

Konzept zur Auslagerung rechenintensiver Steuerungsprozesse Autonomer Roboter mit 5G

5G-basierte Steuerungsauslagerung für mobile Robotik

T. Lackner, J. Hermann, D. Palm

ZUSAMMENFASSUNG Private 5G-Campusnetzwerke bieten eine zuverlässige Kommunikationslösung für Autonome Mobile Roboter (AMR), insbesondere durch hohe Upload-Raten und niedrige Latenzen. Der Beitrag untersucht die Auslagerung rechen- und energieintensiver Steuerungsprozesse von Roboterflotten über private 5G-Netze. Ziel ist es, die Energieeffizienz der Roboter zu steigern und Einsatzzeiten zwischen Ladezyklen zu optimieren. Dabei wird die Auslagerung nicht nur nach Rechenintensität, sondern auch nach Sicherheitsanforderungen bewertet, um Echtzeitfähigkeit und Sicherheit im realen Betrieb zu gewährleisten.

STICHWÖRTER

Energieeffizienz, Software, Industrieroboter, Industrie 4.0

5G-based outsourcing of control processes for mobile robotics

ABSTRACT Private 5G campus networks offer a reliable communication solution for Autonomous Mobile Robots (AMRs), particularly due to high upload rates and low latencies. This article explores offloading the compute- and energy-intensive control processes of robot fleets via private 5G networks. The goal is to enhance the robots' energy efficiency and extend operational times between charging cycles. The offloading process is evaluated not only based on computational demand but also on security relevance to ensure real-time capability and safety in real-world operations.

1 Einleitung in die Robotik

Im Kontext von Industrie 4.0 stehen Unternehmen in einem zunehmend wettbewerbsintensiven Umfeld, in dem die Effizienz ihrer Prozesse und die Senkung von Kosten entscheidende Faktoren für den Erfolg sind [1]. Um in diesem dynamischen Markt bestehen zu können, sehen sich viele Unternehmen gezwungen, ihre intralogistischen Transport- und Handhabungsaufgaben zu automatisieren [1, 2]. Intralogistik umfasst die Steuerung, Durchführung und Optimierung innerbetrieblicher Prozesse und Materialflüsse innerhalb geschlossener Unternehmensstandorte wie Fabrikanlagen, Lagerhäuser und große Distributionszentren [2]. Die Automatisierung dieser Prozesse verspricht nicht nur eine Erhöhung der Effizienz, sondern auch eine Verbesserung der Genauigkeit und Geschwindigkeit, mit der Materialien bewegt werden.

In der automatisierten intralogistischen Prozessgestaltung spielen fahrerlose Transportsysteme (FTS) eine entscheidende Rolle [3]. Diese Systeme ermöglichen einen automatisierten oder gänzlich autonomen Materialtransport, was in der heutigen industriellen Landschaft von großer Bedeutung ist. Seit den 1950er-Jahren haben Robotikunternehmen kontinuierlich an spurgebundenen fahrerlosen Transportsystemen (englisch: Automated Guided Vehicle, AGV) gearbeitet. Diese Fahrzeuge, die in der Lage sind, auf vordefinierten Routen zu operieren, haben sich in vielen Unternehmen bewährt. Mit der Entwicklung innovativer Führungstechnologien wie magnetischen, kontrastspurbasierten (visuellen), induktiven und kartesischen Referenzsystemen haben

AGVs jedoch ihre Grenzen [3, 4]. Ihre Bewegungen sind auf feste Bahnen und festgelegte Zielpositionen beschränkt, was in dynamischen und sich schnell verändernden Umgebungen als nachteilig angesehen wird.

Ein bedeutender Fortschritt in der Robotik wurde 1987 mit dem ersten Patent für einen vollständig autonomen mobilen Roboter (AMR) erzielt [3]. Im Gegensatz zu den spurgebundenen AGVs bieten AMRs die Möglichkeit, sich autonom und kollisionsfrei zu bewegen. Sie navigieren ohne zusätzliche Infrastruktur innerhalb eines definierten Bereichs zu jedem erreichbaren Zielpunkt, indem sie On-Board-Laserscanner und eine Vielzahl von Sensoren einsetzen [4, 5]. Diese fortschrittlichen Technologien erlauben es den AMRs, sich flexibel an wechselnde Umgebungen und Anforderungen anzupassen. In den letzten Jahren hat die Verbreitung von AMRs in der Industrie im Vergleich zu AGVs drastisch zugenommen. Unternehmen setzen zunehmend auf diese flexiblen Roboterlösungen, um den Herausforderungen eines dynamischen und sich schnell verändernden industriellen Umfelds gerecht zu werden. Die Fähigkeit von AMRs, in Echtzeit auf ihre Umgebung zu reagieren und autonom Entscheidungen zu treffen, hat ihre Einsatzmöglichkeiten erheblich erweitert. Dies hat nicht nur zu einer höheren Effizienz in den intralogistischen Abläufen geführt, sondern auch zu einer verbesserten Sicherheit, da AMRs in der Lage sind, Hindernisse zu erkennen und zu umgehen, ohne dass menschliches Eingreifen erforderlich ist.

