

INDALOS

Intelligentes Überwachungssystem für satellitengestützte Navigation

Ergebnisbericht | Projekterfolg bestätigt

Ein Projekt finanziert im Rahmen des Programms **KIRAS/K-PASS**

Vorhaben: INDALOS

Zeitraum: 01. Oktober 2024 bis 30. September 2025

Fördernehmer: IGASPIN GmbH
Reininghausstr. 13A
8020 Graz
Österreich
www.igaspin.at

Projektleiter: Rüdiger Hein
Geschäftsführer
IGASPIN GmbH
R.Hein@igaspin.at

INHALTSVERZEICHNIS


INHALTSVERZEICHNIS.....	2
1. Was macht INDALOS? Eine Einführung.....	3
1.1 Das Problem: Störungen der Satellitennavigation.....	3
1.2 Die Lösung: Ein intelligentes Frühwarnsystem	3
1.3 Warum ist das wichtig?	4
2. Das Wichtigste in Kürze.....	5
3. Was wurde entwickelt? Die technischen Ergebnisse.....	5
3.1 Die Systemarchitektur: Sensoren und Zentrale.....	5
3.1.1 Serversoftware und Netzwerkvisualisierung.....	6
3.1.2 Sensor–Server-Kommunikation und IT-Sicherheit	7
3.1.3 Lizenzkonzept.....	7
3.2 Der Premium Static Node: Das Herzstück des Systems.....	8
Bewährte Praxistauglichkeit.....	9
3.2.1 Ausgangssituation vor Projektbeginn (PSN „vorher“).....	10
3.2.2 Weiterentwicklungen im Projekt INDALOS Akut (PSN „nachher“)	11
3.2.3 Monitoring-Algorithmen und KI-Entscheidungslogik.....	13
3.2.4 Bewährte Praxistauglichkeit und Umfang der erbrachten Leistung	14
3.3 Validierung: Wie wurde die Zuverlässigkeit nachgewiesen?.....	15
3.4 Vorgehensweise und angewandte Methoden	16
4. Was macht INDALOS besonders?	17
5. Wo kann INDALOS eingesetzt werden?.....	19
5.1 Praktische Anwendungsbeispiele.....	19
5.2 Wer profitiert von INDALOS?	20
6. Stärken und nächste Schritte.....	20
6.1 Was kann INDALOS besonders gut?.....	20
6.2 Was kommt als Nächstes?.....	20
6.3 Mögliche Störungen aus dem All? – Internationale Messkampagne	21
7. Zusammenfassung	22
8. Danksagung.....	23

1. Was macht INDALOS? Eine Einführung

1.1 Das Problem: Störungen der Satellitennavigation

Satellitennavigationssysteme wie GPS, Galileo oder GLONASS sind heute unverzichtbar. Sie helfen nicht nur beim Navigieren im Auto, sondern sind kritisch für die Luftfahrt, Schifffahrt, den Güterverkehr, Mobilfunknetze, Stromnetze und viele weitere lebenswichtige Infrastrukturen. Diese Systeme werden unter dem Begriff **GNSS** (Global Navigation Satellite System) zusammengefasst.

Das Problem: GNSS-Signale sind extrem schwach und können durch **Interferenzen** – also Störsignale – beeinträchtigt oder vollständig blockiert werden. Diese Störungen können unbeabsichtigt auftreten (z.B. durch defekte Geräte) oder absichtlich verursacht werden (z.B. durch Störsender, sogenannte *Jammer*).

 **Beispiel aus der Praxis:** Im Januar 2022 fielen während eines militärischen Konflikts GPS-Dienste über weiten Teilen Nordeuropas aus. Fluggesellschaften mussten Routen ändern, und kritische Infrastrukturen waren beeinträchtigt. Solche Vorfälle zeigen, wie verwundbar unsere Gesellschaft ohne funktionierende Satellitennavigation ist.

1.2 Die Lösung: Ein intelligentes Frühwarnsystem

INDALOS ist ein intelligentes Überwachungssystem, das Störungen der Satellitennavigation **in Echtzeit** erkennt, klassifiziert und lokalisiert. Das System funktioniert wie ein hochentwickeltes Frühwarnsystem:

1. **Erkennung:** Sensoren überwachen kontinuierlich die Satellitennavigationssignale und erkennen selbst kleinste Anomalien
2. **Klassifizierung:** Künstliche Intelligenz (KI) analysiert die Störung und bestimmt den Typ – z.B. Breitband-Störer, getarnte Störsignale oder technische Defekte
3. **Lokalisierung:** Das System ermittelt, wo sich die Störquelle befindet
4. **Alarmierung:** Verantwortliche werden sofort informiert und können Gegenmaßnahmen einleiten

INDALOS baut auf Vorarbeiten aus dem Vorgängerprojekt PINPOINT auf. Im Projekt INDALOS Akut wurden diese Vorarbeiten deutlich erweitert und vom Laborprototypen zu einem produktreifen System weiterentwickelt.

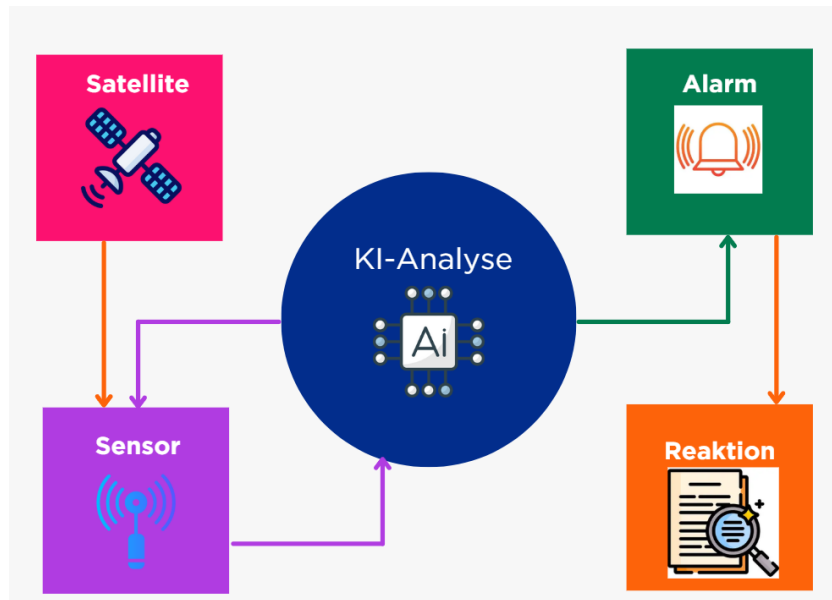


Abbildung 1

1.3 Warum ist das wichtig?

Ohne funktionierende Satellitennavigation würden zahlreiche kritische Systeme ausfallen:

