



Einführung Autonomer Mobiler Roboter in Brownfield-Umgebungen

Von Begriffen und Potenzialen zu Planungsmodellen und Standards



Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Michael Henke
Lehrstuhl für Unternehmenslogistik (LFO)
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund
www.lfo.tu-dortmund.de
sekretariat.lfo.mb.@tu-dortmund.de
+49 (231) 755 5771

Autoren

Thanushan Thayaparan¹, Natalia Straub¹, Tobias Schrage¹, Charlotte Haack¹, Katharina Glock²,
Justus Knierem²

¹Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Unternehmenslogistik, Leonhard-Euler-Str. 5,
44227 Dortmund,
{Thanushan.Thayaparan, Natalia. Straub, Tobias3.Schrage, Charlotte.Haack}@tu-dortmund.de,
Website: <https://lfo.mb.tu-dortmund.de/>

²FZI Forschungszentrum Informatik, Haid- und Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe, {glock,
knierim}@fzi.de, Webseite: www.fzi.de

Koordination

Korrespondenzautor: Tobias Schrage

Redaktion: Thanushan Thayaparan

Satz und Layout: Dagmar Lepke

Bildnachweis

Titel: Digitaler Hintergrund Vektoren auf Vecteezy.com, Cardboard Boxes on Pallet Mockup auf
mockupworld.co, bearbeitet von Dagmar Lepke S. 5,6,7,14

©LFO 09/2025

<https://lfo.mb.tu-dortmund.de/forschung/forschungsprojekte/flextools/>

DOI: <http://dx.doi.org/10.17877/DE290R->

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



Projektbeschreibung FlexTools.....	3
Das Konsortium	4
Management Summary	5
1. Einsatzpotenziale von Autonomen Mobilen Robotern	6
2. Autonome Mobile Roboter – Begriffsverständnis und Eigenschaften	7
3. Implementierung von Autonomen Mobilen Robotern in Brownfield	11
4. Anforderungen und Standardisierungsansätze für die Automobil- und Zulieferindustrie	13
5. Planungsansätze für eine AMR-Implementierung.....	15
6. Fazit und Ausblick	18
7. Literaturverzeichnis	19

Projektbeschreibung FlexTools

Der Einsatz von Automatisierungslösungen ist angesichts des hohen Wettbewerbsdrucks und des Fachkräftemangels für große Teile der deutschen Automobilindustrie und ihrer Zulieferer essenziell, um die Wettbewerbsfähigkeit aufrechtzuerhalten. Die Einführung von Automatisierungslösungen wie Autonome Mobile Roboter (AMR) stellt jedoch gerade kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) der Zuliefererindustrie vor erhebliche Herausforderungen. Insbesondere die Integration in bestehende, historisch gewachsene Produktionssysteme (Brownfield-Umgebungen) bringt enorme Schwierigkeiten mit sich. Zu diesen zählen unter anderem Restriktionen der physischen und digitalen Infrastruktur, fehlende Expertise und Akzeptanz, hohe Investitionskosten und Simulationsaufwände sowie langwierige Projektlaufzeiten [1].

Das Projekt „FlexTools – die modulare Toolbox für flexible Robotik kleinerer und mittlerer Automotive-Zulieferer“ begegnet diesen Herausforderungen mit einem umfassenden modularen Bausteinkasten, der die kosteneffiziente Einführung mobiler Robotik in Brownfield-Umgebungen erleichtert. Dieser umfasst flexible Robotik-Plattformen, austauschbare Planungs- und Steuerungsverfahren und digitale Zwillinge zur virtuellen Inbetriebnahme. Im Fokus stehen zudem neben den technischen Komponenten auch der ganzheitliche Transformationsprozess der Organisation mit ihren Mitarbeitenden. Dieser wird durch Bausteine für die Projektierung, Hilfestellungen und Vorgehensmodelle für ein erfolgreiches Change-Management sowie für die Qualifizierung von Beschäftigten unterstützt [1].

Die Module des FlexTools-Bausteinkastens werden entlang der Anforderungen zweier repräsentativer Anwendungsfälle aus der Automobil- und Zulieferindustrie entwickelt. Die Entwicklung dieser Komponenten erfolgt dabei in drei Schlüsselbereichen: Robotertechnologie, IT-Systeme & Algorithmen sowie Management & Umsetzung. Die Wiederverwendbarkeit wird durch die Nutzung bestehender Standards und Schnittstellen ermöglicht. Im engen Dialog mit den Anwendungspartnern werden diese Lösungskonzepte entwickelt, um KMU in die Lage zu versetzen, ihre Prozesse und Systeme eigenständig weiterzuentwickeln [1].



Projektlaufzeit: 01.09.2023 – 31.08.2026

Förderkennzeichen: 13IK032

FlexTools Projektwebsite:

<https://lfo.mb.tu-dortmund.de/forschung/forschungsprojekte/flextools/>

Das Konsortium



Lehrstuhl für Unternehmenslogistik (LFO), Technische Universität Dortmund
Leonhard-Euler-Straße 5,
44227 Dortmund
<https://lfo.mb.tu-dortmund.de/>



FZI Forschungszentrum Informatik
Haid-und-Neu-Straße 10-14,
76131 Karlsruhe
<https://www.fzi.de/>



Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI),
Karlsruher Institut für Technologie
Zirkel 2,
76133 Karlsruhe
<https://www.imi.kit.edu/24.php>



Tünkers Maschinenbau GmbH
Am Rosenkothen 4-12,
40880 Ratingen
<https://www.tuenkers.de/>



TE Connectivity Germany GmbH
Amperestrasse 12-14,
64625 Bensheim
<https://www.te.com/de/home.html>



HEO COATING
Max-Planck-Straße 8,
8739 Wickede (Ruhr)
<https://www.heo-coating.com/>



SimPlan AG
Sophie-Scholl-Platz 6,
63452 Hanau
<https://www.simplan.de/>



Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4,
44227 Dortmund
<https://www.impl.fraunhofer.de/>



ProLog Automation GmbH & Co. KG
Planckstraße 17,
1691 Freiberg am Neckar
<https://prolog-automation.de/>

Autonome Mobile Roboter (AMR) bieten großes Potenzial zur Automatisierung innerbetrieblicher Transportprozesse, insbesondere für Unternehmen mit gewachsenen Infrastrukturen und steigendem Fachkräftemangel. Voraussetzung für eine erfolgreiche Einführung in diesen Brownfield-Umgebungen ist jedoch ein klares Verständnis der technologischen Grundlagen. Die Abgrenzung zentraler Begrifflichkeiten, etwa zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) auf engl. Automated Guided Vehicles (AGV) und AMR, ist bislang weder in der Praxis noch in der Wissenschaft eindeutig beschrieben. Dieses Whitepaper macht diese Unklarheiten sichtbar und leistet einen Beitrag zur begrifflichen Klärung.

Darüber hinaus werden eine Übersicht über aktuelle Planungsansätze aus Forschung und Praxis gegeben und soziotechnische Herausforderungen in Brownfield-Umgebungen herausgearbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für das Projekt FlexTools, das praxisorientierte Bausteine entwickelt, um Unternehmen gezielt bei der strukturierten Einführung und Integration von AMR zu unterstützen.

Einsatzpotenziale von AMR

AMR ermöglichen es Unternehmen, dem Fachkräftemangel, der zunehmenden Produktkomplexität und dem steigenden Wettbewerbsdruck wirksam zu begegnen. Sie erhöhen die Flexibilität, reduzieren Risiken durch Übernahme monotoner oder gefährlicher Aufgaben und ermöglichen einen 24/7-Betrieb. Trotz ihres Potenzials finden sie bislang vor allem in Großunternehmen Anwendung, während KMU häufig an Hürden wie unzureichender digitaler Reife und bestehenden Infrastrukturen scheitern.

Begriffsverständnis und Eigenschaften von AMR

AMR unterscheiden sich von herkömmlichen AGV durch ihre dezentrale Steuerung, autonome Navigation und hohe Integrationsfähigkeit. Während in der Theorie verschiedene Modelle zur Klassifikation von Autonomiestufen existieren, fehlt es in der Praxis häufig an klaren Abgrenzungen und einem einheitlichen Begriffsverständnis. Dieses Kapitel schafft Transparenz und stellt zentrale Unterschiede strukturiert dar, um die Auswahl und Integration von AMR in Unternehmen gezielt zu unterstützen.

Implementierung in Brownfield-Umgebungen

Die Einführung von AMR in Brownfield-Umgebungen ist besonders anspruchsvoll. Herausforderungen bestehen in den Bereichen Infrastruktur, IT, Organisation und Technologieakzeptanz. Erfolgreiche Projekte benötigen eine durchdachte Planung, frühzeitige Mitarbeitereinbindung sowie eine Berücksichtigung von soziotechnischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen

Branchenspezifische Standards und Richtlinien

Die Automobil- und Zulieferindustrie stellt hohe Anforderungen an AMR-Systeme. Standards wie die VDA 5050, Layout Interchange Format (LIF) und weitere VDI-Richtlinien definieren Kommunikationsprotokolle und Schnittstellen zur Sicherstellung von Interoperabilität und Sicherheit. Eine einheitliche Umsetzung bleibt jedoch herausfordernd, insbesondere im Zusammenspiel unterschiedlicher Hersteller und Systemlandschaften.

