



Robotikgestützte Werkzeuglogistik mit Quadrupeds für die Bauindustrie

Christian Kiebel¹, Dominik Lehmann¹, Sven Zentgraf¹  and Patrick Herbers¹ 

¹Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150,
44801 Bochum, Deutschland

E-mail(s): christian.kiebel@rub.de, dominik.lehmann@rub.de, sven.zentgraf@rub.de,
patrick.herbers@rub.de

Abstract: Dieser Beitrag stellt die Umsetzung eines praktischen Beispiels vor, um die potenziellen Anwendungen der Robotik in der Baulogistik aufzuzeigen. Mit der zunehmenden Integration von Industrie 4.0-Technologien in den Produktionssektor hat die Robotik eine zentrale Rolle übernommen, da sie Effizienzsteigerung und Automatisierung bietet. Um diese Vorteile auf den Bausektor zu übertragen, wird ein theoretisches Konzept anhand eines praktischen Beispiels umgesetzt. Die Grundlage dafür ist *Spot*, ein von Boston Dynamics entwickelter Roboterhund. Unter Verwendung der API und des Software Development Kits wurde eine automatisierte Routine programmiert, die einen bestimmten Arbeitsablauf auf einer Baustelle simuliert. Um die praktische Anwendbarkeit zu veranschaulichen, wurde *Spot* mit einem neuen Zusatzmodul ausgestattet, in dem Proben oder Werkzeuge gelagert werden können. Zusätzlich wurde *Spot* mit einem Greifarm ausgestattet, der es ihm ermöglicht, Objekte aus dem Zusatzmodul zu entnehmen. Im Mittelpunkt dieser Untersuchung stand die Frage, ob *Spot* in der Lage ist, den programmierten Autowalk einschließlich der Anbringung des Zusatzmoduls und der darin enthaltenen Gegenstände auch dann durchzuführen, wenn unvorhergesehene Hindernisse auftreten oder die vorgegebene Route blockiert ist. Die Ergebnisse zeigen, dass *Spot* diese Aufgabe erfolgreich bewältigt hat, was die Machbarkeit und das Potenzial der Integration von Robotertechnologie im Bausektor verdeutlicht.

Keywords: Robotik, Automatisierung, Additive Fertigung



Erschienen in Tagungsband 35. Forum Bauinformatik 2024, Hamburg, Deutschland, DOI: 10.15480/882.13526

© 2024 Das Copyright für diesen Beitrag liegt bei den Autoren. Verwendung erlaubt unter Creative Commons Lizenz Namensnennung 4.0 International.

1 Einleitung

Im Kontext der industriellen Entwicklung markiert der Unterschied des technologischen Fortschritts und der Automatisierung zwischen der Fertigungsindustrie und dem Bauwesen eine Diskrepanz. Während die Fertigungsindustrie durch weitreichende Automatisierungsprozesse und den Einsatz fortschrittlicher Technologien charakterisiert wird, steht das Bauwesen diesen Entwicklungen noch vergleichsweise zurückhaltend gegenüber [1]. Ein deutlicher Indikator für diesen Unterschied lässt sich anhand der Produktivitätsentwicklung in diesen Sektoren ablesen. Während die allgemeine

Wirtschaftsleistung zwischen 1991 und 2021 um 45 Prozent anstieg und das verarbeitende Gewerbe sogar einen Produktivitätssprung von 90 Prozent verzeichnen konnte, erlebte das Baugewerbe einen Rückgang der Arbeitsproduktivität um 4,2 Prozent [2]. Im Vergleich zu anderen Wirtschaftsbereichen ist es den Unternehmen im Baugewerbe somit nicht gelungen, ihre Produktivität signifikant zu verbessern.

Die zunehmende Integration von Robotik in das Bauwesen erfolgt aufgrund der Erkenntnisse und Erfolge in der industriellen Anwendung. Roboter, welche durch ihre Fähigkeit, physische Belastungen für die Arbeiter minimieren und monotone sowie arbeitsintensive Tätigkeiten übernehmen, stellen einen beträchtlichen Mehrwert dar [3]. Diese Arbeit konzentriert sich darauf, das Potenzial der Robotik zur Unterstützung und Optimierung von Prozessen im Bauwesen zu evaluieren, speziell im Bereich der Baustellenlogistik. Trotz der noch hohen Anschaffungskosten der Robotikhardware wird durch steigende Lohnkosten der Einsatz von Robotik auf der Baustelle unabdingbar sein. Die Verteilung von Material und Werkzeug auf einer Baustelle ist mit dem gesamten Bauprozess eng verbunden. Eine Unterstützung der Baustellenlogistik durch Robotik könnte so den Weg zu einer komplett autonomen Baustelle bereiten.

