

# Robotergestütztes Bauwerksmonitoring basierend auf eingebetteter Sensorik

Sergej Johann<sup>1,2</sup>, Jan Stührenberg<sup>1</sup>  und Aditya Tandon<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Institut für Digitales und Autonomes Bauen, Technische Universität Hamburg, Blohmstraße 15,  
21079 Hamburg, Deutschland

<sup>2</sup>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin,  
Deutschland

E-Mails: sergej.johann@bam.de, jan.stuehrenberg@tuhh.de, aditya.tandon@tuhh.de

**Abstract:** In den letzten Jahrzehnten hat sich das Bauwerksmonitoring (engl. „Structural Health Monitoring“, SHM) zu einer nützlichen Ergänzung routinemäßiger Inspektionen entwickelt. SHM ermöglicht die frühzeitige Erkennung von Schäden an Bauwerken und dadurch die frühe, und somit kostengünstige, Durchführung von Reparatur- und Wartungsarbeiten. Mit dem Aufkommen drahtloser Technologien und Fortschritten in der Informations- und Kommunikationstechnologie werden Bauwerke zunehmend mit drahtlosen Sensorknoten ausgestattet, um für SHM relevante Bauwerksdaten zu erfassen, zu analysieren und zu übertragen. Eine vielversprechende Methode für SHM ist die direkte Einbettung von Sensoren in den Beton. In diesem Beitrag wird ein Sensorsystem zur Einbettung in Beton vorgestellt, das in der Lage ist, die im Beton aufgenommenen Bauwerksdaten auszuwerten. Die Sensoren werden bei Bedarf von vierbeinigen Robotern mittels Radio Frequency Identification (RFID) ausgelesen und mit Energie versorgt, was einen automatisierten und effizienten Prozess ermöglicht. Der prototypische Prozess zur automatischen Erfassung von Bauwerksdaten mit eingebetteter Sensorik und vierbeinigen Robotern wird durch Tests in einer Büroumgebung validiert. Die Ergebnisse der Tests bestätigen die automatische und effiziente Erfassung von Bauwerksdaten, die eine frühzeitige Erkennung von Bauwerksschäden, auch von nicht sichtbaren Schäden, ermöglicht, und eine folgerichtige Weiterentwicklung des modernen Bauwerksmonitorings repräsentiert.

**Keywords:** Radio Frequency Identification (RFID), Bauwerksmonitoring (SHM), eingebettete Sensorik, vierbeinige Roboter, autonome Navigation



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13502  
© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

## 1 Einleitung

Structural Health Monitoring (SHM) ist für eine kosteneffiziente Instandhaltung von Bauwerken durch rechtzeitige Schadenserkennung von großer Bedeutung. In den letzten Jahren wurden vermehrt

drahtlose Sensorknoten in SHM-Systeme integriert, um den Installationsaufwand zu verringern und die Flexibilität und Skalierbarkeit im Vergleich zu kabelgebundenen SHM-Systemen zu verbessern [1]. Die Einbettung von Sensoren in Beton ist vielversprechend für drahtloses SHM, da Degradationsprozesse – wie Korrosion im Stahlbeton [2] – an der Oberfläche von Bauelementen, wo drahtlose Sensorknoten normalerweise installiert werden, kaum sichtbar sind. Die Herausforderungen bei Ansätzen, die eingebettete drahtlose Sensoren verwenden, liegen in der Energieautonomie und in der Datenabfrage [3]. Eine kontinuierliche Stromversorgung ist bei eingebetteten Sensoren kaum möglich, und die Abfrage von Daten kann insbesondere bei großen Bauwerken mit vielen eingebetteten Sensoren umständlich sein. Drahtlose eingebettete Sensoren, die effizient mit Strom versorgt und abgerufen werden können, und damit eine Datenerfassung über die gesamte Dicke von Strukturelementen ermöglichen, könnten das SHM erheblich verbessern.