Planungsansätze für AMR-Implementierungen

Der Planungsprozess für AMR basiert häufig auf bestehenden AGV-Planungsansätzen, insbesondere der VDI 2710. Diese liefert eine strukturierte Grundlage, fokussiert aber vorrangig technische Aspekte. Für AMR und speziell Brownfield-Umgebungen sind erweiterte Planungsansätze notwendig, die soziotechnische Rahmenbedingungen und Nachhaltigkeitsaspekte systematisch berücksichtigen.

Handlungsempfehlung – AMR in Brownfield

Die Einführung von AMR in bestehende Strukturen ist komplex und wird bislang kaum systematisch adressiert. Dieses Whitepaper zeigt, dass vorhandene Standards und Planungsansätze wichtige Grundlagen bieten, jedoch zentrale Herausforderungen wie IT-Integration, Technologieakzeptanz oder Qualifizierung unzureichend berücksichtigen. FlexTools setzt genau hier an und entwickelt praxisorientierte Bausteine, die Unternehmen gezielt bei der Planung und Einführung von AMR in Brownfield-Umgebungen.

1. Einsatzpotenziale von Autonomen Mobilen Robotern

Produzierende Unternehmen und Logistikdienstleister sehen sich einem steigenden globalen Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Gleichzeitig nimmt die Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen kontinuierlich zu [2, 3]. Eine weitere zentrale Herausforderung ist der anhaltende Fachkräftemangel, insbesondere in der Lagerlogistik. Im vierten Quartal 2024 berichteten rund 45 Prozent der Unternehmen von Einschränkungen aufgrund fehlenden Personals. Im Jahr 2009 waren es noch weniger als 10 Prozent (vgl. Abbildung 1) [4].

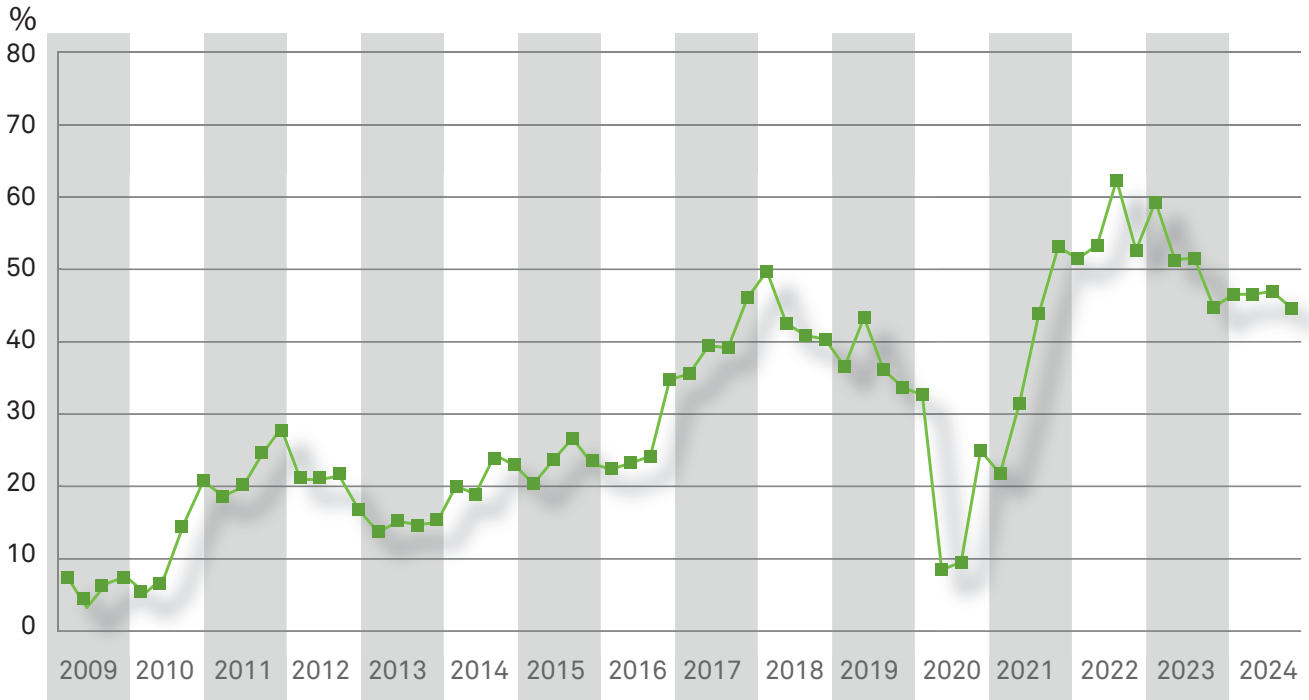


Abbildung 1: Entwicklung des Fachkräftemangels in der Lagerlogistik von 2009 bis 2024 [4]

Um auf diese Entwicklungen zu reagieren, setzen Unternehmen zunehmend auf AMR. Sie helfen nicht nur dabei, Personalengpässe zu überbrücken, sondern bieten auch neue Möglichkeiten zur Flexibilisierung und Dezentralisierung von Produktions- und Logistikprozessen [2]. AMR übernehmen in der Produktion und Lagerhaltung vor allem innerbetriebliche Transportaufgaben, etwa beim Warentransport, der Lagerorganisation oder bei Pick-and-Place-Prozessen [5], wie in Abbildung 2 dargestellt. Mit dem technischen Fortschritt erschließen sich fortlaufend neue Anwendungsbereiche. Dazu zählen Reinigungsaufgaben, Medikamententransporte in Krankenhäusern, die Gepäckbeförderung in Hotels sowie Sicherheits- und Überwachungsfunktionen. Auch im Einzelhandel und im Gastgewerbe übernehmen AMR Aufgaben wie Lieferungen oder die Bestandsüberwachung.

Darüber hinaus werden AMR zunehmend in spezialisierten Anwendungsfeldern eingesetzt. Dazu zählen automatisierte Ein- und Auslagerungsprozesse, Desinfektionsarbeiten in sensiblen Bereichen sowie Transportaufgaben an Flughäfen oder Containerterminals. Ihre Fähigkeit, sich flexibel an unterschiedliche Einsatzbedingungen anzupassen, macht sie zu einem zentralen Element der Automatisierung moderner Arbeitsumgebungen [2]. Besonders für KMU bieten AMR ein hohes Potenzial, beispielsweise zur Effizienzsteigerung oder zur Überbrückung personeller Engpässe. In der betrieblichen Praxis zeigt sich jedoch, dass die Technologie bislang vorwiegend in Großunternehmen mit mehr als 5.000 Beschäftigten zum Einsatz kommt. Über 65 Prozent der KMU nutzen weiterhin manuelle oder mechanisch unterstützte Transportsysteme [7].

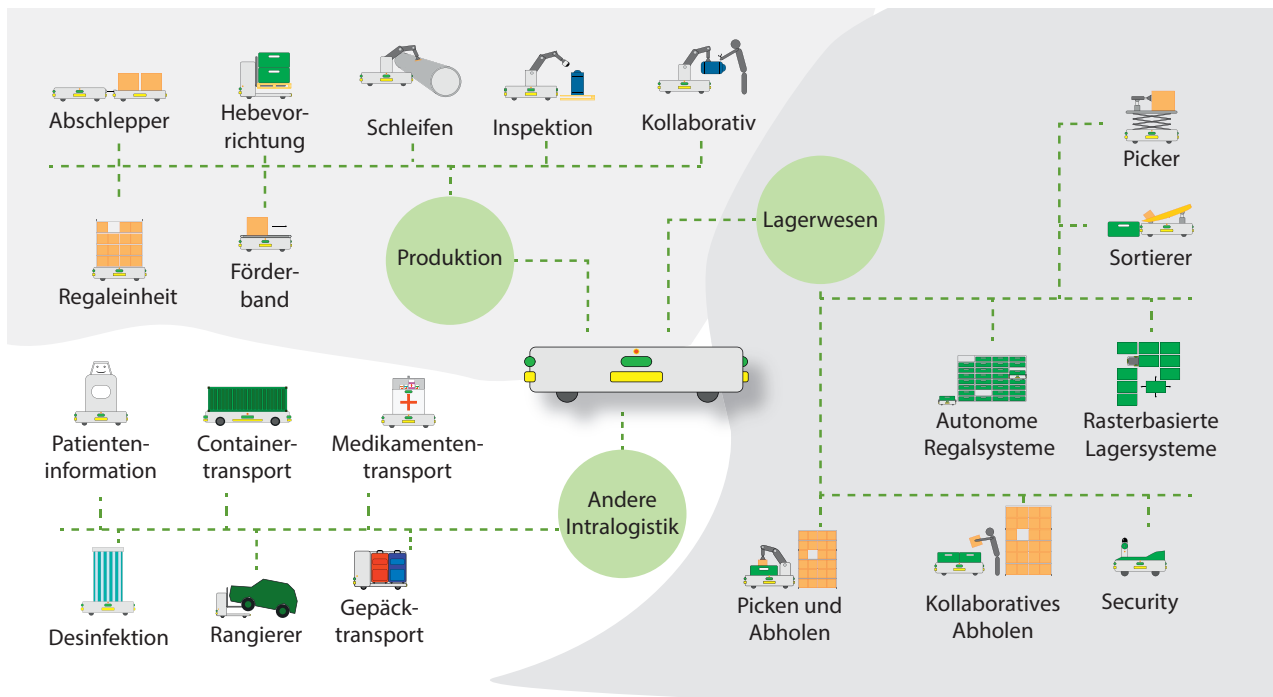


Abbildung 2: Beispiele für AMR-Aufgaben und -Typen, eigene Darstellung nach Fragapane et al. [2]

Ein Großteil der AMR-Implementierungen erfolgt in sogenannten Brownfield-Umgebungen, also in bestehende Betriebsstrukturen mit historisch gewachsenen IT-Systemen und starrer Infrastruktur. Die Integration in solche Umgebungen erfordert individuelle Anpassungen und ist häufig mit erheblichem Planungs- und Umsetzungsaufwand verbunden. Dennoch bieten AMR einen klaren Mehrwert: Sie übernehmen repetitive oder körperlich belastende Tätigkeiten, erhöhen die Arbeitssicherheit und ermöglichen einen ununterbrochenen Betrieb rund um die Uhr. Dies hat in den vergangenen Jahren maßgeblich zur steigenden Nachfrage nach AMR-Lösungen beigetragen [8–10].