Diese Entwicklung hat weitreichende Implikationen für die Zukunft der Intralogistik. Die Kombination aus Automatisierung, künstlicher Intelligenz und fortschrittlicher Sensorik eröffnet

neue Möglichkeiten, um komplexe Logistikprozesse zu optimieren. Während AGVs nach wie vor eine wichtige Rolle in vielen Anwendungen spielen, bietet die Flexibilität und Autonomie von AMRs einen klaren Wettbewerbsvorteil in der modernen Industrie. In den kommenden Jahren wird man eine verstärkte Integration dieser Technologien erleben, die dazu beitragen wird, die Effizienz und Reaktionsfähigkeit von Produktions- und Logistikprozessen weiter zu steigern [3]. Die Notwendigkeit, Prozesse zu automatisieren und die Vorteile neuer Technologien zu nutzen, ist dringender denn je. Gerade vor dem Hintergrund, dass AMRs derzeit über WLAN angebunden sind und durch die massive Anbindung an Geräten WLAN oftmals an Grenzen stößt. Dies wird verstärkt, da WLAN auf öffentliche Frequenzen zugreift und vor allem das 2,4-GHz-Frequenzband dadurch oftmals überlastet ist. Um die Herausforderungen der Zukunft erfolgreich zu meistern, müssen Unternehmen innovative Ansätze verfolgen, welche die Vorteile autonomer Systeme in der intralogistischen Automatisierung maximieren.

Dieser Beitrag beschreibt zunächst in Kapitel 2 den Mobilfunkstandard 5G und speziell die privaten 5G-Campusnetzwerke. In Kapitel 3 werden die rechenspezifischen Komponenten von AMRs dargestellt und die Auslagerungsarchitektur mittels 5G-Campusnetzwerken entwickelt. Kapitel 4 fasst die Untersuchung zusammen und gibt einen kurzen Ausblick über zukünftige Entwicklungen.

2 Der Mobilfunkstandard 5G und private 5G-Netzwerke

Die Organisation 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ist die Dachorganisation, welche die fünfte Generation des Mobilfunk (5G) standardisiert. Sie umfasst eine Vielzahl von Stakeholdern, wie Mobilfunkanbieter, Telekommunikationsgremien, politische Vertreter sowie Experten aus Wissenschaft und Forschung. Im Jahr 2015 definierte 3GPP zusammen mit der Internationalen Telekommunikationsunion (ITU-R) drei zentrale Leistungen für 5G [4]:

- Ein ausgeweitetes Breitband mit Datenübertragungsraten von bis zu 10 Gbit/s im Download und 1 Gbit/s im Upload
- Ultra-zuverlässige und niedrige Latenzen für zeitkritische, industrielle Anwendungen im Bereich von bis zu 1 ms
- Massive Endgeräte-Konnektivität für IoT-Anwendungen von bis zu 1 Millionen Geräte pro Quadratkilometer

Zusätzlich erlaubt 5G erstmals den Aufbau sogenannter privater 5G-Campusnetzwerke, welche speziell für industrielle Zwecke entwickelt werden. Private 5G-Netzwerke zeichnen sich aus durch einen dedizierten Frequenzbereich und ein hohes Maß an Konfigurierbarkeit für den Einsatzzweck [5]. Allerdings können 5G-Campusnetzwerke bislang nur eingeschränkt ihr volles Potenzial ausschöpfen, da viele Funktionalitäten und leistungssteigernde Features noch in der Definitions- oder Entwicklungsphase sind und also nicht für den kommerziellen Markt zur Verfügung stehen. Zudem integriert 5G verschiedene industrielle Dienste, wie Lokalisierung, die spezifische Anpassung von Anwendungsfällen durch Software (Network Slicing) und die Kommunikation zwischen Fahrzeugen. Diese Dienste basieren teilweise auf anderen Standards und haben eigene Entwicklungs- und Zeitpläne, was den Freigabeprozess komplizierter macht. Außerdem sind die 5G-Standards für öffentliche und private Netzwerke im Release-Prozess [6] nicht klar voneinander abgegrenzt, was die Bewer-

tung der Leistung privater 5G-Campusnetze in den einzelnen Releases undurchsichtig gestaltet. Dies erschwert die Einschätzung der Eignung von 5G für industrielle Anwendungen.