- **Luftverkehr:** Flugzeuge benötigen GNSS für präzise Landeanflüge, insbesondere bei schlechtem Wetter
- **Stromnetze:** Die Synchronisation von Kraftwerken und Netzen erfolgt über GNSS-Zeitstempel
- **Mobilfunk:** Mobilfunkmasten nutzen GNSS für die zeitliche Koordination
- **Finanzwesen:** Börsentransaktionen erfordern exakte Zeitstempel
- **Rettungsdienste:** Notfalleinsätze sind auf präzise Ortung angewiesen

INDALOS schützt diese kritischen Infrastrukturen, indem es Störungen frühzeitig erkennt und ein schnelles Handeln ermöglicht.

2. Das Wichtigste in Kürze

Das Projekt INDALOS hat ein einsatzbereites, KI-gestütztes System zur Überwachung von Satellitennavigation entwickelt. Die Lösung erreicht eine Erkennungsgenauigkeit von über 99,97 % und kann zum Aufbau von Überwachungsnetzwerken zum Schutz kritischer Infrastrukturen eingesetzt werden.

Im Rahmen von INDALOS Akut wurde insbesondere der Premium Static Node (PSN) – das Herzstück des Systems – von einem labororientierten Ein Frequenz-Prototypen (nur L1/E1) zu einem multifrequenzfähigen, produktreifen Sensorknoten mit mehr als 14 KI-basierten Monitoring-Algorithmen weiterentwickelt. Die gesamte Signalverarbeitung, die Entscheidungseinheit, die Serverarchitektur, die Sensor-Server-Kommunikation sowie ein Lizenz- und Sicherheitskonzept wurden für den operativen Dauerbetrieb ausgelegt und validiert.

Das System kombiniert intelligente Sensoren mit einer zentralen Serverinfrastruktur und unterstützt alle globalen Satellitennavigationssysteme. Es erkennt, klassifiziert und lokalisiert Störungen in Echtzeit mithilfe adaptiver KI-Algorithmen. Erfolgreiche Praxistests unter realen Bedingungen bestätigen die sofortige Einsatzfähigkeit.

INDALOS positioniert sich als europäischer Standard für GNSS-Schutznetze und bildet die technologische Grundlage für die geplante weltraumgestützte Erweiterung im Folgeprojekt BEACONSAT.

3. Was wurde entwickelt? Die technischen Ergebnisse

3.1 Die Systemarchitektur: Sensoren und Zentrale

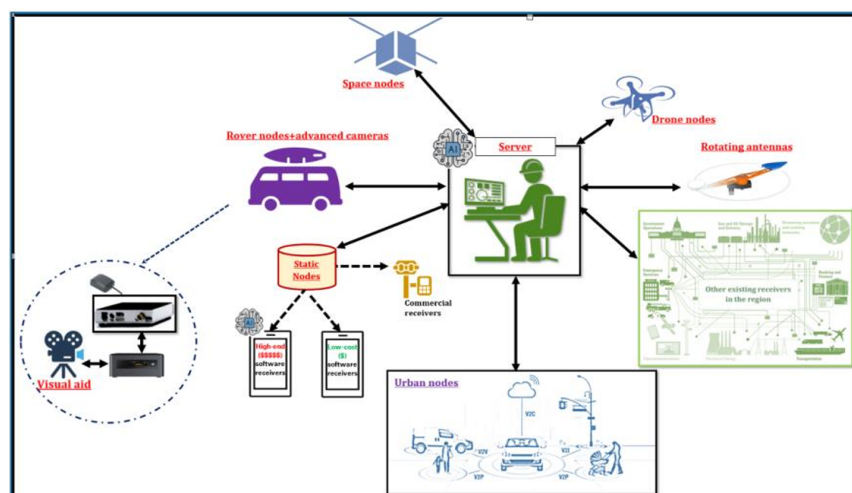


Abbildung 2

INDALOS basiert auf einem modularen Aufbau, ähnlich einem Netzwerk von Wetterstationen:

- **Sensoren (Knoten):** Einzelne Mess-Stationen, die an verschiedenen Orten aufgestellt werden und die Satellitensignale überwachen
- **Zentrale (Server):** Ein zentraler Computer, der die Daten aller Sensoren sammelt, analysiert und ein Gesamtbild erstellt

Der Server kann verschiedene Typen von Sensoren gleichzeitig verwalten:

- *Stationäre Sensoren:* Fest installiert an einem Ort (z.B. auf Gebäuden)
- *Mobile Sensoren:* Tragbar, zur temporären Überwachung oder in Fahrzeugen montiert
- *Rotierende Antennen:* Zur präzisen Richtungsbestimmung von Störquellen

3.1.1 Serversoftware und Netzwerkvisualisierung

In der Serversoftware wurde eine kartenbasierte Visualisierung des INDALOS-Netzwerks umgesetzt:

- Alle aktiven Sensorknoten (statisch und mobil) werden als Marker auf einer geografischen Karte dargestellt, inklusive Position und Knotennamen.
- Dies verschafft der Bedienerin/dem Bediener sofort einen Überblick über die räumliche Verteilung der Sensoren und erleichtert die Zuordnung erkannter GNSS-Störungen zu ihrem Standort im Feld.
- Die Kartenansicht ist ein wichtiger Schritt hin zu einer benutzerfreundlichen GUI und verbessert das Lagebewusstsein des Gesamtsystems.

Die kartenbasierte Darstellung der aktiven INDALOS-Knoten ist in Abbildung 3 gezeigt.