2. Autonome Mobile Roboter – Begriffsverständnis und Eigenschaften

In der industriellen Praxis existiert bislang keine einheitliche Definition für AMR. Während der Begriff „AMR“ vor allem in der Robotik-Community etabliert ist, dominiert in der Produktion und Logistik häufig noch der Begriff „Fahrerloses Transportsystem (FTS)“, wobei unter den Begriffen nur teilweise die gleichen Systeme verstanden werden. Ein FTS besteht typischerweise aus mehreren Fahrzeugen, einer Leitsteuerung sowie weiterer Infrastruktur für die Positionierung und Kommunikation. Die einzelnen Fahrzeuge innerhalb eines FTS werden als FTF bezeichnet und in der internationalen Literatur meist unter dem Begriff AGV geführt.

Dieses Whitepaper trägt zur begrifflichen Klärung bei, indem AMR systematisch von AGV abgegrenzt werden. Es werden zentrale Unterschiede in technischen Eigenschaften, Funktionsweisen und Autonomiestufen aufgezeigt. Diese Differenzierung ist wesentlich, um passende Technologien für spezifische betriebliche Anforderungen auszuwählen und zu implementieren.

„Die Begriffe werden oft durcheinandergeworfen. Wer aber AMR plant wie ein AGV, wird scheitern, die Systeme unterscheiden sich technisch, funktional und in der Art, wie sie gesteuert werden.“

*Volker Single
CEO ProLog Automation GmbH*

In vielen Unternehmen sind noch Begrifflichkeiten im Umlauf, die teilweise auf überholten Standards basieren. Standards wie die VDI-Richtlinie 2510, VDI 4415 und VDI 2710, ursprünglich auf FTS zugeschnitten, spiegeln die aktuellen Entwicklungen im Kontext von AMR nicht vollständig wider. Deshalb werden neben diesen etablierten Grundlagen auch aktuelle wissenschaftliche und praxisnahe Ansätze berücksichtigt, um die vorhandene definitorische Lücke zwischen Theorie und Praxis zu schließen.

Autonome Mobile Roboter vs. Fahrerlose Transportfahrzeuge

AGV sind Bestandteil von FTS und übernehmen automatisierte innerbetriebliche Transportaufgaben. Ein AGV-System besteht in der Regel aus mehreren Fahrzeugen, einer zentralen Leitsteuerung und Komponenten zur Lage- und Positionsbestimmung. Ergänzend kommen Infrastrukturelemente wie Markierungen auf dem Boden oder an Wänden sowie Datenübertragungssysteme zum Einsatz [11]. Die Fahrzeuge bewegen sich entlang vordefinierter Fahrwege, die meist durch Magnetstreifen, Induktionsdrähte oder optische Markierungen definiert sind. Die zentrale Leitsteuerung plant die Routen, erteilt Aufträge und überwacht die Ausführung. AGV übernehmen in der Praxis vor allem standardisierte Transporte und benötigen bei komplexeren Abläufen oder beim Be- und Entladen oft manuelle Unterstützung [12].

Im Gegensatz dazu unterscheiden sich AMR grundlegend. Sie navigieren mithilfe integrierter Sensoren und intelligenter Software, treffen Entscheidungen dezentral und agieren unabhängig von externer Steuerung. AMR erkennen ihre Umgebung in Echtzeit, reagieren auf Hindernisse und berechnen selbstständig alternative Fahrwege. Dadurch sind sie besonders für dynamische und komplexe Einsatzumgebungen geeignet, etwa wenn sich Layouts kurzfristig ändern oder Transportvolumina stark schwanken [2, 11].

Über drahtlose Schnittstellen kommunizieren AMR mit Maschinen, IT-Systemen und Mitarbeitenden. Sie lassen sich modular erweitern und in bestehende Infrastrukturen integrieren. Die dezentrale Steuerung reduziert den Bedarf an fester Infrastruktur und vereinfacht die Einbindung in heterogene Systemlandschaften [5, 8, 13].

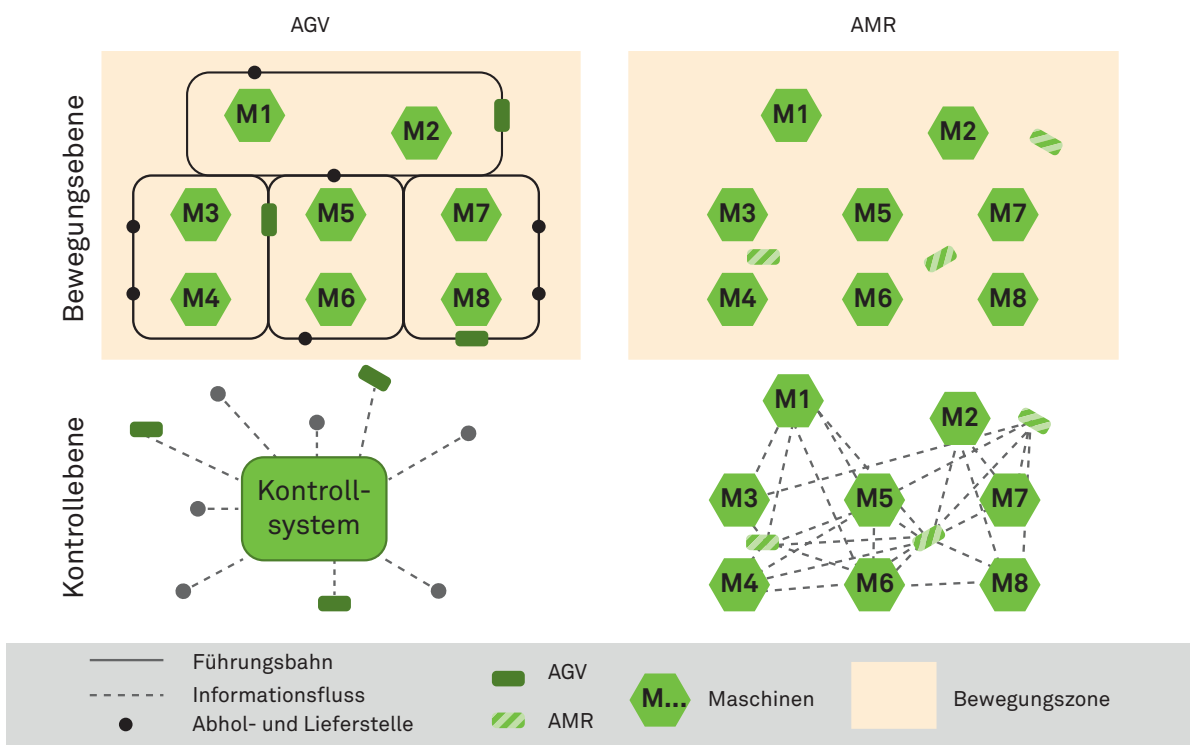


Abbildung 3: Zentralisierte AGV-Steuerung (links) vs. dezentrale AMR-Steuerung (rechts), eigene Darstellung nach Fragapane et al. [2]

Zur weiteren Fundierung der begrifflichen Abgrenzung wurden in diesem Whitepaper ausgewählte wissenschaftliche Definitionen analysiert, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Diese zeigen deutlich, dass AMR als Systeme beschrieben werden, die autonom agieren, kollaborative Funktionen übernehmen und sich in digitalen Umgebungen integrieren lassen. Im Gegensatz dazu sind AGV stärker auf externe Steuerung angewiesen und in ihrer Reaktion auf Veränderungen eingeschränkt.

