

SaiNSOR

Vertrauenswürdige KI-Sensorik: Modulare Interface-Technologien für domänenübergreifende Messsysteme der Zukunft

Jürgen Wohlfeil^{1*}  <https://orcid.org/0000-0003-1786-6460>, Andre Choinowski¹,
Klaus Strobl²  <https://orcid.org/0000-0001-8123-0606>, Andrea Monti³,
Mahmoud Elbarrawy³  <https://orcid.org/0009-0007-1064-0318>, Claudio Ciano³,
Patrick Irmisch¹  <https://orcid.org/0009-0004-3621-530X>, Thomas Kraft¹  <https://orcid.org/0000-0003-3270-5606>,
Daniel Lüdtke³  <https://orcid.org/0000-0002-6758-1562>, Anko Börner¹,
Adrian Schischmanow¹  <https://orcid.org/0009-0003-6587-0816>

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

¹ Institut für Weltraumforschung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, Deutschland

² Institut für Robotik und Mechatronik, Münchener Straße 20, 82234 Oberpfaffenhofen-Weßling, Deutschland

³ Institut für Softwaretechnologie, Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

*Correspondence: Jürgen Wohlfeil, juergen.wohlfeil@dlr.de

Abstract. Das Projekt SaiNSOR – eine Initiative des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter der Leitung des DLR-Instituts für Weltraumforschung – verfolgt das Ziel, vertrauenswürdige und KI-gestützte Datenverarbeitungsprozesse für Messsysteme zu entwickeln. Kern der Arbeit ist die Entwicklung einer modularen, domänenübergreifenden Schnittstellentechnologie, welche multimodale Sensoriken integriert, Datenverarbeitung und Sensorik eng verknüpft – insbesondere für sicherheitskritische Anwendungen – und die durch qualitative Bewertungssysteme das Vertrauen in die Datenqualität nachhaltig stärkt.

Der dringende Bedarf ergibt sich aus den Herausforderungen moderner KI-Systeme: Während deren Blackbox-Charakter oft undurchsichtige Entscheidungsprozesse zur Folge haben, verlangen die strengen Vorgaben der EU-KI-Verordnung (AI Act) explizit die Bereitstellung von hochwertigen, nachvollziehbaren und transparenten Daten. Maßgeschneiderte Sensordaten sind dabei ein entscheidender Baustein, um KI-Systeme verlässlich und vertrauenswürdig zu gestalten.

Bisherige Insellösungen sind mit hohem Entwicklungsaufwand verbunden. SaiNSOR löst diese Herausforderungen durch eine flexible Interface-Technologie, die es ermöglicht, multimodale Sensordaten zu generieren, zu verarbeiten und mit Qualitätsmetriken auszustatten. Damit wird die Datenqualität sichergestellt und die Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendungsbereichen verbessert.

Keywords: Multimodale Sensordaten, Messsysteme, Qualitätsmetriken, Multisensorsystem

1 Einleitung

1.1 Motivation

Viele KI-Anwendungen erfordern homogene Daten komplexer Sensoriken. Oft müssen verschiedene Sensoren über verschiedene Schnittstellen eingelesen und deren Messdaten korrekt interpretiert werden. Von entscheidender Bedeutung sind dabei häufig:

- der zeitliche Bezug der Sensordaten, absolut und/oder relativ zueinander (zeitliche Referenzierung),
- ihr räumlicher Bezug, absolut und/oder relativ zueinander (räumliche Referenzierung),
- Qualitätsmetriken zu den Daten
- und eine grundlegende Vorverarbeitung der Daten um sie mit neuronalen Netzen verarbeiten zu können; üblicherweise mit klassischen und/oder KI-basierten Algorithmen.

In vielen Fällen nehmen die dazu notwendigen Arbeiten einen entscheidenden Teil der Entwicklungszeit in Anspruch. Im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurden viele individuelle Lösungen dafür in verschiedenen Projekten benötigt und über die letzten Jahre entwickelt.

