeweiligen Einsatzes zu verankern, und zweitens dient eine detaillierte Beschreibung der auszuführenden Roboteraktionen (zu erfüllende Funktionen) als Grundlage für die Ableitung technischer Anforderungen.

Um Robotersysteme in die Standardverfahren für Hausbrände und CBRNe-Einsätze zu integrieren, wurde eine neue Standardarbeitsanweisung mit dem Titel „UGV-basierte Messung gefährlicher Stoffe“ erstellt. Neben den neuen Aufgaben des Menschen bei der Handhabung des Roboters als solchem wurden funktionale Details für die Roboteraktionen als Benutzeranforderungen definiert. Einige Beispiele sind in der folgenden Liste aufgeführt:

- visuelle Fernsteuerung ohne Kabelverbindung
- Einsatz außerhalb und innerhalb von Gebäuden
- klare Unterscheidung bei der Anzeige von Sensor- und UGV-Daten
- Anzeige von Detektionen nahezu in Echtzeit
- für den Bediener sichtbare Liste der montierten Sensoren
- Anzeige der Sensordaten für jeden montierten Sensor
 - Anzeige von Typ und Name jedes Sensors sowie
 - Ober- und Untergrenze, aktueller Wert
 - aktueller Alarmstatus: kein Alarm, Voralarm und Hauptalarm
 - Sensorfunktion: Weist der Sensor eine Fehlfunktion auf? Erfasst er plausible Werte oder liegen die Werte weit außerhalb des Messbereichs?

Technologie

Aus den Nutzeranforderungen wurden technische Systemanforderungen abgeleitet. Die Anforderungen lassen sich in zwei Bereiche unterteilen:

- Roboterplattform. Als Maßstab für die Bewertung von Roboterplattformen wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Parameter ermittelt.
- Sensorsystem. Die ermittelten Sensormodi und ihre Priorität sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Metrik	Beschreibung	Mögliche Spezifikationen
Steigwinkel	Maximale Steigung, die der Roboter bewältigen kann.	Mindestens 30° auf unebenem Gelände.
Hindernisüberwindung	Maximale Höhe des Hindernisses, das überwunden werden kann.	Mindestens 20 cm.
Treppensteigen	Ja/Nein, und wenn ja, bis zu welchem Winkel und welcher Stufenhöhe.	Ja, 45° und 17 cm.
Stufenlänge	Maximale Strecke, die der Roboter pro Schritt zurücklegen kann.	30 – 50 cm auf Schutt oder Trümmern.
Manövrierfähigkeit	Minimaler Wenderadius.	< 0,5 m.
Geschwindigkeit	Maximale Geschwindigkeit auf ebenem und unebenem Gelände.	1–2 m/s.
Traktion	Fähigkeit, auf verschiedenen Oberflächen Traktion aufrechtzuerhalten.	Sand, Schlamm, Schutt, Schnee.
Energieeffizienz oder Betriebszeit	Energieverbrauch pro zurückgelegter Strecke.	< 50 J/m bei Volllastbetrieb.
Bodenfreiheit	Abstand zwischen dem Boden und der Unterseite des Roboters.	Mindestens 10 cm.
Neigungsstabilität	Maximale Seitenneigung, bei der der Roboter stabil bleibt.	Mindestens 45°.
Tragkraft	Maximale Nutzlast, die der Roboter tragen kann.	Mindestens 50 kg.
Robustheit	Fähigkeit, mechanischen Belastungen wie Stößen oder Vibrationen standzuhalten.	IP65-Standard oder höher.
Abmessungen	Größe des Roboters (Länge, Breite, Höhe).	Handgepäckkoffer.
Gewicht	Gesamtgewicht der Basis.	Tragbar von einer Person.
Bedienbarkeit	Fernsteuerung des Roboters per Fernbedienung.	Kransteuerung oder ähnliches.
Einrichtungszeit	Wie lange dauert der Startvorgang?	t=5s, sofort einsatzbereit.
Kommunikation im Freien	Funkverbindung zwischen Fernbedienung und Roboter.	200 m
Kommunikation in Innenräumen	Funkverbindung zwischen Fernbedienung und Roboter.	3 Stockwerke

Tabelle 1 Ermittelte metrische Parameter für die Roboterplattform

Sensor	Bereich	Substanz	Priorität
Inhalierbare Partikel	0–1000 µg/m ³	Feinstaub	++
HR O ₃ + NO ₂ - Sensormodul	0–11 ppm	Ozon + Stickstoffdioxid	++
HR NO ₂ -Sensormodul	0–11 ppm	Stickstoffdioxid	++
HR CO-Sensormodul	0–11 ppm	Kohlenmonoxid	+
HR-SO ₂ -Sensormodul	0–15 ppm	Schwefeldioxid	++
VOC-Sensormodul	0–50 ppm	Flüchtige organische Verbindungen in der Luft	+++
HR-H ₂ S-Sensormodul	0–90 ppm	Schwefelwasserstoff	+++
HR-C _x H _y /CH ₄ /LEL- Sensormodul	0–100 % UEG	Brennbare Gase und Dämpfe in der Luft	+++
HR CO ₂ -Sensormodul	0–50.000 ppm	Kohlendioxid	+++
WR NH ₃ -Sensormodul	0–100 ppm	Ammoniak	+++
WR HCl-Sensormodul	0–100 ppm	Chlorwasserstoff	++
WR O ₂ -Sensormodul	0–50 %	Sauerstoff	++
WR SO ₂ -Sensormodul	0–100 ppm	Schwefeldioxid	++
WR H ₂ -Sensormodul	0–5000 ppm	Wasserstoff	+++
Cl ₂ -Sensormodul	0–20 ppm	Chlor	++
WR PH ₃ -Sensormodul	0–2000 ppm	Monophosphan	++
WR CO-Sensormodul	0–1000 ppm	Kohlenmonoxid	+++
NO-Sensormodul	0–11 ppm	Nobelium	++
WR HCN-Sensormodul	0–100 ppm	Cyanwasserstoff (Blausäure)	+++
WR HF-Sensormodul	0–100 ppm	Hafnium (Nukleartechnik)	++

Tabelle 2 Identifizierte Sensormodi und ihre Priorität für die Integration.

Systemkonzept

Um das Ziel eines praxistauglichen Bodenrobotersystems mit hohem TRL sowie die im vorigen Abschnitt beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, verfolgen wir den Ansatz, handelsübliche Komponenten (Roboterplattform, Sensorsystem, Rechner, Softwarebibliotheken und Kommunikation) zu verwenden und Abhängigkeiten von Infrastrukturen wie WLAN, GNSS oder Mobilfunknetzen zu vermeiden. Die Idee wurde inspiriert von den benutzerfreundlichen, robusten und weit verbreiteten UAVs mit aufsteckbaren Sensoren. In ähnlicher Weise planen wir, ein einsatzbereites ferngesteuertes UGV mit einer handelsüblichen Sensorausrüstung als Payload zu verwenden. Nach einer ersten Marktanalyse schien dieser Ansatz vielversprechend. Doch Einschränkungen hinsichtlich der Qualität der verfügbaren Systeme und ihrer Offenheit erschwerten das Vorhaben.