Eine vielversprechende Technologie für die drahtlose Energieversorgung ist die Radiofrequenz-Identifikation (RFID), die zunehmend im Bausektor zur drahtlosen Identifizierung und Überwachung von Objekten eingesetzt wird. Darüber hinaus wird die Durchführung groß angelegter Inspektionen von Bauwerken während der Bauphase durch mobile Roboter erleichtert, die zunehmend auf Baustellen eingesetzt werden. Die aktuelle SHM-Praxis kann von den beiden oben genannten Technologien, RFID und mobile Robotik, profitieren.

Eine Übersicht zur Integration von RFID-Technologie und SHM findet sich in [4]. Ansätze, die mobile Roboter für SHM einsetzen, werden in [5] behandelt. Dabei sind Laufroboter mit fortschrittlichen Fortbewegungstechniken, die eine verbesserte Manövrierfähigkeit und Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Umgebungen bieten, besonders interessant für SHM [6]. Der Integration von RFID in mobile Roboter zur Steigerung der Effizienz von SHM, z.B. zur Erleichterung des Einsatzes eingebetteter Sensoren, wurde bisher jedoch kaum Beachtung geschenkt.

In diesem Beitrag wird eine Methode zur Einbettung drahtloser Sensoren in Betonstrukturen vorgeschlagen. Die in den Beton eingebetteten Sensoren zeichnen SHM-Daten auf, um den Zustand der Struktur zu bewerten. Vierbeinige Roboter werden eingesetzt, um die in den Beton eingebetteten Sensoren bei Bedarf automatisch über RFID mit Strom zu versorgen und die SHM-Daten drahtlos zu erfassen. Die automatische Erfassung von SHM-Daten minimiert die menschliche Interaktion und erhöht die Effizienz.

Der Beitrag ist wie folgt gegliedert. In Abschnitt 2 werden die Methodik und die Implementierung für den Einsatz der robotergestützten und in den Beton eingebetteten Sensoren, einschließlich der automatischen Erfassung der SHM-Daten mit vierbeinigen Robotern, beschrieben. In Abschnitt 3 werden Validierungstests vorgestellt, die in einer Büroumgebung durchgeführt wurden, um die automatische Datenerfassung der eingebetteten Sensoren zu demonstrieren. Abschnitt 4 schließt den Beitrag mit einer Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.

## 2 RFID für robotergestützte, in Beton eingebettete Sensoren

Die Beschreibung der in diesem Abschnitt vorgestellten Methodik beginnt mit einem Überblick über die RFID-Technologie, einschließlich der Komponenten, die zum Auslesen der SHM-Daten von den in den Beton eingebetteten Sensoren verwendet werden. Anschließend werden die Anbringung der RFID-Komponenten an vierbeinigen Robotern und der Prozess der automatischen Erfassung von SHM-Daten von den in den Beton eingebetteten Sensoren mithilfe von vierbeinigen Robotern beleuchtet.

### 2.1 RFID-Technologie

Die RFID-Technologie ermöglicht (i) die Stromversorgung und (ii) die Datenübertragung von den in den Beton eingebetteten Sensoren zu den Lesegeräten. Abbildung 1 veranschaulicht die RFID-Komponenten, die zur Durchführung von Messungen im Rahmen des SHM erforderlich sind. Zu den wesentlichen Komponenten gehören RFID-Tags, die die SHM-Daten aufnehmen, und RFID-Lesegeräte, die die Informationen und SHM-Daten von den RFID-Tags lesen und die Daten zur weiteren Verarbeitung übermitteln. RFID-Lesegeräte senden elektromagnetische Wellen aus, um die RFID-Tags zu aktivieren und die von den RFID-Tags empfangenen SHM-Daten auszulesen, zu speichern, zu verwalten und zu analysieren. RFID-Antennen sind die Kommunikationsschnittstelle zwischen den RFID-Tags und den RFID-Lesegeräten. Die Energieübertragung erfolgt über elektromagnetische Felder, so dass die Tags ohne Energiespeicher arbeiten können. In diesem Beitrag sind die RFID-Tags so konzipiert, dass sie Daten von Temperatur-, Feuchtigkeits- und Drucksensoren für das SHM erfassen.