Quelle	Definition
Fragapane et al. (2021), eigene Übersetzung	„Autonome Mobile Roboter sind industrielle Roboter, die eine dezentrale Entscheidungslogik für eine kollisionsfreie Navigation nutzen, um eine Plattform für Materialhandling, kollaborative Tätigkeiten und umfassende Dienste innerhalb eines abgegrenzten Bereichs bereitzustellen.“ [2]
Gries et al. (2023)	„Im Gegensatz zu klassischen fahrerlosen Transportsystemen (FTS) sind Autonome Mobile Roboter (AMR) nicht von vorgegebenen Spurführungen abhängig [...] da sie ihre Umgebung in Echtzeit erfassen und sich unabhängig und sicher in dieser bewegen können. “ [17]
Hercik et al. (2022), eigene Übersetzung	„Die wichtigste Eigenschaft Autonomer Roboter ist die Unabhängigkeit und die Fähigkeit, sich selbstständig im Raum zu orientieren , ohne die Notwendigkeit vordefinierter Richtlinien [...] Sie können in den Bereichen Lagerung, Transport und Produktion eingesetzt werden.“ [20]
Kopp et al. (2023), eigene Übersetzung	„In diesem Sinne sollten AGVs von mobilen Robotern unterschieden werden, da sie per Definition nicht in der Lage sind, sich ohne Kontrolle zu bewegen. Andere Quellen betonen, dass AGVs eine Unterkategorie Autonomer Mobiler Roboter darstellen, die hauptsächlich in industriellen Kontexten eingesetzt werden und speziell für den innerbetrieblichen Transport konzipiert sind.“ [21]
Tola et al. (2024), eigene Übersetzung	„Autonome Mobile Roboter können bestimmte Aufgaben übernehmen und sich in ihrer Umgebung bewegen sowie alle intelligenten Aktivitäten selbstständig ausführen. “ [22]
Zhao und Chidambareswaran (2023), eigene Übersetzung	„Mit der weitverbreiteten Einführung neuer Technologien in Sensorik- und Robotiksteuerungstechnologien, wie z. B. fahrerlosen Fahrzeugen, die Autonome Mobile Roboter (AMR) genannt werden und mit Kamerasicht, Lichtdetektion und Entfernungsmessung (LiDAR)-Sensoren, Robotiksteuerungen und omnidirektionalen Antriebsmechanismen ausgestattet sind, wird erwartet, dass sie sich zur nächsten Generation der AGV-Technologie für Materialhandhabungsanwendungen entwickeln. “ [13]

Tabelle 1: Übersicht der AMR-Definitionen

Mechanisch betrachtet weisen AMR und AGV nur geringfügige Unterschiede auf. Beide basieren auf mobilen Plattformen mit modularer Ausstattung, etwa durch Förderbänder, Roboterarme oder Hebesysteme. Die wesentliche Unterscheidung liegt in der Funktionsweise und im Autonomiegrad [14–16]. So werden unter AGV zentral gesteuerte, weitgehend an Fahrwege gebundene, Systeme verstanden, wobei AMR in der Regel als (vollständig) dezentral koordinierte Fahrzeuge interpretiert werden (vgl. auch Abbildung 3). In der Tabelle 2 werden die Unterschiede anhand der Kategorien: Navigation, Bewegung, Steuerung und Datenaustausch zusammengefasst.

Kategorien	Autonomer Mobiler Roboter	Automated Guided Vehicle
Navigation	Höhere Navigationsfähigkeit und schnellere Anpassung an neue Produktionsbedingungen [2, 17]	Fahrzeuge werden entlang festgelegter Spuren geführt [18]
	Autonom (z. B. SLAM, LIDAR, Kameras, Sensorfusion)	Führungsbasiert (z. B. Induktionsschleifen, QR-Codes, Magnetspuren)
Bewegung	Autonome Fortbewegung in dynamischem Umfeld [11]	Bewegung in einem vorgegebenen und eingegrenzten Bereich [17]
	Eigenständiges Umfahren von Hindernissen [5, 19]	Stillstand bis zur Beseitigung des Hindernisses oder bis zur manuellen Freigabe
Steuerung	Künstliche Intelligenz, Echtzeit-Umgebungskartierung	Regelbasiert, meist ohne Umgebungsinterpretation
	Dezentrale Steuerung, Fahrzeuge entscheiden selbstständig [2]	Zentrales System zur Steuerung der einzelnen Fahrzeuge [2]
Datenaustausch	Austausch von Daten untereinander über Funk und Cloud [17]	Datenübertragung über ein zentrales System [2]

Tabelle 1: Vergleich von AMR und AGV

Ein zentraler Unterschied zwischen AMR und AGV liegt im Autonomiegrad, also in der Fähigkeit eines Systems, Entscheidungen ohne menschlichen Eingriff zu treffen und eigenständig umzusetzen. In der Forschung existieren zahlreiche wissenschaftliche Ansätze zur Klassifikation dieses Autonomiegrads. In der Tabelle 3 werden die Ansätze von Hoppe et al. (2019) und Clauer & Fottner (2019) beispielhaft gegenübergestellt [23,24].

Clauer und Fottner definieren ein siebenstufiges Stufenmodell, das bei manuellen Transportprozessen (Stufe 0) beginnt und über assistenzgestützte (Stufe 1) sowie teilautomatisierte Systeme (Stufe 2) bis zu standardisierten automatisierten Abläufen (Stufe 3) reicht. Ab Stufe 4 spricht man von Teilautonomie, bei der Fahrzeuge innerhalb eines definierten Rahmens selbstständig Entscheidungen treffen. In Stufe 5 erreichen die Systeme vollständige Autonomie mit eigenständiger Planung und Durchführung von Aufgaben. Die höchste Stufe (Stufe 6) beschreibt eine vollständige Vernetzung in einem digitalen Ökosystem mit kontinuierlichem Datenaustausch zur Optimierung betrieblicher Abläufe. [23]

Hoppe et al. hingegen schlagen ein vierstufiges Modell vor. In der ersten Stufe bewegen sich Fahrzeuge entlang fester Routen ohne Entscheidungsfreiheit. In Stufe 2 sind sie in der Lage, innerhalb abgegrenzter Bereiche zu navigieren und Sensordaten zu verarbeiten, wobei menschliche Eingriffe über eine Vetofunktion möglich bleiben. Stufe 3 erlaubt selbstständige Navigation in unbekanntem, aber stabilen Umgebungen. Die höchste Stufe beschreibt vollständig autonome Systeme, die sich auch in dynamischen Kontexten zurechtfinden und mit anderen Systemen kommunizieren können. [24]

	Autonomiestufen		Mensch-Roboter Interaktion
Clauer und Fottner (2019)	Basisautonomie	1	Aktionen & Routen von Menschen vordefiniert
	Teilautonomie	2	Bestätigung oder Stornierung von Aufträgen durch Menschen
	Beschränkte Vollautonomie	3	Durchgehender Informationsaustausch mit den Menschen
	Vollautonomie	4	Mensch nicht mehr notwendig & Informationsaustausch nur auf Entscheidung vom AMR oder Anfrage vom Menschen
Hoppe et al. (2019)	Keine Automatisierung	0	Manuell bediente Flurförderzeuge
	Assistenzsystem	1	Mensch wird durch einzelne Systeme unterstützt
	Teil-Automatisierung	2	Mensch wird durch kombinierte Systeme unterstützt
	Automatisierung	3	Aufgabe wird von Menschen vordefiniert und freigegeben
	Teil-Autonom	4	Remote-Überwachung durch Menschen
	Autonom	5	Unterstützung durch Menschen nicht erforderlich
	IoT	6	Unterstützung durch Menschen nicht erforderlich

Tabelle 3: Einordnung von Autonomiestufen und Mensch-Roboter-Interaktionen in AMR-Kontexten i.A.a. [23, 24]

Aus der Gegenüberstellung dieser Modelle wird deutlich, dass der Begriff der Autonomie differenziert betrachtet werden muss. Die vollständige Autonomie, wie sie für AMR charakteristisch ist, beginnt bei Clauer und Fottner [23] ab Stufe 5 und bei Hoppe et al. [24] in Stufe 4. Erst in diesen Stufen verfügen die Systeme über die Fähigkeit, Transportaufträge eigenständig zu planen, auszuführen und flexibel auf Veränderungen im Umfeld zu reagieren. Für die Praxis bedeutet das: Nicht jedes fahrerlose Fahrzeug mit Automatisierungsfunktion ist ein AMR. Die Bestimmung des erforderlichen Autonomiegrads ist entscheidend, um die passende Technologie für den Anwendungsfall auszuwählen. Die Einordnung des Autonomiegrads ist daher eine zentrale Voraussetzung, um Technologien korrekt zu bewerten und in betrieblichen Kontexten sinnvoll einzusetzen.

3. Implementierung von Autonomen Mobilen Robotern in Brownfield-Umgebungen

Im vorherigen Kapitel wurden die Begriffe AMR und AGV voneinander abgegrenzt. Der Fokus richtet sich nun auf die Integration von AMR in bestehende Produktions- und Logistikumgebungen. Im Gegensatz zu Greenfield-Projekten, die auf neuer Infrastruktur aufbauen, erfordert die Implementierung in Brownfield-Umgebungen die Einbindung in bestehende bauliche, technische und organisatorische Strukturen. Dies bringt erhöhte Anforderungen an Planung, Umsetzung und Betrieb mit sich. Für einzelne Aspekte wie die IT-Integration oder Prozessanpassung gibt es bereits praxiserprobte Teillösungen. Für andere Herausforderungen, insbesondere im soziotechnischen Bereich, fehlen bislang jedoch konkrete und übertragbare Umsetzungsansätze. Viele der bestehenden Modelle und Standards orientieren sich an idealisierten Greenfield-Szenarien und erfassen die Realitäten in historisch gewachsenen Betriebsumgebungen nur unzureichend.