Ziel dieser Arbeit ist, ein Szenario der Baustellenlogistik, den Werkzeugtransport, durch den Einsatz mobiler, autonomer Robotik zu unterstützen. Wir verwenden *Spot*, einen vierbeinigen Roboter von Boston Dynamics, der über fortschrittliche autonome Gleichgewichts- und Navigationsfähigkeiten verfügt. *Spot* soll dabei in der Lage sein, Gegenstände aufzuheben, zu verstauen, und an einen anderen Ort zu liefern. Dabei müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, wie das Gewicht der Payloads, der Massenschwerpunkt, und die Transportsicherheit.

2 Verwandte Arbeiten

Ein anschauliches Beispiel für den praktischen Einsatz von *Spot* zeigt sich im verstärkten Gebrauch dieser Technologie bei der Deutschen Bahn. Im Artikel "Roboterhund unterstützt digitale Instandhaltung der DB" [4] wird die Anwendung von *Spot* detailliert beschrieben und verdeutlicht den Beitrag zur digitalen Wartung und Instandhaltung: *"Der Laufroboter reduziert Laufwege, objektiviert Prüfungsergebnisse und ermöglicht den Wegfall von aufwendigen Grubenarbeiten unter dem Zug. Die Mitarbeitenden werden bei körperlich anstrengenden Arbeiten entlastet und gewinnen Zeit für wertschöpfende Tätigkeiten. So können die Instandhaltungskosten gesenkt und der Fachkräftemangel abgefedert werden."*

Follini, Terzer, Marcher u. a. [5] stellen ein Projekt vor, in dessen Zentrum die Entwicklung einer Roboterplattform steht, die in der Lage ist, einem Arbeiter auf der Baustelle zu folgen und dabei dynamische Hindernisse automatisiert zu umgehen. Die Reduktion von Muskel-Skelett-Erkrankungen der Arbeitnehmer auf Baustellen stellt ein wesentliches Ziel des Projekts dar. Die Übernahme schwerer körperlicher Arbeit durch die Maschine ermöglicht es, die Belastung der Arbeitnehmer zu reduzieren. Der Arbeiter fungiert dabei lediglich als Leitfigur, um sich schneller auf der Baustelle zurechtzufinden.

Emig, Siegele und Terzer [6] präsentieren mögliche Steigerungen des Automatisierungsgrades von Bauvorhaben sowie aktuelle Herausforderungen, wie beispielsweise dynamische und unsichere Randbedingungen bei der Umsetzung auf der Baustelle. Im Artikel werden diverse Maschinen vor-

gestellt, die zur Umsetzung der Digitalisierung auf der Baustelle beitragen könnten. Dazu gehören beispielsweise auch verfahrbare Plattformen zum Transport von Baumaterialien.

Bei der Implementierung von Robotertechnologien auf Baustellen sind wichtige Faktoren zu berücksichtigen, die den Einsatz derzeit teilweise unmöglich machen, diese Probleme und mögliche Lösungen werden von Dindorf und Wos [7] behandelt. Zwar geht es den Autoren nicht direkt um den Materialtransport auf der Baustelle, sondern um ein mobiles robotergestütztes Maurersystem (RBS), aber die Probleme, die bei der Umsetzung auf der Baustelle auftreten, sind die gleichen wie bei der robotergestützten Werkzeuglogistik auf der Baustelle. Dazu zählen anfängliche Kostenbarrieren, die hohen Vorlaufkosten für die Herstellung und den Betrieb der Bauroboter. Will [8] thematisiert neue Möglichkeiten zur Automatisierung von Baumaschinen und Bauprozessen. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass im Hochbau die Implementierung von Assistenzsystemen zur Unterstützung und Entlastung der Arbeitskräfte eine entscheidende Rolle spielt.