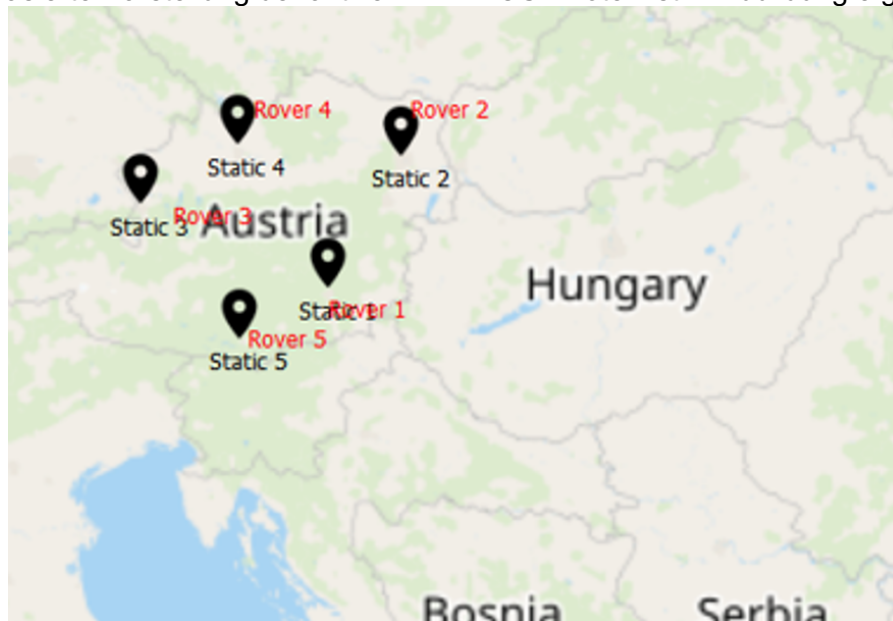


Abbildung 3: Kartenbasierte Darstellung der aktiven INDALOS-Sensorknoten in der Serversoftware (Netzwerkübersicht und Lagebild).

3.1.2 Sensor–Server-Kommunikation und IT-Sicherheit

Jeder INDALOS-Sensorknoten baut eine TCP/IP-Client-Verbindung zum zentralen Server auf. Für jede Messepoche wird eine strukturierte Textnachricht erzeugt, die u.a. folgende Informationen enthält:

- GPS-Woche (nGPSWeek)
- GPS-Sekunde (dGPSSecond)
- Überwachte Frequenz (freq)
- Interferenzstatus (interferencePresent)
- Logging-Flag für Jamming-Ereignisse (logJamming)
- Zusätzliche Qualitätsmetriken (z.B. aus sqmM1)

Diese Informationen werden als Textstring über eine persistente TCP-Verbindung an den Server gesendet. Die Zentrale speichert die Daten, analysiert sie in Echtzeit und erkennt bzw. klassifiziert GNSS-Interferenzereignisse.

Alle TCP/IP-Verbindungen zwischen INDALOS-Sensorknoten und dem zentralen Server sind durch TLS-verschlüsselte Client-Server-Verbindungen mit zertifikatsbasierter Authentifizierung abgesichert:

- Die anwendungsseitige TCP-Socket-Verbindung ist in eine TLS-Session eingebettet und gewährleistet Ende-zu-Ende-Verschlüsselung der Messdaten.
- Während des TLS-Handshakes prüft der Client das digitale Zertifikat des Servers und stellt sicher, dass der Knoten tatsächlich mit dem INDALOS-Server kommuniziert.
- Sämtliche übertragenen Daten sind damit vor dem Mitlesen durch Angreifer geschützt.

3.1.3 Lizenzkonzept

Die INDALOS-Software verwendet ein dateibasiertes Lizenzsystem:

- Eine separate Lizenz-Generator-Anwendung erzeugt Lizenzdateien, die Informationen wie Lizenztyp, Ablaufdatum und optional eine Hardware-ID enthalten.
- Diese Informationen werden mit einem privaten Schlüssel (OpenSSL-basiert) kryptografisch signiert.
- Auf Client-Seite ist ausschließlich der zugehörige öffentliche Schlüssel hinterlegt.
- Beim Start prüft die Anwendung, ob eine Lizenzdatei vorhanden ist, liest deren Inhalt und verifiziert die digitale Signatur.
- Nur wenn die Signatur gültig ist und die Hardware-ID zum aktuellen Gerät passt, wird die Lizenz akzeptiert.

- Zur zusätzlichen Absicherung wird die aktuelle Zeit über eine Online-Zeitquelle (WinHTTP) bezogen, um Manipulationen der lokalen Systemuhr (z.B. zur Umgehung von Ablaufdaten) zu verhindern.

Der Ablauf der Lizenzprüfung sowie das Fehler- und Sicherheitskonzept sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt.



Abbildung 4: Ablauf der Lizenzprüfung inklusive Signaturverifikation und Zeitvalidierung (Sicherheits- und Fehlerbehandlungskonzept).

3.2 Der Premium Static Node: Das Herzstück des Systems

Der **Premium Static Node (PSN)** ist der Hauptsensor des INDALOS-Systems – vergleichbar mit einer hochmodernen Wetterstation, die aber statt Temperatur und Niederschlag die Qualität der Satellitensignale misst.



Abbildung 5

Technische Leistungsmerkmale:

- **Weltweite Abdeckung:** Überwacht alle globalen Satellitennavigationssysteme gleichzeitig – GPS (USA), Galileo (Europa), GLONASS (Russland), BeiDou (China) und weitere. Insgesamt werden über 100 Satellitensignale parallel analysiert.
- **Höchste Präzision:** Erkennt Störungen mit einer Genauigkeit von über 99,97 % – das bedeutet, dass von 10.000 Ereignissen nur etwa 3 falsch eingeschätzt werden
- **Extreme Empfindlichkeit:** Erkennt bereits Störsignale, die nur minimal stärker sind als das normale Hintergrundrauschen ($> 3 \text{ dB/MHz}$) – vergleichbar damit, ein Flüstern in einem vollen Raum zu hören
- **Künstliche Intelligenz:** Nutzt 14 verschiedene Analyse-Methoden parallel und lernt kontinuierlich dazu, um auch neue, unbekannte Störungsarten zu erkennen
- **Echtzeit-Fähigkeit:** Analyse und Alarm erfolgen innerhalb von Millisekunden – schneller als ein Wimpernschlag

Bewährte Praxistauglichkeit

Der Premium Static Node wurde unter realen Bedingungen am Truppenübungsplatz Seetaler Alpe erfolgreich getestet. Dabei wurden verschiedene Störszenarien simuliert:

- *Breitband-Störer:* Stören viele Frequenzen gleichzeitig (wie ein Störsender, der ein breites Spektrum blockiert)
- *Chirp-Störer:* Wechseln schnell zwischen Frequenzen (schwerer zu erkennen)
- *Single-Tone-Störer:* Stören nur eine spezifische Frequenz (sehr gezielt)

In allen Tests konnte der PSN die Störquellen zuverlässig identifizieren und lokalisieren.

