

Leitfaden Autonomie für mobile Roboter

Statusreport Technik

**Begriffe, Erklärungen, Abgrenzungen
und Vorstellung eines
„Autonomie-Index“ für FTS / AMR**



Herausgeber:

**VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
Fachausschuss Fahrerlose Transportsysteme (FTS)**

Ausgabe: Dezember 2021, Version 1.0
erarbeitet durch den Arbeitskreis Autonomie
des VDI Fachausschusses „Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“

Autoren:

Thomas Albrecht, Jochen Luz, Waldemar Osterhoff, Dr. Kai Pfeifer, Karl Rapp und Dr. Günter Ullrich

Leitfaden Autonomie für mobile Roboter

Begriffe, Erklärungen, Abgrenzungen
und Vorstellung eines
„Autonomie-Index“ für FTS / AMR

Inhaltsverzeichnis

1	MOTIVATION	3
2	BEGRIFFSWELT DER AUTONOMIE	4
3	ABGRENZUNG VON AUTOMATISCHEN UND AUTONOMEN FUNKTIONEN	9
3.1	AUTOMATISCHE Funktionen	9
3.2	Aktuell bekannte AUTONOME Funktionen	11
4	BESTIMMUNG VON AUTONOMIE- UND ANFORDERUNGSERFÜLLUNGS-INDEX	14
5	KRITISCHE AUSEINANDERSETZUNG MIT DEN AUTONOMIE-FUNKTIONEN	16
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	22
7	ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFE	22

1 Motivation

Wo es früher nur FTS und FTF gab, gibt es heute zusätzlich noch AMR, MR, aAGV, IGVs und weitere Begrifflichkeiten, die weitgehend dem Marketing entsprungen sind. Dabei wird insbesondere durch Verwendung der Begriffe Autonomie / autonom versucht, neuen Produkten mit neuen Funktionen einen höheren Wert und Anwendernutzen zuzuschreiben. Da ein allgemein anerkanntes Verständnis der Begriffe automatisiert, voll-automatisiert, autonom, hoch-autonom sowie intelligent im Bereich der Intralogistik fehlt, kommt es zu einer Vielzahl von schwer miteinander vergleichbaren Angeboten und in deren Folge zu Missverständnissen und enttäuschten Erwartungen bei den Anwendern.

Ziel dieses Leitfadens ist es, ein gemeinsames Verständnis dieser Begriffswelt zu erreichen und darauf basierend für Anbieter und Anwender ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, mit dem eine neutrale und praktikable Bewertung der Autonomie von Fahrerlosen Transportsystemen (AGV / AMR), die in der Intralogistik eingesetzt werden, ermöglicht wird.

2 Begriffswelt der Autonomie

Der Begriff „**Fahrerloses Transportsystem**“ (FTS, engl. AGV System) wird seit mehr als sechzig Jahren verwendet und beschreibt ein Logistiksystem, mit dem eine konkrete Logistikaufgabe – beispielsweise Transporte zur Verknüpfung von Quellen und Senken, Montagelinien für Serienprodukte oder eine Aufgabenstellung in Lager und Kommissionierung – mittels einer Flotte automatischer Flurförderzeuge erledigt wird.

So ein FTS versteht sich als Organisationsmittel und Garant für einen zuverlässigen, sicheren Materialtransport mit höchster Leistung, Verfügbarkeit und Qualität. Die Peripherie und alle im Umfeld ablaufenden Logistik- und Produktionsprozesse sind sorgfältig aufeinander abgestimmt.

Typische Anwendungen sind: durchgeplante, komplexe Logistikprozesse in Unternehmen, in denen mittels Serien- / Massenfertigung produziert sowie höchste Leistung und Effizienz in Lager und Kommissionierung gefordert wird.

Typische Beispiele sind: Automobilfertigung, Automobilzulieferbetriebe, Logistikzentren, Serienfertiger der weißen und braunen Ware, Lebensmittelindustrie, Warenströme in Krankenhäusern (Essen, Medikamente, Wäsche, Abfall etc., abseits der Bettenstationen).