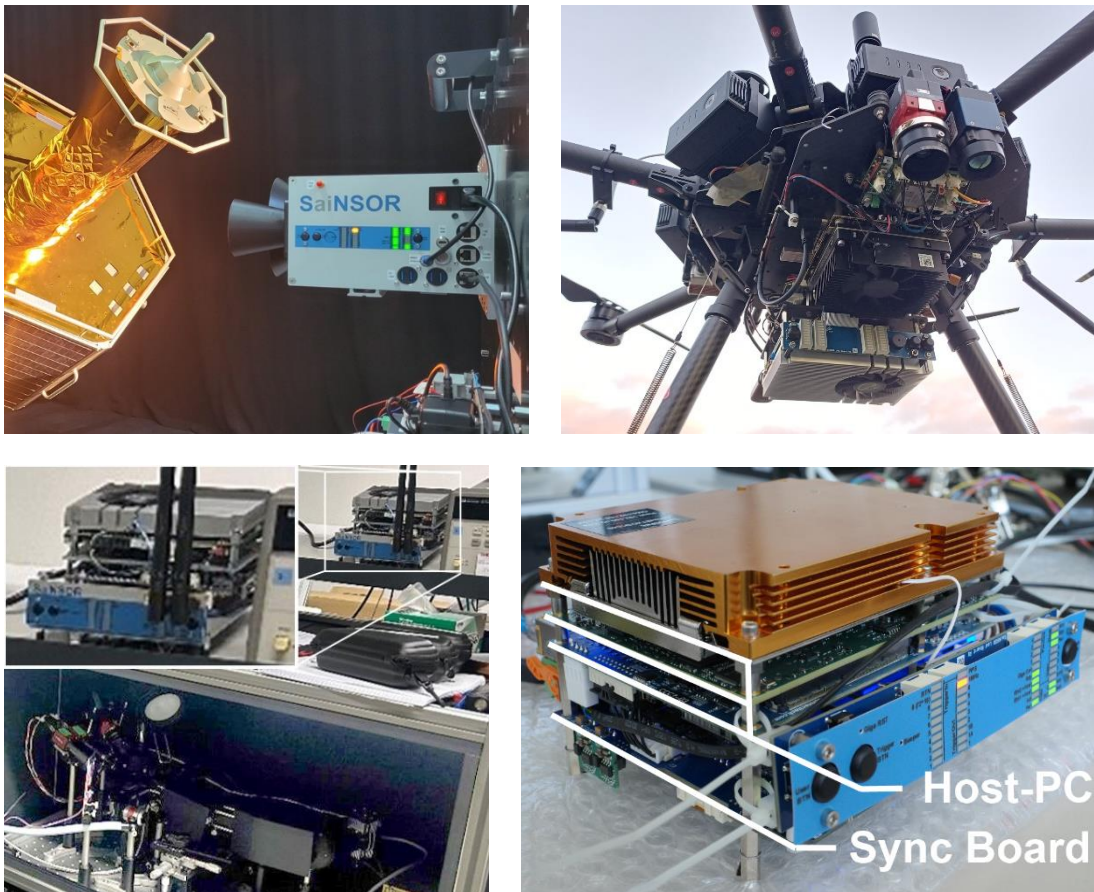


Abbildung 1: SaiNSOR Prototypen in verschiedenen Anwendungen. Oben links: auf der EPOS 2.0 Anlage, oben rechts an einer Drohne für den UAS-Eye Use-Case, unten links in einem Testaufbau für SpecX, unten rechts für das Verkehrsprojekt INTAS.

1.2 Lösungsansatz

Im Querschnittprojekt SaiNSOR wurde eine allgemeine Lösung für diese im vorherigen Abschnitt genannten Aufgaben entwickelt. Es stellt die Hardware und Software bereit, welche für die oben beschriebenen Anforderungen eine universelle Lösung bietet. Auch wenn sie in ihrer vollständigen und prototypisch umgesetzten Konfiguration für manche Anwendungen zu groß, zu schwer oder zu energieintensiv ist, stellt sie einen Ausgangspunkt für die Entwicklung dar. Mit relativ geringem Aufwand kann sie durch das Weglassen unnötiger Komponenten zu einer passenden Lösung weiterentwickelt werden.