Technische Daten auf einen Blick:

Merkmal	Leistung
Erkennungsgenauigkeit	> 99,97 %
Unterstützte Systeme	GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou, QZSS, NavIC, SBAS
Reaktionszeit	Millisekunden (Echtzeit)
Empfindlichkeit	> 3 dB/MHz über Rauschpegel
KI-Methoden	14 parallele Detektionsmethoden (Stream-, Channel-, Receiver-basiert)
Reifegrad	TRL 8 (einsatzbereit, erfolgreich getestet)

3.2.1 Ausgangssituation vor Projektbeginn (PSN „vorher“)

Vor Beginn von INDALOS Akut befand sich der Premium Static Node in einem prototypischen Zustand.

Frequenzbereich (vorher)

- Der PSN arbeitete ausschließlich im L1/E1-Frequenzband.
- Interferenzdetektion und -charakterisierung waren nur für L1/E1 implementiert.
- Die Verarbeitungskette und die Datenformate waren auf Einbandbetrieb ausgelegt:
 - keine Unterstützung zusätzlicher GNSS-Bänder,
 - keine multifrequente Verarbeitung,
 - keine gemeinsame Analyse über mehrere Frequenzbänder.

Software (vorher)

- Die Interferenz-Monitoring-Pipeline war fest auf L1/E1 kodiert:
 - Detektionsalgorithmen, Schwellwerte und Konfigurationsparameter waren auf dieses Band zugeschnitten.
- Datenstrukturen und interne Schnittstellen waren nicht für eine einfache Erweiterbarkeit auf andere Frequenzen ausgelegt.
- Die Software diente primär der funktionalen Verifikation im Labor; Aspekte der operativen Nutzbarkeit (GUI-Konzept, Visualisierung, Bedienkomfort) waren nur rudimentär vorhanden.

Hardware (vorher)

- Die Hardware entsprach einem Laboraufbau:
 - Ausgelegt als Proof-of-Concept für Interferenzdetektion im L1/E1-Band,
 - nicht optimiert für Robustheit, Umweltbedingungen oder langfristige Feldtauglichkeit.
- Der Knoten war somit ein experimentelles Messsystem und noch kein produktreifer Sensor.

Monitoring-Algorithmen und Entscheidungslogik – Stand aus PINPOINT

Im Vorgängerprojekt PINPOINT wurde ein erstes Framework für GNSS-Interferenzdetektion entwickelt:

- Grundkonzept von drei Algorithmusfamilien: Stream-basierte, Receiver-basierte und Channel-basierte Verfahren.
- Erste Detektionsalgorithmen für L1/E1 auf Basis klassischer Verfahren wie Leistungsverfolgung und PSD-Analyse.
- Prototypische Implementierungen für Laborversuche und Offline-Auswertungen.
- Integration in einen Forschungsprototypen des PSN, jedoch:
 - beschränkt auf Einfrequenzbetrieb,
 - noch nicht für 24/7-Echtzeitbetrieb optimiert,
 - Entscheidungslogik auf einfachen Schwellwertregeln ohne ausgereiftes Fusionskonzept.

Diese Vorarbeiten bildeten die Ausgangsbasis für INDALOS Akut.

3.2.2 Weiterentwicklungen im Projekt INDALOS Akut (PSN „nachher“)

Im Projekt INDALOS Akut wurde der Premium Static Node umfassend weiterentwickelt.

Frequenzbereich (nachher)

- Erweiterung vom reinen L1/E1-Prototyp zu einem multifrequenzfähigen Interferenz-Monitoringsystem.
- Unterstützung mehrerer GNSS-Frequenzbänder, parallele Überwachung verschiedener Bänder.
- Gemeinsame Analyse über mehrere Frequenzen zur besseren Erkennung und Klassifikation komplexer Jamming- und Spoofing-Szenarien.

Software & GUI (nachher)

- Generalisierung der Verarbeitungskette und des internen Datenmodells für multifrequenten Betrieb:

- Algorithmen und Parameter können für zusätzliche Bänder konfiguriert werden, ohne den Quellcode grundlegend zu ändern.
- Feineinstellung der schwellenwert-basierten Detektionsmethoden anhand umfangreicher Labor- und Feldmessungen.
- Deutliche Erweiterung der GUI:
 - übersichtlichere Layouts und Sichten für multifrequentes Monitoring,
 - verbesserte Visualisierung von GNSS-Anomalien und Interferenzindikatoren,
 - Einführung eines eigenen History-Tabs für:
 - Ansicht vergangener Ereignisse und Alarme,
 - besseres Verständnis des Systemverhaltens über die Zeit,
 - Unterstützung von Post-Event-Analysen.

Die Unterschiede zwischen der ursprünglichen Software und der im Projekt entwickelten Version sind in Abbildung 6 dargestellt; ein Beispiel des History-Tabs ist in Abbildung 7 gezeigt.

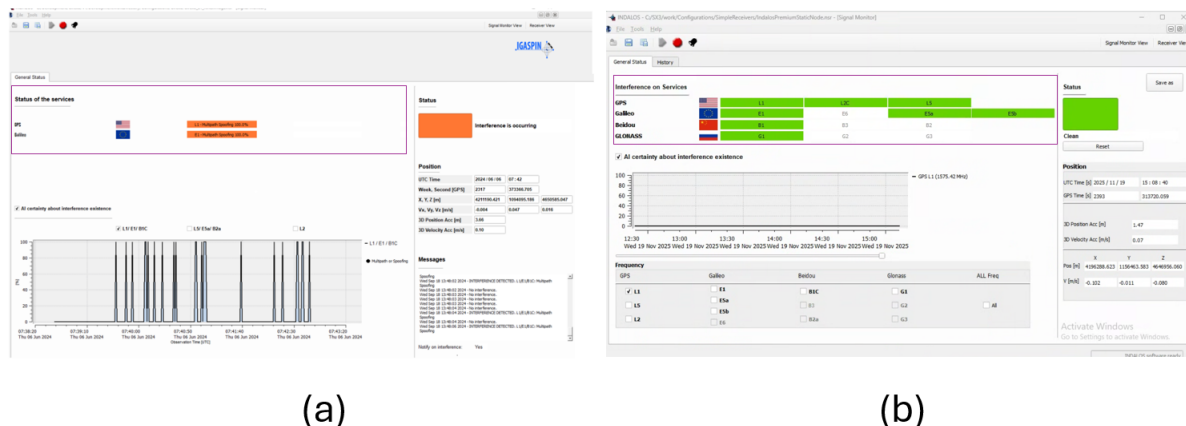


Abbildung 6: Software des Premium Static Node vor (a) und nach (b) der Weiterentwicklung in INDALOS Akut (Multiband-Unterstützung und erweiterte GUI).