### 2.2 Automatisierte Erfassung der Sensordaten mit Hilfe von Laufrobotern

Um eine automatisierte und effiziente Erfassung von SHM-Daten von in Beton eingebetteten Sensoren zu ermöglichen, werden die RFID-Komponenten auf einem vierbeinigen Roboter installiert, wie in Abbildung 2 dargestellt. Das RFID-Lesegerät ist über eine universelle asynchrone Empfänger/Sender-Schnittstelle (UART) mit dem Roboter verbunden. Die RFID-Antenne ist am Endeffektor eines Roboterarms angebracht, der auf dem vierbeinigen Roboter montiert ist. Der Roboterarm ermöglicht es, die Antenne nahe an die eingebetteten RFID-Tags heranzubewegen.

Für die automatisierte Erfassung von SHM-Daten von mehreren in Beton eingebetteten Sensoren, die in einem zu inspizierenden Gebäude verteilt sind, ist der vierbeinige Roboter mit einer zuverlässigen autonomen Bewegungsplanung ausgestattet. Die Bewegungsplanung beruht auf einer Echtzeit-Wahrnehmung der Umgebung, um detaillierte Karten zu erstellen, die genaue Lokalisierung innerhalb der Karten zu ermöglichen und Hindernisse zu erkennen. In dieser Studie verwendet der vierbeinige Roboter die weit verbreitete Kombination aus einem 3D-Light-Detection-and-Ranging (LiDAR)-Sensor und einer Inertialmesseinheit (IMU) für die Wahrnehmung, wie in Abbildung 2 dargestellt. Da die Bewegungsplanung in 3D und in Echtzeit auf eingebetteten Plattformen wie vierbeinigen Robotern erhebliche rechnerische Herausforderungen mit sich bringt [7], werden die 3D-LiDAR-Daten auf die horizontale 2D-Ebene projiziert, um eine überschaubare

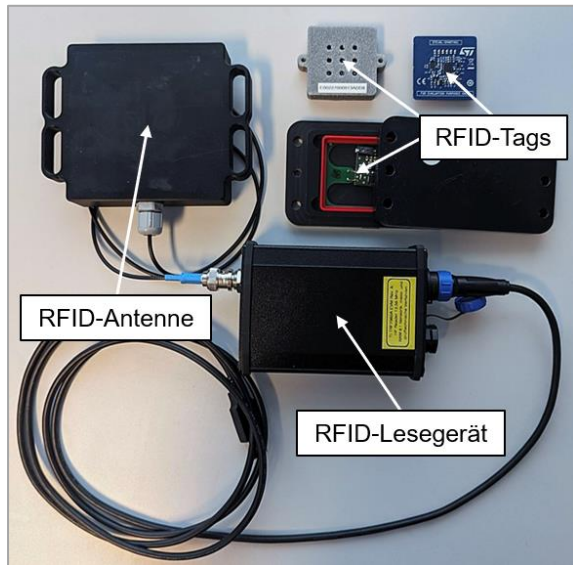


Abbildung 1: Prototypische RFID-Komponenten für die eingebetteten Sensoren.