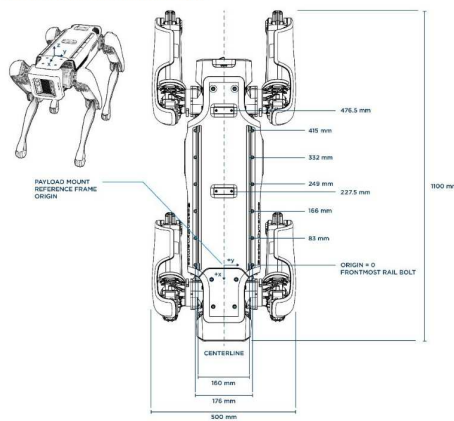
3 Methodik

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung und Bewertung einer simulierten Laufroute unter Einsatz von *Spot*, einem vierbeinigen autonomen Roboter von Boston Dynamics. *Spot* kann sowohl über ein Tablet für direkte Befehle als auch programmatisch über speziell entwickelte Software-Schnittstellen gesteuert werden. Ein zentraler Bestandteil der autonomen Steuerung ist die AutoWalk-Schnittstelle. AutoWalks sind vom Benutzer aufgenommene Lauf Routen, die vom Roboter vollautonom abgelaufen werden können. Darüber hinaus ist *Spot* mit Fischaugenkameras und Stereokameras ausgestattet, die ihm eine kontinuierliche Umgebungswahrnehmung und damit die Vermeidung von Kollisionen ermöglichen. *Spot* kann neben den bereits fest eingebauten Kameras noch bis zu 14kg Payload tragen.

Unter Verwendung der Boston Dynamics API (*Application Programming Interface*) wird eine Laufroute erstellt, die *Spot* autonom durchlaufen soll. Dabei wird eine speziell angefertigte Payload integriert, der bis zu einem definierten Maximalgewicht beladen werden kann. Die Laufroute wird in zwei Szenarien getestet: erstens auf einer hindernisfreien Strecke und zweitens auf einem Weg, der durch ein Hindernis blockiert wird. Ziel dieser Evaluation ist es, zu überprüfen, ob *Spot* in der Lage ist, sich die Laufroute zu merken und das Hindernis eigenständig zu umgehen oder anzuhalten. Diese Simulation zielt darauf ab, die praktische Anwendbarkeit von *Spot* auf Baustellen und in ähnlichen Arbeitsumgebungen zu demonstrieren, wobei die Fähigkeit zur autonomen Navigation und Hindernisvermeidung im Mittelpunkt steht.

Ein praktisches Anwendungsbeispiel bildet eine alltägliche Situation auf einer Baustelle, bei der ein Arbeiter einen Winkelschleifer aus einem Magazincontainer benötigt, jedoch der weitläufige Weg dorthin ineffizient ist. In diesem Szenario wird der Winkelschleifer in einen speziell für *Spot* entwickelten und auf ihm befestigten Payload gelegt. Anschließend wird *Spot* so programmiert, dass er den Winkelschleifer direkt zum Arbeiter transportiert. Ziel ist es, zu demonstrieren, dass *Spot* den programmierten Weg bei wiederholter Durchführung zuverlässig absolviert, auch wenn kleine Hindernisse auftreten oder geringfügige Änderungen im Gelände vorliegen. Dies minimiert den

Spot dimensions and reference points



Grundriss

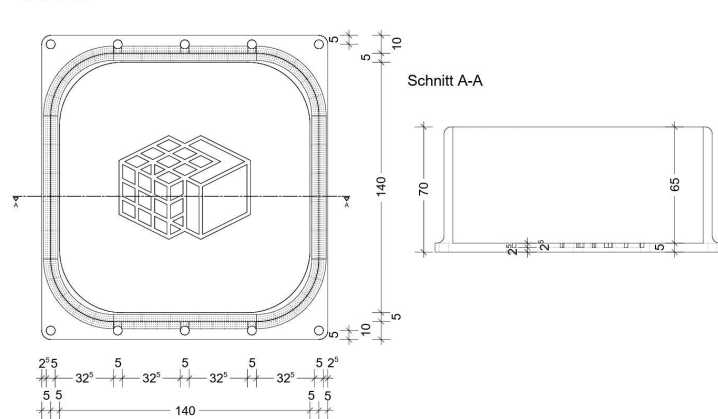


Abbildung 1: Spot Abmessungen und Bezugspunkte von oben
 Abbildung 2: Konstruktionszeichnungen mit Bemaßung