Dieses Kapitel identifiziert und systematisiert die zentralen Herausforderungen der AMR-Implementierung in Brownfield-Umgebungen in fünf Themenfeldern: physische und IT-Infrastruktur, betriebliche Flexibilität, soziale Strukturen, wirtschaftliche Rahmenbedingungen und ökologische Anforderungen. Die Analyse dieser Bereiche bildet die Grundlage für die anschließende Bewertung bestehender Planungsansätze. Ziel ist es, diese Lücken sichtbar zu machen, in denen Unternehmen konkrete Unterstützung benötigen.

„Autonome Mobile Roboter entfalten ihr volles Potenzial nur dann, wenn sie in der Realität bestehender Betriebsumgebungen funktionieren – und genau hier liegt die Herausforderung: In Brownfield-Szenarien treffen wir auf gewachsene Strukturen, komplexe Abläufe und soziale Dynamiken, die sich nicht einfach standardisieren lassen. Erfolgreiche Einsatzszenarien zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht nur technisch integrierbar sind, sondern auch organisatorisch mitgetragen und wirtschaftlich tragfähig bleiben. Deshalb brauchen Unternehmen keine Lösungen von der Stange, sondern modulare standardisierte Werkzeuge und Produkte, die sich flexibel an ihre individuelle Situation anpassen lassen“

Christian Dreyer, Bereichsleiter AGV, TÜNKERS

Physische und IT-Infrastruktur

Brownfield-Umgebungen sind oft durch enge Verkehrswege und unebene Bodenstrukturen gekennzeichnet, was die Bewegungsfreiheit und Betriebssicherheit der AMR erheblich einschränken kann [25]. Für einen störungsfreien Einsatz sind geeignete Bodenverhältnisse, eine zuverlässige Sensorik sowie eine koordinierte Koexistenz mit manuellen Fahrzeugen und Mitarbeitenden erforderlich [21, 25, 26].

Betriebliche Flexibilität und Anpassung

Brownfield-Projekte finden in der Regel in einem laufenden Betrieb statt. Dies erfordert eine hohe Flexibilität im Umgang mit bestehenden soziotechnischen Systemen, die Maschinen, Prozesse und Mitarbeitende gleichermaßen einbeziehen [11, 27, 28]. Notwendig sind beispielsweise die Anpassung von Fahrwegen, regelmäßige Kalibrierungen oder die Erhöhung der Fahrzeuganzahl bei Durchsatzschwankungen. Eine kontinuierliche Planung und adaptive Steuerung sind Voraussetzungen, um die dynamischen Anforderungen zu bewältigen [29].

Soziale Strukturen und Qualifikation

Soziale Faktoren haben großen Einfluss auf die Akzeptanz neuer Technologien. In Brownfield-Umgebungen bestehen oft etablierte kulturelle Normen und stabile Gruppenstrukturen, die durch die Einführung von AMR beeinflusst werden können [26]. Unsicherheiten hinsichtlich Arbeitsplatzveränderungen und der Komplexität neuer Systeme, fehlende Transparenz können zu fehlender Technologieakzeptanz und somit zu Widerständen führen [21].

Die frühzeitige Einbindung von Mitarbeitenden, eine offene und kontinuierliche Kommunikation sowie begleitende Change-Management-Maßnahmen sind daher essenziell [21, 30]. Zusätzlich ist der Qualifizierungsgrad der Beschäftigten entscheidend für den Erfolg der Implementierung. Der Betrieb von AMR-Systemen erfordert technisches Know-how in Bereichen wie Programmierung, Sensorik oder Systemintegration sowie organisatorische Fähigkeiten im Umgang mit technologischen Transformationsprozessen [31]. Entsprechende Schulungs- und Weiterbildungsmaßnahmen sind daher notwendig, um Einführung, Betrieb und langfristige Weiterentwicklung der Systeme sicherzustellen.

Wirtschaftliche Rahmenbedin- gungen



Die Einführung von AMR-Systemen geht mit hohen Investitionskosten einher. Neben den Fahrzeugkosten sind auch ggfs. infrastrukturelle Anpassungen, die Systemintegration und Qualifizierungsmaßnahmen zu berücksichtigen [32]. Hinzu kommen umfangreiche Simulationsaufwände zur Validierung und Optimierung von Systemkonfigurationen, die sowohl personelle als auch finanzielle Ressourcen binden [33]. Unternehmen müssen die Gesamtkostenstruktur ganzheitlich analysieren, Einsparpotenziale identifizieren und mögliche Skaleneffekte bewerten. Ebenso wichtig ist eine realistische Einschätzung zukünftiger Betriebskosten und Risiken.

Ökologische Aspekte



Die zunehmende Relevanz von Nachhaltigkeitszielen stellt auch an AMR-Projekte neue Anforderungen. Bereits in der frühen Planungsphase müssen Umweltaspekte wie Energieeffizienz, Emissionsreduktion und Ressourcenschonung bewertet werden [34]. Der Einsatz von Umweltbewertungsinstrumenten sowie die Integration von Zirkularität, beispielsweise durch Wiederverwendung bestehender Infrastrukturen, können einen erheblichen Beitrag zur Reduktion von Umwelteinflüssen leisten [34, 35].



Bild:@AdobeStock

4. Anforderungen und Standardisierungsansätze für die Automobil- und Zulieferindustrie

Obwohl es bislang nur wenige Lösungen gibt, die das volle Potenzial von AMR ausschöpfen, existieren bereits Standards, welche die Einführung neuer Systeme deutlich erleichtern und in ihren unterstützten Funktionen über klassische AGV hinausgehen. Für zahlreiche Brownfield-Anwendungen stellen sie daher einen vielversprechenden Einstiegspunkt dar. Da sich diese Ansätze jedoch noch in der Entwicklung befinden, werden sie zwar kontinuierlich um neue Funktionalitäten erweitert, die eine höhere Flexibilität ermöglichen, decken jedoch derzeit nicht in jedem Fall alle benötigten Anforderungen ab. Im Folgenden werden die relevanten Anforderungen in Kategorien dargestellt.

„Die VDA 5050 senkt die Einstiegshürden für den Einsatz von AMR deutlich und macht gerade KMU unabhängiger von einzelnen Herstellern. Sie ersetzt aber nicht das Prozesswissen, dass für eine erfolgreiche Einführung notwendig ist“

*Dr.-Ing.Katharina Glock
Bereichsleitering Information Process Engineering FZI*

Branchenspezifische Anforderungen

Die Einführung von AMR in der Automobilindustrie ist mit besonderen Anforderungen verbunden, die sich aus den spezifischen Merkmalen dieser Branche ergeben. Insbesondere die hohe Prozesskomplexität erfordert eine flexible Anpassungsfähigkeit der AMR an sich häufig ändernde Bedingungen in Produktions- und Logistiksystemen. Hinzu kommen strenge Qualitätsanforderungen sowie umfassende Kontrollmechanismen, um Fehler in der Materialbearbeitung zu vermeiden.

Für KMU im Brownfield-Umfeld ist es bei der Umsetzung entscheidend, durch anbieteroffene Schnittstellen hersteller- und softwareunabhängig zu bleiben und gleichzeitig unterschiedliche Hardware für verschiedene Anwendungsfälle miteinander kombinieren zu können. Grundlage hierfür sind standardisierte Kommunikationsprotokolle, die den Informationsaustausch zwischen Leitsteuerung bzw. Flottenmanagementsystem und den AMR ermöglichen. Zusätzlich sollte die Leitsteuerung auch mit peripheren Systemen wie Türen oder Aufzügen interagieren können, um einen reibungslosen Wechsel zwischen Hallen oder Ebenen sicherzustellen.

Standard

VDI 2710-Blatt3	Einsatzgebiete der Simulation für FTS
VDI 4451-Blatt5	Kompatibilität von FTS – Schnittstelle zwischen Auftraggeber und FTS-Steuerung
VDI 4451-Blatt7	Kompatibilität von FTS – Leitsteuerung für FTS
VDI 2510-Reihe	Die Richtlinie gibt eine Definition Fahrerloser Transportsysteme und einen Einblick in die dazugehörigen Teilsysteme
VDI 2710-Blatt1	Ganzheitliche Planung von FTS – Entscheidungskriterien für die Auswahl eines Fördersystems
Layout Interchange Format	Definition eines Formats für den Austausch von Wegenetzen zwischen FTF Integrator und Leitsystem gemäß VDA 5050
MassRobotics AMR Interoperability Standard	Standard zum Teilen von Basisinformationen wie Position, Geschwindigkeit, ... unter den verfügbaren AMRs
VDA 5050	Schnittstelle zur Kommunikation zwischen FTF und einer Leitsteuerung

Tabelle 4: Übersicht über Standards für AMRs in der Theorie und Praxis

Im Hinblick auf die Integration von AMR-Systemen kommt der VDA 5050 eine zentrale Rolle zu, die ein einheitliches Kommunikationsprotokoll zwischen den AMR und der Leitsteuerung beschreibt. Die Nachrichten werden in einer JSON-Struktur unter Verwendung des Protokolls Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) übertragen. Der AMR sendet dabei regelmäßig Informationen über seinen aktuellen Zustand und Verbindungsstatus mit allen relevanten Daten an die Leitsteuerung. Diese wiederum übermittelt standardisierte Aufträge, sowie bei Bedarf unmittelbar auszuführende Aktionen. Zusätzlich kann ein AMR im Rahmen der Inbetriebnahme physikalische Eigenschaften wie Größe oder die Art der Trägereaufnahme an die Leitsteuerung melden [36].

