

mFUND Machbarkeitsstudie



Schlussbericht:

Digitale Leitungsauskunft durch Roboter auf Baustellen

SchaufelPlus 19F1111A

LAT

LAT Funkanlagen Service GmbH

Modersohnstr. 36, 10245 Berlin

info@lat.de / 030 362 005 -0

Partner:

BHT Berliner
Hochschule
für Technik



I) Kurze Darstellung zu

1. Aufgabenstellung:

Ziel des Vorhabens war es, Planungsprozesse auf Baustellen zu beschleunigen und die Automatisierung von Bauabläufen voranzutreiben. Der Fokus der Machbarkeitsstudie lag dabei auf Bestandskabel.

Durch eine einfache Kombination aus einem vierbeinigen Roboter und zusätzlich montierten Sensoren wurden vor Ort auf der Baustelle relevante Daten für ein Echtzeit-Kabelkataster gesammelt. Darüber hinaus wurden Daten zur Luftfeuchtigkeit sowie die Temperatur als Indikator für den Zustand von Bauwerken (wie Tunneln) erfasst.

Im Rahmen des Projekts wurden laufende LAT-Bauvorhaben in Zusammenarbeit mit der BVG in Berlin zu Reallaboren, in denen folgendes untersucht wurde:

1. ob ein vierbeiniger Laufroboter sich im U-Bahn-Tunnel und im Gleisbett bewegen kann
2. ob der Roboter, ausgestattet mit zusätzlicher Kamera- und Sensortechnik, digitale Daten für ein Echtzeit-Kabelkataster generieren kann
3. ob übliche Betonzustand-Testverfahren (Manuelle Probe, Laborverfahren) verkürzt werden können, indem aus der Kombination von Daten zur Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein Indikator für den Zustand von Bauwerken (Tunneln) generiert wird.

2. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens:

Motivation und Zielstellung

Das Familienunternehmen LAT (www.lat.de) ist seit über 50 Jahren als Dienstleister rund ums Gleis und im Breitbandausbau tätig. Als Fachfirma für Kabelleitungs- und Spezialtiefbau ist das Unternehmen auf genaue Leitungsauskunft angewiesen. Zeitintensiv ist das Einholen der Leitungsverläufe: Oft sind diese Informationen lückenhaft, ein zentrales Kabelkataster (wie im Koalitionsvertrag der Bundesregierung vermerkt) gibt es nicht. Auch wer einmal mit einem Kabelsuchgerät gearbeitet hat, erkennt eine Automatisierungslücke. Das Ergebnis: Die aufwendige (und nicht automatisierte) Suchschachtung bleibt im Trend. Zusätzlich sind Ablaufverzögerungen und Nachträge durch Planabweichungen (soll/ist Zustände) die Regel.

Laut Bauschadensbericht 2020/21 entstehen durch Kabel- und Leitungsschäden jährliche Kosten von über 500 Millionen Euro; die Ursachen sind vor allem die fehlende oder fehlerhafte Leitungsauskunft [Quelle: Verband Sicherer Tiefbau e.V.].

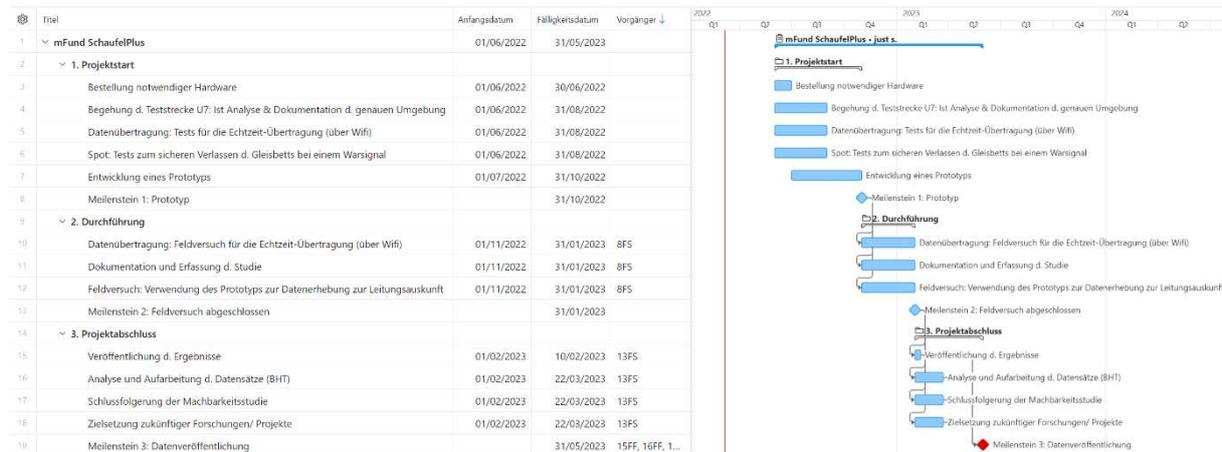
Im Rahmen dieser vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) mFund finanzierten Machbarkeitsstudie wurde getestet, wie durch Roboter auf Baustellen Planungsprozesse beschleunigt und Abläufe automatisiert werden können, um Leitungsschäden vorzubeugen. Unterstützt wurde LAT dabei durch die Berliner Hochschule für Technik (BHT) und die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG).

Die Expertise im Bereich der Robotik lieferte dabei die Berliner Hochschule für Technik (BHT): Prof. Dr. Manfred Hild ist Leiter des Forschungslabors Neurorobotik an der BHT und lehrt im Studiengang Humanoide Robotik. Er und sein Team befassen sich u.a. mit Bewegungsmustern für die humanoide Robotik.

Der Netzbetreiber Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) stellte als assoziierter Partner ein Reallabor zur Verfügung: LAT arbeitet regelmäßig in deren U-Bahntunneln und ist mit den oben beschriebenen Herausforderungen vertraut.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens:

Geplant und durchgeführt wurde das Vorhaben nach Arbeitspaketen. Die Arbeitspakete (AP) und Meilensteine (M) wurden entsprechend dem hier noch einmal wiedergegebenen Balkenplan umgesetzt.



4. Anknüpfung von wissenschaftlichem und technischem Stand

- **Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,**

Tunnelanlagen sind aufgrund schlechter Lichtverhältnisse, unterschiedlicher Temperaturen, Feuchtigkeit, unebener Oberflächen und sämtlichen Hindernissen, wie z.B. der Beschilderung oder auch der Gleistechnik rund ums Gleis, äußerst schwierig zu inspizieren. Daher ist der Einsatz von robotischen Systemen im und um das Gleis aus technischer Sicht eine große Herausforderung. Unsere Grundidee basierte auf der Annahme, dass der Boston Dynamics Spot technisch bereits sehr ausgereift ist und mit einer Akkulaufzeit von rund 90 Minuten Treppen hinauf- und hinuntersteigen, unebenes Gelände durchqueren und sogar im Regen betrieben werden kann. Nach ersten Tests hat sich gezeigt, dass der Roboter für unser Vorhaben geeignet ist, um Arbeiten im Gleis übernehmen zu können. Wir sind davon ausgegangen, dass im Gegensatz zu anderen Robotersystemen, wie humanoiden Robotern oder Kettenrobotern, vierbeinige Robotersysteme den großen Vorteil haben, dass sie sich mobiler durch die Tunnel bewegen und aufgrund ihrer Beweglichkeit eine geringere Fehlerquote bei der Fortbewegung haben.