Roboterplattform und Mobilität

Der ursprünglich geplante Aufbau sah einen kostengünstigen, im Handel erhältlichen Raupenroboter wie den „Bunker Mini“ von AgileX vor.

Im Zuge einer Evaluierung kommerziell verfügbarer und kostengünstiger Roboterplattformen zur Absicherung des initialen Vorschlag im Antrag, wurde eine List von möglichen Roboterplattformen erstellt, die grundsätzlich die technischen Anforderungen erfüllen.

- **AGILEX Bunker Mini**
- **ULRICHC Roboter Cu-Chassis-XT RT-Tac**
- **ULRICHC Roboter Cu-Chassis-XT RT-Max**
- **ULRICHC Roboter Cu-Chassis-XT 4WD-Max**
- **ULRICHC Roboter Cu-Chassis-XT 4WD-Au**
- **FireBug**

Anschließend wurde versucht, die Roboterplattformen auf Leihbasis für eine detaillierte Evaluierung in die FH Oberösterreich zu bekommen. Dies gelang nur für den Bunker Mini. Der Roboter wurde im stanardsierten Hindernissparkur der RoboCup Rescue League (verschiedene Hindernisse, Rampen, Treppen, Kies) auf seine Mobilität getestet. Abbildung 2 zeigt verschieden Tests mit dem Roboter.



Abbildung 2 Bunker Mini bei den verschiedenen Mobilitätstests an der FH Oberösterreich.

Überraschenderweise konnten die Systeme hinsichtlich der Mobilität die im vorigen Abschnitt genannten Anforderungen nicht erfüllen. Er kippte bei Hindernissen und Treppen um. Ferner gab es Probleme mit der Funkfernsteuerung, da der Roboter beim Abriss der Verbindung das letzte Kommando unkontrolliert weiter ausführt. Damit ist der geplante Raupenroboter leider nicht als Plattform geeignet.

Daher wurde auf den Laufroboter „Unitree GO2“ umgestellt. In ersten Tests und bei der ersten Validierung mit den Einsatzkräften zeigte der Roboter eine überzeugende Leistung.

Der GO2-Roboter verfügt über ein vierbeiniges Design mit mehreren angetriebenen Gelenken, was ein stabiles und anpassungsfähiges Gehen auf unebenem, unübersichtlichem oder geneigtem Gelände ermöglicht, wo Radroboter oft versagen. Seine kompakte und robuste mechanische Struktur unterstützt den Einsatz in beengten Räumen bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Mobilität über Hindernisse hinweg, wodurch er sich gut für Katastropheneinsätze und Inspektionsszenarien eignet.

Die Steuerungsarchitektur umfasst eine Low-Level-Bewegungssteuerung für stabile Gangartgenerierung und Gleichgewicht sowie eine High-Level-Planung zur Hindernisvermeidung und halbautonomen Navigation. Bediener können das System über eine drahtlose Verbindung fernsteuern und erhalten Live-Video- und Sensordaten für Entscheidungen in Echtzeit. Die Stromversorgung erfolgt über wiederaufladbare Lithium-Batterien, die die Aktuatoren, die integrierte Rechenhardware und die Sensorausrüstung versorgen.

Insgesamt nutzt das Systemdesign die fortschrittliche Mobilität auf Beinen, die einfache Fernsteuerung und die modularen Nutzlastfähigkeiten des GO2-Roboters, um eine einsetzbare Lösung für die Erkennung von Gefahrstoffen in komplexen, unzugänglichen oder gefährlichen Umgebungen zu schaffen. Die Roboterplattform mit integriertem Sensorsystem ist in Abbildung 3 dargestellt. Für die initiale Evaluierung des Konzepts wurde die Roboterplattform der FH Oberösterreich versuchsweise genutzt. Es ist zu beachten, dass, abgesehen von der Befestigung, keine Integration zwischen Roboter und Sensorsystem stattfindet, um das System einfach und stabil zu halten. Im Zuge des Projektes wurde später vom DCNA die Robotervariante Unitree GO2W (Laufroboter mit integrierten Rädern) angeschafft und für das weitere Projekt genutzt.

Sensorsystem

Gemäß dem oben genannten Prinzip war ursprünglich geplant, ein einsatzbereites, handelsübliches Sensorsystem wie den Sniffer4D von Sorability zu verwenden, da sich dieses in UAV-Anwendungsfällen bewährt hat. Es stellte sich jedoch heraus, dass die mit den oben genannten Anforderungen kompatible Sensorkonfiguration im Vergleich zu den bereits von Feuerwehren verwendeten Handgeräten sehr teuer ist und der Zugriff auf die Daten hauptsächlich über Infrastrukturen wie Mobilfunknetze, GNSS und Cloud-Dienste möglich ist. Daher wurde diese Sensorkonfiguration verworfen. Eine anschließende Diskussion mit Anbietern von Handgeräten wie Dräger oder Honeywell ergab, dass die Systeme entweder keine direkte Datenauslesung ermöglichen oder ebenfalls auf Infrastruktur und einen proprietären Cloud-Dienst angewiesen sind.

Als Proof-of-Concept wurden der Strahlungsdetektor und das Spektrometer Radiacode 103G sowie der Mehrgassensor Honeywell MultiRAE Lite integriert. Ersterer liefert Messwerte über zwei Kanäle gleichzeitig: die Zählrate in Zählimpulsen pro Sekunde (CPS) sowie die Dosisleistung in Mikrosievert (μSv). Die Zählrate gibt die Strahlungsintensität an, während die Dosisleistungsmessung die biologischen

Auswirkungen der detektierten Strahlung widerspiegelt. Zusätzlich liefert und zeichnet der Sensor das Gammastrahlen-Energiespektrum auf, was die Identifizierung spezifischer radioaktiver Isotope ermöglicht. Letzterer ist ein Handgasdetektor, der bei österreichischen Feuerwehren etabliert ist. In der verwendeten Konfiguration liefert er Messwerte für explosionsgefährdete Bereiche (EX), O₂, H₂S und VOC. Aufgrund des eingeschränkten direkten Zugriffs auf die Sensordaten wurde ein zusätzlicher Kamerastream für die Sensoranzeige hinzugefügt. Zur Sensorausstattung gehört auch eine Kamera zur Aufzeichnung von Bildern für die Dokumentation während des Einsatzes. Der Roboterplattform G2OW mit vollständig integrierter Sensorik ist in Abbildung 4 zu sehen.