Die Fahrzeuge, die in solchen Systemen zum Einsatz kommen, werden üblicherweise „**Fahrerlose Transportfahrzeuge**“ (FTF, engl. AGV; auch Fahrerlose Flurförderzeuge (FFZ), engl. Driverless Trucks) genannt und können sich technologisch hinsichtlich ihrer Funktionalitäten (mechanisch, mechatronisch, elektrisch) aber auch hinsichtlich Ihrer „Intelligenz“ (Sensorik, Steuerungsfunktionen, Autonomie) sehr unterscheiden.

Seit einigen Jahren gibt es Bestrebungen, anders als beim klassischen FTS, das im Rahmen eines Systemgeschäfts beschafft und als Projekt realisiert wird, den Fokus auf die Fahrzeuge zu legen und lediglich diese zu beschaffen (Produktgeschäft). Diese Fahrzeuge werden häufig nicht als FTF, sondern als **Mobiler Roboter** (MR), Autonomer Mobiler Roboter (AMR), oder schlicht „robot“ bezeichnet. Daneben gibt es zahlreiche weitere Bezeichnungen, die häufig auch Produktnamen einzelner Hersteller sind.

Im Vordergrund steht also der mobile Roboter, der „einfach“ in eine bestehende Industrieumgebung integriert werden und nach kurzer Inbetriebnahmezeit einfache Dienstleistungen (wie Transporte, Handhaben, Reinigen, Information) übernehmen kann. Es ist möglich, dass einige wenige solcher Roboter miteinander kommunizieren und sich die Aufgaben teilen. Solche Fahrzeuge sind vielfältig einsetzbar, benötigen wenig Planung, kaum Vorbereitungen der Einsatzumgebung und kurze Zeiten für das In Betrieb nehmen. Sie können ggf. ohne eine stationäre FTS-Leitsteuerung funktionieren, wenn sie selbst in Abstimmung mit den anderen MRs ihre Aufgaben finden, verteilen und ausführen.

Anmerkung: Im angelsächsischen Sprachraum wird der Begriff „robot“ häufig nicht wie der deutsche Begriff „Roboter“ verstanden, sondern steht eher für eine automatisch arbeitende Maschine, häufig auch eine automatisch fahrende mobile Plattform / ein automatisches Fahrzeug; ein Roboterarm/ Manipulator kann, muss aber nicht vorhanden sein. So bezeichnet auch ein „robot car“ nicht ein Auto mit einem darauf montierten Roboter, sondern sehr häufig lediglich eine mobile, automatisch fahrende Plattform ohne jegliche weitere Anbauteile/Komponenten. Dementsprechend werden „robots“ auch nicht zwingend in Industrieumgebungen eingesetzt, sondern können auch außerhalb von Werkhallen und sogar im öffentlichen Raum angetroffen werden.

Da sich die in solchen Fahrerlosen Transportsystemen eingesetzten MR und / oder FTF nicht grundsätzlich unterscheiden – in beiden Fällen können aber Funktionalität, Komplexität und Intelligenz stark variieren –, gelten unter anderem die VDI Richtlinienreihen 2510 und 2710 für beide gleichermaßen. Auch die Richtlinien zur FTS-Sicherheit und die FTS-Leitfäden Sicherheit (für Planer und Betreiber) sind anwendbar bzw. anzuwenden.

Als **Autonomie** bezeichnet man in nicht-technischen Bereichen einen Zustand der Selbstbestimmung, Unabhängigkeit, Selbstverwaltung oder Entscheidungs- bzw. Handlungsfreiheit. Sie ist in der idealistischen Philosophie die Fähigkeit, sich als Wesen der Freiheit zu begreifen und aus dieser Freiheit heraus zu handeln. Eine direkte Übertragbarkeit des Begriffs in die Welt der Technik ist offensichtlich schwierig und bietet daher viel Raum für Interpretationen.

In der breiten Öffentlichkeit wurde der Begriff Autonomie im technischen Kontext erstmals ab etwa 2010 im Zusammenhang mit **autonomen Pkw** (selbstfahrende Autos im öffentlichen Straßenverkehr) wahrgenommen. In technisch interessierten Kreisen erregte die vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium als Wettbewerb angelegte *DARPA Grand Challenge*, mit der die Entwicklung autonom fahrender Landfahrzeuge vorangetrieben werden sollte, bereits vorher (2004, 2005, 2007) große Aufmerksamkeit.