Da der Einsatz von Robotik in der Bauindustrie noch sehr neu ist und daher nur wenig veröffentlichte Studien zu diesem Thema vorliegen, wurde auf das Wissen und die Expertise des Projektteams und anderer Fachexperten zurückgegriffen, um Fortschritte zu erzielen. Vorrangig wurde dabei auf einen Austausch mit Industrieexperten gesetzt und Netzwerkveranstaltungen genutzt, um auf tiefgreifendes Wissen und Anforderungen an das System zurückzugreifen.

- **Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste,**

Auf folgende Fachliteratur/Informationsquellen wurde zurückgegriffen:

- Jäkel, Jan-Iwo & Rahnama, Shervin & Klemt-Albert, Katharina. (2022). Construction Robotics Excellence Model: A framework to overcome existing barriers for the implementation of robotics in the construction industry. 10.22260/ISARC2022/0085.
- [Position Leitungsschaeden 2020-10.pdf \(bauindustrie.de\)](#)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde von Anfang an mit der Berliner Hochschule für Technik (BHT) als wissenschaftlicher Partner und mit den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) als assoziierten Partner für die Testungen im Reallabor (U-Bahn-Tunnel) durchgeführt.

Zusätzlich fand ein direkter Austausch mit Startups aus der Bauindustrie statt, auch „Construction Tech Startups“ genannt. Beispielsweise hat das Projektteam über das Accelerator Programm der DB Mindbox den Cohort „New cable tracking challenge“ näher kennengelernt und die Startups bei LAT eingeladen. Spannende Startups wie Avus/Syslor ([Syslor – Visualisation des réseaux en réalité augmentée](#)) konnten dabei wichtige Hinweise geben und durch den Austausch helfen das Projekt voranzutreiben. Zudem stehen wir mit dem Startup im Austausch für ein Folgeprojekt (mFund Förderlinie 2).

Außerdem fand während des Projektes ein kontinuierlicher Fachaustausch mit wissenschaftlichen Institutionen sowie Industrieunternehmen statt. Auf folgenden Veranstaltungen wurde das Projekt SchaufelPlus und die Thematik um die digitale Leitungsauskunft aufgenommen:

◆ **Construction Equipment Forum 2022 (November 2022):**

Die Konferenz bringt das gesamte Wertschöpfungs-system der Baumaschinenindustrie zusammen: Branchenübergreifend tauschten sich über 250 Hersteller, Zulieferer und Abnehmer zwei Tage intensiv aus. Unternehmen wie Ammann, Hitachi, Schaeffler, Strabag, Wacker Neuson und xeletrix Power waren vor Ort. LAT hat dort in einem Impulsvortrag zum Thema "Digitale Leitungsauskunft auf Baustellen" und das Projekt SchaufelPlus vorgestellt.

◆ **VBKI Sommerfest Mobilitätsausschuss „Smart City Berlin: Beispiele aus Verkehrsinfrastruktur und Betrieb“:**

Rudolf Boll, Referatsleiter Förderinitiativen und Dateninnovationen im Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) hat im Rahmen der Veranstaltung über den mFUND berichtet, im Anschluss wurde SchaufelPlus vorgestellt und in offener Runde diskutiert.

Unter den teilnehmenden Unternehmen waren:

Selaestus Personal Management GmbH, Arcadis Global, Alstom S.A., Siemens Mobility GmbH, Siemens AG, DB Netz AG, BVG, BMDV, Charité Berlin, Land der Ideen, Fastr GmbH, Wollmann & Partner GbR, CONSTIN GmbH, GRG Services Berlin GmbH & Co. KG, Froesch GmbH, SOLVENZNAVIGATION Kristina Bormann, TrustPower Unternehmens- und Personalberater, bulwiengesa AG, Strategieberatung Dr. Thomas Letz, Pari Personal GmbH.

Der Austausch mit anderen Unternehmen und Institutionen hat dem Projekt geholfen auf technischer Ebene Anforderungen aus verschiedenen Industrien zusammenzuführen und diese mit einfließen zu lassen.

◆ **FutureLab Netzwerkveranstaltung**

Gemeinsam mit dem Beratungsunternehmen Double Skill haben wir das Projekt „FutureLab“ ins Leben gerufen. Dabei laden wir zu regelmäßigen Netzwerkveranstaltungen und widmen uns zukunftsweisenden Themen unserer Branche. Bei der Auftaktveranstaltung im Oktober 2022 sind wir mit dem Thema „Technologietrend: Einsatz von Robotik und Drohnen“ eingestiegen und haben mit den Teilnehmern diskutiert, wie innovative Technologien digitale Daten erzeugen und zusammenführen können. Dabei haben wir den aktuellen Stand von SchaufelPlus vorgestellt und den Teilnehmenden den Nutzen der eingesetzten Technik erläutert.

◆ **IHK Berlin zum Thema "Nachhaltige Mobilität im Unternehmen"**

Wir haben mit der IHK Berlin zum Thema "Nachhaltige Mobilität im Unternehmen" diskutiert und mit den Teilnehmenden den Einsatz von Robotik in Unternehmen und die potenziellen Chancen der digitalen Datenerfassung diskutiert.

II) Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele:

Die Zuwendung wurde planmäßig, sparsam und zweckentsprechend verwendet. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse nach Arbeitspaketen (AP) dargestellt.

AP1: „Projektstart“

Zu Beginn haben die Projektpartner gemeinsam an der Projektplanung und Umsetzungsvorbereitung gearbeitet. Dort wurden die Anforderungen an den Roboter, der Messgeräte, Sensoren- und Kamertechnik für die Datenerhebung zur Leitungsauskunft bestimmt.

Dafür wurde die Teststrecke (U-Bahn-Tunnel/U2 in Berlin) abgelaufen und die Umgebung genau dokumentiert. So wurde die Beschaffenheit des Tunnels festgehalten, um bei der Entwicklung des Prototyps auf mögliche Hindernisse einzugehen.