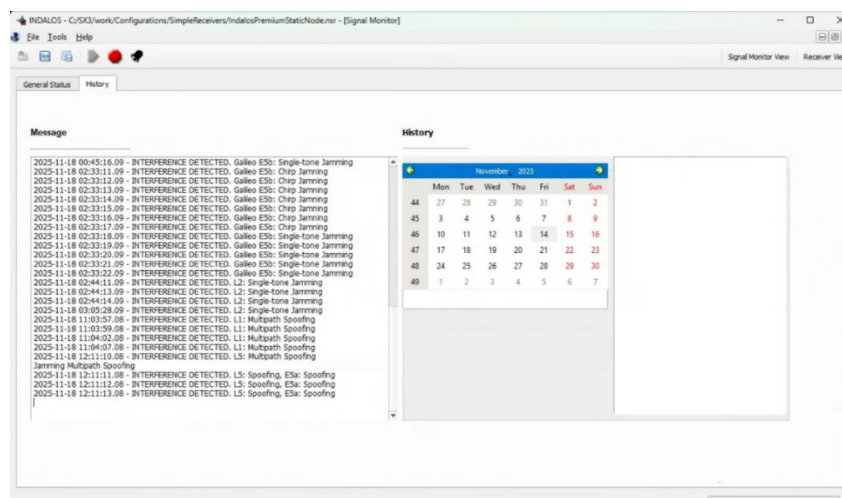


Abbildung 7: History-Tab der PSN-GUI mit Anzeige vergangener Ereignisse und Alarme.

Hardware-Integration (nachher)

- Umwandlung des Laboraufbaus in einen vollständig integrierten, robusten Premium Static Node:
 - Hardwareauslegung für kontinuierlichen 24/7-Betrieb,
 - mechanische und elektrische Integration in ein kompaktes, feldtaugliches Gerät.
- Ergebnis ist ein einsatzfähiger Sensorknoten, der multifrequentes GNSS-Interferenzmonitoring mit industrieller Zuverlässigkeit kombiniert.

Der Übergang vom Laboraufbau zum integrierten Premium Static Node ist in Abbildung 8 visualisiert.



(a)



(b)

Abbildung 8: Hardware des Premium Static Node vor (a) und nach (b) der Integration zu einem produktreifen 24/7-Sensorknoten.

3.2.3 Monitoring-Algorithmen und KI-Entscheidungslogik

In INDALOS Akut wurden die vorhandenen Monitoring-Algorithmen aus PINPOINT deutlich weiterentwickelt, konsolidiert und für den operativen Einsatz vorbereitet:

- **Erweiterung und Konsolidierung der Algorithmen**
 - Verallgemeinerung von Einfrequenz- (L1/E1) auf multifrequentes Monitoring für alle unterstützten GNSS-Bänder.

- **Anpassung für Echtzeit- und Dauerbetrieb**
 - Refactoring und Optimierung der Implementierungen für Echtzeitverarbeitung auf der PSN-Hardware.
 - Überarbeitung von Datenstrukturen und Schnittstellen für stabilen 24/7-Betrieb (Speicher- und CPU-Verhalten).
- **Datengetriebene Abstimmung und Robustheit**
 - Auswertung von Langzeitdaten im Büro-Betrieb sowie von gezielten Jamming- und Spoofing-Kampagnen in Tupel.
 - Systematische Abstimmung von Schwellwerten und Parametern zur Erreichung hoher Detektionswahrscheinlichkeit bei niedriger Falschalarmrate.
 - Besondere Berücksichtigung von Mehrwegeeffekten und harmlosen Störungen, um unnötige Alarmer zu vermeiden.
- **KI-gestützte Fusion und Entscheidungslogik**
 - Implementierung eines Fusionsmodells, bei dem jeder Algorithmus einen Konfidenzwert zur Präsenz und Art der Interferenz liefert.
 - Gewichtete Kombination dieser Konfidenzen in einer Entscheidungsinstanz auf Node-Ebene (Klassifikation z.B. in „Clean“, „Jamming“, „Spoofing“, „Multipath“).
 - Adaptive Mechanismen zur besseren Handhabung bislang unbekannter Störmuster und veränderlicher Umgebungen.
- **Integration ins Gesamtsystem**
 - Einbindung der Entscheidungslogik in GUI (Anomalie-Indikatoren, Ereignislisten, History-Tab) und Server-Visualisierung.
 - Integration in Logging- und Exportfunktionen zur späteren Analyse und Validierung.

3.2.4 Bewährte Praxistauglichkeit und Umfang der erbrachten Leistung

Der Premium Static Node wurde unter realen Bedingungen am Truppenübungsplatz Seetaler Alpe sowie im Langzeitbetrieb (z.B. in Graz und Tupel) erfolgreich getestet. Dabei wurden verschiedene Störszenarien simuliert bzw. erzeugt:

- **Breitband-Störer:** Stören viele Frequenzen gleichzeitig (z.B. breitbandige Jammer).
- **Chirp-Störer:** Wechseln schnell zwischen Frequenzen (schwerer zu erkennen).
- **Single-Tone-Störer:** Stören nur eine spezifische Frequenz (sehr gezielt).
- **Spoofing-Szenarien und Mehrwegeeffekte.**

In allen Tests konnte der PSN die Störquellen zuverlässig identifizieren und lokalisieren.

Zusammenfassend wurde im Projekt INDALOS Akut:

- der vorherige L1/E1-Laborprototyp zu einem multifrequenzfähigen, produktreifen Sensorknoten weiterentwickelt,
- die Monitoring-Algorithmen aus PINPOINT zu einem robusten, KI-gestützten Entscheidungsframework ausgebaut,
- Hardware, Software, GUI, Kommunikation, Security und Lizenzierung auf operativen 24/7-Betrieb ausgerichtet und
- die Zielkennzahlen (Erkennungsgenauigkeit, Reaktionszeit, TRL 8) im Labor und Feld demonstriert.

3.3 Validierung: Wie wurde die Zuverlässigkeit nachgewiesen?

Um sicherzustellen, dass INDALOS unter allen Bedingungen zuverlässig funktioniert, wurde das System umfassend getestet. Der Begriff **TRL 8** (Technology Readiness Level 8) bedeutet, dass das System vollständig entwickelt ist und unter realen Bedingungen erfolgreich funktioniert hat – es ist also bereit für den praktischen Einsatz.