Abbildung 3 Die Laufroboterplattform Unitree GO2 mit initialer Sensorausstattung (ohne Gassensor) während der ersten Testphase.



Abbildung 4 Laufroboterplattform Unitree GO2W mit vollständig integrierter Sensorausstattung bei der ersten Feldübung.

Systemintegration und Benutzeroberfläche

Die Sensoreinheit nutzt einen Raspberry Pi 5 als Bordcomputer. Die Sensoren und die Kamera sind über kabelgebundene serielle Verbindungen mit dem Raspberry Pi 5 verbunden, auf dem die dafür erforderlichen Treiber laufen. Die Messwerte der Sensoren werden erfasst und als Zeitreihendaten in einer lokalen Instanz der Open-Source-Datenbank (OSS) InfluxDB gespeichert. Der Kamertreiber startet einen MJPEG-Server, der den Stream der Kamera hostet, und speichert die URL des Videostreams in der Datenbank, um später darauf zugreifen zu können. Außerdem wird alle 30 Sekunden ein Bild in der Datenbank gespeichert, das zu Archivierungs- und Analysezwecken dient. Die InfluxDB-Datenbank ist mit einer Grafana-Open-Source-Serverinstanz (OSS) verbunden, die ebenfalls lokal auf dem Raspberry Pi 5 läuft. Grafana bietet Tools zur Datenvisualisierung und -überwachung. Zudem lässt sich Grafana zuverlässig mit der InfluxDB-Datenbank als Datenquelle verbinden. Die Grafana-Visualisierungen sind in ein HTML-Dashboard eingebettet, das auf einem integrierten Apache-HTTP-Webserver für den Fernzugriff durch Benutzer bereitgestellt wird.

Die Einsatzkraft, die den Roboter einsetzt, kann einfach auf das Dashboard zugreifen, indem sie ihr Mobilgerät mit dem 2,4 GHz-WLAN des RUTX11-Routers verbindet und im Webbrowser zur URL navigiert, unter der es gehostet wird. Das Netzwerk besteht lediglich aus dem Raspberry Pi 5 und den Geräten, die auf das Dashboard zugreifen, und erfordert keine Verbindung zum Internet. Das Dashboard ermöglicht es Benutzern, Live-Daten zur Gaskonzentration, Strahlungswerte, den Kamerastream und den Status aller Systemkomponenten zu überwachen. Zudem kann auf frühere Messwerte und gespeicherte Kamerabilder zugegriffen werden, indem der Zeitbereich auf den gewünschten Zeitraum eingestellt wird.

Abbildung 5 veranschaulicht den Gesamtentwurf und hebt die Komponenten hervor, die an der Erkundung, der Datenerfassung und der Visualisierung beteiligt sind. Die endgültige Version der Dashboards für die Datenvisualisierung ist in Abbildung 6 dargestellt.

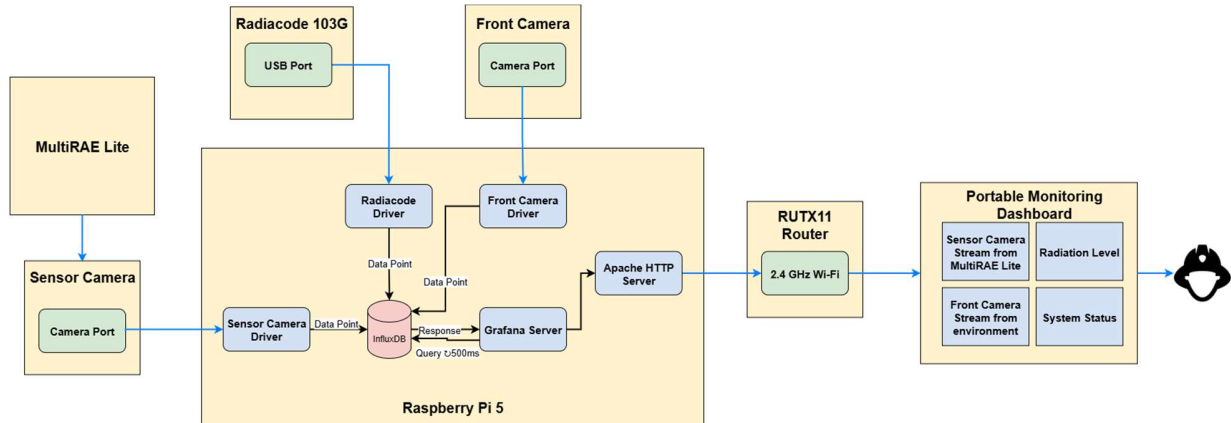


Abbildung 5 Überblick über den endgültigen Systemaufbau in Bezug auf Fernerkundung, Datenerfassung und Visualisierung.

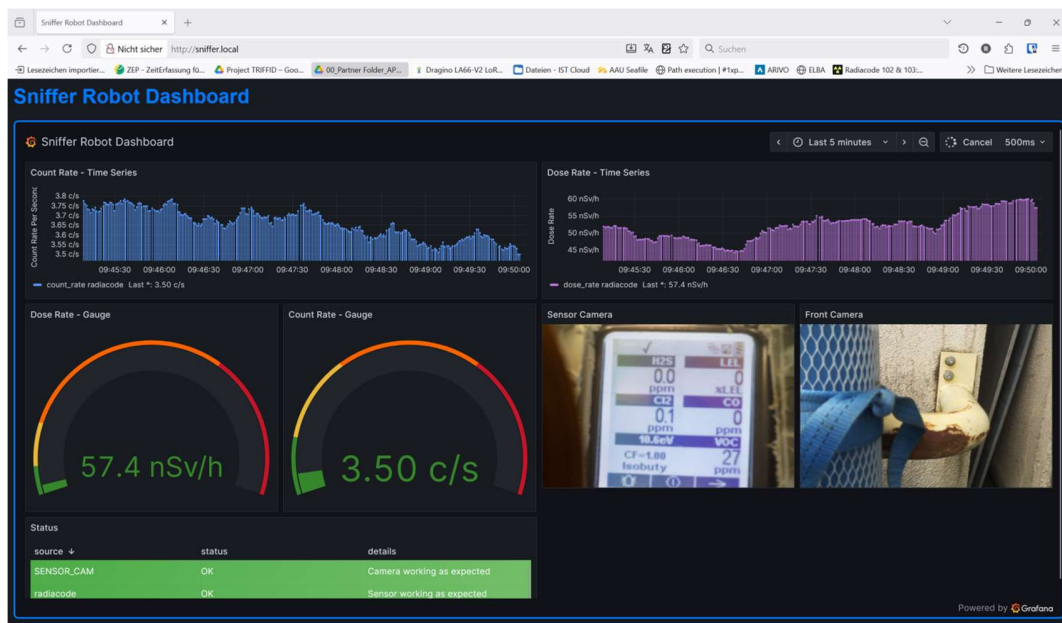


Figure 6 Screenshot des fertigen, browserbasierten Datenvisualisierung im Betrieb. Bitte beachten Sie die beiden separaten Kamerabilder für den Gasdetektor und die Lagebeurteilung.