Tests mit dem Roboter zum sicheren Verlassen des Gleises:

Zudem wurden erste Tests mit dem Roboter durchgeführt und u.a. das sichere Verlassen des Gleisbetts erprobt. Dabei zeigte sich, dass sich der **SPOT** von Boston Dynamics sehr gut im Gleisbett bewegen kann und auch bei schlechten Lichtverhältnissen sicher unterwegs ist. So wurde auch geprüft, dass der Roboter innerhalb von 120 Sekunden sicher das Gleis verlassen kann. Der Roboter wurde dafür manuell gesteuert, um die Gefahrenzone zu verlassen. Da die Beweglichkeit dies ohne weiteres zulässt, hätte der Roboter genügend Zeit, das Gleis sicher zu verlassen, z.B. wenn ein Zug durchfährt. Im Schnitt reichen dort ca. 70 Sekunden.

Insgesamt gab es nur einen Zwischenfall, bei dem ein Bein des Roboters zwischen einer Stromschiene stecken blieb und ohne Hilfe nicht mehr herauskam. Dabei wurde der Roboter durch den Bediener versehentlich in die Stromschiene gesteuert. Für die weitere Entwicklung ist es wichtig, dass der Roboter sich von solchen Stromschienen automatisch fernhält, da diese normalerweise unter Hochstrom stehen und somit eine Gefahr für den Roboter selbst darstellen.

Wir stellen fest, dass wir die **optische und akustische Signalerkennung** bei Gefahrensituationen in diesem Projekt nicht ausreichend testen konnten. Die optische Erkennung konnten wir zwar durch die **Intel Realsense Kameras** festhalten, jedoch fehlte die notwendige Software, um eine Echtzeit Analyse durchzuführen und direkt mit dem Roboter zu kommunizieren. Daher sollte in einem Folgeprojekt die Erkennung dieser Signale mit entsprechender Hard- und Software getestet werden, um langfristig ein automatisches Verlassen der Gleise zu gewährleisten. Zudem empfehlen wir für ein Folgeprojekt die Anschaffung eines Roboters, damit eine kontinuierliche Entwicklung möglich ist und immer mit demselben Roboter gearbeitet werden kann.

Zusätzlich zu den Tests mit dem SPOT wurde auch das günstigere Go1-Modell des chinesischen Herstellers Unitree getestet. Ziel war es zu prüfen, ob auch eine günstigere Variante der Beschaffenheit des Tunnels standhält. Da dieses Modell nicht nur günstiger, sondern auch kleiner ist, sind Stufen mit einer Höhe von 12 cm das Maximum für diesen Roboter. Entscheidend für den Test waren jedoch die Bewegungen, wobei es um die Frage ging, ob die Bewegungsalgorithmen ausgereift genug sind, um den Roboter sicher durch die Strecke laufen zu lassen. Insgesamt lässt sich sagen, dass der **Unitree Go1** aufgrund seiner kürzeren Beine viel mehr Schwierigkeiten hat, die Strecke abzulaufen, als der größere Spot Roboter.

Folgend ein Bild der Roboter (links der Unitree und rechts der Spot) im Vergleich:

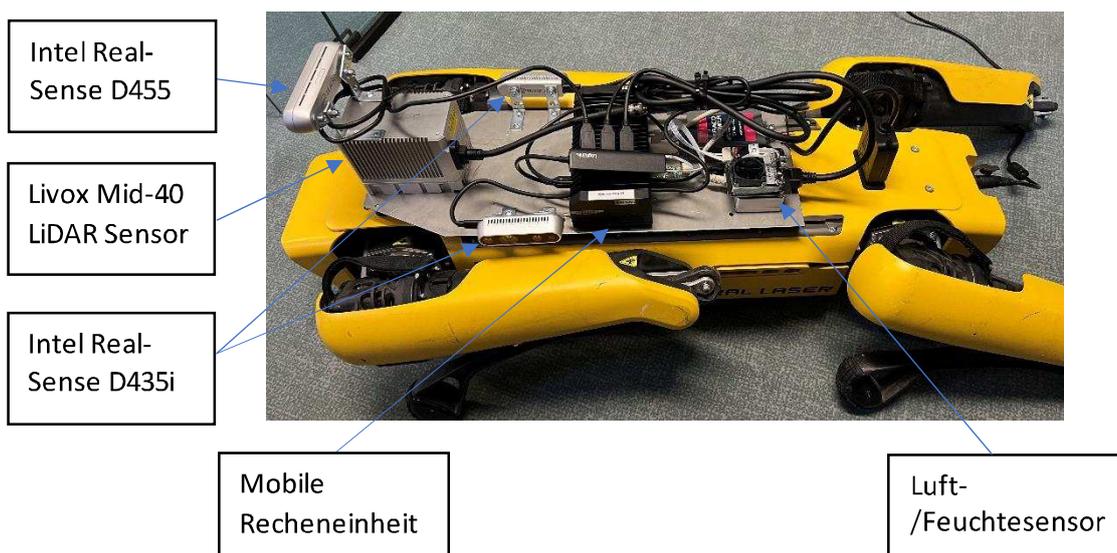


Abschließend lässt sich sagen, dass beide Roboter sich durch das Gleisbett bewegen können. Allerdings ist der SPOT der weit überlegende, da die Hardware und die Software sich dafür besser eignen. Beispielsweise ist es nur mit dem SPOT möglich gewesen den ganzen Weg vom Tunnelleingang bis unten ins Gleisbett eigenständig zu laufen. Für den Unitree Go1 war dies aufgrund der Stufenhöhe >12cm nicht möglich. Langfristig ist das jedoch kein Grund sich ausschließlich auf den SPOT zu fokussieren, da bereits Ende 2022 auch eine größere Variante (B1) des Unitree's auf den Markt gekommen ist und solche Barrieren dadurch problemlos überqueren sollte. Deshalb haben wir uns entschieden, auch beim AP2 weiter mit dem Unitree Tests durchzuführen.

Prototyp-Entwicklung:

Mit Prototyp ist die zusätzlich montierte Technik gemeint, die im Wesentlichen aus verschiedenen **Intel Realsense Tiefenbildkameratypen, LiDAR- und Luft-/Feuchtesensoren** besteht. Die Sensoren wurden bei verschiedenen Tests im Tunnel und unter freiem Himmel eingesetzt und können von einer mobilen Computereinheit auf dem Roboter angesteuert werden. Eine speziell zugeschnittene Aluminiumplatte dient als abnehmbare Plattform, die autark, also ohne den Roboter, genutzt werden kann.

Auf dem folgenden Bild ist der Prototyp zu sehen:



- **Gesamtgewicht des Prototyps:** 5,0 kg
- **Stromzufuhr:** Die mobile Computereinheit, Intel Realsense Tiefenbildkameratypen sowie die Luft-/Feuchtesensoren wurden mit einer externen Power Bank (20.000 mAh) mit Strom versorgt. Bei den Tests im Reallabor hat die Power Bank genügend Strom für mindestens 60 Minuten geliefert. Aufgrund der benötigten Spannung wurde der Livox Mid-40 LiDAR Sensor direkt an den Roboter angeschlossen.