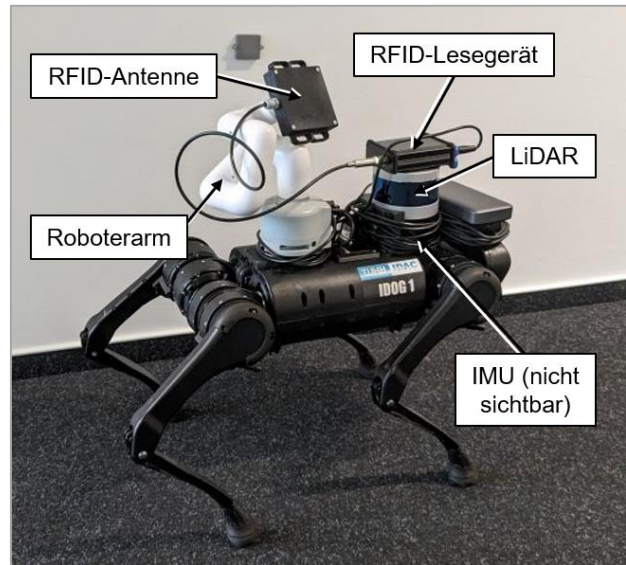


Abbildung 2: Am vierbeinigen Roboter angebrachte RFID-Komponenten.

Datenverarbeitung zu gewährleisten. Die Bewegungsplanung erfolgt durch die Darstellung des vierbeinigen Roboters als holonomer Roboter in der horizontalen 2D-Ebene mit einer rechteckigen Grundfläche, die dem physischen Raum entspricht, den der vierbeinige Roboter einnimmt. Die Bewegungsplanung basiert auf der Architektur des Robot Operating System (ROS).

Der Prozess der automatisierten Erfassung der SHM-Daten von in den Beton eingebetteten Sensoren besteht aus den folgenden Schritten:

- Erstellen einer Karte der Umgebung,
- Planung von Inspektionsaufgaben durch Bereitstellung von Zielposen in der Karte
- Planung und Verfolgung von Trajektorien zu den Zielposen und
- Erfüllung der Inspektionsaufgaben durch Bewegen der RFID-Antenne mit dem Roboterarm zu den RFID-Tags an den Zielposen, um SHM-Daten auszulesen.

Die Karte der Umgebung wird mit einem SLAM-System (Simultaneous Localization and Mapping) erstellt, genauer gesagt mit dem SLAM-System „Cartographer“ [8]. Cartographer verwendet die auf die horizontale 2D-Ebene projizierten LiDAR-Daten und die IMU-Messungen zur Erstellung einer statischen 2D-Umgebungskarte, die als Occupancy Grid Map kodiert ist und die Umgebung als gleichmäßig verteiltes Gitter darstellt, wobei jede Gitterzelle eine Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Hindernissen enthält.

Die Planung von Inspektionsmissionen erfolgt mithilfe eines Frameworks basierend auf hierarchischen endlichen Automaten. Inspektionsmissionen bestehen aus Zielposen und Inspektionsaufgaben, die beide als einzelne Zustände modelliert werden. Übergänge zwischen den Zuständen werden auf der Grundlage des Ausführungsstatus der einzelnen Zustände definiert. Der Automat wird mit Hilfe der SMACH-Bibliothek [9] in der ROS-Architektur implementiert. Zur intuitiven

Planung von Inspektionsaufgaben wurde ein Planungspanel im ROS-Visualisierungstool RViz entwickelt, das es ermöglicht, Zielposen auf den erstellten Karten zu markieren und Inspektionsaufgaben zu den Zielposen hinzuzufügen.

Zur automatischen Ausführung von Inspektionsaufträgen lokalisiert sich der vierbeinige Roboter in der Karte der Umgebung, plant Pfade zu den Zielpositionen der Inspektionsaufträge, folgt den Pfadplänen während Hindernisse umgangen werden, und führt die Inspektionsaufgaben an den jeweiligen Zielpositionen aus. Zur Lokalisierung in der Karte verwendet der vierbeinige Roboter den Lokalisierungsmodus des Cartographer-Systems. Im Lokalisierungsmodus werden projizierte LiDAR-Daten mit vorher erstellten Karten abgeglichen, so dass der vierbeinige Roboter seine anfänglich unbekannte Position in der Karte finden und anschließend verfolgen kann. Der A\*-Suchalgorithmus wird verwendet, um Trajektorien, die hier als "globale Pläne" bezeichnet werden, von den aktuellen Positionen der Roboter zu Zielpositionen in statischen Karten der Umgebung zu planen. Um dynamische oder statische Hindernisse (die z.B. in veralteten Karten auftreten können) zu kompensieren und eine kollisionsfreie Navigation zu gewährleisten, wird ein lokaler Planer verwendet. Der lokale Planer erfasst mithilfe der LiDAR-Daten dynamische und statische Hindernisse um den Roboter herum in lokalen Kostenkarten, die Mindestabstände zwischen dem vierbeinigen Roboter und den Hindernissen sicherstellen. Der lokale Planer passt grobe globale Pläne für ein kurzes Zeitfenster in der Nähe des vierbeinigen Roboters mit hoher Frequenz an und gibt Bewegungssteuerungsbefehle an den Roboter. Für den lokalen Planer wird der Ansatz der Timed Elastic Bands (TEB) verwendet [10], der zeitoptimale Trajektorien generiert.