Außere Einflüsse, wie Materialabschirmungen und Interferenzen in der Umgebung des 5G-Endgeräts, können zudem dazu führen, dass die tatsächliche Leistung von der theoretischen abweicht. Bisher gibt es nur wenige Langzeitmessungen in industrienahen Umgebungen, die eine Beurteilung der Eignung von 5G für industrielle Anwendungen im Bereich der mobilen Robotik erlauben. Ziel dieses Artikels ist es daher, diese Forschungslücke zu schließen und anhand von Langzeitmessungen eines 5G-Campusnetzwerks in einer industrienahen Umgebung eine Bewertungsgrundlage für industrielle Anwendungsfälle der mobilen Robotik bereitzustellen.

2.1 Private 5G Campusnetzwerke

Eine bedeutende Entwicklung im Bereich 5G für industrielle Anwendungen sind die privaten 5G-Campusnetzwerke. Diese Netzwerke erlauben es Unternehmen, maßgeschneiderte 5G-Infrastrukturen direkt in ihren Betriebsstätten zu implementieren. Dadurch erhalten sie die Möglichkeit, eine zuverlässige, sichere und leistungsstarke Kommunikation zu gewährleisten, die speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnitten ist. Private 5G-Netzwerke sind vollständig von öffentlichen Netzwerken getrennt, was höchste Sicherheitsstandards gewährleistet. Alle Datenströme sowie die Netzwerkfunktionen, sowohl auf Benutzer- als auch auf Steuer-ebene, bleiben innerhalb der Unternehmensgrenzen. Dies minimiert das Risiko von Datenlecks und erhöht die Kontrolle über die IT-Infrastruktur. Zudem bieten private 5G-Campusnetzwerke erhebliche Vorteile in Bezug auf Latenz und Bandbreite. Unternehmen können somit hochautomatisierte Prozesse, Echtzeitanalysen und Internet-of-Things(IoT)-Anwendungen effizienter und schneller umsetzen. Die Flexibilität dieser Netzwerke erlaubt es, spezifische Anwendungen und Dienste zu integrieren, die auf die individuellen Anforderungen der jeweiligen Branche abgestimmt sind.

Mit der Implementierung von privaten 5G-Netzen können Unternehmen nicht nur ihre betriebliche Effizienz steigern, sondern auch innovative Geschäftsmodelle wie Edge-Computing-as-a-Service und Remote-/Predictive-Maintenance-as-a-Service entwickeln, die auf der fortschrittlichen Kommunikationstechnologie basieren. In einer zunehmend vernetzten Welt sind private 5G-Campusnetzwerke ein entscheidender Schritt für die digitale Transformation industrieller Anwendungen [5].

Im Gegensatz zu öffentlichen 5G-Netzwerken ermöglichen private Campusnetzwerke eine größere Kontrolle über die Netzwerkressourcen und bieten zusätzliche Sicherheitsfunktionen, die für industrielle Umgebungen entscheidend sind [5]. Ein privates 5G-Campusnetzwerk besteht typischerweise aus einer Kombination drahtloser und drahtgebundener Komponenten, die speziell auf die Anforderungen eines bestimmten Unternehmens zugeschnitten sind.

Die Architektur umfasst drei grundlegende Elemente: (1) Ein 5G-Endgerät, (2) die Luftschmittstelle und (3) das 5G-Netzwerk bestehend aus Basisstationen (Antennen), die auf dem Gelände des Unternehmens installiert sind und eine drahtlose Verbindung zu 5G-Endgeräten herstellen. Die Antennen sind typischerweise über Glasfaserkabel mit einer zentralen Recheneinheit bestehend aus Basisbandeinheit (englisch: Base Band Unit, BBU), Server