Die verwendete Technik:

- **LiDAR Sensor:** Livox Mid-40 LiDAR Sensor - erkennt Objekte in einer Entfernung von bis zu 260 Metern und verwendet ein fortschrittliches, sich nicht wiederholendes Scanmuster, um hochpräzise Details im Sichtfeld zu liefern.
- **Tiefenbild/3D Kamera:** Intel RealSense Depth Camera D435i/ D455
- **Luft-/Feuchtesensor:** VOC-/Feuchte-/Temperaturfühler; Feinstaubsensor Nova Fitness

Erfassung der Umgebung

GraphNav ist ein Karten-, Lokalisierungs- und autonomes Bewegungssystem von Boston Dynamics zur Datenerfassung und Steuerung.

Die Position des Roboters kann zu Beginn der Messung als Ausgangspunkt eines Koordinatensystems gewählt werden. Der Roboter muss als erstes manuell gesteuert werden, um die Umgebung zu erfassen und aufzuzeichnen. Die daraus resultierende Grafik kann zur Lokalisierung des Roboters innerhalb der erfassten Umgebung verwendet werden. Nach der Aufzeichnung kann der Roboter die Umgebung innerhalb dieses Graphen durch einen sogenannten visuellen SLAM-Algorithmus selbstständig durchqueren.

Lokalisierung

Nach dem Hochladen einer neuen Karte muss der Roboter explizit initialisiert werden. Dies kann durch die Positionierung des Roboters in der Nähe eines Referenzpunktes erfolgen, der in der vorherigen Karte während des Aufnahmeprozesses gespeichert wurde.



Diese Funktion macht es dem Roboter möglich, vorab gelaufene Strecken immer wieder abzulaufen. Beispielsweise bei Gleisinspektionen ist dies wichtig. Bauvorhaben können somit immer wieder abgelaufen werden, um frische Daten zum Fortschritt zu liefern. Folgendes Bild zeigt den Spot beim Scannen eines Referenzpunktes.

Die Feldversuche bestätigen, dass der Roboter die Navigation auch bei schlechten Lichtverhältnissen bewältigen kann. Die GraphNav Funktion ermöglicht es dem Roboter, Strecken nach einem einmaligen Abgehen automatisch abzulaufen. Dies funktioniert jedoch nur, wenn sich die Umgebung nicht ändert. Da sich die Umgebung während der Bauarbeiten oft ändert, sollten jedes Mal neue GraphNav-Karten erkundet werden.

Im Rahmen des AP1 wurden folgende Arbeiten umgesetzt:

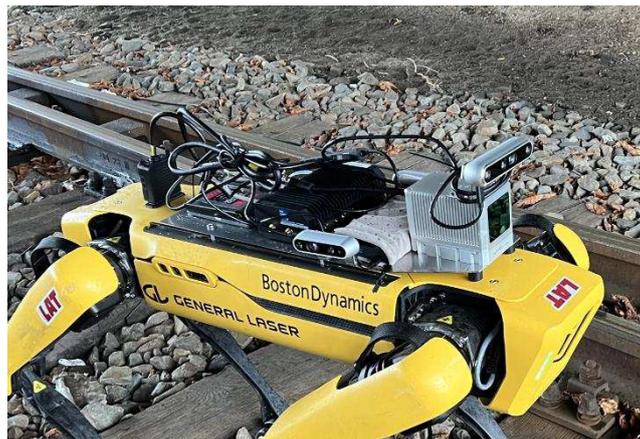
- a) Analyse der Teststrecke (Begehung/ Dokumentation des Zustandes, Abgleich mit vorhandenen Plänen)
- b) Tests mit dem Roboter zum sicheren Verlassen des Gleises
- c) Bestellung/ Erwerb von Hardware (Sensoren, Messgeräte, etc.)
- d) Tests der Sensoren/ Messgeräte im Tunnel
- e) Zusammenbauen der Technik (Prototyp)
- f) Testläufe zur Datenerfassung auf dem Betriebsgelände
- g) Echtzeit-Datenübertragung über Wifi / Handy-Netz

M1:

Mit Abschließen des AP1 wurde der Meilenstein 1 (M1) im Wesentlichen erreicht. Der Roboter wurde unter realen Bedingungen getestet und ein erster Prototyp wurde so fertiggestellt, dass dieser im nächsten Schritt vor Ort im Tunnel eingesetzt konnte.

AP2: „Projektdurchführung: Feldversuch“

In diesem AP2 wurden die Ergebnisse aus dem vorherigen AP genutzt und im Reallabor eingesetzt. Folgend der Spot mit unserer Technik ausgestattet.



In AP2 wurden verschiedene Testläufe durchgeführt. Zum einen wurde der Roboter oberirdisch in einem privaten Gleis getestet und immer wieder angepasst, um den hohen Anforderungen gerecht zu werden. Dies sollte sicherstellen, dass der Roboter mit den Prototypen auf dem Rücken, auch bei einem Test im Tunnel einsatzbereit war. Bei den Tests wurden folgende Ziele verfolgt:

1. Test des Prototyps unter realen Bedingungen im Gleis
2. Funktionsfähigkeit der angeschlossenen Technik (Stromversorgung, Datenerfassung und -speicherung, Zuverlässigkeit)
3. Qualität der Messdaten/Aufnahmen (während der Bewegung und im Stillstand)
4. Übersendung Daten über Wifi/LTE
5. Beweglichkeit & Trittsicherheit des Roboters mit Zusatzgewicht (Payload)

Fazit/Learnings:

- Der Roboter konnte sich auch mit einem Zusatzgewicht (Payload) von ca. 5 kg einwandfrei auf dem Gleisbett bewegen
- Keine notwendige Sensorik für die Laufbewegung wurde durch den Prototyp eingeschränkt
- Die Stromversorgung des Roboters war ausreichend, um den LiDAR-Sensor zu versorgen (die mobile Computereinheit und alle weiteren Sensoren wurden mit einer externen Powerbank versorgt)
- Selbst bei einer Temperatur von ca. 2,5 Grad Celsius und Nieselregen konnten wir Messungen durchführen. Die Technik ist durch die Feuchtigkeit nicht beschädigt worden
- Für die Ansteuerung des Prototyps und die Datenerfassung wird noch ein externes Display benötigt - langfristig soll dies auch remote möglich sein
- Der Prototyp hat das Potenzial, mit weiterer Technik ausgerüstet zu werden. Die Computereinheit kann weitere Sensoren/Messgeräte einbinden
- Kleinere Datenmengen können problemlos von der mobilen Computereinheit über LTE übertragen werden. Allerdings hängt die Datenübertragung signifikant von der Datenmenge ab. Die aufgenommenen Daten sind mit bis zu 100 GB große Dateien, bei denen eine Echtzeit-Übertragung nur unter sehr guten Bedingungen möglich ist. Daher ist es wichtig, bei einem Folgeprojekt zu versuchen die Datenmenge zu verringern und z.B. mit Hilfe von künstlicher Intelligenz ausschließlich relevante Daten zu sammeln.