Trotz der definierten Datenobjekte unterscheiden sich VDA 5050-Schnittstellen in der Praxis jedoch regelmäßig. Für unterschiedliche Produktionsprozesse müssen oft individuelle Aktionsparameter festgelegt werden, damit die AMR ihre Aufgaben korrekt ausführen können. Zudem befindet sich der Standard weiterhin in der Entwicklung. Es existieren mehrere Versionen, die sich in Teilen der zugrunde liegenden Datenmodelle leicht unterscheiden, was eine beliebige Integration von Komponenten erschwert.

Das LIF stellt eine Ergänzung zur VDA 5050-Schnittstelle dar. Es dient der Abbildung des Produktionslayouts und ermöglicht es der Leitsteuerung, die Produktionsumgebung strukturiert zu erfassen und zu nutzen. Zusätzlich erlaubt der Standard, dass AMR durch ihre Sensorik Änderungen in der Umgebung erkennen und diese an die Leitsteuerung übermitteln können. Allerdings weist das Layout Interchange Format auch einige Einschränkungen auf. Die zugrunde liegende JSON-Struktur ist nicht in der Lage, logische Abläufe wie Vorfahrtsregeln abzubilden, und enthält keine Informationen über die jeweilige Lokalisierungsmethode der AMR. Zudem wird auch das LIF-Format laufend weiterentwickelt, sodass zum aktuellen Standpunkt noch nicht alle branchenüblichen Layoutmöglichkeiten und die gebotenen Freiheitsgrade abgebildet werden können [37].



5. Planungsansätze für eine AMR-Implementierung

Die erfolgreiche AMR-Einführung erfordert strukturierte und praxisgerechte Vorgehensmodelle. Sie helfen, Projekte effizient aufzusetzen, Akzeptanzprobleme zu vermeiden und spätere Anpassungen zu minimieren. Bisher existiert jedoch kein umfassender Planungsansatz, der speziell auf AMR in bestehenden Infrastrukturen, den sogenannten Brownfields, ausgerichtet ist.

Im Folgenden werden etablierte Planungsansätze aus Wissenschaft und Praxis. Bewährte Standards wie die VDI-Richtlinie 2710, ursprünglich für klassische AGV-Systeme entwickelt, bilden dabei eine wichtige Grundlage [33]. stoßen jedoch bei den spezifischen Herausforderungen gewachsener Betriebsumgebungen schnell an ihre Grenzen. Auch aktuelle Forschungsergebnisse liefern wertvolle Impulse, decken aber oft nur Teilbereiche des Planungsprozesses ab und betrachten ebenfalls selten Anwendungen im Brownfield.

„Wir sehen immer wieder, dass Betriebe zwar den Wunsch haben, AMR einzuführen – aber an der Frage scheitern: Wo fangen wir eigentlich an? Es fehlt ein klarer Fahrplan, der Technik, Prozesse und Menschen gleichermaßen berücksichtigt.“

Volker Single
CEO ProLog Automation GmbH

Praxisnahe Referenzmodelle und Standards

Die VDI-Richtlinie 2710 gilt als etabliertes Referenzmodell für die Einführung von FTS. Sie beschreibt die Umsetzung über mehrere Projektphasen: von der Planung über die technische Realisierung bis hin zur Inbetriebnahme und dem späteren Betrieb [38]. Dabei werden technische, organisatorische und wirtschaftliche Aspekte praxisnah berücksichtigt (vgl. Abbildung 5).

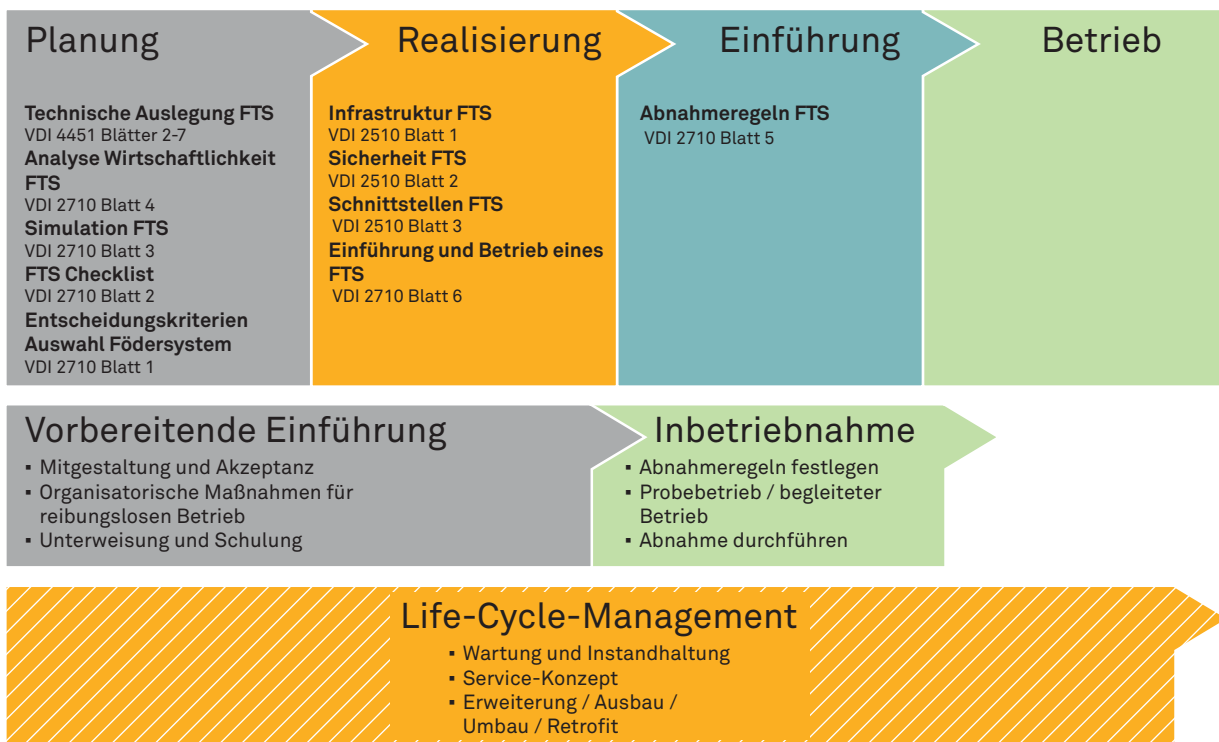


Abbildung 5: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (VDI 2710 Blatt 6), eigene Darstellung nach [39].

Die VDI 2710 ist in der Industrie weit verbreitet und unterstützt Unternehmen dabei, FTS-Projekte strukturiert umzusetzen [38]. Der Ablauf gliedert sich in folgende vier Phasen: Planung, Realisierung, Einführung und Betrieb. In der Planungsphase erfolgt eine umfassende Analyse des Ist-Zustands. Darauf aufbauend werden Anforderungen definiert, wirtschaftliche Bewertungen durchgeführt und erste Entscheidungen zur Systemauswahl getroffen. Die anschließende Realisierungsphase umfasst die technische Auslegung, die Auswahl und Beschaffung der Systemkomponenten sowie die Anpassung der Infrastruktur. In der Einführungsphase stehen die Integration in bestehende Prozesse, Systemtests und Schulungsmaßnahmen für das Bedienpersonal im Fokus. Erst danach folgt die Betriebsphase, in der das System in den Betrieb eingeführt, anschließend überwacht, gewartet und weiterentwickelt wird. Für AMR-Projekte bietet das Modell eine sinnvolle Grundlage, kann jedoch zentrale Besonderheiten wie dezentrale Steuerung, dynamische Navigation und den Brownfield-Kontext nur eingeschränkt abbilden.

Wissenschaftliche Ansätze und Studien zur AMR-Einführung

Um die Relevanz und Reichweite bestehender Planungsansätze besser einordnen zu können, wurden im Projekt FlexTools neben der VDI 2710 auch wissenschaftliche Publikationen systematisch analysiert. Ziel war es, zu untersuchen, inwieweit die in der Praxis bewährten Phasen der VDI 2710 auch in wissenschaftlichen Modellen aufgegriffen werden und ob diese Ansätze bereits auf die besonderen Herausforderungen in Brownfield-Umgebungen eingehen. Hierbei lag der Fokus auf den ersten drei Phasen. Die Analyse bietet eine fundierte Grundlage, um bestehende Lücken sichtbar zu machen und Impulse für die Weiterentwicklung praxisgerechter Planungsvorgehen zu gewinnen. In Tabelle 5 werden die betrachteten Ansätze strukturiert zusammengefasst. Hierbei werden die inhaltlichen Schwerpunkte, die Einordnung der Planungsphasen und Berücksichtigung Brownfield-spezifischer Aspekte fokussiert [40].