Sobald Roboter eine Zielpose neben einem RFID-Tag erreicht haben, bewegt er die am Endeffektor angebrachte RFID-Antenne in Richtung des RFID-Tags. Nach der Messung für eine vordefinierte Zeit wird der Roboterarm eingezogen und der Roboter bewegt sich zur nächsten Zielpose.

### 3 Validierung und Ergebnisse

Die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methodik zur automatischen Erfassung von SHM-Daten mit einem vierbeinigen Roboter wird in Validierungstests gezeigt. Die Tests werden in einer Bürsumgebung mit zwei RFID-Tags durchgeführt, die in 3D-gedruckten Gehäusen an einer Wand befestigt sind. Der bei den Tests eingesetzte vierbeinige Roboter „IDOG“ basiert auf dem Roboter Unitree A1 von Unitree Robotics und ist mit dem Velodyne Puck LITE LiDAR und einer LORD MicroStrain 3DM-GX5-25 IMU zur Lokalisierung, Kartierung und Navigation ausgestattet [11]. Weiterhin ist der Roboterarm myCobot 280 von Elephant Robotics auf dem IDOG montiert, der die RFID-Antenne hält. Der IDOG wird zunächst ferngesteuert, während mit dem Cartographer-System eine Karte erstellt wird. Die Inspektionsmission wird geplant, indem in der Karte neben den RFID-Tags Zielposen angegeben und mithilfe des Planungspanels Inspektionsaufgaben hinzugefügt werden. Nach dem Speichern der Mission wird die Mission fünfmal wiederholt. Während der Wiederholung der Mission läuft der IDOG automatisch zu den Zielposen, sammelt SHM-Daten von den eingebetteten Sensoren, und visualisiert Karte, Trajektorie und SHM-Daten in RViz.

Die generierte Karte der Büroumgebung einschließlich der beiden Zielposen ist in Abbildung 3 dargestellt. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen Momentaufnahmen der automatischen Erfassung der SHM-Daten in den Missionswiederholungen. In Abbildung 4 sind der globale Plan, der lokale Plan und die tatsächliche Trajektorie des IDOGs dargestellt. Der lokale Plan weicht vom globalen Plan ab, um Hindernissen, in diesem Fall einem Passanten, auszuweichen. Abbildung 5 zeigt die Erfassung von SHM-Daten durch die in den Beton eingebetteten Sensoren. Nach Erreichen einer Zielposition (Abbildung 5a) bewegt der IDOG den mit der Antenne ausgestatteten Roboterarm in Richtung des RFID-Tags (Abbildung 5b) und sammelt SHM-Daten. Nach einer Messdauer von 10 Sekunden zieht der IDOG den Roboterarm zurück und bewegt sich zur nächsten Zielposition. Die vom IDOG gesammelten Daten sind in Tabelle 1 aufgeführt und umfassen Luftfeuchtigkeit, Druck und Temperatur für zwei Zielposen. Bei allen fünf Missionswiederholungen ist der IDOG in der Lage, die Inspektionsmission erfolgreich abzuschließen, indem es zu allen Zielposen navigiert.