Ortung/Lokalisierung:

Zur genauen Lokalisierung des Roboters wurde GNSS (bekannt als GPS) getestet. Da die Technologie ausschließlich oberirdisch und unter freiem Himmel funktioniert, wurden noch zusätzliche Tests zur Ortung gemacht. Für ein weniger genaues Standort-Tracking können Streckenkennzeichnungen von Gleisen verwendet werden. Bei unseren Tests konnten wir diese durch die Intel RealSense Kamertechnik gut erkennen. Allerdings stellen wir auch fest, dass dies manuelle Mehrarbeit bedeutet und unter realen Umständen viel extra Arbeit für unsere Mitarbeiter bedeuten würde.

Wir haben festgestellt, dass für ein Folgeprojekte die SLAM-Methode und LiDAR Technologie bei der Lokalisierung im Tunnel besonders hilfreich sein könnten. Die SLAM-Methode basiert auf dem Ansatz, dass Roboter dank Kamera oder Sensoren wie Lidar („Light Detection and Rang ing“) dazu in der Lage sind, relative Messungen der Umgebungsgeometrie vorzunehmen und sich dadurch lokalisieren.

M2: Mit Abschließen der Feldversuche und der Datenerfassung wurde M2 im Wesentlichen erreicht.

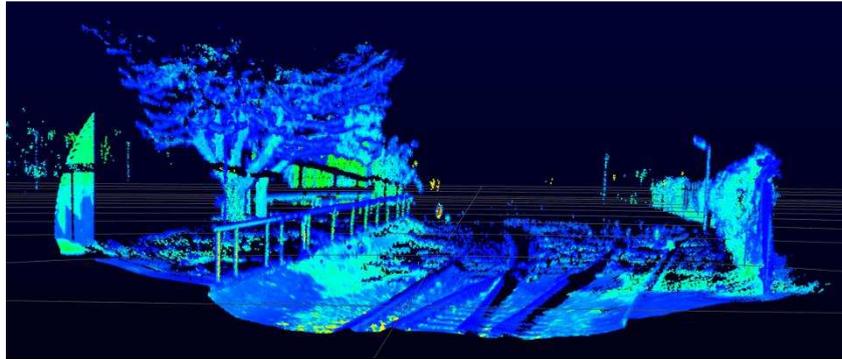
AP3: „Projektabschluss“

In diesem Arbeitspaket wurden die von den Projektpartnern erhobenen Daten ausgewertet und die gewonnenen Erkenntnisse bewertet. Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist ein Teil des AP gewesen.

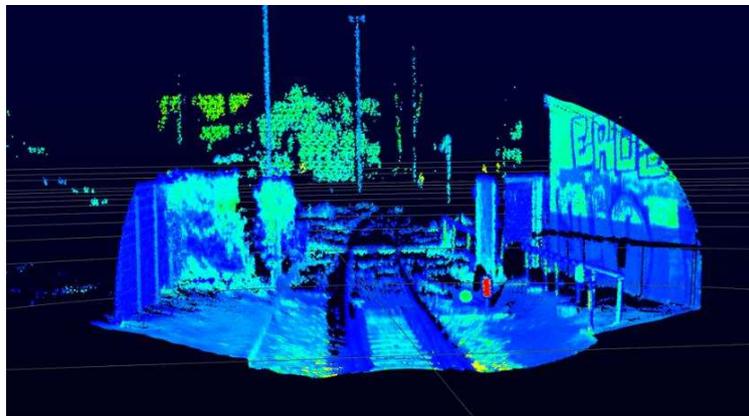
Datenveröffentlichung:

Da wir die Messungen in kritischer Infrastruktur gemacht haben, ist es leider nicht möglich den Großteil der Daten öffentlich zu teilen. Die folgenden Aufnahmen mit dem **Livox Mid-40 LiDAR Sensor** stammen jedoch von einer privaten, oberirdisch verlaufenden Strecke. Der Sensor

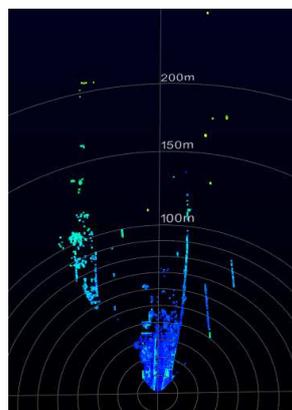
erkennt Objekte in einer Entfernung von bis zu 260 Metern und verwendet ein fortschrittliches, sich nicht wiederholendes Scanmuster, um hochpräzise Details im Sichtfeld zu liefern.



LiDAR-Daten werden in so genannten Punktwolken dargestellt. Diese Darstellung ist ein exaktes Abbild der vom Sensor erfassten Umgebung in 3D. Durch den dreidimensionalen Charakter können verschiedenste Blickwinkel eingenommen werden. Um die Datenqualität und damit die Aussagekraft der Daten zu verbessern, bewegte sich der Roboter auf der Strecke und stoppte bis zu 30 Sekunden lang an einem Fixpunkt, damit der LiDAR-Sensor genügend Datenpunkte erzeugen konnte.



In diesem Fall wurden die Fotos bei Nieselregen aufgenommen. Die Gleise, Abgrenzungen, Beleuchtung, Graffiti an der Innenwand der Brücke und vieles mehr sind mit bloßem Auge zu erkennen. Details, wie das Graffiti, kann der Sensor durch zum Untergrund unterschiedliche Reflexionsverhalten des Laserstrahls erfassen.



Die Rohdaten wurden auf der vom BMDV bereitgestellten Mobilthek veröffentlicht: <https://mobilthek.info/offers/552873227271958528>. Aus datenschutzrechtlichen Gründen dürfen wir den genauen Standort der Aufzeichnungen nicht veröffentlichen. Da die