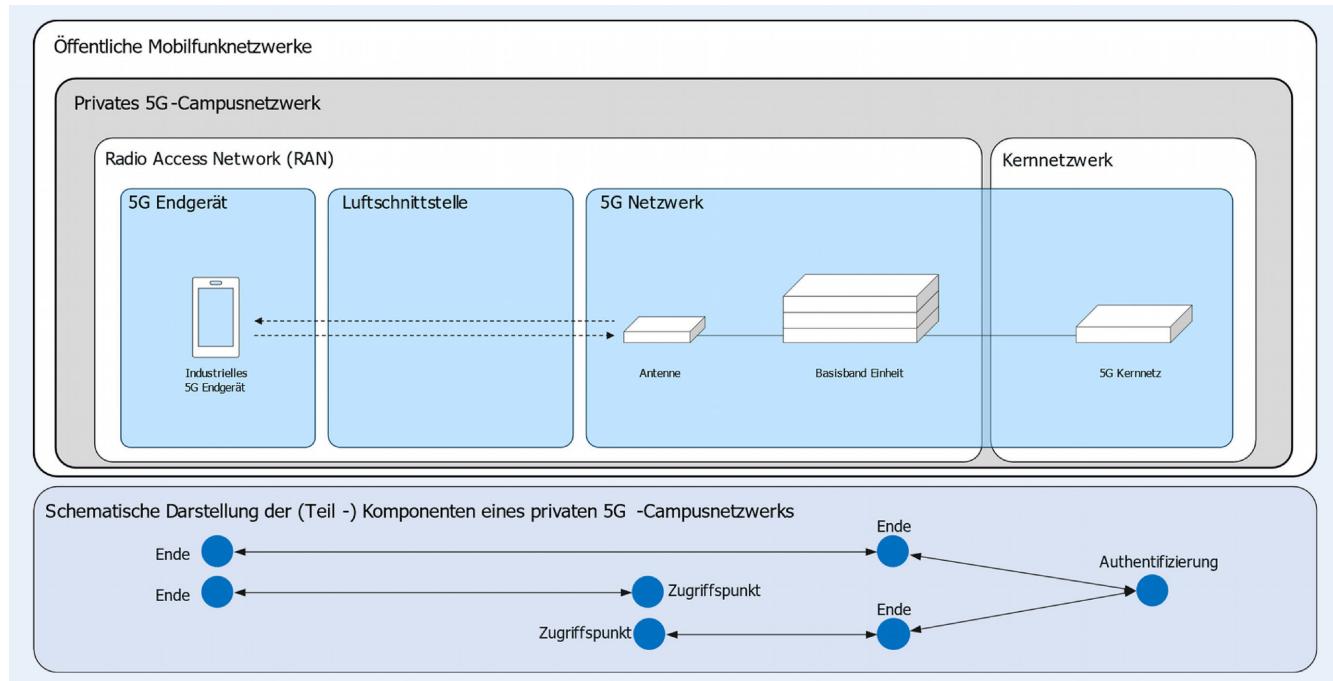


Bild 1. Vereinfachte Architektur eines privaten 5G-Campusnetzwerkes. Grafik: Eigene Darstellung

und Speicher verbunden, welche die 5G-Services bereitstellen und für die Authentifizierung der Geräte im Kernnetzwerk verantwortlich sind [7]. Bild 1 stellt eine vereinfachte Architektur eines privaten Campusnetzwerkes dar.

Darüber hinaus können private 5G-Campusnetzwerke auch lokale Edge-Computing-Ressourcen integrieren, um die Latenzzeiten weiter zu reduzieren und Echtzeitanwendungen effektiv zu unterstützen. Die Luftschnittstelle, die die Verbindung zwischen 5G-Endgeräten und dem 5G-Netzwerk herstellt, spielt dabei eine zentrale Rolle. Externe Faktoren wie Materialabschirmung, elektromagnetische Wellen und physikalische Effekte wie Wellenüberlagerung können das Signal erheblich beeinflussen [8].

Da private 5G-Campusnetzwerke sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, mangelt es in der Literatur über mobile Robotik derzeit an Messungen im industriellen Kontext sowie an konkreten Beispielen zur Nachrüstung von Robotern mit 5G-Technologie. Besonders der für mobile Roboter entscheidende Handover-Prozess wurde bislang in der Fachliteratur nicht in realen Anwendungsszenarien untersucht und veröffentlicht.

Im Zuge der fortschreitenden Integration von 5G in industrielle Anwendungen eröffnet sich die Möglichkeit, rechenintensive Steuerungsprozesse autonomer mobiler Roboterfлотtens auszulagern. Durch die hohe Bandbreite und niedrigen Latenzzeiten von privaten 5G-Netzen können komplexe Berechnungen und Analysen direkt an Edge-Computing-Ressourcen übertragen werden. Dies ermöglicht nicht nur eine schnellere Reaktionszeit, sondern auch eine optimierte Ressourcenverteilung, sodass mobile Roboter in Echtzeit Entscheidungen treffen können.

Die Verbindung von 5G-Technologie und Edge-Computing bietet Unternehmen die Chance, die Effizienz und Flexibilität ihrer Robotersysteme erheblich zu steigern, was insbesondere in dynamischen Produktionsumgebungen von großem Vorteil ist. Aus diesem Grund stellt diese Publikation im nächsten Kapitel eine erste konzeptionelle Ausarbeitung der Steuerungsauslagerung rechenintensiver Prozesse von AMR-Flotten vor.