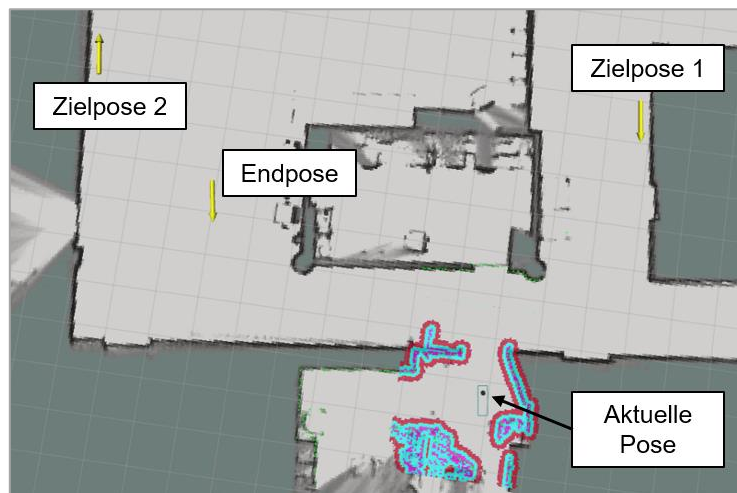
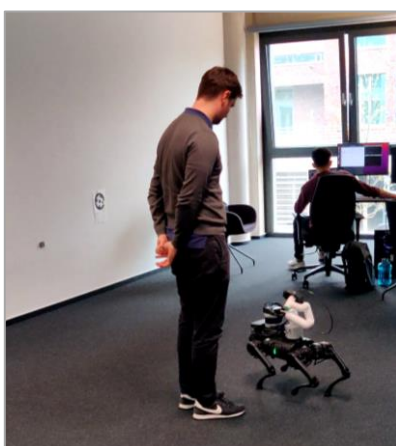
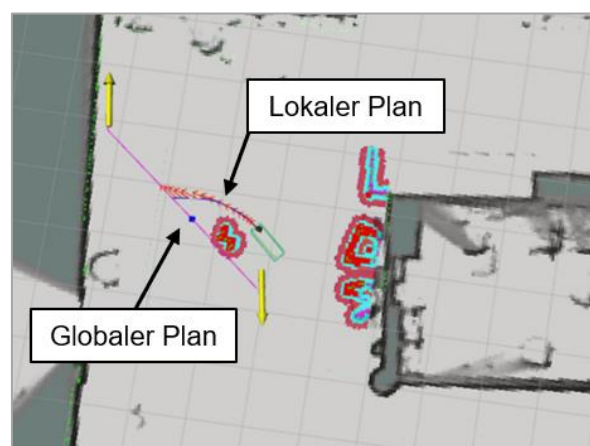


Abbildung 3: Generierte Karte der Umgebung mit Zielpositionen der Inspektionsmission.



(a) Umlaufen eines Passanten



(b) Abweichung zwischen globalem und lokalem Plan

Abbildung 4: Hindernisvermeidung während der Durchführung der Inspektionsmission.



(a) IDOG bei Erreichen einer Zielposition



(b) Erfassung von SHM-Daten

Abbildung 5: Vom IDOG automatisch erfasste SHM-Daten in einer Zielposition.

Während der Validierungstests konnten die SHM-Daten bei der Zielpose 1 in zwei Wiederholungen aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung der RFID-Tags und der Positionierung der RFID-Antenne nicht abgerufen werden. Um die Gesamtleistung zu verbessern und die Fehlertoleranz bei SHM-Inspektionseinsätzen zu erhöhen, muss die Genauigkeit der RFID-Tag-Lokalisierung und der Positionierung der Antenne erhöht werden, um Ausfälle bei der SHM-Datenerfassung zu vermeiden.

Tabelle 1: Vom IDOG erfasste SHM-Daten während der Validierungstests.