Durchgeführte Tests:

- **Labortests:** Überprüfung der Genauigkeit der KI-Entscheidungen
- **Feldtests:** Praxistests unter realen Bedingungen mit verschiedenen Umgebungseinflüssen
- **Robustheitstests:** Unterscheidung zwischen Störungen und natürlichen Signalstörungen (z.B. durch Gebäude, Gelände)
- **Langzeittests:** Überprüfung der Stabilität und Zuverlässigkeit über längere Zeiträume.

Ergebnis: Alle Tests waren erfolgreich. INDALOS funktioniert und ist sofort einsatzbereit.

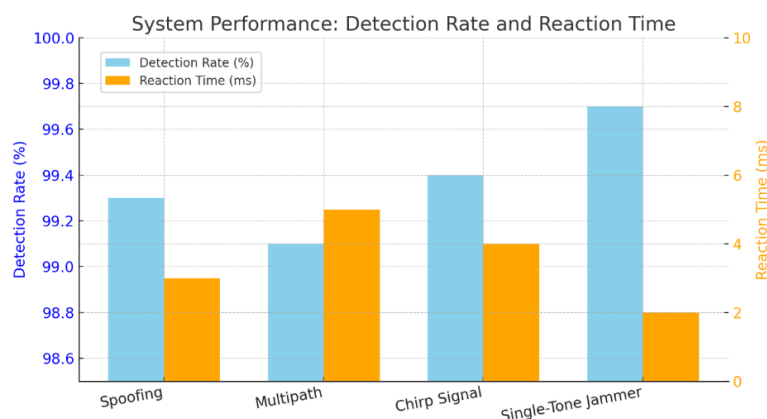


Abbildung 9

3.4 Vorgehensweise und angewandte Methoden

Zur Erreichung der Projektziele wurde ein strukturiertes, mehrstufiges Vorgehen gewählt:

1. Anforderungsanalyse und Systemdesign

- Analyse der im Projektantrag beschriebenen Szenarien (z.B. Jamming/Spoofing an kritischer Infrastruktur).
- Ableitung technischer Anforderungen (unterstützte Frequenzen, Detektionswahrscheinlichkeit, Falschalarmrate, Reaktionszeit, Verfügbarkeit, IT-Sicherheit).
- Erstellung einer Systemarchitektur für Sensornetz, Server, Kommunikation und Visualisierung.

2. Laboraufbau und Datenerfassung

- Aufbau eines Labor-Testbeds mit GNSS-Signalquellen und einstellbaren Störsendern (Breitband-, Chirp-, Single-Tone-Jammer, Spoofing).
- Systematische Messkampagnen mit variierenden Störtypen und Pegeln.
- Erfassung von Langzeitdaten im Büro-Betrieb zum Verständnis typischer „Clean“-Zustände und seltener Störungen.

3. Algorithmusentwicklung und -optimierung

- Auswertung der Messdaten zur Analyse der Detektionsmetriken (Leistung, spektrale Indikatoren, Signalqualitätsmaße) für Clean-, Jamming-, Mehrwege- und Spoofing-Szenarien.
- Datengetriebene Abstimmung von Schwellwerten und Parametern für die >14 Detektionsalgorithmen.
- Implementierung und Verifikation eines Fusionsmodells mit Konfidenzwerten je Algorithmus.

4. Integration in den Premium Static Node

- Umsetzung der optimierten Algorithmen in die PSN-Verarbeitungskette.
- Generalisierung von Datenstrukturen und Schnittstellen für multifrequenten Echtzeitbetrieb.
- Iterative Zyklen aus Implementierung, Test, Bugfixing und Performanceoptimierung.

5. Integration von Server, Kommunikation und Sicherheit

- Entwurf des Sensor–Server-Protokolls, inkl. strukturierter Messnachrichten (Zeit, Frequenz, Interferenzstatus, Qualitätsmetriken).

- Implementierung von TLS-Verschlüsselung und Zertifikatsprüfung zur Absicherung aller Verbindungen.
- Validierung der Fehlerbehandlung bei Fehlkonfigurationen und ungültigen Zertifikaten.

6. GUI-Design und Netzwerkvisualisierung

- Weiterentwicklung der PSN-GUI (Multiband-Ansichten, History-Tab).
- Entwicklung einer Kartenansicht in der Serversoftware mit allen Knoten und deren Status.
- Einbindung von Alarmen und Ereignissen zur Unterstützung des Lagebilds.

7. Feldtests, Langzeitbetrieb und TRL-Nachweis

- Durchführung von Jamming- und Spoofing-Kampagnen in Tupel und anderen Standorten.
- Dauerbetrieb (24/7) zur Verifikation von Stabilität und Robustheit.
- Auswertung der Feld- und Langzeitdaten zum Nachweis der Zielkennzahlen und des Reifegrads TRL 8.

4. Was macht INDALOS besonders?

INDALOS hebt sich durch mehrere technologischen Innovationen von vergleichbaren Systemen ab:

1. **Künstliche Intelligenz mit Lernfähigkeit:** Während herkömmliche Systeme nur bekannte Störmuster erkennen, lernt INDALOS kontinuierlich dazu und passt sich automatisch an neue Bedrohungen an
2. **Weltweite Kompatibilität:** Überwacht alle globalen Navigationssysteme gleichzeitig – andere Systeme sind oft auf ein oder zwei Systeme beschränkt
3. **Netzwerkintelligenz:** Durch Zusammenführung der Daten mehrerer Sensoren entsteht ein präzises Lagebild – vergleichbar mit mehreren Zeugen, die ein Ereignis aus verschiedenen Blickwinkeln beschreiben
4. **Einfache Integration:** Bestehende GNSS-Überwachungssysteme können problemlos in das INDALOS-Netzwerk eingebunden werden – keine teuren Ersatzinvestitionen nötig
5. **Skalierbarkeit:** Vom einzelnen Sensor bis zum landesweiten Netzwerk – das System wächst mit den Anforderungen