Bedarf, die Laufroute für jede Lieferung neu anzupassen. Die Entwicklung eines maßgeschneiderten Rahmens und eines tragbaren Behälters ist dabei essenziell. Der Rahmen wird dauerhaft an *Spot* befestigt, während der Behälter für flexible Einsätze konzipiert wird. Durch genaue Vermessung und Berücksichtigung des maximal zulässigen Gewichts gemäß den Herstellerempfehlungen wird sichergestellt, dass der Payload die Funktionsfähigkeit von *Spot* nicht beeinträchtigt. Dieses Projekt soll nicht nur die Machbarkeit des automatisierten Transports von Werkzeugen und Materialien auf Baustellen verdeutlichen, sondern auch Perspektiven für zukünftige Erweiterungen eröffnen, wie die Einbindung fortgeschrittener Navigationsalgorithmen und die Optimierung des Payload-Designs für vielfältigere Einsatzmöglichkeiten.

3.1 Vorgehen Additive Fertigung

In diesem Abschnitt wird der Prozess der Entwicklung und Herstellung der Payloads für *Spot* beschrieben. Um sicherzustellen, dass *Spot* in Zukunft auch mit empfindlichen Werkzeugen auf der Baustelle beim Transport zurechtkommt, wurde in der Projektarbeit beispielhaft ein Alltagsgegenstand gewählt. Um zu zeigen, wie gut *Spot* auch mit zerbrechlichen Dingen umgehen kann, wurden Getränkeflaschen aus Glas als Testobjekt ausgewählt. Die Intention bestand darin, die Flaschen so auf *Spot* zu befestigen, dass sie sicher stehen, jedoch auch einfach wieder abgenommen werden können. Für die Bewältigung dieser Herausforderung wurde eine Transportbox entworfen.

Abb. 1 zeigt die Bemaßung des Roboters, Abb. 2 die Konstruktionszeichnung der entworfenen Transportbox. Die Transportbox wurde für vier Glasflaschen (ca. 70mm Radius) entworfen. Die inneren Maße der Box betragen 145mm × 145mm und eine Höhe von 70mm. Wände und Boden der Transportbox wurde mit einer Dicke von fünf Millimetern entworfen, um eine ausreichende Stabilität für das Tragen von Flaschen zu gewährleisten. Um die strukturelle Integrität zu verstärken, wurde um die Box herum eine Randversteifung eingefügt, in der Schraubenlöcher für die Befestigung angebracht wurden. Dabei wurde ein Abstand von zehn Millimetern an den Seiten vorgesehen, an denen Schrauben angebracht werden, während an den anderen Seiten ein Abstand von fünf Millimetern eingehalten wurde. Damit auch andere Flaschen in dieser Box transportiert werden



Abbildung 3: Transportbox mit Abstandshalter für kleinere Flaschen

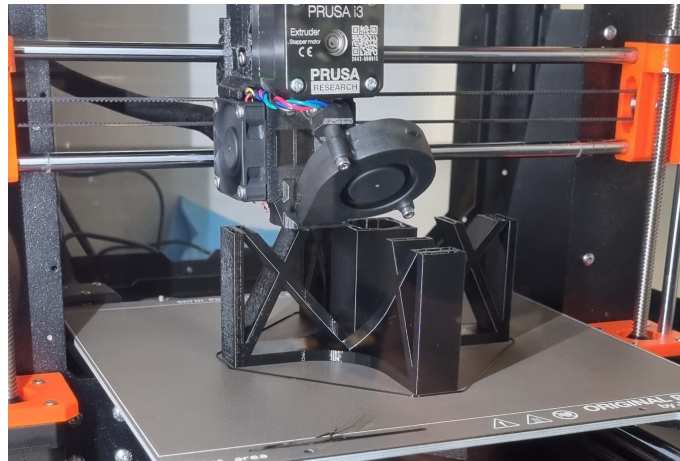


Abbildung 4: Druck des Abstandshalters mit Querstreben

können, wurde für die Box ein Abstandshalter entworfen und gedruckt, der für 0,25-Liter-Flaschen geeignet ist. Dieser ist in Abb. 3 zu sehen.

Die im Druckverfahren verwendeten Kunststoffe machen das endgültige Modell leicht und gleichzeitig robust genug, um den vorgesehenen Zweck zu erfüllen. Abb. 4 zeigt den Druck des Abstandshalters, Abb. 5 die montierte Transportbox mit Ladung.