3 Auslagerung rechenintensiver Prozesse von mobilen Robotern

Ein AMR verwendet eine Vielzahl von Sensoren und Planungsalgorithmen, um autonom in einer Umgebung zu navigieren und Aufgaben zu erfüllen. Die konventionelle Architektur sieht vor, dass alle datenverarbeitenden Dienste und Algorithmen auf dem AMR lokal (On-Board) ausgeführt werden. Dabei nutzt der AMR mehrere Sensortypen, um Informationen über seine Umgebung zu sammeln:

- 2D-Laserscanner: Diese Sensoren erfassen Laserscans, die zur Erstellung einer 2D-Karte der Umgebung genutzt werden. Dies hilft dem AMR, Hindernisse zu erkennen und sich sicher zu bewegen.
- Tiefenkameras: Diese liefern sowohl Tiefenbilder als auch RGB(Rot-Grün-Blau)-Bilder. Die Tiefenbilder helfen dabei, die Position von Objekten im Raum zu bestimmen, während die RGB-Bilder visuelle Informationen liefern.
- Lokalisierung: Die Daten der Sensoren werden verwendet, um die genaue Position des AMRs in seiner Umgebung zu bestimmen. Dieser Schritt ist essenziell, um sicherzustellen, dass der Roboter weiß, wo er sich befindet und wohin er sich bewegen muss.
- Globale Planung (ROS): Der globale Planer, der auf dem Robot Operating System (ROS) basiert, plant die optimale Route für den AMR auf Basis von Kartendaten und dem vorgegebenen Zielpunkt, der von einem Flottenmanagementsystem bereitgestellt wird. Dieses System teilt dem AMR mit, wohin er sich bewegen soll.
- Point-Cloud-Generierung: Die Tiefenkamera-Daten werden in eine Punktwolke umgewandelt, die eine detaillierte 3D-Präsentation der Umgebung ermöglicht. Diese Punktwolke wird dann gefiltert, um relevante Informationen für die Navigation zu extrahieren.

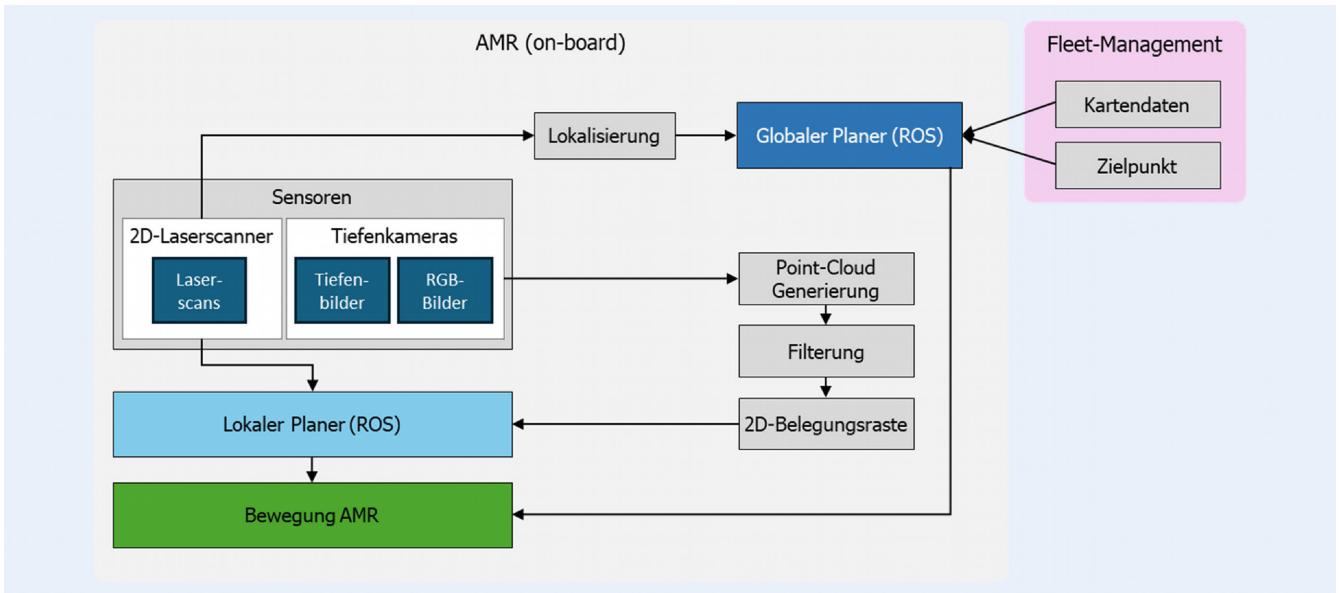


Bild 2. Konventionelle, lokale Datenverarbeitung eines AMR. *Grafik: Eigene Darstellung*