Beim Begriff des autonomen Pkw handelt es sich bei genauem Hinsehen um eine sprachliche Ungenauigkeit, denn die zuständige Norm SAE J3016¹, die auch die Grundlage für das jüngst vom Bundestag verabschiedete Gesetz zum automatischen Fahren (auf dafür frei gegebenen Streckenabschnitten öffentlicher Straßen) bildet, kennt bzw. erwähnt den Begriff „autonom“ gar nicht. Es werden vielmehr fünf verschiedene Automatisierungsstufen (Level) beschrieben. Die höchste Stufe, in der kein Fahrer mehr eingreifen braucht und auch nicht kann (mangels Bedienelementen wie Lenkrad, Gas-/Bremspedal etc.), wird als „Full Automation“ („Vollautomatisierung“) bezeichnet. Dieser Level 5 wird häufig (vor allem umgangssprachlich) im deutschsprachigen Raum auch als autonomes Fahren bezeichnet.

Wenn man nun die Abwesenheit eines menschlichen Fahrers zum – alleinigen – Kriterium für die Entscheidung macht, ob ein Fahrzeug als autonom bezeichnet werden kann/darf, könnte man zu dem Ergebnis kommen, dass Fahrerlose Transportfahrzeuge und mobile Roboter autonom agieren, da sie per Definition ohne menschliche Fahrer betrieben werden. Bei etwas genauerem Hinsehen stellt man aber fest, dass in bestimmten Situationen sehr wohl noch ein menschlicher Eingriff möglich und nötig ist, dass ein FTF/MR also nicht immer vollkommen selbstständig auf alle im Tagesbetrieb auftretenden Situationen reagieren kann.

Die Fähigkeiten eines vollautomatisch fahrenden Pkw gehen also in einigen Situationen – z. B. Fahrt bei hohem Tempo und hohem Verkehrsaufkommen, bei schlechter Sicht (nachts, bei Nebel oder Schneeregen), bei Annäherung an eine temporäre Fahrbahnsperre wg. einer Baustelle – weit über die Anforderungen an ein FTF / einen MR hinaus. In anderen Bereichen – beispielsweise bei Lastwechselvorgängen einzuhaltende Positioniertoleranzen im Bereich weniger Millimeter – sind die Anforderungen an FTF/MR aber deutlich höher.

Die pauschale Aussage, jedes FTF / jeder MR ist ein autonomes Fahrzeug, ist nicht korrekt, kann einen falschen Eindruck erwecken und verleitet zu falschen Annahmen – und dennoch erfolgt genau dies in der jüngeren Vergangenheit immer häufiger. Auf vielen Hersteller-Webseiten wird der Begriff „autonom“ als Synonym für selbstfahrend, fahrerlos und vollautomatisch verwendet.

¹ 2014 von der SAE International herausgegeben, engl. Original-Titel „*Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*“

Um das Verständnis für die Bandbreite des Themengebiets zu wecken und die Basis für die Ausführungen in den nachfolgenden Kapiteln zu bilden, folgen zunächst einige Aussagen und Erläuterungen zur Autonomie technischer Systeme von Mitarbeitern maßgeblicher Forschungseinrichtungen.

Prof. Hans-Jörg Kreowski, Professor (i. R.) für Theoretische Informatik, Universität Bremen
Ausschnitt aus einer schriftlichen Ausarbeitung eines Vortrags zu „Autonomie in technischen Systemen“, der im Rahmen einer Veranstaltung der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin am 10. Dezember 2015 gehalten wurde; im März 2018 veröffentlicht

„... Autonomie in technischen Systemen ist heute immer von Menschen gemacht und daran wird sich vorläufig nichts ändern. Es handelt sich also nicht um Autonomie im Sinne von Philosophie und Biologie, sondern um Artefakte, um eine Analogiebildung, ähnlich wie künstliche Intelligenz nicht mit menschlicher Intelligenz vergleichbar ist und maschinelles Lernen mit dem Lernen von Lebewesen wenig bis gar nichts zu tun hat. Autonome technische Systeme haben kein Bewusstsein, sind nicht vernunftbegabt, können nicht denken.