3.2 Vorgehen Autowalk

Für die autonome Navigation des Roboters wurde die Autowalk API von Boston Dynamics verwendet. Die Steuerung von *Spot* erfolgte über einen Tablet-Controller, der mittels einer Wi-Fi-Verbindung die drahtlose Kommunikation mit dem Roboter ermöglichte. Durch die Nutzung des Tablets konnten Wegpunkte aufgenommen werden, die die Route des Autowalks bilden. Die Wegpunkte beinhalten die Pose des Roboters und visuelle Orientierungspunkte (z.B. Fiducials), welche während der Aufnahme sichtbar waren. Die Wegpunkte werden in etwa 1m Abständen aufgezeichnet und auf das Tablet übertragen. Ist der Roboter Hindernissen gegenübergestellt, muss eine alternative Route gesucht werden. Dafür muss die aufgenommene Route in einen Graphen übertragen werden, in dem alle Posen untereinander verlinkt werden. Dadurch wird es auch möglich, jeden einzelnen Punkt des Graphen gezielt anzusteuern. Neben den automatisch aufgenommenen Wegpunkten besteht auch die Möglichkeit, manuell Wegpunkte zu setzen. Diese Funktionalität ermöglicht eine präzise Steuerung und Anpassung der Laufroute, um eine optimale Navigation und Wiederholbarkeit der Route zu gewährleisten.

3.3 Vorgehen Beladung

Für eine autonome Baustellenlogistik ist die Beladung und Entladung ein zentraler Bestandteil. Damit der Roboter ohne externe Hilfe Ladung aufnehmen und ablegen kann, wurde ein Roboterarm der Marke *Kinova Gen 3* auf dem Rücken von *Spot* montiert (siehe Abb. 6). Die Stromversorgung des Arms erfolgte über eine externe Stromquelle, ein integrierter Anschluss an die Batterie von *Spot* ist aber denkbar. Der Roboterarm hat eine Reichweite von 90cm und eine Bewegungsfreiheit von 6 Degrees

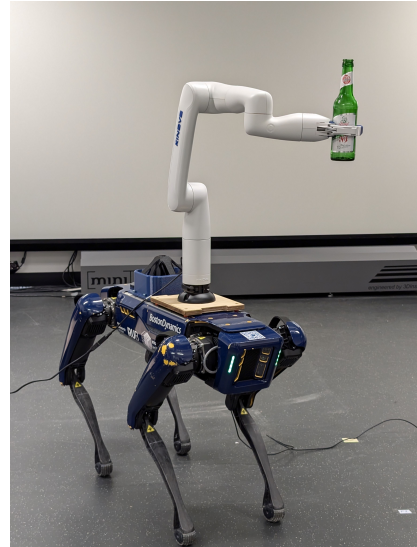
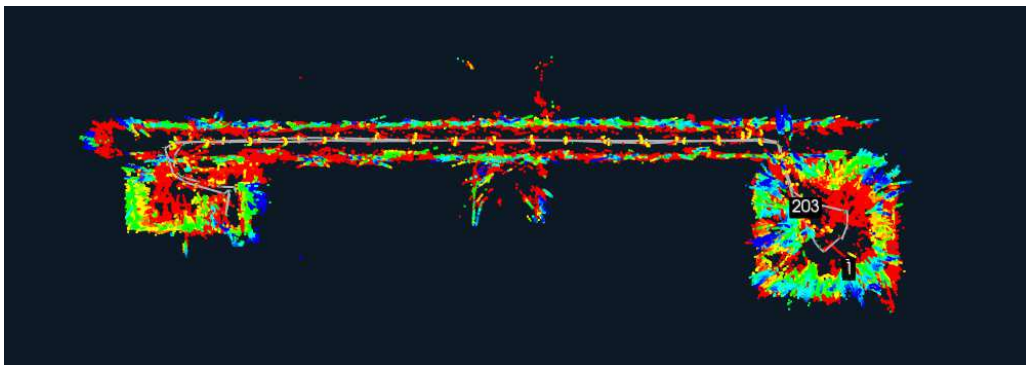
Abbildung 5: *Spot* mit beladener TransportboxAbbildung 6: Montierter *Kinova Gen 3* Roboterarm mit Ladung