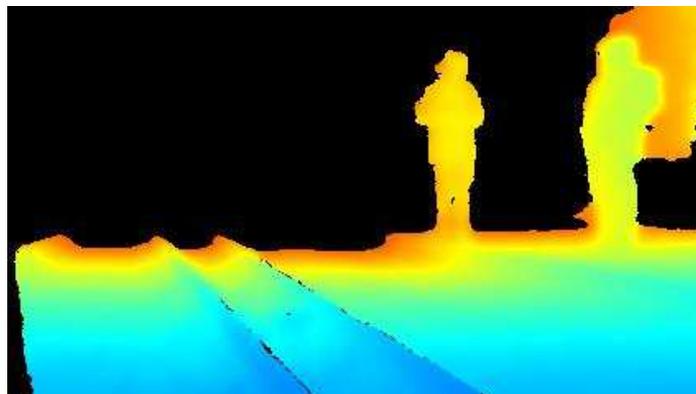
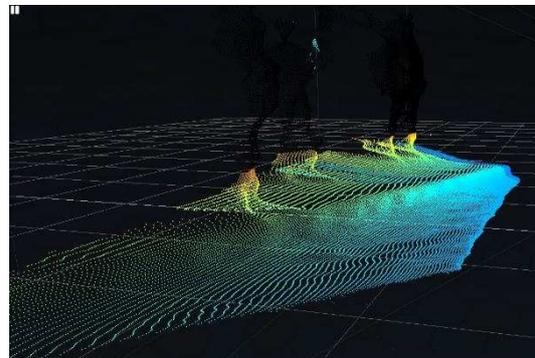
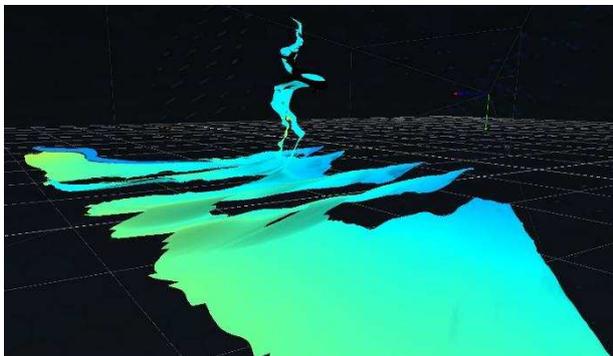
Beschaffenheit des Privatgleises einen ähnlichen Standard wie bei öffentlichen Netzen aufweist, sind diese Daten auch für andere Projekte und Interessenten relevant.

Intel RealSense Tiefenbild Kamera:

Die Intel RealSense Kamera hilft dabei, Hindernissen auszuweichen oder mit sich bewegenden Objekten zu interagieren. Die Kamera hat drei Objektive, eine Standard-2D-Kamera für normale Fotos und Videos sowie eine Infrarotkamera und einen Infrarot-Laserprojektor. Mit den Infrarotteilen kann die RealSense den Abstand zwischen Objekten erkennen, Objekte von den Hintergrundschichten dahinter trennen und eine viel bessere Objekt-, Gesichts- und Gestenerkennung bieten als eine herkömmliche Kamera.

Für unser Vorhaben haben wir die Aufnahmen der Intel RealSense genutzt, um einen Abgleich mit Bestandsplänen zu machen. Zudem sind die Daten notwendig, um die autonome Bewegung des Roboters langfristig zu ermöglichen. Unsere Tests zeigen, dass wir die Kamera an den Roboter anschließen und die Daten eine ausreichende Qualität liefern. Der Prototyp hat insgesamt drei Kameras verbaut und wurde unter schlechten Lichtverhältnissen im Tunnel getestet.

Da wir die Tests in einer kritischen Infrastruktur durchgeführt haben, wurden die folgenden Beispielaufnahmen im Freien auf einer privaten Rennstrecke gemacht, während der Roboter eine Gleisstrecke entlanglief:



Die Daten der Tiefenbild Kamera Intel RealSense D455 wurden unter folgenden Link veröffentlicht: <https://mobilithek.info/offers/555791298743660544>.

Luftgütesensor:

Des Weiteren wurden Daten zur Luftqualität bei unseren Testversuchen im Tunnel aufgenommen. Die Datenqualität ist grundsätzlich gut und gibt darüber Hinweise zum Zustand des Tunnels. Beispielsweise konnten wir erhöhte Feuchtigkeitswerte im Tunnel feststellen. Dies lässt darauf schließen, dass der Tunnel von dem Betreiber besichtigt und überprüft werden muss. Allerdings können wir uns auf Grundlage dieser Daten kein aussagekräftiges Bild machen. Für ein

Folgeprojekt ist es daher wichtig festzulegen, welche weiteren Daten benötigt werden, um eine möglichst genaue Aussage zum Tunnelzustand zu treffen.

Ergebnisse:

❖ Datenqualität & Aufnahmegeschwindigkeit

Die Aufnahmen bieten grundsätzlich ein erfreuliches Ergebnis. Wie bereits erwähnt, sind einige Objekte mit dem bloßen Auge sichtbar. Darüber hinaus kann eine KI grundsätzlich mit einer geringeren Anzahl von Datenpunkten in 3D-Bildern auskommen als der Mensch und daraus Muster erkennen.

Jedoch muss sich die Qualität langfristig verbessern, um für Building Information Modelling (BIM) relevant zu werden. Hardwareseitig ist die Verwendung eines 360-Grad-LiDAR-Sensors empfehlenswert. Dieser Sensor kann ein größeres Sichtfeld und eine höhere Auflösung der gesamten Umgebung während einer Baustellenbegehung abdecken. Zudem ist eine hohe Datenqualität enorm wichtig für reibungslose Abläufe datengetriebener Bauplanung. Daher würde höherwertige LiDAR Technik eine sinnvolle Ergänzung sein, um die Qualität sowie Aufnahmegeschwindigkeit zu verbessern.

❖ Relevanz

Die Tests im Tunnel haben gezeigt, dass an der Wand befestigte Kabel erkennbar sind. Jedoch hat die Auswertung es nicht möglich gemacht genau zu erkennen, um welchen Kabeltyp es sich dabei handelt. Da es in diesem Projekt vorerst um die Machbarkeit geht, haben wir die Aufnahmen der Intel Realsense und LiDAR Kamera mit bestehenden Plänen in der U-Bahn abgeglichen. Das Ergebnis zeigt, dass es sinnvoll ist einem Abgleich mit Bestandsplänen zu machen, da diese häufig fehlerhaft sind. Darüber hinaus geben die Aufzeichnungen nicht nur Auskunft über die Kabel, sondern auch über den allgemeinen Zustand des Tunnels. Daher sind die Daten von hoher Relevanz, da sie zur Verbesserung der Bauplanung genutzt werden können.

❖ Datengröße

Hinsichtlich der Datengröße resultieren wir, dass eine Echtzeit Übertragung mit einem LTE-Netz nur unter besten Bedingungen möglich ist. Da es sich bei den Aufnahmen in großen und verschiedenen Dateien handelt, wird eine besonders gute Verbindung benötigt. Bei einem Folgeprojekt sollte untersucht werden, wie die verschiedenen Sensoren mit einer Software zusammengeführt werden können, um die Dateigröße möglichst klein zu halten. Grundsätzlich gibt es im Tunnel eine Internetverbindung, die aber von der Signalstärke je nach Tunneltiefe und Netzwerkanbieter unterschiedlich ausfällt.

Im Rahmen des AP3 wurden folgende Arbeiten umgesetzt:

- a) Analyse der gesammelten Daten
- b) Bewertung der Feldversuche
- c) Veröffentlichung der Daten
- d) Veröffentlichung und Kommunikation der Ergebnisse

M3: Veröffentlichung

Mit Veröffentlichung der Ergebnisse wurde der Meilenstein 3 erreicht und die Machbarkeitsstudie abgeschlossen.