2 Systembeschreibung

Um seinen Aufgaben gerecht zu werden besteht SaiNSOR aus den folgenden Hard- und Software Komponenten (vergleiche Abbildung 1 unten rechts und Abbildung 2):

- Das Sync-Board basiert auf einer eigens entwickelten Platine, auf der die Hardware für eine genaue Auslösung und Zeitstempelung der Sensoren untergebracht ist. Auf dem Sync-Board läuft eine eigens entwickelte Firmware, die auf einem Arduino programmiert wurde und sich somit leicht erweitern und anpassen lässt.
- Ein Host-PC liest als kompakter Hochleistungsrechner die Sensordaten über schnelle Schnittstellen ein und stellt sie mittels der ROS2-basierten SaiNSOR-Middleware der KI-Anwendung zur Verfügung. Dabei werden die Daten zeitlich verknüpft, vorverarbeitet, und räumlich referenziert (mehr dazu in Abschnitt 3). Diese Anwendung kann auf dem Host-PC oder einem weiteren System laufen.

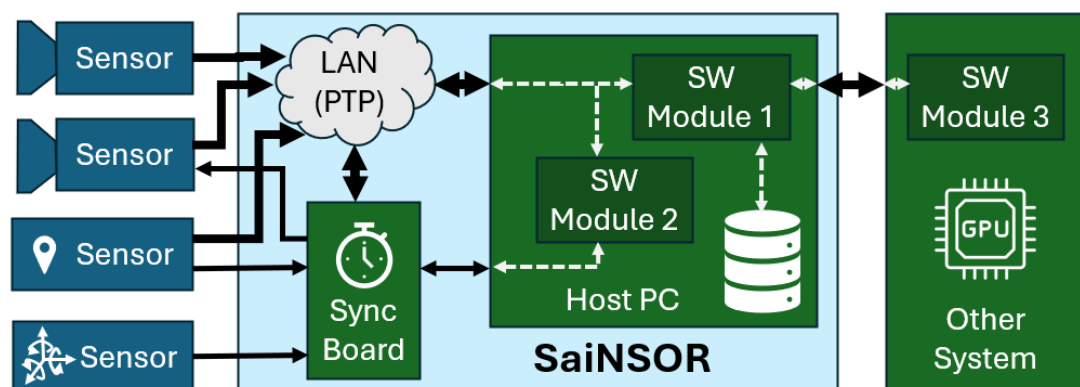


Abbildung 2: Schematischer Aufbau von SaiNSOR. Die breiten Pfeile stellen breitbandige Ethernet Verbindungen dar, die schmalen Pfeile Steuerleitungen oder schmalbandige Verbindungen (UART, I2C, etc.) welche zur Zeitstempelung der Synchronisationssignale über das Sync Board geführt werden).

In den folgenden Abschnitten wird die Umsetzung der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Schritte auf der entsprechenden Hardware im Einzelnen erläutert.

2.1 Zeitliche Referenzierung

Die Daten der verschiedenen Sensortypen müssen abhängig von der Anwendung zeitlich möglichst genau und absolut zueinander referenziert werden. Dies betrifft sowohl die präzise zeitliche Zuordnung der aufgezeichneten Daten, als auch die präzise zeitliche Steuerung der Auslösezeitpunkte von Messungen.

Zur Zeitstempelung und zeitgenauer Auslösung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Sensoren, welche über ein lokales Netzwerk (LAN) angebunden sind und die das Precision Time Protocol (PTP, gemäß IEEE1588) unterstützen, werden über das Netzwerk zeit-synchronisiert. Das Sync-Board mit seinem hochgenauen Ofen-Quarz übernimmt hierbei die

Rolle des PTP-Masters. Die Zuordnung der Daten von Sensoren, welche ihre Aufzeichnungszeitpunkte elektrisch signalisieren (Trigger), erfolgt über die präzise Registrierung der Trigger-Events (In Abbildung 2 als dünne Pfeile dargestellt). Dafür verfügt das System über acht elektrische Trigger-Eingänge. Die Methoden können auch kombiniert werden, um die sensorspezifischen systematischen und unsystematischen Zeitversätze in den Zeitstempeln zu ermitteln und zu validieren. Von Seiten des SaiNSOR Systems liegt der unsystematische Fehler der Zeitstempelung unter 10 μ s. Systematische Zeitversätze können durch einen konstanten Offset korrigiert werden. Sensordaten die nicht über diese beiden Wege referenziert werden können, können beim Empfang an der Schnittstelle (über LAN, USB, Serielle Schnittstelle, SPI oder I2C) zeitgestempelt werden. Dabei müssen die sensorspezifischen Zeitverzögerungen von der Messung bis zur Ausgabe des Synchronisationssignals bzw. der Daten des Sensors einmal ermittelt werden (z.B. aus dem Datenblatt), damit der resultierende Zeitstempel mit dem eigentlichen Messzeitpunkt des Sensors übereinstimmt.