Abbildung 7: Aufgenommene Route des Autowalks und Punktwolke

of Freedom (6-DoF). Der Arm kann Objekte mit einem Gewicht von 2kg heben, 4kg wenn nahe am Schwerpunkt. Das Eigengewicht des Arms von 7kg erlaubt die Nutzung als Payload für *Spot*, jedoch beschränkt diese *Spot's* gesamte Traglast von 14kg. Der Arm verschiebt den Masseschwerpunkt des Roboters erheblich. Deswegen ist zu empfehlen, den Arm nur zu bedienen, wenn *Spot* in einer stabilen Position auf dem Boden sitzt. In Tests konnte der bearbete Roboter in Sitzposition 0,5l Flaschen problemlos heben und in dem gedruckten Aufbau verstauen. Auch ein Entladen konnte erfolgreich getestet werden.

4 Ergebnisse

Um das Gleichgewicht und die Navigation des Roboters zu prüfen, wurde ein Testlauf gestartet. Zunächst wurden die in Kapitel 3.1 beschriebenen Payloads für *Spot* entsprechend registriert. Der Schwerpunkt der Transportbox inkl. Flaschen wurde vermessen und in *Spot's* Konfiguration angegeben. Diese Justierungen sind wichtig, um die Stabilität und Bewegungsdynamik zu optimieren, insbesondere hinsichtlich seines Aufsteh- und Bewegungsverhaltens sowie der Lastverteilung auf seinem Rücken.

Eine Laufroute von 40m entlang eines Flurs und zwei Räumen inklusive Rückweg wurde entsprechend des Vorgehens in Kapitel 3.2 aufgezeichnet (siehe Abb. 7). Die Laufroute enthält enge Passagen durch Türen sowie Hindernisse in Form von Kisten in den Räumen. Die Überprüfung der aufgenommenen Laufroute bestätigte die erfolgreiche und fehlerfreie Funktionsweise. *Spot* ist in der Lage, zu einem spezifizierten Wegpunkt zu navigieren und im Anschluss an den Ausgangspunkt zurückzukehren. Selbst bei der Anpassung der Laufroute mit einem Hindernis findet *Spot* eigenständig einen alternativen Weg, um die geplanten Wegpunkte sequenziell abzuarbeiten. Diese Fähigkeit zeigt sich besonders vorteilhaft in dynamischen Umgebungen wie Baustellen.

Nach der Montage der mittels 3D-Druck hergestellten Transportbox als Payload auf *Spots* Rücken wurde ein AutoWalk-Test durchgeführt, um die Funktionalität und Belastbarkeit der Konstruktion zu überprüfen. Im Rahmen des Tests demonstrierte *Spot* seine Stabilität und Mobilität mit Lasten, indem er sowohl aufstehen als auch sich hinlegen konnte, ohne dass die transportierten Bierflaschen – jeweils 0,5 Liter – umfielen oder Schaden nahmen. Dies bestätigt die Eignung der Transportbox in Verbindung mit *Spot* für den sicheren Transport von Gegenständen. Während des Tests navigierte *Spot* von einem Labor über einen Flur bis zur Kaffeeküche des Lehrstuhls und legte sich dort auf den Boden. Für die Rückkehr zum Ausgangspunkt stand *Spot* wieder auf, drehte sich um und bewegte sich zurück zur Startposition. Dabei musste lediglich eine konstante WiFi-Verbindung aufrecht erhalten werden, um die Steuerung und Notstopp-Funktion via Laptop zu erhalten. Dies unterstreicht die Bedeutung der Berücksichtigung von Reichweitengrenzen bei der Planung von autonomen Operationen auf Baustellen oder in ähnlichen Umgebungen, insbesondere wenn ferngesteuerte Überwachung und Steuerung vorgesehen sind.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass *Spot* effektiv für den Transport von Materialien und Werkzeugen auf Baustellen eingesetzt werden kann. Die Kombination mit der additiven Fertigung im 3D-Drucker macht es möglich, Halterungen für jeden Zweck herzustellen und diese dann auf *Spot* anzubringen. Durch die Aufnahme eines Autowalks war es möglich, *Spot* autonom navigieren zu lassen. Dies würde einen Einsatz von automatisierter Logistik über die Baustelle ermöglichen, zum Beispiel als Werkzeuganforderung oder Materialverfolgung und Verteilung. Auch ist ein Fernzugriff möglich, sodass externe Fachkräfte Proben nehmen oder andere Arbeiten durchführen können, ohne auf die Baustelle zu kommen. In Zeiten des Fachkräftemangels würde das einen effizienteren Einsatz von Arbeitskraft ermöglichen.