Das „Kind“ braucht einen Namen. Im technisch-wissenschaftlichen Bereich bedient man sich dabei gern bekannter Begriffe, wenn ihre eigentliche Bedeutung gewisse Ähnlichkeiten mit dem neu Benannten aufweist. Von technischer, künstlicher, maschineller Autonomie zu sprechen, ist also durchaus nachvollziehbar, aber darf nicht mit dem ursprünglichen Autonomiebegriff verwechselt werden. Wenn dieser Unterschied nicht beachtet oder sogar bewusst vertuscht wird, ist das Irreführung. Leider passiert das im Zusammenhang mit technischer Autonomie häufig – teils unbedacht, teils absichtsvoll. ...“

Mensch-Maschine-Interaktion, Handbuch zu Geschichte – Kultur – Ethik,

Herausgeber: Kevin Liggieri, Oliver Müller, Springer-Verlag 2019

Kap. 34 „Automation / Automatisierung“ von Martina Heßler, TU Darmstadt

„Der Begriff »Automation« bezeichnet die Delegation von Tätigkeiten an Maschinen, die in der Lage sind, diese selbstständig auszuführen. Prinzipielles Ziel von Automatisierung ist es, einen Prozess ohne menschliche Handlungen ablaufen zu lassen. Kern des Begriffs ist die automatische Steuerung und Kontrolle von Prozessen auf der Grundlage eines rückgekoppelten Regelsystems. [...] Automatisierung veränderte und verschob stets das Verhältnis von Mensch und Maschinen, allerdings nicht immer in der erwarteten Weise. So machten Automatisierungsversuche auch deutlich, was Maschinen (noch) nicht können und unterstrichen umso deutlicher die Bedeutung und Notwendigkeit menschlicher Fähigkeiten.“

Kap. 35 „Autonomie“ von Niels Gottschalk-Mazouz(†), Universität Bayreuth

„Innerhalb technischer Autonomie werden für gewöhnlich Grade der Autonomie als Grade der Unabhängigkeit vom Menschen und der Umwelt bei der technischen Ausführung bestimmter Aufgaben unterschieden. [...]

Mit zunehmender Autonomie nimmt typischerweise die Häufigkeit und Dauer von Benutzerinterventionen ab und verändert sich die Art der Benutzerinteraktion; sie wird globaler, abstrakter und höherwertiger. [...] Autonomie bezeichnet dann die Abhängigkeit des zukünftigen Verhaltens nur von inneren Zuständen des Systems (inklusive Sensorik), sowie die Fähigkeiten, denselben Auftrag

in verschiedenen Situationen und in denselben Situationen verschiedene Aufträge auszuführen. Anders gesagt geht es hier um Innensteuerung, Adaptivität und Flexibilität. [...] Drittens schließlich wird Autonomie mit der Fähigkeit verbunden, uns zu überraschen. Autonome Systeme können demnach dazulernen, weisen nicht explizit bei der Konstruktion vorgegebene Verhaltensweisen oder uns unbekannte Zustände und Gesetze auf. Anders gesagt geht es um Lernen, Innovation und Unvorhersagbarkeit.“

Blog: Autonom oder vielleicht doch nur hochautomatisiert, was ist eigentlich der Unterschied?

Dr. Rasmus Adler, Program Manager “Autonomous Systems”, Fraunhofer IESE, Kaiserslautern

(Quelle: <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/autonom-oder-vielleicht-doch-nur-hochautomatisiert-was-ist-eigentlich-der-unterschied/>)

„... Sowohl autonom als auch vollautomatisiert beziehen sich darauf, dass etwas zielgerichtet und ohne menschliche Weisung passiert. Die Begriffe werden neuerdings – insbesondere beim Thema „automatisiertes Fahren“ – häufig synonym verwendet. ...

Wenn alles im Vorfeld genau durchgedacht ist, auch wenn es noch so kompliziert ist, und wir dem System die durchdachten kausalen Zusammenhänge einprogrammieren, dann reden wir von automatisiert. Wenn wir die kausalen Zusammenhänge aber gar nicht richtig erfassen und dem System mit KI-Ansätzen nur indirekt sagen, wie es sich in einer bestimmten Situation verhalten soll, dann reden wir von autonom. ...“

Deutsches Zentrum für künstliche Intelligenz – DFKI

(Quelle: <https://www.dfki.de/web/forschung/forschungsthemen/autonome-systeme/>)