Müssen Sensoren zeitgleich oder mit einem bestimmten Zeitversatz zueinander ausgelöst werden (z.B. bei Multi-Kamerasystemen), stehen dafür sechs elektronische Trigger-Ausgänge zur Verfügung (TTL-Pegel).

Dies alles ist auch möglich ohne absolute Zeitanbindung, wenn nur der relative zeitliche Ablauf entscheidend ist. Für präzise, langzeitstabile Zeitmessungen sorgt ein eingebauter stabilisierter und kalibrierter Ofen-Quarz, der die Uhren der Systemkomponenten zur Laufzeit sehr genau hält.

Zur Anbindung an die absolute Zeit kann ein GNSS-Receiver über einen dafür vorgesehenen Stecker direkt eingebunden werden. SaiNSOR bietet verschiedene Synchronisationsmodi für Fälle, in denen ein GNSS-Zeitsignal (1) ständig vorhanden ist, (2) anfangs noch nicht verfügbar sein kann und/oder (3) zeitweise ausfallen kann, und die Zeit mittels Ofen-Quarz weitergezählt wird.

2.2 Räumliche Referenzierung

In vielen KI-Anwendungen ist der räumliche Bezug hilfreich bis unerlässlich. In mehreren DLR-Projekten ist eine hohe räumliche Genauigkeit sogar von entscheidender Bedeutung. SaiNSOR verfügt daher über Konzepte und Implementierungen zur Bereitstellung räumlicher Informationen:

- Absolute Verortung des Systems: Dafür kann ein GNSS-Empfänger direkt auf das Sync-Board aufgebracht oder ein externes Gerät angeschlossen werden. Zusätzlich ist das Sync-Board für den Anschluss einer inertialen Messeinheit (engl. Inertial Measurement Unit, kurz IMU) vorbereitet.
- Relative Referenzierung der Sensoren: Da üblicherweise verschiedene Sensoren verwendet werden, die sich gegenseitig ergänzen, ist es notwendig, dass ihre Ergebnisse im gleichen Bezugssystem und Maßstab bereitgestellt werden.
- Geometrische Kalibrierung einzelner Komponenten (intrinsische Kalibrierung): Zur räumlichen Zuordnung einzelner Messungen ist diese ebenfalls erforderlich. Je nach Genauigkeitsanforderung muss diese Kalibrierung pro Messaufbau durchgeführt werden – z.B. mit DLR-Tools wie CalLab [1].

Für Sensoren mit geringer bis mittlerer Reichweite ist es problemlos möglich, dies vollständig auf geometrische Weise zu tun, indem man ihre relative räumliche Position und Ausrichtung entweder aus einem vorherigen, genauen Kalibrierungsprozess oder aus Online-Schätzungsprozessen ermittelt wird. Aus Gründen der Genauigkeit wird der erste Ansatz aus bevorzugt. In Abschnitt 4.3 beschreiben wir als Beispiel die geometrische Registrierung von Stereo-Vision-Daten mit einem RAMAN-Spektrometer.

2.3 Qualitätsmetriken

Für die Bereitstellung hochwertiger, nachvollziehbarer und transparenter Daten ist die lückenlose Überwachung und Rückverfolgung der aufwändigen, aber notwendigen Kalibrierprozesse entscheidend. Im SaiNSOR-Projekt wird diese Software im Rahmen einer auf ROS2 basierten Middleware implementiert (siehe Abschnitt 3), die auf der SaiNSOR-Box läuft. So können Sensor-Metadaten wie die Qualitätsmesswerte von Qualitätsmetrik-Softwarenodes geliefert werden. Die in der SaiNSOR-Box laufende Middleware überwacht drei Kategorien von Daten:

- Die photometrische Qualität der Bilder: Diese ist von zentraler Bedeutung, um die Sensorhardware optimal abzustimmen, Fehlkonfigurationen frühzeitig zu erkennen und nachgelagerte Aufgaben wie die visuelle Bewegungsabschätzung der Kamera mit Qualitätsmetriken zu versehen. Im Falle von Kameras umfasst die entwickelte Software die folgenden photometrischen Online-Messungen: Unschärfe-Bewertung, Rauschabschätzung und deren Verhältnis zum Signal (Signalleistungsverhältnis SNR und Peak-SNR), dynamische Bereiche der numerischen Farbkanalnutzung, Über- und Unterbelichtungsmessungen sowie die vielseitige, maschinell erlernte Qualitäts-Bewertung Brisque. Brisque zeichnet sich durch die Erkennung einer großen Anzahl unerwünschter Konfigurationen wie Unschärfe, Überbelichtung, starke Komprimierung, Bildgrößenänderung, Aliasing und Rauschen aus.
- Die Verfügbarkeit von Sensordaten: Unsere eingebettete Software prüft kontinuierlich die Verfügbarkeit der Sensordaten, stellt sicher, dass die Daten neu sind (unterschiedliche ID, Zeitstempel und Datensignatur), ihre ankommende Bildrate, ob die Bildrate den Erwartungen entspricht, ob die Sensorkonfiguration den Erwartungen entspricht, sammelt Softwarewarnungen im Zusammenhang mit der Erzeugung jeder Data Message und liefert für die weitere Planung die Arbeitslast des Rechensystems einschließlich der Rechen-, Speicher- und Festplattennutzung.
- Den Zustand des zeitlichen Synchronisationssystems: Dies schließt die zeitliche Genauigkeit der Sensoren, des Sync-Boards und die Latenz unserer eigenen Softwarenodes (z.B. die Rechenlatenz jedes Transformationsnodes, einschließlich der Qualitätsmessnodes) mit ein.
- Extrinsische kinematische Transformationen: die für die finale Aufgaben von Interesse sein könnten, wie z.B. aktive Kameras, die synchronisierte Roboterbewegungen erfordern.

Die Rückverfolgung der Kalibrierprozesse soll die gelieferten Daten ebenfalls als Metadaten ergänzen, da diese wird oft von den finalen Prozessen für deren eigene Qualitätsmetrik verwendet werden. Allgemein werden diese Prozesse vor dem Betrieb durchgeführt werden und erst dann geändert, wenn eine Fehlfunktion auftritt, eine Rekalibrierung erforderlich ist oder eine Änderung des Setups gemacht wird. Infolgedessen ändern sich diese Qualitätsmaßnahmen in der Regel nicht während des Betriebs und sind nicht vom Inhalt der Daten, sondern von ihrer Quelle abhängig. Die Software in der SaiNSOR-Box verfolgt die Kalibrierungsdaten hinsichtlich der photometrischen Qualität der Sensordaten sowie der geometrischen Kalibrierungsgenauigkeit.

Erwähnenswert ist, dass die Einbeziehung von KI-gesteuerten Qualitätsmaßen in unserem Rahmenwerk nur dann in Betracht gezogen wird, wenn sie für die meisten Folgeaufgaben von Interesse sind. Andernfalls werden die von der KI berechneten Qualitätsmaße typischerweise mit der Inferenzausgabe der neuronalen Netze verbunden, da sie rechenintensiv sind und mit jedem Inferenzschritt gekoppelt sind.

3 Softwarearchitektur

Die aktuellen Anforderungen in den zahlreichen, unterschiedlichen Projekten des DLR erfordern eine modulare, robuste und skalierbare Architektur, die in der Lage ist, heterogene Sensorerfassung und -verarbeitung in sehr unterschiedlichen Anwendungsbereichen zu unterstützen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, haben wir in SaiNSOR ein Framework entwickelt, welches das Robot Operating System 2 (ROS2) in einer speziellen Abstraktionsschicht kapselt und für die nahtlose Integration multimodaler Sensoren ausgelegt ist. Das Framework wird im SaiNSOR-Kontext als Middleware bezeichnet und nutzt die nativen Fähigkeiten von ROS2 wie das Publish-Subscribe-Kommunikationsmodell mit DDS-Kommunikationsprotokoll und Lifecycle-Management. Gleichzeitig wird eine zusätzliche Wrapping-Schicht eingeführt, die das Verhalten von Sensorknoten standardisiert, die Konfigurierbarkeit verbessert und eine strenge Lifecycle-Kontrolle durchsetzt. Die zentrale Konfiguration des Frameworks wird durch eine JSON-Datei erreicht, welche in drei Teile unterteilt ist: die Systemkonfiguration, die Sensorkonfiguration und die Benutzerkonfiguration. Während der Implementierung wurden mehrere wichtige Herausforderungen gelöst, wie z.B. die Harmonisierung unterschiedlicher Datenformate, die präzise Zeitsynchronisation über asynchrone Sensorströme hinweg sowie die Sicherstellung der Systemstabilität bei unterschiedlicher Zuverlässigkeit der Sensoren. Dies wird durch eine hierarchische Komposition von Softwaremodulen erreicht:

- BaseNode Layer: Erweitert die Fähigkeiten des "ROS2 Lifecycle Node", implementiert allgemeine Verwaltungsfunktionen (z.B. Diagnose, Handhabung von Parametern) und abstrahiert den sich wiederholenden Boilerplate-Code.
- SensorNode-Schicht: Kapselt die gerätespezifische Logik, einschließlich der Hardwaretreiber.
- UserNode-Schicht: Dies ist die Benutzerinteraktionsschicht, auf der Benutzer Kalibrierungsroutinen und Datenpipelines hinzufügen können.

Diese Trennung im Design ermöglicht es Entwicklern, hardwarespezifische Implementierungen von Implementierungen auf Systemebene zu isolieren, was die dynamische Rekonfiguration und nahtlose Integration heterogener Sensoren (z.B. Kameras, LiDAR, IMUs und GNSS) erleichtert.

4 Anwendungen und Tests

Um einen Einblick in die Vielfalt der Anwendungen von SaiNSOR zu geben sollen hier drei Beispiele unter jeweils einem Aspekt kurz beschrieben werden. Alle sind auch in Abbildung 1 dargestellt.

4.1 Use Case UAS-Eye

Eine Anwendung von SaiNSOR war die Nutzung des modularen Konzepts an unbemannten Flugsystemen (UAS) zur Erprobung von neuesten KI-Algorithmen zur Umfelderkennung und Wahrnehmung. Dazu wurde eine Payload für einen Multikopter entwickelt, womit hochauflösende Luftbilddaten im visuellen und thermal-infraroten Spektrum aufgenommen und thematisch ausgewertet werden können. Jedes aufgenommene Bild hat einen hochgenauen zeitlichen und räumlichen Bezug, sodass den detektierten Objekten im Bild ebenfalls ein räumlicher Bezug zugewiesen werden kann. Exemplarisch konnte die Detektion von Fahrzeugen oder Personen in den Luftbildern im Flug demonstriert werden. Dies erfolgte mit speziell trainierten KI-Modellen (z.B. RT-DETR und YOLO) auf State-of-the-Art Hardware (Nvidia Orin AGX DevKit). So war es möglich, in jeder Sekunde ein Bild des 25MPx Sensors thematisch auszuwerten. Die Fernsteuerung der Payload erfolgte im Flug über LTE.



Abbildung 3: Links: KI-gestützte Fahrzeug- und Personenerkennung in der Anwendung UAS-Eye (kombinierte Darstellung). Rechts: 3D-Modell eines Opal-Minerals im Bezugssystem des Spektrometers mit rot eingezeichneter Position des Laserstrahls und seiner tatsächlichen Position als grüner Punkt.

4.2 Use Case RICADOS

Angewendet wurde SaiNSOR auch in Experimenten im Rahmen der In-Orbit Satelliteninspektion in der Großforschungsanlage European Proximity Operations Simulator (EPOS 2.0) des DLR [2]. Die Anlage am DLR-Standort Oberpfaffenhofen bietet eine experimentelle Entwicklungs- und Testumgebung zur Simulation von Inspektions- und Annäherungsmanövern von Satelliten im Weltraum. In Zusammenarbeit mit dem DLR-Projekt RICADOS [3] 2.0 wurde für Evaluationszwecke eine Sensor Suite entwickelt, die mehrere Kameras, ein Light Detection and Ranging System (LIDAR) und die SaiNSOR Interface Unit umfasst. Das Gesamtsystem wurde auf EPOS 2.0 installiert und getestet. So konnten bereits erste Sensordaten erfolgreich generiert werden.