Planungsansätze	Fokus	Planungsphasen der VDI 2710			Brownfield-Spezifika					
		AMR vs. AGV	System-Entscheidungsfindung	Detailliertes Systemdesign	Beschaffung	Strukturelle Rahmenbedingungen	Betriebliche Rahmenbedingungen	Soziale Aspekte und Qualifizierung	Wirtschaftliche Aspekte	Ökologische Aspekte
VDI 2710 [38]	AGV	●	●	●	○	○	○	◐	○	
Le-Anh & Koster [41]	AGV	●	●	○	◐	◐	○	◐	○	
Vis [42]	AGV	●	●	○	○	○	○	◐	○	
Ali & Khan [43]	AGV	●	●	○	●	○	○	○	○	
Hoppe & Freitag [24]	AGV	●	●	●	●	○	○	◐	○	
Grover & Ashraf [8]	AMR	○	●	○	◐	●	●	●	○	
Fragapane et al. [2]	AMR	◐	●	○	◐	◐	○	◐	○	
Torres [5]	AMR	◐	◐	○	●	●	○	◐	○	
Kopp et al. [21]	AGV	○	○	○	○	○	◐	○	○	
Aguiar et al. [34]	AGV	○	○	○	○	○	◐	◐	◐	
Moser & Kannengiesser [44]	AGV	○	○	○	●	●	●	●	○	

○ = nicht behandelt, ◐ = teilweise behandelt, ● = vollständig behandelt

Tabelle 5: Übersicht über die AMR-/AGV-Planungsansätze, eigene Darstellung nach Benkhoff et al. [40]

Vis [42] liefert eine grundlegende Übersicht zur Planung von AGV-Systemen und greift zentrale Elemente der VDI-Richtlinie 2710 auf. Der Schwerpunkt liegt dabei auf wirtschaftlichen Fragestellungen. Spezifische Herausforderungen in Brownfield-Umgebungen werden jedoch nicht adressiert. Le-Anh und Koster [41] erweitern den Blick um strukturelle und operative Einschränkungen, die typischerweise in Brownfield-Szenarien auftreten. Die Integration in bestehende Infrastrukturen bleibt jedoch weitgehend unbehandelt. Ali und Khan [45] analysieren die Einführung von AGVs in flexiblen Fertigungssystemen und setzen ihren Fokus auf Design-, Planungs- und Steuerungsstrategien. Ihr Ansatz deckt mehrere Aspekte der VDI 2710 ab, lässt jedoch kontextspezifische Brownfield-Anforderungen außer Acht. Hoppe und Freitag [24] orientieren sich eng am VDI-Planungsprozess und bilden die dort beschriebenen Projektphasen umfassend ab. Eine gezielte Anpassung an die Bedingungen in bestehenden Betriebsstrukturen erfolgt allerdings nur ansatzweise, vor allem im Hinblick auf bauliche Einschränkungen.

AMR-spezifische Ansätze und ergänzende Perspektiven

Grover und Ashraf [8] analysieren im Kontext von AMR verschiedene Einflussfaktoren bei der technischen Integration. Zwar werden Herausforderungen bestehender Betriebsumgebungen thematisiert, konkrete Planungsansätze oder Handlungsempfehlungen bleiben jedoch aus. Fragapane et al. [2] stellen ein Entscheidungsrahmenwerk für Führungskräfte vor, das einzelne Teilbereiche der AMR-Einführung berücksichtigt. Ein ganzheitliches Vorgehensmodell wird nicht erarbeitet. Torres [5] nutzt das Axiomatic Design zur technischen Planung von AMR-Systemen. Das Modell konzentriert sich stark auf technische Aspekte, lässt soziale und organisatorische Fragestellungen außen vor und erfasst die Projektphasen nicht vollständig.

Soziale und nachhaltige Dimensionen der Einführung

Neben technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen spielt die soziale Akzeptanz eine entscheidende Rolle für die erfolgreiche Implementierung autonomer Systeme. Kopp et al. [21] zeigen, wie gezielte Kommunikationsmaßnahmen und die Einbindung von Mitarbeitenden zur Akzeptanzförderung beitragen können. Aguiar et al. [34] erweitern den Blick auf Nachhaltigkeit und untersuchen ökonomische, soziale und ökologische Erfolgsfaktoren. Konkrete Handlungsschritte oder praxisnahe Umsetzungsmodelle werden jedoch nicht ausgeführt.

Brownfield-spezifische Ansätze

Einen auf Brownfield-Umgebungen ausgerichteten Ansatz verfolgen Moser und Kannengiesser [44]. Sie schlagen das Subject-oriented Business Process Management vor, um AGV-Systeme schrittweise in bestehende Prozesse zu integrieren ohne den laufenden Betrieb zu unterbrechen. Menschliche und automatisierte Abläufe werden hierbei gemeinsam betrachtet und dokumentiert. Die vorgelagerten Planungsphasen, etwa die Auswahl geeigneter Systeme oder die technische Simulation, bleiben jedoch unberücksichtigt.

Zusammenfassung

Die Analyse aktueller Planungsansätze liefert eine strukturierte Übersicht über bestehende Modelle zur Einführung von AMR-Systemen in Brownfield-Umgebungen. Es wurde untersucht, welche Merkmale diese Umgebungen adressieren und welche Herausforderungen bei der Integration bestehen. Die Ergebnisse zeigen, dass viele Ansätze zwar wichtige Impulse geben, sich jedoch meist auf einzelne Phasen der Planung konzentrieren. Der VDI-Standard 2710 beispielsweise bildet die ersten Schritte eines Einführungsprozesses gut ab, lässt jedoch zentrale Aspekte wie soziale Wechselwirkungen, betriebliche Akzeptanz oder organisatorische Übergänge in gewachsenen Strukturen unberücksichtigt [40]. Auch andere Modelle adressieren häufig technische und wirtschaftliche Themen, lassen aber den komplexen soziotechnischen Kontext in Brownfield-Umgebungen weitgehend außen vor.

6. Fazit und Ausblick

Die Implementierung von AMR in Brownfield-Umgebungen setzt eine strukturierte, methodische Vorbereitung voraus. Bereits ein fehlendes einheitliches Begriffsverständnis erschwert die Orientierung. Dieses Whitepaper zeigt, dass insbesondere die Abgrenzung zwischen AGV und AMR in Wissenschaft und Praxis bislang nicht konsistent erfolgt. Gleichzeitig wird aufgezeigt, dass bestehende Standards, wie etwa der VDI 2710, sowie Planungsansätze aus Forschung und Praxis zwar wertvolle Grundlagen bieten, es bislang jedoch an durchgängigen Methodiken für die Implementierung von AMR in Brownfield-Umgebungen mangelt [33].

Die Analyse der soziotechnischen Herausforderungen macht deutlich, dass bestehende Ansätze bislang nur Teilbereiche abdecken. Insbesondere die Integration in bestehenden Infrastrukturen, die Qualifikation des Personals, Akzeptanzfragen sowie ökologische Aspekte finden bislang nur punktuell Berücksichtigung. Zudem wird deutlich, dass die Mehrheit der vorhandenen Ansätze auf AGV-Systeme ausgerichtet ist. AMR-spezifische Planungsmodelle stehen bislang nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Gleichzeitig fehlt es an einem durchgängigen, praxisnahen Konzept, das technische, wirtschaftliche, soziale und ökologische Anforderungen ganzheitlich zusammenführt. Aspekte wie Mitarbeiterqualifikation, Prozessintegration oder Nachhaltigkeit finden bislang kaum systematische Berücksichtigung, obwohl sie für die langfristige Tragfähigkeit von AMR-Lösungen in der Praxis zunehmend entscheidend sind [40].

In dem Whitepaper wurden zentrale Herausforderungen bei der Einführung von AMR in bestehende Betriebsumgebungen sichtbar gemacht, relevante Standards und Planungsansätze systematisch erfasst und die begriffliche Abgrenzung zu klassischen AGV herausgearbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Grundlage, um die Einführung AMR strukturiert vorzubereiten und bestehende Unsicherheiten im Auswahl- und Planungsprozess zu reduzieren.

Das Projekt FlexTools greift diese Erkenntnisse auf und entwickelt darauf aufbauend modulare Bausteine, die Unternehmen gezielt bei der Planung und Umsetzung von AMR-Projekten in Brownfield-Umgebungen unterstützen sollen. Die vorgestellten Erkenntnisse dienen als Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells, das bestehende Standards integriert als auch praxisrelevante Herausforderungen adressiert. Damit wird eine strukturierte, anschlussfähige und anwenderorientierte Grundlage geschaffen, um den Einsatz von AMR-Systemen auch in komplexen Brownfield-Umgebungen effizient zu realisieren.