Evaluierung im Feld

Um den praktischen Nutzen des vorgeschlagenen Systems zu bewerten, wurde in enger Zusammenarbeit mit regionalen Feuerwehrverbänden in Österreich ein zweistufiges Bewertungsverfahren für die technische Leistungsfähigkeit und die Integration in die Standard-Einsatzabläufe entwickelt.

Initialer Validierungsworkshop

Eine erste Version des vorgeschlagenen Spürrobotersystems wurde im Juli 2025 gemeinsam mit Experten des Feuerwehrverbands im Feuerwehr-Ausbildungszentrum Lebring, Österreich, validiert, das zahlreiche

Möglichkeiten zur Ausbildung von Personal und zum Testen von Ausrüstung wie Rauchkammern, Trümmerhaufen oder Strahlungsquellen für Gefahrstoffe bietet.

Die erste Validierung erfolgte in drei Teilen auf der Grundlage der im vorigen Abschnitt vorgestellten Metriken.

- **Mobilität** Verschiedene Herausforderungen hinsichtlich der Mobilität, wie das Bewältigen verschiedener Treppenarten (Neigungen, Stufenbreite, Untergründe), das Überwinden von Stufen (bis zu 22 cm) oder das Bewältigen von Steigungen und Gefällen auf unterschiedlichem Gelände (bis zu 40° Neigung, bis zu 30° Rollwinkel, Gras, Beton), wurden systematisch bewertet. Der vorgeschlagene Laufroboter stieß an einige Grenzen, bewältigte die Herausforderungen jedoch gut, sodass Einsatzkräfte Potenzial für den Realeinsatz sehen.
- **Konnektivität** Die maximale Reichweite für die Konnektivität der Roboterfernsteuerung sowie der Datenübertragung wurde in drei Szenarien getestet, darunter eine offene Umgebung, eine Umgebung mit Vegetation und in einem Gebäude mit verschiedenen Materialien (Holz, Ziegel, Beton). Die Anforderung einer Reichweite von 200 m (ohne externe Infrastruktur) wurde nur in wenigen Fällen erfüllt. Insbesondere in Gebäuden gab es Probleme beim Erreichen des Kellers.
- **Integration SOP** Um das vorgeschlagene System hinsichtlich der praktischen Integration zu validieren, wurde eine Suche nach einer Strahlungsquelle mit einem Spürrobotertrupp (Roboterpilot, Datensichter) durchgeführt. Das erste Feedback der Einsatzkräfte war hinsichtlich der Anwendbarkeit positiv, obwohl Probleme wie die begrenzte Aktualisierungsrate der Sensorwerte deutlich wurden. Aufgrund der laufenden Auswahl eines geeigneten Sensors für Gefahrstoffe beschränkte sich der Aufbau im ersten Test auf den verfügbaren Strahlungssensor.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel für ein Testprotokoll zur Kommunikation. Abbildung 8 zeigt verschiedene durchgeführte Tests für den Spürroboter.

KOMMUNIKATION

TESTDURCHFÜHRUNG AM: 29/7/25

TEST-OBJEKT:

Frei LOS

TESTER:

Stornauer VAQUER

Roboter Start 9:10

stop anbau x

Schweinbad
Küche

Metrik	Spezifikation					Ja	Nein	Notiz
Außen LOS Roboter (min 200m)	BW:	RSSI:	RSSI:	Dist: 119	Lag: ✓	✓	✗	weak shield lafer
Außen LOS Sensor (min 200m)	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: 150	Lag: ✓	✓	✗	weak schutt lafer stop anbau / mende
Wald LOS Roboter	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: 144	Lag: ✓	✓	✗	weak 1. Brand
Wald LOS Sensor	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: 225	Lag: ✓	✓	✗	2. Brand
Innen Betongeb. Roboter	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Betongeb. Sensor	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Holzbau Roboter	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Holzbau Sensor	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Ziegelbau Roboter	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Ziegelbau Sensor	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Keller Roboter	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			
Innen Keller Sensor	BW:	Freq:	RSSI:	Dist: Floors:	Lag:			

9:20
+
9:43

A

* lock bei 10 min

Abbildung 7 Testprotokoll Kommunikation initialer Komponententest.

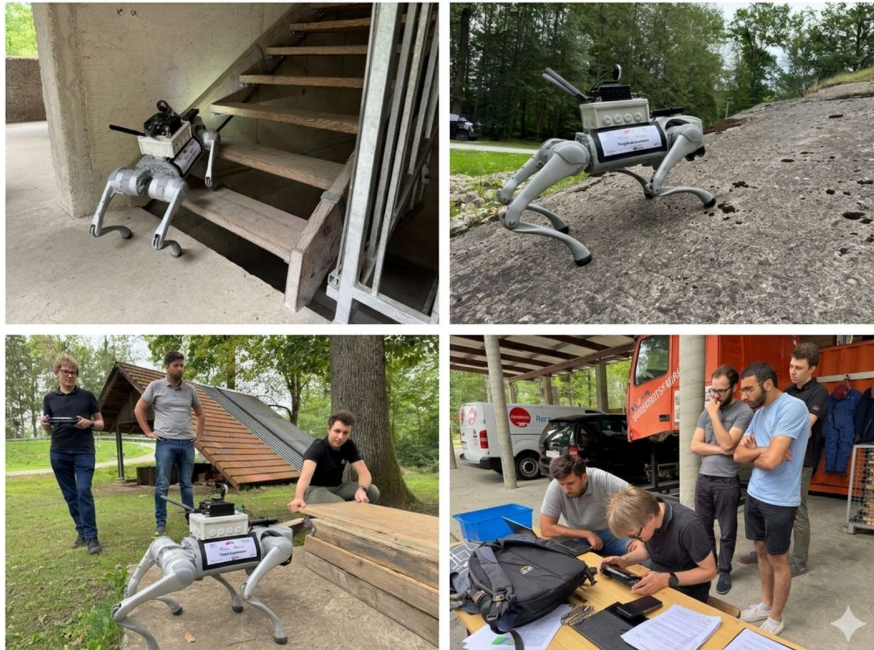


Abbildung 8 Verschiedene Tests (Treppen, Rampe, Stufe, Suche nach einer Strahlungsquelle) beim initialen Komponententest in Feuerwehr- und Zivilschutzschule Lebring.