- 2D-Belegungsraum: Das gefilterte Ergebnis der Punktwolke wird in ein 2D-Belegungsraum umgewandelt. Dieses Raster gibt an, welche Bereiche der Umgebung frei oder von Hindernissen blockiert sind, was die lokale Bewegungsplanung erleichtert.
- Lokale Planung (ROS): Der lokale Planer, ebenfalls auf ROS basierend, verwendet die Informationen des Belegungsraums und der Sensordaten, um kurzfristige Entscheidungen über die Bewegung des AMRs zu treffen. Er sorgt dafür, dass der Roboter Kollisionen mit Hindernissen vermeidet, während er seine globale Route verfolgt.
- Bewegung des AMRs: Die Entscheidungen des lokalen Planers werden in Bewegungsbefehle für den AMR übersetzt, sodass der Roboter seine Aufgaben sicher und effizient ausführen kann.
- Fleet-Management: Das Flottenmanagementsystem bildet die Schnittstelle zum Auftragsmanagement und übergibt dem AMR die notwendigen Kartendaten und den Zielpunkt. Es überwacht und koordiniert die Bewegung mehrerer AMRs, um einen effizienten Einsatz sicherzustellen.

Bild 2 zeigt eine Übersicht der Hauptkomponenten und -prozesse eines AMRs und des konventionellen, lokalen On-Board-Datenverarbeitungsprozesses.

Zusammengefasst funktioniert ein konventioneller AMR, indem er Sensordaten nutzt, um seine Umgebung wahrzunehmen, und diese Informationen in Echtzeit verarbeitet, um sichere und effiziente Bewegungsentscheidungen zu treffen. Die Kombination von globaler und lokaler Planung erlaubt es dem Roboter, sowohl seine langfristige Route zu planen als auch auf kurzfristige Hindernisse zu reagieren. Jedoch ist die lokale Verarbeitung vor allem bei Tiefenkameras sehr rechenintensiv. Das bedeutet, dass nicht nur hohe Rechenleistung benötigt wird, sondern auch eine verkürzte Einsatzzeit der AMRs wegen des hohen Stromverbrauchs.

Aus diesem Grund zeigt die entwickelte Architektur des AMRs einen erweiterten Ansatz, bei dem bestimmte Prozesse auf einen Edge-Cloud-Server ausgelagert werden. Diese Auslagerung zielt darauf ab, die Rechenlast auf dem AMR selbst zu verringern und die Gesamtleistung durch die Nutzung von hochleistungsfähigen

Cloud-Ressourcen zu verbessern, während die Kommunikation über ein privates 5G-Netzwerk erfolgt. Folgende Komponenten sind bei der Auslagerung von Prozessen besonders wichtig:

- Komprimierung: Die vom AMR gesammelten Tiefen- und Bilddaten werden vor der Übertragung an den Edge-Cloud-Server komprimiert, um die Datenmenge zu verringern und die Effizienz der Datenübertragung über das 5G-Netzwerk zu maximieren.
- Privates 5G-Netzwerk: Das 5G-Netzwerk stellt eine hochleistungsfähige Verbindung zwischen dem AMR und dem Edge-Cloud-Server her. Es ermöglicht die nahezu latenzfreie Übertragung großer Datenmengen, was für die Auslagerung rechenintensiver Prozesse entscheidend ist.
- Edge-Cloud-Server (off-board): Auf dem Edge-Cloud-Server werden mehrere wichtige Prozesse durchgeführt, die sonst auf dem AMR stattfinden.
- De-Komprimierung: Die komprimierten Daten des AMRs werden entpackt und für die Weiterverarbeitung vorbereitet.

Bild 3 zeigt das entwickelte Konzept zur Auslagerung von rechenintensiven Prozessen von AMRs in eine Edge-Cloud.

Da das Fleet-Management (rosa, rechts in Bild 3) nur kleine, zeitunkritische Protokolle an die AMRs übermittelt, ist keine 5G-Verbindung zwingend notwendig. Die Verbindung kann über das private 5G-Netzwerk, WLAN und über kabelgebundene Verbindungen hergestellt oder direkt auf dem Edge-Cloud-Server gehostet werden.