4.3 Use Case SpecX

Als Beispiel für die geometrische Referenzierung mit SaiNSOR dient hier die geometrische Registrierung von Stereo-Vision-Daten mit einem RAMAN-Spektrometer zur entfernten Untersuchung von Gesteinseigenschaften. Im Projekt SpecX muss die genaue Position des Messpunkts des Spektrometers zur Interpretation der Messergebnisse und zur weiteren Navigation des Messbereichs bekannt sein. Zu diesem Zweck wird eine klassische Stereokamera eingesetzt, welche RGBD-Daten (farbige 3D-Punktwolke) in ihrem eigenen Bezugssystem liefert. Um diese im Bezugssystem des Spektrometers darstellen zu können ist es notwendig (1) das Stereokameramodell [1] geometrisch zu kalibrieren und (2) eine Methode zur extrinsischen Kalibrierung des Kamerasystems in Bezug auf das Spektrometer zu entwickeln.

Diese Vorgänge werden von den im Rahmen von SaiNSOR gewählten Kalibrationsmethoden durch DLR CalDe and DLR CalLab [1] unterstützt. Zusätzlich zur Darstellung der 3D-Punktwolke im Bezugssystem des Spektrometers ermöglichen diese räumlichen Transformationen die Erzeugung virtueller hochauflösender RGB-Bilder, als ob sie aus dem genauen Blickwinkel des Lasers des Spektrometers aufgenommen worden wären. In diesen Bildern wird die Messung des Spektrometers immer auf dem zentralen Pixel des erzeugten Bildes erwartet. Dieser Pixel entspricht der Hauptachse der virtuellen Kamera, die sich im Bezugssystem des Spektrometers befindet (siehe Abbildung 3 rechts). Diese geometrische Methode kann auch bei Lidars und IMUs angewendet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

SaiNSOR wurde als universeller Lösungsansatz für die Entwicklung von Multi-Sensor-Anwendungen mit und ohne KI-Unterstützung entwickelt, um ein leistungsfähiges Fundament für neue Forschungsprojekte in diesem Feld zu etablieren. Dies wurde in mehreren realen Projekten als Use Cases prototypisch umgesetzt. Da die SaiNSOR-Box nicht gleichzeitig klein und zugleich leistungsstark genug für jede Anwendung sein kann, ist sie modular aufgebaut.

Nach ersten Tests mit der gesamten Box, die einen leichten Einstieg ermöglicht, können Komponenten weggelassen oder ersetzt werden um eine angepasste Lösung mit geringem Entwicklungsaufwand zu erreichen.

Für KI-Anwendungen ist es von Vorteil, dass sich Entwickler:innen nicht tief in die komplexen, fachübergreifenden Thematiken von Multisensorsystemen einarbeiten müssen. Mit ROS2 bietet die Middleware eine etablierte Schnittstelle zur Online-Verarbeitung, sowie der Aufzeichnung und späteren Verarbeitung der Sensordaten.

6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeitenden des SaINSOR-Projekts für ihre indirekten aber wertvollen Beiträge. Vielen Dank für die hervorragende Zusammenarbeit in diesem institutsübergreifenden Projekt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] K. H. Strobl, W. Sepp, S. Fuchs, C. Paredes, C. Smisek und C. Arbter, „DLR CalDe and DLR CalLab,“ Institute of Robotics and Mechatronics, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany, 2005. [Online]. Available: <https://rm.dlr.de/callab>. [Zugriff am 17 02 2026].
- [2] H. Benninghoff, F. Rems , E.-A. Risse und C. Mietner , „European Proximity Operations Simulator 2.0 (EPOS) - A Robotic-Based Rendezvous and Docking Simulator,“ *Journal of large-scale research facilities*, 2017.
- [3] H. Benninghoff, F. Rems, E.-A. Risse, P. Irmisch, B. Brunner, M. Stelzer, R. Lampariello und S. Christian, „RICADOS – Rendezvous, Inspection, CAPturing and Detumbling by Orbital Servicing,“ 2018. [Online]. Available: <https://indico.esa.int/event/224/contributions/3863/>.
- [4] K. H. Strobl und G. Hirzinger, „Optimal Hand-Eye Calibration,“ *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, p. 4647–4653, 2006.
- [5] K. H. Strobl und M. Lingenauber, „Stepwise Calibration of Focused Plenoptic Cameras,“ *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*, Bd. 145, p. 140–147, 2016.
- [6] „DLR-Projekt Intelligent ad-hoc sensor networks,“ [Online]. Available: <https://www.dlr.de/en/research-and-transfer/projects-and-missions/intas>. [Zugriff am 18 2 2026].