Erprobung im Feld

Freiwillige Feuerwehren in Österreich trainieren regelmäßig für Katastropheneinsätze wie Hochwasser oder Industrieunfälle. Der vorgeschlagene integrierte Erkundungsroboter und die Einsatzverfahren (SOPs) wurden in zwei groß angelegten Übungen evaluiert.

In einer ersten Evaluierung wurden Roboter und Taktik in die Gefahrgutteams der Region Oststeiermark integriert, bei der ein Industrieunfall nachgestellt wurde, der sich im September 2025 ereignet hatte. Der detaillierte Ablauf wurde gemeinsam mit Gefahrgutexperten der Feuerwehrverbände festgelegt. Das Übungsszenario simulierte die Freisetzung eines Gefahrstoffs in einem Industriebetrieb. Die beteiligten Ingenieure sowie die Experten aus dem kommunalen Netzwerk werden lediglich als Beobachter fungieren, um objektive Ergebnisse zu sammeln.

Die Übung wurde bei Nidec Global Appliance Austria in Fürstenfeld, einem Hersteller von Kühlgeräten, durchgeführt. Aufgrund der angenommenen unklaren Lage war ein großangelegter Alarm der Feuerwehren in der Region sowie von Spezialeinheiten wie Gefahrgut-Einheiten, Mess-Einheiten und Atemschutz-Einheiten erforderlich (siehe Abbildung 5).

Wie bereits bei der ersten Bewertung der Komponenten getestet, bestand das Spürroboter-Team aus einem Piloten und einem Beobachter, der die Messwerte überwachte. Die taktische Zuweisung erfolgte an das Messteam der regionalen Gefahrgutgruppe. Das Team wurde während der Übung durch einen zusätzlichen Gruppenkommandanten des Oberösterreichischen Feuerwehrverbands ergänzt, der als Schnittstelle zur Messgruppe fungierte. Entsprechend der entwickelten Taktik führte der Spürrobotertrupp die vom Kommandanten der Messgruppe angeordneten Aufgaben aus und ist über diesen mit der Einsatzleitung und der taktischen Führung verbunden.

Ziel war es, eine realistische Bewertung unter realen technischen und taktischen Bedingungen zu erreichen. Dies ist vor allem daher möglich, weil die beteiligten Forscher auch Mitglieder der Universitätsfeuerwehr der Technischen Universität Graz oder einer freiwilligen Feuerwehr sind und daher über die entsprechende Ausbildung und Ausrüstung (PSA, Feuerwehrfahrzeug) verfügen. Um eine vollständige, unvoreingenommene Dokumentation zu gewährleisten, stellte das Disaster Competence Network Austria einen unabhängigen Beobachter zur Verfügung, der die Übung beobachtete und die Ergebnisse entsprechend protokollierte.

Im Rahmen der Übung wurde der Roboter eingesetzt, um den Umkreis des betroffenen Gebäudes auf gefährliche Stoffe zu überprüfen, die ein Risiko für alle Einsatzkräfte am Ort des Ereignisses darstellten. Darüber hinaus wurde der Roboter zur Erkundung der Leckstelle aus der Ferne eingesetzt (siehe Abbildung 9).



Figure 9 Einsatz des endgültigen integrierten Roboters bei einer Übung mit Gefahrstoffen. In der mittleren Box befindet sich der MultiRAE-Mehrgasdetektor.

Entsprechend der entwickelten Taktik führte das Spürroboter-Team die vom Kommandanten der Messgruppe angeordneten Aufgaben aus. Abbildung 10 zeigt die Unterstützung des Spürroboters bei der Suche nach eine Leckage. Abbildung 11 zeigt die Überwachung des Absperrbereichs durch den Spürroboter.



Abbildung 10 Suche nach der Schadstoffquelle während der Schadstoffübung in Fürstenfeld.



Abbildung 11 Überwachung des Absperrbereichs bei der Schadstoffübung in Fürstenfeld.

Eine weitere Evaluierung des integrierten Systems und Taktik erfolgte bei Übung des Schadstoffzuges des Bezirkes Freistadt in Kefermarkt im Februar 2026.

Aufgrund der vielen wertvollen Erkenntnisse aus der Übung in mit dem Schadstoffzug der Oststeiermark wurde eine weitere Übung unter Beteiligung des GSF-Zuges (Gefährliche Stoffe) des Bezirks Freistadt, des

OÖ Landes-Feuerwehrverbandes (OÖLFV), DCNA, FH OÖ F&E GmbH sowie der Projektleitung TU Graz durchgeführt.

Die zweite Übung in Kefermarkt wurde im Konsortium vereinbart, um die in Fürstenfeld identifizierten Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Datenmeldung an die Einsatzleitung gezielt zu evaluieren. Diese Erweiterung wirkte sich positiv auf die Qualität der Datenbasis und auf die Aussagekraft der abgeleiteten Empfehlungen aus, da die Resilienz der Taktik gegenüber unterschiedlichen Bundesländer-Strukturen direkt nachgewiesen werden konnte. Eine Anpassung der weiteren Planung war dadurch nicht erforderlich.

In die Übung wurde der entwickelte Spürroboter integriert, um sowohl technologische Ansätze als auch deren Zusammenspiel und die sich dadurch auch erweiterte Taktik im Einsatzkontext zu evaluieren. Zielsetzung war insbesondere die Untersuchung der Interoperabilität zwischen den Spezialeinsatzkräften des GSF-Zuges und dem robotischen System, sowie die Bewertung des operationellen Mehrwerts in komplexen Lagen. Abbildung 12 zeigt den Trupp des Spürroboters bei der Suche nach einer Gefahrenstoffquelle.



Figure 12 Spürrobotertrupp mit Pilot und Spotter während der Schadstoffübung in Kefermarkt.

Das Übungsszenario umfasste die Lokalisierung einer vermissten Person in einem schwer zugänglichen und potenziell kontaminierten Gelände. Der eingesetzte Spürroboter führte manuelle Erkundungsmissionen durch und lieferte kontinuierlich Sensordaten (Kamerabilder und Messwerte) an die Einsatzleitung. Auf Basis dieser Daten konnte die Zielperson effizient lokalisiert und deren Position lagegenau bestimmt werden.

Die durch die Robotersysteme generierten Lageinformationen wurden einerseits unmittelbar in die Einsatzführung integriert, andererseits konnte der Roboter den GSF-Trupp gezielt zur Einsatzstelle (vermissten Person) führen. Dies ermöglichte eine signifikante Reduktion der Such- und Rettungszeit sowie eine Minimierung der Exposition der Einsatzkräfte gegenüber potenziellen Gefahrstoffen. Die Reduktion

der Rettungszeit wird durch den parallelen Einsatz des Roboters und die gleichzeitige Vorbereitung des GSF-Trupps ermöglicht.