Merkmal	INDALOS-System	Herkömmliche Systeme
Monitoring-Methoden	● Universelle Architektur mit mehreren Monitoring-Nodes (Sensoren)	● Begrenzte Anzahl fester Empfänger
All-in-One-PNT-Monitoring	● Komplette Lösung für PNT-Monitoring mit umfassendem GNSS-Schutz	● Teilweise oder nur ein GNSS-System unterstützt
KI-gestützte Entscheidungsfindung	● Echtzeit-KI-Analyse zur Zonenerkennung	● Manuelle oder schwellenbasierte Signalanalyse
Visuelle Unterstützung	● In Rover-Nodes integriertes visuelles Modul für besseres Situationsbewusstsein	● Keine visuelle Datenverarbeitung oder Kameraintegration
Betriebsmodi	● Echtzeit- und Post-Processing-Betrieb für präzise Analyse	● Nur Post-Processing oder verzögerte Erkennung
Algorithmen	● 15 KI-basierte Algorithmen, einschließlich der Karhunen–Loève-Transformation (KLT)	● Begrenzte Algorithmen oder einfache Filtermethoden
Geschwindigkeit & Genauigkeit	● Hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit mit Millisekunden-Reaktionszeit und >99 % Erkennungsrate	● Geringere Genauigkeit und langsamere Auswertung
Wartung	● Fernwartung und automatische Software-Updates	● Manuelle Wartung vor Ort erforderlich
Skalierbarkeit	● Modulares, leicht erweiterbares Multi-Node-Netzwerk	● Beschränkt auf feste Installationen oder Einzelsysteme

5. Wo kann INDALOS eingesetzt werden?

5.1 Praktische Anwendungsbeispiele

Flughäfen und Luftverkehr

INDALOS-Sensoren überwachen die Umgebung von Flughäfen und warnen sofort, wenn Störsignale den Flugverkehr gefährden könnten. Besonders kritisch sind Landeanflüge bei schlechtem Wetter, bei denen Piloten auf präzise GNSS-Signale angewiesen sind.

Häfen und Schifffahrt

In großen Häfen navigieren Schiffe in engen Fahrrinnen – ohne funktionierende Satellitennavigation drohen Kollisionen oder Grundberührungen. INDALOS schützt diese kritische Infrastruktur.

Stromversorgung

Kraftwerke und Stromnetze benötigen exakte Zeitsynchronisation. Störungen der GNSS-Zeitstempel können zu Netzininstabilitäten oder sogar Blackouts führen. INDALOS gewährleistet die rechtzeitige Erkennung solcher Risiken.

Militärische und sicherheitsrelevante Bereiche

Für Verteidigungseinrichtungen ist das kontinuierliche Monitoring des elektromagnetischen Umfelds essenziell. INDALOS liefert Echtzeit-Lagebilder und unterstützt bei der Erkennung und Abwehr gezielter Störangriffe.

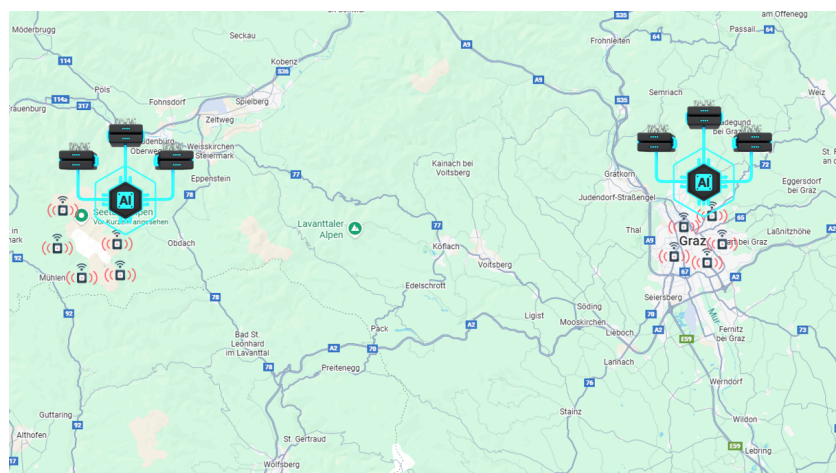


Abbildung 10

5.2 Wer profitiert von INDALOS?

Zielgruppen:

- Staatliche Einrichtungen und Behörden
- Verteidigungsministerien und Streitkräfte
- Raumfahrtagenturen
- Nationale GNSS-Kontrollzentren
- Betreiber kritischer Infrastrukturen (Energie, Verkehr, Telekommunikation)
- Flughäfen und Seehäfen

Die modulare Bauweise ermöglicht Lösungen für jeden Bedarf – von einer einzelnen Installation bis hin zu landesweiten oder sogar internationalen Überwachungsnetzwerken.

6. Stärken und nächste Schritte

6.1 Was kann INDALOS besonders gut?

- **Höchste Zuverlässigkeit:** Mehr als 99,97 % Erkennungsgenauigkeit
- **Sofortige Reaktion:** Echtzeit-Analyse und -Alarmierung
- **Flexibel erweiterbar:** Vom Einzelsensor bis zum Netzwerk
- **Weltweit einsetzbar:** Unterstützt alle globalen Navigationssysteme
- **Kosteneffizient:** Integration bestehender Systeme möglich

6.2 Was kommt als Nächstes?

Markteinführung (2025-2026): INDALOS ist produktreif und wird zur weltweiten Referenzlösung für GNSS-Schutznetze weiterentwickelt. Die kommerzielle Verfügbarkeit ermöglicht den raschen Aufbau von Überwachungsinfrastrukturen.

Folgeprojekt BEACONSAT: Die nächste Generation wird um weltraumgestützte Sensoren erweitert. Damit wird erstmals eine lückenlose, globale Überwachung von Störungen aus dem All möglich – ähnlich wie Erdbeobachtungssatelliten die Erde kontinuierlich überwachen.

Zukunftsvision: Langfristig sollen KI-gestützte Vorhersagefunktionen integriert werden, die Störungen bereits erkennen, bevor sie kritisch werden, und automatisch Gegenmaßnahmen einleiten – ein selbstlernendes Schutzsystem für die globale Navigationsinfrastruktur.