Test Nr.		1	2	3	4	5
<b>RFID-Tag 1</b>	Temperatur [°C]	24	-	24	-	24
	Luftfeuchtigkeit [%]	55	-	56	-	56
	Druck [hPa]	1210	-	1210	-	1210
<b>RFID-Tag 2</b>	Temperatur [°C]	25	25	25	24	24
	Luftfeuchtigkeit [%]	47	47	56	56	56
	Druck [hPa]	1001	1001	1004,5	1004,5	1004,5

## 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

SHM ist zu einer wertvollen Ergänzung regelmäßiger Inspektionen geworden. Robotergestützte, in Beton eingebettete Sensoren für SHM stellen ein vielversprechendes Werkzeug dar, um SHM weiterzuentwickeln, die Informationsverarbeitung weitergehend zu automatisieren und Sensordaten aus dem Inneren von Bauelementen zu erfassen. In diesem Beitrag wurde eine Methodik robotergestützter, in Beton eingebetteter Sensoren für SHM vorgestellt und auf einem vierbeinigen Roboter implementiert. Es wurden Validierungstests in einer Büroumgebung durchgeführt, um die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methodik zur automatischen Erfassung von SHM-Daten zu demonstrieren. Der vierbeinige Roboter hat erfolgreich und automatisch die SHM-Daten von den in der Büroumgebung verteilten Sensoren erfasst und dabei Hindernisse vermieden. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Kombination aus RFID-

Technologie und robotergestützter Inspektionen als vielversprechender Ansatz erwiesen hat, um die derzeitigen SHM-Praktiken in Richtung automatisierter und digitalisierter Prozesse voranzutreiben. Obwohl die Validierungstests erfolgreich verlaufen sind, besteht Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Genauigkeit der robotergestützten, automatischen Lokalisierung der RFID-Tags. Darüber hinaus kann die Integration mit Building Information Modeling (BIM) helfen, den Ansatz weiter zu automatisieren, indem den Robotern Karten der Bauwerke zur Verfügung gestellt und die erfassten SHM-Daten mit den Objekten in den BIM-Modellen verknüpft werden.

## Referenzen

- [1] Dragos, K. & Smarsly, K., 2015. A comparative review of wireless sensor nodes for structural health monitoring. In: Proceedings of the 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Turin, Italy, 7/1/2015.
- [2] Strangfeld, C., Johann, S., & Bartholmai, M., 2019. Smart RFID sensors embedded in building structures for early damage detection and long-term monitoring. *Sensors*, 19(24), 5514.
- [3] Johann, S., Strangfeld, C., Müller, M., Mieller, B., & Bartholmai, M., 2017. RFID sensor systems embedded in concrete - requirements for long-term operation. *Materials Today: Proceedings*, 4(5), S. 5827-5832.
- [4] Zhang, J., Tian, G. Y., Marindra, A. M., Sunny, A. I., & Zhao, A. B, 2017. A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications. *Sensors*, 17(2), 265.
- [5] Tian, Y., Chen, C., Sagoe-Crentsil, K., Zhang, J., & Duan, W., 2022. Intelligent robotic systems for structural health monitoring: Applications and future trends. *Automation in Construction*, 139, 104273.
- [6] Smarsly, K., Dragos, K., Stührenberg, J., & Worm, M., 2023. Mobile structural health monitoring based on legged robots. *Infrastructures*, 8(9), 136.
- [7] Wellhausen, L. & Hutter, M., 2023. Artplanner: Robust legged robot navigation in the field. *Field Robotics*, 3(1), S. 413-434.
- [8] Hess, W., Kohler, D., Rapp, H., & Andor, D., 2016. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM. In: Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, 5/16/2016.
- [9] Bohren, J. & Cousins, S., 2010. The smach high-level executive. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 17(4), S. 18-20.
- [10] Rösmann, C., Feiten, W., Wösch, T., Hoffmann, F., & Bertram, T., 2012. Trajectory modification considering dynamic constraints of autonomous robots. In: Proceedings of ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics. Munich, Germany, 3/21/2012.
- [11] Smarsly, K., & Dragos, K., 2024. Advancing civil infrastructure assessment through robotic fleets. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 4(2024), S. 138-140.