Abbildungen 13 bis 15 zeigen den Spürroboter bei der Unterstützung der Erkundung und der Bergung einer verletzten Person.



Abbildung 13 Spürroboter bei der Detektion einer Schadstoffquelle und einer vermissten Person bei der Schadstoffübung in Kefermarkt.



Abbildung 14 Führung von Einsatzkräften durch den Spürroboter und einer vermissten Person bei der Schadstoffübung in Kefermarkt.



Abbildung 15 Beobachtung der Personenbergung durch den Spürroboter und einer vermissten Person bei der Schadstoffübung in Kefermarkt.

Die Übung diente darüber hinaus der systematischen Erfassung von Nutzerfeedback hinsichtlich Bedienbarkeit, Robustheit, Situational Awareness sowie der Integrationsfähigkeit in bestehende Einsatzabläufe. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Weiterentwicklung des Systems ein, insbesondere in Bezug auf Mensch-Maschine-Interaktion, Autonomiegrade und Schnittstellen zur Einsatzführung.

Durch die föderale Struktur der Feuerwehren ergibt sich auch eine leicht unterschiedliche Taktik im Schadstoffeinsatz. Durch die Übung in Oberösterreich konnte die Robustheit der entwickelten robotischen Taktik im direkten Vergleich mit der Übung in der Oststeiermark nachgewiesen werden. Die gleiche robotische Taktik konnte problemlos in beide Einheiten integriert werden.

Zusätzlich wurde der fachliche Austausch zwischen Forschungseinrichtungen und Einsatzorganisationen intensiviert, um Anforderungen aus der Praxis frühzeitig in den Entwicklungsprozess zu integrieren. Die Ergebnisse unterstreichen das Potenzial robotischer Systeme zur Unterstützung von Einsatzkräften, insbesondere in gefährlichen und schwer zugänglichen Umgebungen. Ein nicht zu vernachlässigender Mehrwert entstand durch die mediale Berichterstattung der Übung. Der Nutzen robotischer Systeme, insbesondere eines Spürroboters, wurde in der Feuerwehrfachwelt sichtbar und sehr positiv aufgenommen.

[Lessons Learned](#)

Während der beiden Evaluierungsphasen wurden wertvolle Rückmeldungen von Fachleuten aus der Praxis gesammelt. Ein großer Vorteil ist die hervorragende Mobilität des Laufroboters, einschließlich der

Überwindung von gefüllten Schläuchen bei komplexen Einsätzen. Die Kommunikation stellt ein Problem dar und ist nach wie vor eingeschränkt. Trotz des ursprünglichen Projektziels, eine Abhängigkeit von bestehender Infrastruktur zu vermeiden, wurde die potenzielle Nutzung des Mobilfunknetzes von den Einsatzkräften nicht negativ bewertet. Die fehlenden offenen Schnittstellen zu Gasdetektoren sind ein anhaltender und einschränkender Faktor. Die derzeitige vereinfachte Konfiguration bietet nur eine begrenzte Lageerkennung, was im praktischen Einsatz ein ernstes Problem darstellt. Die Struktur des Roboterteams (Robotermechaniker, Datensichter, Gruppenkommandant bei mehreren Robotern) und dessen nahtlose Integration in den Einsatz wurden von den Einsatzkräften sehr positiv aufgenommen. Wasserfestigkeit und die Möglichkeit der Dekontamination wurden als unverzichtbar identifiziert. Abbildung 16 zeigt Einsatzkräfte, wie sie den Roboter mit Druckluft (die glücklicherweise aus den Feuerwehrfahrzeugen verfügbar war) trocknet, nachdem dieser in einen Wassereimer gelaufen war.



Abbildung 16 Trocknung des nassen Spürroboters mittels Druckluft während der Schadstoffübung in Fürstenfeld.

Abgeleitete Empfehlungen

Im Rahmen des Projektes wurde die gesammelte Datenbasis zu einer praxisorientierten Empfehlung verdichtet. Sie benennt jene Einsatzlagen, in denen der Spürroboter einen Mehrwert bietet, etwa beim Messen aus sicherer Entfernung außerhalb des Gefahrenbereichs oder bei der Vorerkundung parallel zum Ausrüsten der Trupps, und legt zugleich die technischen wie taktischen Grenzen offen. Aus den beiden Feldübungen, dem initialen Validierungsworkshop sowie dem kontinuierlichen fachlichen Austausch mit den beteiligten Feuerwehrverbänden lässt sich eine Reihe konkreter Handlungsempfehlungen für die Feuerwehr sowie für Einsatzorganisationen im Allgemeinen ableiten. Diese werden im Folgenden nach Themenfeldern strukturiert dargestellt.

Taktik und Standardeinsatzmaßnahmen

Aufbauend auf der „Standardeinsatzmaßnahme 10 Chemieunfall“ (SEM 10) des ÖBFV wurde im Rahmen des Projektes die „SEM 10 Spürroboter“ erarbeitet, die das Trupp-Konzept aus Roboteramaschinist (R105) und Beobachter beziehungsweise Datensichter (R106) sowie die Maßnahme „UGV-Gefahrstoffmessung durchführen“ umfasst. Die Robustheit dieser Taktik konnte durch den direkten Vergleich der Übungen in der Oststeiermark und in Oberösterreich nachgewiesen werden, da dieselbe robotische Taktik trotz föderal unterschiedlicher Verbandsstrukturen problemlos in beide Einheiten integriert werden konnte.

Für eine österreichweite Einführung reicht eine einzelne SEM jedoch nicht aus. Empfohlen wird die Entwicklung eines Satzes harmonisierter, aufeinander abgestimmter Standardeinsatzmaßnahmen, der insbesondere folgende Aspekte abdeckt:

- Eine erweiterte SEM für den Einsatz mehrerer Spürroboter, die ab dem zweiten gleichzeitig eingesetzten System die Rolle eines zusätzlichen „robotischen“ Gruppenkommandanten definiert. Dieser übernimmt die Koordination zwischen mehreren Robotertrupps sowie die Schnittstelle zur übergeordneten Einsatzführung.
- Konkrete Maßnahmen zum Rüsten des Roboters für unterschiedliche Sensorkonfigurationen, da die benötigte Sensorik je nach Gefahrenlage variiert und ein rasches, standardisiertes Umrüsten im Einsatzfall entscheidend ist.
- Eine eigene Maßnahme zur Dekontamination des Systems nach Kontakt mit Gefahrstoffen, die die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu Wasserfestigkeit und Reinigung berücksichtigt.
- Standardisierte Verfahren für die Führung, insbesondere für den Umgang mit den vom Roboter gelieferten Daten sowie für die Definition der möglichen Einsatzarten (z. B. gezielte Erkundung versus semi-autonome Überwachung eines Bereichs).