Die Fähigkeit von *Spot*, Hindernisse zu erkennen und zu umgehen, unterstreicht die fortgeschrittene Technologie und Flexibilität, die Robotiksysteme in das Bauwesen einführen können. Dieser Aspekt ist besonders relevant, da er zeigt, dass der Einsatz von Robotern nicht auf vorhersehbare oder streng kontrollierte Umgebungen beschränkt ist, sondern auch in den dynamischen und oft unvorhersehbaren Bedingungen einer Baustelle effektiv sein kann. Die erfolgreiche Integration der zusätzlichen Payloads und die Anpassung der Bewegungsfähigkeiten von *Spot* basierend auf dem Gewicht und Schwerpunkt der transportierten Gegenstände zeigen das Potential für eine Vielzahl von spezialisierten Anwendungen. Diese Anpassungsfähigkeit eröffnet neue Möglichkeiten für die

Nutzung von *Spot* in verschiedenen Phasen des Bauprozesses, von der initialen Erkundung und Datenakquisition bis hin zum Transport von Baumaterialien und Werkzeugen.

In weiterführender Forschung sollten die autonomen Fähigkeiten des Roboters untersucht und erweitert werden. Für den Werkzeug- und Materialtransport ist eine visuelle Erkennung und Klassifizierung notwendig um das automatische Beladen zu ermöglichen. Für einen sicheren Einsatz von mobilen Robotern auf der Baustelle ist ein Umgebungsverständnis nötig, welche Gefahren erkennen und vermeiden kann. Weiterhin sollten andere Konfigurationen von Robotern getestet werden, wie radbasierte Roboter für erhöhte Transportkapazität, oder humanoide Roboter für mehr Flexibilität. Auch weitere Forschung in Interaktionsmöglichkeiten zwischen menschlichen Arbeitern und mobilen Robotersystemen wie *Spot* können dazu beitragen die Akzeptanz und effektive Zusammenarbeit auf der Baustelle zu fördern.

Literatur

- [1] T. Bock, »The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics«, *Automation in Construction*, Jg. 59, S. 113–121, 2015. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.022.
- [2] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V., *Produktivität im Bau(haupt-)gewerbe – ein statistischer Befund*, 2022. Adresse: <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/publikationen/brancheninfo-bau/produktivitaet-im-bauhauptgewerbe> (besucht am 26. 03. 2024).
- [3] T. Afflerbach, *Serviceroboter: Digitalisierung von Dienstleistungen aus Kunden-, Mitarbeiter- und Managementperspektive (essentials)*. Wiesbaden, Germany und Heidelberg: Springer Gabler, 2021. DOI: 10.1007/978-3-658-35624-8.
- [4] Deutsche Bahn AG, »Roboterhund unterstützt digitale Instandhaltung der DB«, 2023. Adresse: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/11859294/810ba4ea054e62aae448612d9bcdf42e/Laufroboter_Faktenblatt-data.pdf (besucht am 26. 03. 2024).
- [5] C. Follini, M. Terzer, C. Marcher, A. Giusti und D. T. Matt, »Combining the Robot Operating System with Building Information Modeling for Robotic Applications in Construction Logistics«, *Advances in Service and Industrial Robotics*, S. 245–253, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-48989-2_27.
- [6] J. Emig, D. Siegele und M. Terzer, »Digitalisierung und KI in der Baurobotik: Eine Analyse der aktuellen Entwicklungen und zukünftigen Potenziale«, *Künstliche Intelligenz im Bauwesen*, S. 413–429, 2024. DOI: 10.1007/978-3-658-42796-2_24.
- [7] R. Dindorf und P. Wos, »Challenges of Robotic Technology in Sustainable Construction Practice«, *Sustainability*, Jg. 16, Nr. 13, 2024. DOI: 10.3390/su16135500.
- [8] F. Will, »Automatisierte Baumaschinen und Bau-Robotik«, in *Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und profitablen Wertschöpfung von Gebäuden: Grundlagen – neue Technologien, Innovationen und Digitalisierung – Best Practices*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 335–360. DOI: 10.1007/978-3-658-34962-2_20.