Durch die Auslagerung rechenintensiver Aufgaben wie der globalen Planung und der Punktwolken-Generierung kann der AMR mit weniger leistungsfähiger Hardware betrieben werden, was die Kosten und den Energieverbrauch reduziert, wie auch in [9] beispielhaft gezeigt wird. Zudem ermöglicht die Verarbeitung auf einem Edge-Cloud-Server leistungsfähigere Ressourcen für komplexe Berechnungen zu nutzen, ohne die lokale Hardware des AMRs zu belasten. Die Nutzung eines privaten 5G-Netzwerks ermöglicht zudem eine schnelle und zuverlässige Kommunikation zwischen dem AMR und dem Cloud-Server, was in Echtzeit-Reaktionen und -Planungen resultiert.

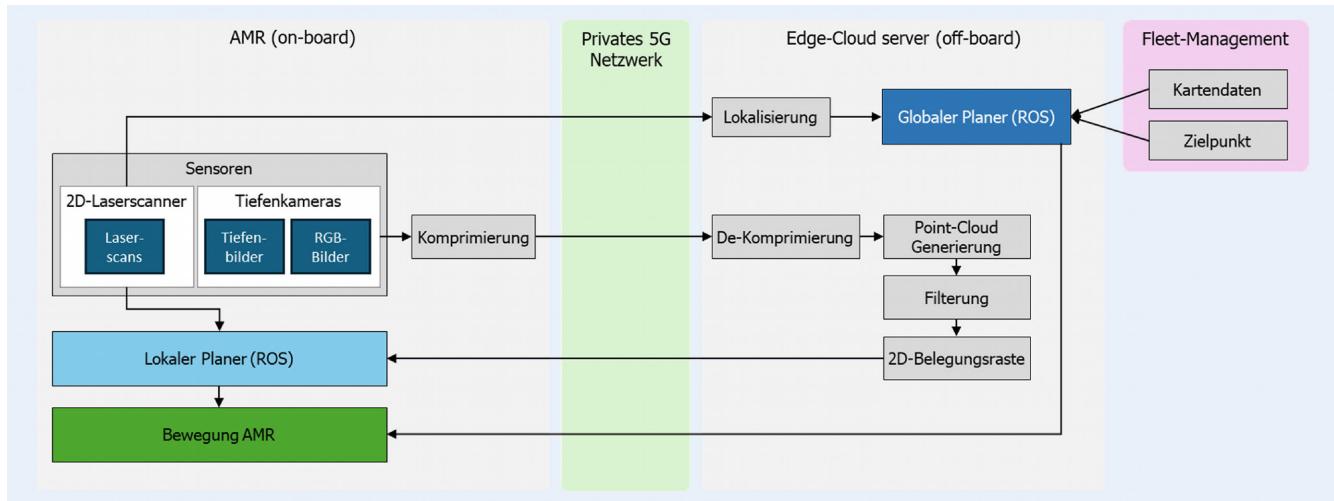


Bild 3. Konzept zur Auslagerung von rechenintensiven Prozessen von AMRs auf eine Edge-Cloud mittels privatem 5G.
Grafik: Eigene Darstellung in Anlehnung an [9]

Das Konzept bietet einen neuartigen Ansatz zur effizienten Nutzung von Cloud-Ressourcen in Kombination mit der Leistungsfähigkeit des 5G-Netzwerks. Sie entlastet den AMR von rechenintensiven Aufgaben und verbessert gleichzeitig die Gesamtleistung und Skalierbarkeit des Systems, was besonders in komplexen Umgebungen und bei großen Flotten von mobilen Robotern von Vorteil ist.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Kontext von Industrie 4.0 sind Unternehmen zunehmend gefordert, ihre intralogistischen Prozesse zu automatisieren, um Effizienz zu steigern und Kosten zu senken. Fahrerlose Transportsysteme (FTS), insbesondere autonome mobile Roboter (AMRs), spielen dabei eine zentrale Rolle. AMRs nutzen fortschrittliche Sensoren, um sich autonom und flexibel in dynamischen Umgebungen zu bewegen.

Die Einführung privater 5G-Campusnetzwerke bietet hier neue Möglichkeiten für AMR-Flotten, da sie maßgeschneiderte und sichere Kommunikationsinfrastrukturen bereitstellen. Besonders die Integration von Edge-Computing-Ressourcen ermöglicht die Auslagerung rechenintensiver Steuerungsprozesse von AMR-Flotten. Durch diese Auslagerung können komplexe Berechnungen und Analysen effizienter durchgeführt und Rechenressourcen geteilt genutzt werden. Experimentelle (Vor-)Messungen (initiale Machbarkeitsstudie) im Werk 150 der Hochschule Reutlingen sind vielversprechend und zeigen, dass die Batterielaufzeit zwischen den Ladezyklen von AMRs um 5–25 % verlängert werden kann (je nach Anzahl und CPU-Last der ausgelagerten Prozesse). Die genaue Verlängerung eines Batterieladezyklus hängt hierbei maßgeblich von den ausgelagerten Prozessen und deren CPU-Auslastungsrate ab.