Rollen, Verantwortlichkeiten und organisatorische Einbindung

Die im Projekt entwickelte Trupp-Struktur aus Roboteramaschinist und Beobachter/Datensichter, ergänzt um einen Gruppenkommandanten als Schnittstelle zur Messgruppe, wurde von den Einsatzkräften in beiden Übungen sehr positiv aufgenommen und sollte als Grundlage für die organisatorische Einbindung des Systems in bestehende Einsatzstrukturen dienen. Diese Rollen sind integraler Bestandteil der oben beschriebenen SEMs und sollten dort verbindlich verankert werden, einschließlich der Zuständigkeiten bei koordiniertem Mehrrobotereinsatz.

Grenzen und Resilienz

Eine ehrliche Kommunikation der Grenzen ist Teil einer belastbaren Empfehlung und schafft Vertrauen bei den Einsatzorganisationen. Wie jedes technische Assistenzsystem stößt auch der Spürroboter an Grenzen, die bei Einführung, Ausbildung und Beschaffung mitzudenken sind:

- Energieversorgung: Die Einsatzdauer ist durch die verfügbare Akkukapazität begrenzt; ein Konzept für den Batteriewechsel im laufenden Einsatz ist erforderlich.
- Umweltrobustheit: Die Widerstandsfähigkeit gegenüber Nässe, Temperatur und anderen Umwelteinflüssen sollte bei der Beschaffung gezielt berücksichtigt werden.
- Kommunikation: Die Funkreichweite kann je nach baulicher und geografischer Umgebung eingeschränkt sein; alternative Übertragungswege sollten situativ verfügbar sein.
- Bedienbarkeit: Die Lagewahrnehmung des Bedienpersonals hängt von der verfügbaren Sensor- und Kameraausstattung ab und sollte im Zuge der Weiterentwicklung laufend verbessert werden.

Diese Grenzen ersetzen nicht die Notwendigkeit einer sorgfältigen taktischen Ausbildung, sondern sollten dort sowie bei künftigen Beschaffungsentscheidungen transparent kommuniziert werden.

Ausbildung und Übungskonzept

Es wird empfohlen, über die Landesfeuerwehrschulen ein standardisiertes, zweistufiges Ausbildungskonzept zu entwickeln:

- Eine rein robotische Grundausbildung, die den Umgang mit Fahrzeug, Steuerung und Sensorik vermittelt.
- Eine Integration in die bestehende Gefahrstoffausbildung, etwa für GSF-Zugskommandanten oder Spürtrupp-Kommandanten, damit der Spürroboter gezielt und lagegerecht in den bestehenden Einsatzablauf eingebunden werden kann, statt als isoliertes Zusatzsystem betrachtet zu werden.

Robotische Systeme sollten künftig systematisch in Aus- und Fortbildung sowie in Übungen integriert werden. Dazu zählen insbesondere:

- Regelmäßige Erprobungen unter realitätsnahen Einsatzbedingungen, wie sie im Projekt mit den Übungen in Fürstenfeld und Kefermarkt bereits erfolgreich durchgeführt wurden.
- Die gezielte Integration von Spürrobotern in Schadstoff-, CBRN- und Großschadensübungen.
- Eine standardisierte Evaluierung der taktischen Verfahren im Rahmen dieser Übungen, um Weiterentwicklungen evidenzbasiert vorzunehmen.
- Bundesländerübergreifende Vergleichsübungen zur Harmonisierung der Taktik, wie sie durch den direkten Vergleich zwischen Oststeiermark und Oberösterreich im Projekt erstmals erprobt wurden.
- Eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Systeme auf Basis des Nutzerfeedbacks aus Übungen und Realeinsätzen.

Ein geeigneter organisatorischer Rahmen hierfür wäre die Etablierung von F&E-Projektfeuerwehren mit gemeinsamer Datensammlung und Austausch zwischen den beteiligten Spürroboter-Feuerwehren.

Beschaffung und funktionale Mindestanforderungen

Auf Basis der im Projekt ermittelten technischen Anforderungen (siehe Tabellen 1 und 2) wird die Erstellung eines nationalen Lastenheftes bzw. funktionaler Mindestanforderungen für zukünftige Beschaffungen empfohlen. Dies sollte insbesondere Robustheit (z. B. IP67-Standard), offene Schnittstellen zu Sensorsystemen, Dekontaminierbarkeit sowie modulare Sensorik umfassen. Die im Projekt festgestellte fehlende Offenheit kommerzieller Gasdetektoren stellt hier eine zentrale, noch ungelöste Einschränkung dar.

Diese Anforderungen sollten nicht isoliert für Spürroboter entwickelt, sondern mit den Anforderungen an andere robotische Anwendungsfelder im Feuerwehrwesen harmonisiert werden, etwa im Hinblick auf modulare Robotersysteme, die neben der Detektion auch weitere Aufgaben (Logistik, Manipulation) übernehmen können.

Wartung, Logistik und Dekontamination

Für den praktischen Betrieb ist ein abgestuftes Wartungs- und Reinigungskonzept erforderlich: eine tägliche Bereitschaftsprüfung (Sichtprüfung, Akkustand, Funktionstest der Sensoren, Funkverbindung), eine Nachbereitung nach jedem Einsatz (Reinigung, gegebenenfalls Dekontamination, Akku-Tausch, Datensicherung) sowie monatliche und jährliche Service-Intervalle.

Für die logistische Integration wird die Verlastung in einem Einsatzfahrzeug des Schadstoff-/Messzuges empfohlen, mit dauerhafter Stromversorgung der Akkus, Mitführung von Reserveakkus und klar definierten Lagerbedingungen, um die jederzeitige Einsatzbereitschaft sicherzustellen.

Führungsintegration und Datenstandards

Die Robotersysteme sollten in bestehende Führungs- und Lageführungssysteme integriert werden, wie es bereits in der zweiten Feldübung in Kefermarkt gezielt evaluiert wurde. Hierfür sind einheitliche Datenstandards sowie sichere Datenräume für die Übertragung der Sensor- und Lagedaten in unterschiedliche Führungssysteme erforderlich, um die Interoperabilität zwischen Robotertrupp, Messgruppe und Einsatzleitung sicherzustellen.

Regionale Kompetenzzentren und Piloteinsatz

Es wird empfohlen, regionale Kompetenzzentren aufzubauen und weitere Pilotanwendungen in Schadstoffzügen durchzuführen. Die Integration sollte dabei nicht als bloße Zusatzausrüstung eines bestehenden Zuges erfolgen, sondern entweder als eigenständige Einheit oder als Einheit, die gezielt mitalarmiert wird und regelmäßig gemeinsam mit dem Schadstoffzug übt, um die im Projekt beobachtete positive Integrationsfähigkeit dauerhaft zu erhalten.