„Die erfolgreiche Integration von AMR-Systemen in bestehende Produktionsumgebungen erfordert weit mehr als nur technisches Know-how – sie braucht ein durchgängiges Verständnis für Prozesse, Standards und die realen Herausforderungen im Brownfield. Genau hier setzt FlexTools mit dem modularen Baukasten an.“

Christian Dreyer, Bereichsleiter AGV, TÜNKERS

7. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), “FlexTools – Die modulare Toolbox für flexible Robotik kleinerer und mittlerer Automotive-Zulieferer,” Projektsteckbrief, 2023. [Online]. Available: <https://lfo.mb.tu-dortmund.de/forschung/forschungsprojekte/flextools/>
- [2] G. Fragapane, R. de Koster, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, “Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 294, no. 2, pp. 405–426, 2021, doi: 10.1016/j.ejor.2021.01.019
- [3] J. Pizon, Ł. Wójcik, A. Gola, Ł. Kanski, and I. Nielsen, “Autonomous mobile robots in automotive remanufacturing: A case study for intra-logistics support,” *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 18, no. 1, pp. 213–230, 2024, doi: 10.12913/22998624/177398
- [4] ifo Institut and KfW, “Entwicklung des Fachkräftemangels bei Unternehmen im Bereich Lagerlogistik bis 2024,” 2025. [Online]. Verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1411744/umfrage/entwicklung-des-fachkraeftemangels-bei-unternehmen-im-bereich-lagerei/>
- [5] D. D. Torres, Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte auf dem Werksgelände durch den Einsatz autonomer mobiler Roboter. Dissertation, Technische Universität München, München, Germany, 2023.
- [6] M. Cognominal, K. Patronymic, and A. Wackowicz, “Evolving field of autonomous mobile robotics: Technological advances and applications,” *fmr*, vol. 2, no. 2, pp. 189–200, 2021, doi: 10.63995/USAS3015
- [7] O. Schmidt and T. Tritschler, “Digitalisierung ist ein entscheidender Effizienztreiber,” *ZWF Z. Wirtsch. Fabr.*, vol. 116, no. 9, pp. 632–638, 2021, doi: 10.1515/zwf-2021-0143
- [8] A. K. Grover and M. H. Ashraf, “Leveraging autonomous mobile robots for Industry 4.0 warehouses: a multiple case study analysis,” *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 35, no. 4, pp. 1168–1199, 2024, doi: 10.1108/IJLM-09-2022-0362
- [9] R. Keith and H. M. La, “Review of autonomous mobile robots for the warehouse environment,” *arXiv preprint arXiv:2406.08333*, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.08333
- [10] M. Zhang, M. G. Ludwig, and E. H. Grosse, “Mensch-Roboter-Zusammenarbeit in der Intralogistik: Vorteile und Auswirkungen auf die Beschäftigten,” *HMD*, vol. 60, no. 6, pp. 1210–1221, 2023, doi: 10.1365/s40702-023-00998-6
- [11] G. Ullrich and T. Albrecht, *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden, Germany: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023, doi: 10.1007/978-3-658-38738-9
- [12] G. Fragapane, D. Ivanov, M. Peron, F. Sgarbossa, and J. O. Strandhagen, “Increasing flexibility and productivity in Industry 4.0 production networks with autonomous mobile robots and smart intralogistics,” *Ann. Oper. Res.*, vol. 308, no. 1–2, pp. 125–143, 2022, doi: 10.1007/s10479-020-03526-7
- [13] X. Zhao and T. Chidambareswaran, “Autonomous mobile robots in manufacturing operations,” in *Proc. 2023 IEEE 19th Int. Conf. Autom. Sci. Eng. (CASE)*, Auckland, New Zealand, 2023, pp. 1–7, doi: 10.1109/CASE56687.2023.10260631
- [14] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, and D. Scaramuzza, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA; London, U.K.: MIT Press, 2011.
- [15] Intel, “Autonomous mobile robot (AMR) overview: Types and use cases—Intel.” [Online]. Verfügbar: <https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/autonomous-mobile-robots/overview.html>
- [16] Omron, “Autonome mobile Roboter (AMR) | Mobile Roboter | OMRON, Deutschland.” [Online]. Verfügbar: <https://industrial.omron.de/de/products/autonomous-mobile-robot>
- [17] C.-I. Gries, S. Tenbrock, and C. Wernick, *Auswirkungen von innovativen digitalen Technologien auf den Markt für industrielle Robotik-Anwendungen*. Bad Honnef, Germany: WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, 2023. [Online]. Verfügbar: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/280414/1/1872127908.pdf>

- [18] S. A. M. Saleh, S. A. Suandi, H. Ibrahim, Q. S. Hamad, and I. A. Amoudi, "AGVs and AMRs robots: A brief overview of the differences and navigation principles," in Proc. 12th Int. Conf. Robot., Vision, Signal Process. Power Appl., 2024, pp. 255–260. doi: 10.1007/978-981-99-9005-4_32.
- [19] O. W. Xuan, H. Selamat, and M. T. Muslim, "Autonomous mobile robot for transporting goods in warehouse and production," Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 845, pp. 555–565, 2024, doi: 10.1007/978-981-99-8498-5_45
- [20] R. Hercik, R. Byrtus, R. Jaros, and J. Koziorek, "Implementation of autonomous mobile robot in SmartFactory," Appl. Sci., vol. 12, no. 17, p. 8912, 2022, doi: 10.3390/app12178912
- [21] T. Kopp, M. Baumgartner, M. Seeger, and S. Kinkel, "Perspectives of managers and workers on the implementation of automated-guided vehicles (AGVs) - a quantitative survey," Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 126, no. 11–12, pp. 5259–5275, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-11294-4
- [22] T. Tola, J. Mi, and Y. Che, "Mapping and localization of autonomous mobile robots in simulated indoor environments," Frontiers, vol. 4, no. 3, pp. 91–100, 2024, doi: 10.11648/j.frontiers.20240403.13
- [23] D. Clauer und J. Fottner Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf (2019), Print-ISBN: 978-3-941702-99-8
- [24] D. U. Hoppe, E. Scherstjanoi, D. Grölllich (2019). Autonomiestufen-Modell für Fahrerlose Transportsysteme (FTS).
- [25] L. Sabattini, E. Cardarelli, V. Digani, C. Secchi, C. Fantuzzi, and K. Fuerstenberg, "Advanced sensing and control techniques for multi AGV systems in shared industrial environments," in Proc. 2015 IEEE 20th Conf. Emerging Technol. Factory Autom. (ETFA), Luxembourg, Luxembourg, 2015, pp. 1–7. doi: 10.1109/ETFA.2015.7301488
- [26] Wall, T., N. Kemp, P. Jackson, and C. Clegg, "Outcomes of autonomous workgroups: A long-term field experiment," Acad. Manag. J., vol. 29, no. 2, pp. 280–304, 1986. doi: 10.2307/256189
- [27] A. Vaughn, P. Fernandes, and T. Shields, Manufacturing System Design Framework Manual: A product of the Manufacturing Systems Team of the Lean Aerospace Initiative. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [28] M. Burghardt, Einführung in Projektmanagement: Definition, Planung, Kontrolle, Abschluss, 5th ed. Erlangen, Germany: Publicis Corp. Publ, 2007.
- [29] D. Nåfors and B. Johansson, "Virtual engineering using realistic virtual models in brownfield factory layout planning," Sustainability, vol. 13, no. 19, p. 11102, 2021, doi: 10.3390/su131911102
- [30] B. Ziemendorf, Emotionale Akzeptanz in Veränderungsprozessen: Entwicklung eines didaktischen Konzeptes. Frankfurt am Main, Germany: Peter Lang, 2009.
- [31] N. Straub, T. Schrage, T. Thayaparan, and T. Bömer, "Bausteinkasten zur Einführung flexibler mobiler Robotik," ZWF Z. Wirtsch. Fabr., vol. 119, no. 10, pp. 724–727, 2024, doi: 10.1515/zwf-2024-1138
- [32] VDI 2710 – Blatt 4: Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS), Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany, 2011.
- [33] VDI 2710: Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS), Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany, 2010.
- [34] G. T. Aguiar, G. A. Oliveira, K. H. Tan, N. Kazantsev, and D. Setti, "Sustainable implementation success factors of AGVs in the Brazilian industry supply chain management," Procedia Manuf., vol. 39, pp. 1577–1586, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.284
- [35] J. Sarkis, M. M. Helms, and A. A. Hervani, "Reverse logistics and social sustainability," Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag., vol. 17, no. 6, pp. 337–354, 2010, doi: 10.1002/csr.220
- [36] VDA 5050: Interface for the communication between automated guided vehicles (AGV) and a master control, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin, Germany, 2025. [Online]. Verfügbar: https://github.com/VDA5050/VDA5050/blob/main/VDA5050_EN.md
- [37] LIF - Layout Interchange Format: Definition of a format of track layouts for exchange between the, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Frankfurt am Main, Germany, 2024.

- [38] Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS), VDI 2710 – aktualisiert, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany, 2022.
- [39] VDI 2710 – Blatt 6: Einführung und Betrieb eines fahrerlosen Transportsystems (FTS), Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Germany, 2023.
- [40] L. Benkhoff, N. Straub, T. Thayaparan, and C. Haack, The Implementation of Autonomous Mobile Robots in Industrial Brownfield Environments – A Literature Review. Hannover, Germany: publish-Ing, 2025. doi: 10.15488/18867.
- [41] T. Le-Anh and M. de Koster, “A review of design and control of automated guided vehicle systems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 171, no. 1, pp. 1–23, 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2005.01.036
- [42] I. Vis, “Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 170, no. 3, pp. 677–709, 2006, doi: 10.1016/j.ejor.2004.09.020
- [43] M. Ali and W. U. Khan, “Implementation issues of AGVs in flexible manufacturing system: A review,” *Glob. J. Flexible Syst. Manage.*, vol. 11, no. 1–2, pp. 55–62, 2010, doi: 10.1007/bf03396578
- [44] C. Moser and U. Kannengiesser, “Incremental implementation of automated guided vehicle-based logistics using S-BPM,” in *Proc. 11th Int. Conf. Subject-Oriented Business Process Manage.*, Seville, Spain, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1145/3329007.3329015