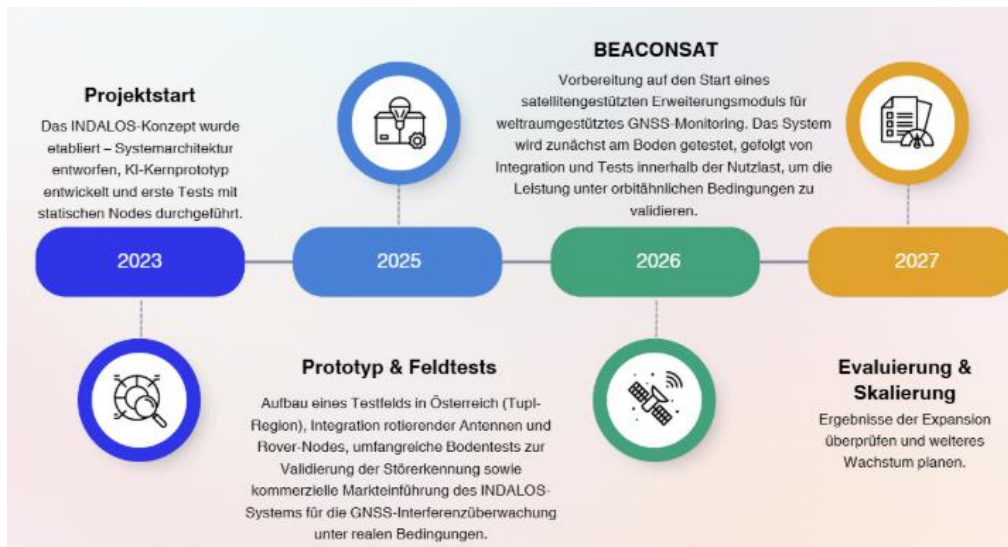


Abbildung 11

6.3 Mögliche Störungen aus dem All? – Internationale Messkampagne

Im Zuge des Dauerbetriebs der Premium Static Nodes sind interessante Anomalien aufgetreten, die auf mögliche weltraumgestützte Störquellen hinweisen könnten:

- Über mehrere Monate hinweg registrierte der in Graz installierte Premium Static Node wiederholt ungewöhnliche Anomalien im L1-Spektrum.
- Die Störungen dauern typischerweise 2–3 Stunden, wobei sich die Zeit des Auftretens von Nacht zu Nacht verschob.
- Im Spektrum zeigten sich konstant zwei schmale Peaks um die L1-Frequenz, getrennt durch mehrere hundert kHz.
- Zur Verifikation wurden zusätzliche INDALOS-Knoten an zwei weiteren Standorten in Graz installiert – mit identischen Beobachtungen.
- Parallel dazu wurden u-blox-Empfänger mit aktiviertem **CW Jamming Indicator** ausgewertet; dieser Indikator zeigt während der von INDALOS detektierten Ereignisse eine deutliche Erhöhung.

In Zusammenarbeit mit internationalen Partnern wurde eine Messkampagne gestartet. Erste Ergebnisse aus Madrid (Spanien), unterstützt durch ESSP, zeigen ein ähnliches Phänomen

– nahezu zur gleichen Zeit wie in Graz. Auffällig ist, dass dieses Muster gelegentlich auch in den Morgenstunden auftritt, dann allerdings mit geringerer Leistung und kürzerer Dauer.

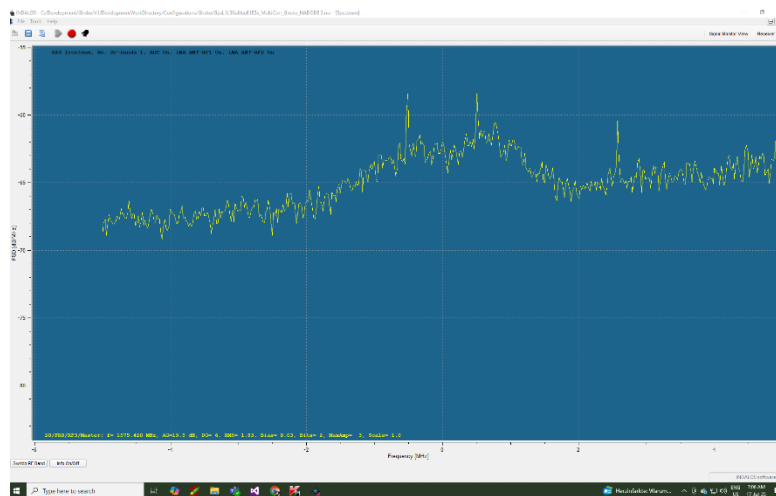
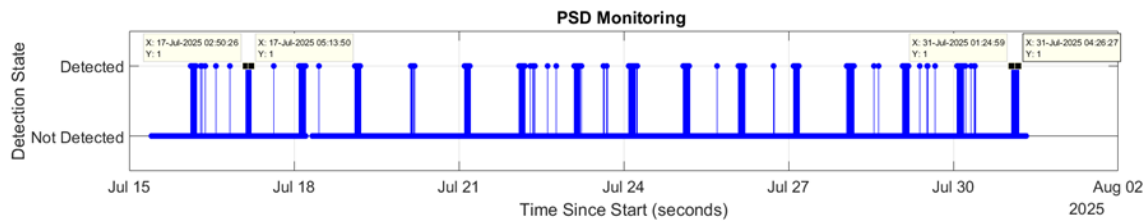


Abbildung 12: Interferenzdetektion mit INDALOS.

7. Zusammenfassung

Das Projekt INDALOS hat alle gesetzten Ziele erreicht und ein vollständig funktionsfähiges Überwachungssystem für Satellitennavigation entwickelt.

Mit einer Erkennungsgenauigkeit von über 99,97 % und der Fähigkeit, alle globalen Navigationssysteme gleichzeitig zu überwachen, setzt INDALOS neue Maßstäbe. Das System ist sofort einsatzbereit und wurde bereits unter realen Bedingungen erfolgreich getestet.

Die Bedeutung von INDALOS geht über technische Innovationen hinaus: Es schützt kritische Infrastrukturen, auf die unsere Gesellschaft täglich angewiesen ist – vom Flugverkehr über Stromnetze bis hin zu Rettungsdiensten. In einer Zeit, in der die Abhängigkeit von Satellitennavigation stetig wächst, bietet INDALOS einen wirksamen Schutz gegen Störungen und Ausfälle.

Mit der erfolgreichen Entwicklung positioniert sich IGASPIN als führender Anbieter für GNSS-Interferenzüberwachung im internationalen Wettbewerb. Die geplante Erweiterung um weltraumgestützte Sensoren im Folgeprojekt BEACONSAT wird die Überwachungskapazität auf eine neue, globale Dimension heben.

INDALOS steht für den Übergang zu einer resilienten, sicheren und global vernetzten Navigationsinfrastruktur – ein entscheidender Schritt für die Zukunftssicherheit unserer digitalisierten Gesellschaft.

8. Danksagung

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

Die IGASPIN GmbH bedankt sich bei allen Beteiligten, die sowohl die Förderung als auch für die Durchführung als auch die Testkampagne unterstützt haben.