Eine flächendeckende Einführung sollte dabei stufenweise erfolgen: Einer Pilotierungsphase mit Beschaffung von ein bis zwei Systemen je Bundesland und systematischer Erfahrungssammlung folgt eine Konsolidierungsphase, in der Taktik, Ausbildung und Beschaffungsspezifikationen auf Basis der gesammelten Erfahrungen angepasst werden, bevor im anschließenden Rollout weitere Schadstoffzüge bedarfsgerecht ausgestattet werden.

Technologische Weiterentwicklung

Für die Weiterentwicklung des Spürroboter-Systems, nicht als allgemeine robotische Plattform, sondern spezifisch im Bereich der Gefahrstoffdetektion, wird empfohlen, verstärkt teilautonome Funktionen sowie KI-gestützte Sensordatenanalyse zu untersuchen, um die im Projekt festgestellten Limitierungen bei der Aktualisierungsrate und der Lageerkennung anzugehen. Darauf aufbauend erscheint auch eine Erweiterung auf verwandte Einsatzszenarien wie CBRN-Lagen, Tunnel-, Industrie-, oder USAR-Einsätze sinnvoll, sofern der Fokus auf der Spürfunktion erhalten bleibt. Ergänzend sollte eventuell ein erweiterter Ex-Schutz, eine robustere Funkkommunikation in herausfordernden Umgebungen, etwa durch Mesh-Netzwerke oder hybride Mobilfunklösungen, sowie die Integration mit Drohnen und anderen robotischen Systemen zu einem koordinierten Erkundungsverbund verfolgt werden.

Standardisierung

Die im Projekt erarbeiteten taktischen und technischen Ergebnisse sollten in nationale und europäische Standardisierungsaktivitäten sowie in zukünftige Feuerwehrdienstvorschriften eingebracht werden. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die DIN SPEC 91477-1 (Robotersysteme für den Einsatz in Schadenslagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen) und die DIN SPEC 91477-2 (Robotersysteme für den Einsatz in Schadenslagen – Teil 2: Anforderungen an Roboter in der Brandbekämpfung) zu nennen. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu funktionalen Anforderungen, Taktik und Systemintegration sollten aktiv in die Weiterentwicklung dieser Normenreihe eingebracht werden, um die entwickelten Anforderungen und Taktiken über den österreichischen Kontext hinaus zu verankern.

Dissemination und Nachhaltigkeit

Für die Dissemination wurde ein Bündel von Maßnahmen durchgeführt. Die wissenschaftliche Verwertung erfolgte über einen Beitrag beim IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR) in Galway 2025 mit dem Titel „Close the Valley of Death – A Deployable Sniffer Robot For Hazardous Substances“, in dem das technische und taktische Konzept sowie die Ergebnisse der experimentellen Erprobung präsentiert wurden. Im Praxiskontext wurde der Workshop „Praxistaugliche Laufroboter für den Katastropheneinsatz“ bei der Fachtagung Katastrophenforschung 2025 im Zuge der RETTER-Messe in Wels durchgeführt, der zugleich als Plattform für den Wissenstransfer zwischen Forschung und Einsatzorganisationen diente. Zur Unterstützung der experimentellen Umsetzung bei künftigen Einsatzübungen wurde zudem eine kompakte Ergebnispräsentation erstellt. Ergänzt wurde die Dissemination durch eine breite mediale Berichterstattung, unter anderem im Magazin Blaulicht (Ausgabe 10/2025), in der Futurezone, der Kleinen Zeitung und in der Presse vom 21.02.2026. Weiters wurde das Projekt in einem Beitrag vom ZDF-Morgenmagazin vorgestellt. Ein ORF Bericht in Mayrs wurde nach Projektende gedreht und wird im Herbst 2026 ausgestrahlt.

Für die nachhaltige Verfügbarkeit wurde der Prototyp in den Ressourcenpark des DCNA integriert und steht weiter für Erprobungen zur Verfügung. Für die Weiterentwicklung in Richtung eines kommerziell verfügbaren Produkts ist ein Folgeantrag im Programm KIRAS/K-PASS KMU Innovation AKUT in Ausarbeitung.

Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt die Entwicklung und systematische Validierung eines einsetzbaren Spürroboters vor, der Einsatzkräfte bei der Erkennung gefährlicher Stoffe unterstützen soll. Nach einem vereinfachten Ansatz, bei dem ein handelsüblicher Roboter (z. B. Unitree GO2) mit einer Sensorausstattung (Radiocode 103G, Honeywell MultiRAE Lite) mit integrierter Verarbeitung, Kommunikation und Visualisierung bietet die Lösung eine gut aufgenommene Alternative zu aktuellen manuellen Messverfahren und zielt darauf ab, die Lücke zur praktischen Anwendung zu schließen. Das System arbeitet unabhängig von externer Infrastruktur, ist tragbar und kann über eine intuitive Benutzeroberfläche ferngesteuert werden, um die Akzeptanz bei Erst Helfern zu fördern.

Detaillierte Komponentenvvalidierungen und die Teilnahme an zwei groß angelegten Übungen zum Umgang mit Gefahrstoffen zeigten, dass das System kritische Anforderungen hinsichtlich Mobilität, Datenerfassung und Benutzerfreundlichkeit unter realen Einsatzbedingungen erfüllt. Rückmeldungen von Berufs- und Freiwilligenfeuerwehrleuten bestätigten die Relevanz und Praktikabilität des Ansatzes. Es wurden umfangreiche Empfehlungen die von der Taktik über Technik, Standardisierung und Beschaffung bis zu Ausbildung reichen erarbeitet, um eine flächendeckende Einführung von Assistenzrobotern im Feuerwehrwesen zu ermöglichen.

Dennoch wurden einige Einschränkungen identifiziert, darunter die Reichweite der Konnektivität, die Aktualisierungsraten der Sensoren und die Betriebsbedingungen (Wasserbeständigkeit), die in Zukunft angegangen werden müssen. Ebenfalls umgesetzt werden muss die Überführung in ein kommerziell verfügbares robustes System.

Referenzen

- [1] H. Surmann, K. Daun, M. Schnaubelt, O. von Stryk, M. Patchou, S. Böcker, C. Wietfeld, J. Quenzel, D. Schleich, S. Behnke, R. Grafe, N. Heidemann, D. Slomma, and I. Kruijff-Korbayova, "Lessons from robot-assisted disaster response deployments by the german rescue robotics center task force," *Journal of Field Robotics*, vol. 41, no. 3, pp. 782–797, 2024.
- [2] German Rescue Robotics Center, "Position Paper - Activating the potential of user-centered innovative technology research in civil security," 2022.
- [3] Austrian Firebrigade Association, "Heft 122 - Der Feuerwehreinsatz," 2016.