2. die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Der (zahlenmäßige) Verwendungsnachweis für das Projekt wurde bereits eingereicht. Insgesamt haben wir sparsam gehandelt. Im zahlenmäßigen Nachweis gibt es keine wichtigen und unwichtigen Posten. Die Mittel wurden zweckmäßig und sparsam verteilt. Angesichts des entstandenen Mehraufwands stellen wir fest, dass die Personalmittel deutlich zu knapp angesetzt waren. So wurden beispielsweise mehr LAT-Mitarbeiter in das Projekt eingebunden als ursprünglich geplant.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit:

Aus II) Punkt 1 ist ersichtlich, welche umfangreichen Arbeiten durchgeführt worden sind. Sie gehen vom Umfang her deutlich – qualitativ und vom Arbeitsvolumen her – darüber hinaus, was durch die Förderung abgedeckt wurde.

Zur Erreichung der oben genannten Ziele und zur Bearbeitung der damit verbundenen Aufgaben waren die Arbeiten dringend notwendig. Unangemessene Arbeiten gab es nicht.

4. Voraussichtliche Nutzung, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans:

Die Projektergebnisse geben vorrangig darüber Auskunft, dass ein Einsatz von Robotik mit zusätzlicher Messtechnik auf dem Rücken auf Baustellen möglich ist und die digitale Datenerfassung für den Baufortschritt genutzt werden kann. Die Technologie kann nun weiterentwickelt und verfeinert werden, so es auch auf realen Baustellen zum Einsatz kommen kann. Wichtig wird im nächsten Schritt die Datenanalyse mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) sein. Wir haben festgestellt, dass sinnvolle Daten erfasst werden können, um die Bauplanung zu verbessern und somit Kabelschäden langfristig zu verringern. Jedoch fehlt eine effiziente Auswertung der gesammelten Daten, bestenfalls passiert das automatisiert in Echtzeit.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen:

Die Robotertechnik und insbesondere der Spot entwickeln sich kontinuierlich weiter. Die Laufbewegung des Roboters wird somit langfristig immer leistungsfähiger und sicherer. Wir sind überzeugt, dass die Technologie, ähnlich wie bei den Drohnen, in den nächsten 5 Jahren einen großen technischen Schritt nach vorne machen wird, und vor allem werden die Preise niedriger sein. Allerdings ist während unseres Projektes kein neues Modell des Spots auf den Markt gekommen. Es gab nach unserem Wissen auch keine relevanten Publikationen anderer Stellen, die unser Vorhaben maßgeblich beeinflusst hätten.

6. die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses:

Die Projektergebnisse wurden während des Projekts über die Social-Media-Kanäle von LAT (LinkedIn: @LAT Gruppe; Instagram: LAT_Berlin) und bei Netzwerkveranstaltungen kommuniziert. Darüber hinaus wurden die erhobenen Daten und Ergebnisse gemäß dem Zuwendungsbescheid vom 24. Mai 2022 veröffentlicht. Die Abschlusspräsentation findet am 04.07.2023 um 10. Uhr statt.

Alle Daten von kritischen Infrastrukturen müssen vertraulich behandelt werden. Dies bezieht sich auf die U-Bahn-Tunnel Begehung während des Projektes.

III) Dem Schlussbericht

1. den Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen:

Um die Verkehrswende zu stemmen, müssen bestehende Netze entsprechend modernisiert werden: Für eine realistische Ablaufplanung benötigen wir belastbare Daten zum Infrastrukturzustand. Mittlerweile gibt es einen „Masterplan Schienengüterverkehr“, einen „Masterplan Schienenverkehr“ und einen „Zielfahrplan Deutschlandtakt 2030“. Da Ziele und Programmatik Konsens sind, rückt nun das entschlossene Handeln umso mehr in den Mittelpunkt. [Quelle: Allianz pro Schiene].

Mit unserer Machbarkeitsstudie können wir nun aufzeigen, wie der Bereich „Bahninfrastruktur ausbauen“ auf der Grundlage von erhobenen Daten realistisch geplant werden und durch den Einsatz von Robotik beschleunigt werden kann.

2. das wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen:

Die wissenschaftliche Aufbereitung der aktuellen Situation ergab folgendes Bild:

Laut Bauschadensbericht 2020/21 entstehen durch Kabel- und Leitungsschäden jährliche Kosten von über 500 Millionen Euro; die Ursachen sind dabei vor allem die fehlende oder fehlerhafte Leitungsauskunft [Quelle: Verband Sicherer Tiefbau e.V.].

Unser Vorhaben bestätigt dies und zeigt, dass es sinnvoll ist digitale Daten vor Ort zu sammeln und einem Abgleich mit Bestandplänen zu machen, da diese häufig fehlerhaft sind. Auch bei unseren Tests haben wir die Erfahrung gemacht, dass nicht alle Pläne übereinstimmend waren und es oftmals leichte Abweichungen beim Standort gab.

Tests mit dem Roboter zum sicheren Verlassen des Gleises: Zudem wurden Tests mit dem Roboter das sichere Verlassen des Gleisbetts erprobt. Dort hat sich herausgestellt, dass sich der Spot von Boston Dynamics sehr gut im Gleisbett bewegen kann und auch mit schlechten Lichtverhältnissen sicher bewegt. So wurde auch geprüft, dass der Roboter innerhalb von 120 Sekunden sicher das Gleis verlassen kann. Der Roboter wurde dafür manuell gesteuert, um die Gefahrenzone zu verlassen. Da die Beweglichkeit dies ohne weiteres zulässt, hätte der Roboter genügend Zeit, das Gleis sicher zu verlassen, z.B. wenn ein Zug durchfährt. Im Schnitt reichen dort ca. 70 Sekunden. Bei der **optischen Signalerkennung** von Gefahrensituationen konnten wir durch die Technik die Gefahrensituation aufzunehmen und bei unserer Analyse erkennen, jedoch war es nicht möglich diese Information in Echtzeit an den Roboter weiterzugeben, um ein automatisches Gleisverlassen einzuleiten. In einem Folgeprojekt sollte die Erkennung dieser Signale in Echtzeit entwickeln und getestet werden, um langfristig ein automatisches Verlassen der Gleise zu gewährleisten.

Bewegung des Roboters: Das Projektteam hat sich dabei mit dem Bewegungsalgorithmus beschäftigt. Unser Ziel war zusätzliche Technik auf dem Roboter zu montieren, ohne dass dessen Bewegung eingeschränkt war. Unsere Tests haben gezeigt, dass der integrierte Bewegungsalgorithmus des Spots ausreicht und dass wir uns hauptsächlich auf unseren Prototyp konzentrieren und die Technologie an der richtigen Stelle im Massenschwerpunkt montieren mussten. Außerdem ist der Zugriff auf den Algorithmus begrenzt und daher schwer anzupassen. Vergleicht man die beiden Robotertypen, so ist das Modell Unitree Go1 leichter zugänglich und kann daher langfristig besser an unseren Verwendungszweck angepasst werden. Für ein Folgeprojekt empfehlen wir die Anschaffung eines Roboters, damit eine kontinuierliche

Entwicklung möglich ist und immer mit demselben Roboter gearbeitet werden kann. Wir kommen auch zu dem Schluss, dass die Qualität, die von der LiDAR- und der Tiefenkamera aufgezeichneten Daten ausreicht, um die Bewegung des Roboters weiterzuentwickeln und zu automatisieren.