Die Auslagerung rechenintensiver Prozesse und die dezentrale Steuerung von Maschinen und Applikationen wird in den kommenden Jahren ein entscheidendes Thema in der Automatisierungstechnik sein. Um das volle Potenzial dieser Technologien auszuschöpfen, sind mehrere Herausforderungen zu bewältigen. Zunächst müssen die Robustheit und Zuverlässigkeit der Netz-

werkverbindungen sichergestellt werden, um eine unterbrechungsfreie Kommunikation zwischen den AMRs und den Edge-Computing-Ressourcen zu garantieren.

Ein weiteres wichtiges Thema ist die Entwicklung von Algorithmen für die verteilte Verarbeitung, die sicherstellen, dass edge-cloud-seitige Berechnungen in Echtzeit ausgeführt werden können, ohne dass es zu größeren Latzenzen kommt. Hierbei sind auch Fragen der Datenintegrität und -sicherheit entscheidend.

Zudem ist eine detaillierte Analyse sowie Messungen im Real-labor zur optimalen Architektur für die Steuerungsauslagerung erforderlich. Unternehmen müssen herausfinden, welche Prozesse am besten ausgelagert werden können, um maximale Effizienz und Flexibilität bei gleichzeitiger Robustheit der Anwendung zu erreichen. Dies erfordert umfangreiche Tests und Langzeitmessungen, um die Eignung der Technologien im realen Betrieb zu bewerten. Schließlich wird die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Technologieanbietern und Forschungseinrichtungen essenziell sein, um die Entwicklung und Implementierung effektiver Lösungen zu unterstützen. Innovative Ansätze in der Steuerungsauslagerung von AMRs werden nicht nur die betriebliche Effizienz steigern, sondern auch dazu beitragen, neue Geschäftsmodelle zu etablieren, die auf den Möglichkeiten von privatem 5G und Edge-Computing für die Robotik basieren.

L iteratur

- [1] VDMA: Produktionsvolumen der Fördertechnik- und Intralogistikbranche in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2021. Stand: März 2024. Internet: de.statista.com/statistik/daten/studie/420777/umfrage/umsatz-in-der-intralogistikbranche-in-deutschland/. Zugriff am 22.01.2025
- [2] Statista: Wie bewerten Sie die Relevanz von autonomen Transportsystemen in der Logistikbranche in Deutschland? Stand: Oktober 2018. Internet: de.statista.com/prognosen/943349/expertenbefragung-zu-autonomem-transportsystemen-in-der-logistikbranche. Zugriff am 22.01.2025
- [3] Mordor Intelligence: Autonomous Mobile Robots Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2025 – 2030). Stand: 2025. Internet: www.mordorintelligence.com/industry-reports/autonomous-mobile-robot-market. Zugriff am 22.01.2025

- [4] ITU-R: IMT-2020. Stand: 2025. Internet: www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx. Zugriff am 22.01.2025
- [5] Ajaz, A.: Private 5G: The Future of Industrial Wireless. IEEE Industrial Electronics Magazine 14 (2020) 4, pp. 136–145
- [6] 3GPP: Releases. Stand: 2024. Internet: www.3gpp.org/specifications-technologies/releases. Zugriff am 22.01.2025
- [7] Rostami, A.: Private 5G Networks for Vertical Industries: Deployment and Operation Models. 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), Dresden, 2019, pp. 433–439
- [8] Zecchi, S.; Cristoforo, G.; Bartoli, M. et al.: A Comprehensive Review of Electromagnetic Interference Shielding Composite Materials. Micro-machines 15 (2024) 2, #187, doi.org/10.3390/mi15020187
- [9] Eisen, M.; Sudhakaran, S.; Mageshkumar, V. et al.: Joint Resource Scheduling for AMR Navigation Over Wireless Edge Networks. IEEE Open Journal of Vehicular Technology 4 (2023), pp. 36–47, doi.org/10.1109/OJVT.2022.3218460



Thorge Lackner M.Sc. & M.Eng.

Foto: ESB Business School
thorge.lackner@reutlingen-university.de

Dr. Julian Hermann
PhD Stellenbosch Univ.

Prof. Dr. techn. Daniel Palm

ESB Business School
Hochschule Reutlingen
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.rzi40.de



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)