Die eher technischen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Datenübertragung: Grundsätzlich gibt es im Tunnel eine Internetverbindung, die aber von der Signalstärke je nach Tunneltiefe und Netzwerkanbieter unterschiedlich ausfällt. Jedoch müssen die Daten so klein wie möglich gehalten werden, um eine Echtzeit-Übertragung zu ermöglichen. Bestenfalls wird in einem Folgeprojekt eine Software programmiert, die es ermöglicht, die gesamte Technik zu steuern und die Daten zu speichern.

3. die Fortschreibung des Verwertungsplans. Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten:

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u. a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten:

Diese Position trifft für das Projekt nicht zu.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont):

Unser Prototyp bestätigt die Annahme, dass ein Roboter mit der notwendigen Technik für den Gebrauch auf Baustellen realistisch ist und genutzt werden kann. Die Tests haben bestätigt, dass die Datenerfassung auch im Tunnel möglich ist. Allerdings muss der Prototyp weiterentwickelt werden, um auch unter realen Umständen eingesetzt werden kann. Beispielsweise ist die Technik bei dem Prototyp weiterhin ungeschützt auf dem Rücken des Roboters montiert. Bei Baustellen muss die Technik geschützt sein, um Beschädigungen vorzubeugen. Bis zur Marktreife wird es noch mindestens 3 bis 4 Jahre dauern, da die Hard- und Software noch angepasst werden muss. Im Falle eines Folgeprojektes in der Förderlinie 2 sollte der Fokus auf der Datenauswertung liegen mit dem Ziel Echtzeit-Analysen durchzuführen. Nachdem die Datenauswertung leistungsfähig ist und den Anforderungen zur Kabelortung bzw. zur Bauplanung standhält, kann das Produkt flächendeckend eingesetzt werden.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont):

Für die Umsetzung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse dieses Vorprojekts in einem Hauptprojekt wurden die Voraussetzungen geschaffen.

Auf technischer Ebene wurde festgestellt, dass die Datenlage zu Bauvorhaben in Tunneln und der dort befindlichen Kabel nicht ausreichend ist. Oftmals sind eine fehlende oder fehlerhafte Leitungsauskunft sowie die falsche Bedienung von Baugeräten weiterhin ein Problem. Durch unsere Technik gelang es relevante Daten zu sammeln und digital abzuspeichern. Die Datenqualität ist auch bei schlechten Lichtverhältnissen und bei Bewegung ausreichend gut, um Analysen durchführen zu können.

Auf wissenschaftlicher Ebene haben wir uns mit dem Bewegungsalgorithmus des Roboters beschäftigt. Die Ergebnisse wurden auch schon während des Projektes an der Berliner Hochschule für Technik in Lehrveranstaltungen aufgenommen.

Ein Zeithorizont für die Umsetzung ist schwer absehbar, da hierfür eine Fördermöglichkeit erst noch gefunden und realisiert werden muss. Das Projektteam strebt an einen Antrag für die Förderlinie 2 des mFund einzureichen und weitere wissenschaftliche Partner, wie die RWTH Aachen, für das Vorhaben zu gewinnen.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse:

Wie bereits beschrieben, haben wir mit dem Projekt die Machbarkeit von Robotern auf Baustellen geprüft. Für die weitere wissenschaftliche, wie auch wirtschaftliche Anschlussfähigkeit wird eine Anschlussfinanzierung benötigt. Diese könnten dann für die weitere Entwicklung des Prototyps sowie für die Datenanalyse verwendet werden.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben:

Finanzierung: Nicht abschließend gelöst werden konnte die Frage, wie eine Weiterentwicklung des Prototyps (bestehend aus Roboter und zusätzlicher Technik) finanziert werden soll. Dafür könnte als Folgeprojekt dieser Machbarkeitsstudie die mFund Förderlinie 2 infrage kommen.

Projektziele: Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie haben wir festgestellt, dass **GPS-Tracking** für den Tunnelgebrauch keine Lösung ist. GPS kann nur unter freiem Himmel verwendet werden und um den genauen Standort der Datenerfassung festzuhalten muss eine alternative Lösung (beispielsweise SLAM oder UWB) gefunden werden. Wie auch bereits in II. Punkt 1 erläutert, für ein weniger genaues Standort-Tracking können Streckenkennzeichnungen von Gleisen verwendet werden.

Außerdem konnten wir die **optische und akustische Signalerkennung** bei Gefahrensituationen in diesem Projekt nicht ausreichend testen. In einem Folgeprojekt sollte die Erkennung dieser Signale mit entsprechender Hardware getestet werden, um langfristig ein automatisches Verlassen der Gleise zu gewährleisten.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer:

Interessierte haben Präsentationsmöglichkeiten, vermittelt durch LAT über info@lat.de oder dem LinkedIn Account @LAT Gruppe. LAT wird das Projekt, sowie die Technik weiterhin auf Anwendungskonferenzen teilen. In ähnlicher Form, wie im November 2022 bei dem Construction Equipment Forum in Berlin.

6. Die Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung:

Kosten: Aufgrund globaler Krisen stiegen die Kosten für Material und Technik im Laufe des Projekts signifikant an. So kam beispielsweise ein 360-Grad-LiDAR-Sensor nicht zum Einsatz, da die Kostensteigerung es dem Unternehmen wirtschaftlich unmöglich machte, den Eigenanteil zu stemmen. Darüber hinaus stiegen die Mietkosten für den Roboter und so kam übergangsweise die günstigere Variante von Unitree (Go1) zum Einsatz. Für ein Folgeprojekt empfehlen wir die Anschaffung eines Roboters, damit eine kontinuierliche Entwicklung möglich ist und immer mit demselben Roboter gearbeitet werden kann.

Darüber hinaus haben wir die ursprünglich geplanten Personalstunden für das Projekt überschritten und somit in größerem Umfang als geplant an dem Projekt gearbeitet.

Zeitplanung: Die Materialbeschaffung hat Anfangs zu Verzögerungen im Zeitplan geführt, da es bei verschiedenen Herstellern aufgrund der Ukraine Krise zu längeren Lieferzeiten führte.

Allerdings hat das Projektteam es trotzdem geschafft die vorgesehenen Arbeitspakete rechtzeitig abzuschließen und das Projekt wie geplant abzuschließen.