„Autonome Systeme handeln selbstständig, lernen, lösen komplexe Aufgaben und können auf unvorhersehbare Ereignisse reagieren. Dabei handelt es sich nicht nur um klassische Roboter, sondern ebenso um intelligente Maschinen, Geräte oder Softwaresysteme, die im Interesse des Menschen in speziellen Bereichen eingesetzt werden. So wird beispielsweise die Mobilität der Zukunft von autonomen Fahrzeugen bestimmt werden. Auch im häuslichen Umfeld werden autonome Systeme beeinträchtigte Menschen unterstützen. Zudem werden sie in der Produktion flexibel mit den Arbeitenden interagieren können und dort selbsttätig handeln, wo es für den Menschen zu gefährlich ist. Künstliche Intelligenz liefert die Schlüsseltechnologien in den Bereichen Maschinelles Lernen, Cyber-Sicherheit und agiler IT-Infrastrukturen, die für die Weiterentwicklung und den Einsatz autonomer Systeme maßgeblich sind.“

Katharina Giese, Fraunhofer IOSB-INA Autonome Anlagenkomponenten

(Quelle: <https://www.vdi.de/news/detail/autonome-systeme-wie-und-warum-sollte-man-sie-vergleichen>)

„Generalisiert man die Grundstrukturen Autonomer Systeme, ergeben sich die Elemente ...

- **Zielerkennung:** Technische Systeme werden für bestimmte Anwendungszwecke entworfen. Die erste Gemeinsamkeit ist das Ziel, zu dessen Erfüllung ein solches System beiträgt.
- **Selbstständige Umfeld erfassung:** Autonome Systeme müssen ihre Umgebung beziehungsweise ihren Kontext wahrnehmen, um den Grad der Zielerfüllung einschätzen zu können. Diese Umfeld erfassung übernehmen z. B. Sensoren.

- **Selbstständig generierter Handlungsplan:** Um ein gegebenes Ziel zu erreichen, muss ein System Einfluss auf die Umgebung nehmen können, und zwar auf eine Weise, die der Zielerfüllung zweckdienlich ist. Ein vom autonomen System selbstständig generierter Handlungsplan bildet die nachvollziehbare Grundlage der Aktionen.
- **Resilienz und Failsafe-Strategien:** Diese Handlungspläne werden auf der Grundlage historischer und aktueller Daten unter anderem mit Methoden des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz generiert. Für das Erreichen der Unabhängigkeit ist die Resilienz besonders wichtig. Denn nur so kann das System auf unvorhergesehene Ereignisse und Fehlerzustände angemessen reagieren. Die Strategien umfassen nicht nur die vom Entwickler vorgedachten potenziellen Probleme. Sie schließen auch die Fähigkeit ein, auf unerwartete Ereignisse sowie Ausfälle innerhalb des Systems zu reagieren, entsprechende Failsafe-Strategien zu entwickeln und umzusetzen, um die eigentliche Aufgabe angemessen weiter zu bearbeiten.

...“

3 Abgrenzung von automatischen und autonomen Funktionen

Wir gehen im Folgendem nicht von einem Entweder/Oder – AGV oder AMR – aus, sondern betrachten autonome Funktionen eines Systems mit automatischen Fahrzeugen. Wir sprechen also von mehr oder weniger autonomen Fahrzeugen bzw. von Fahrzeugen mit mehr oder weniger vielen autonomen Funktionen. Hierbei beschränken wir uns auf Funktionen zum Fahren, zur Sicherheit und zum Lasthandling. Dabei ist es unerheblich, ob die Funktionen als Software lokal im Fahrzeug, in einer zentralen Leitsteuerung, in einer externen Cloud oder einer geeigneten Kombination realisiert werden.

Auf Basis der Ausführungen im vorigen Kapitel werden im Folgenden autonome Funktionen vorgestellt und im Detail beschrieben. Zur Abgrenzung und Klarstellung sollen aber zunächst Funktionen genannt werden, die nach unserem Verständnis „nur“ Automatikfunktionen darstellen. Sie genügen also nach unserer Einschätzung den zuvor genannten Anforderungen an autonomes Agieren nicht. Denn autonome Funktionen sind komplex. In der Regel handelt es sich dabei um situatives Reagieren auf sich verändernde Umgebungs-/Rahmenbedingungen und Systemzustände, welche mittels mehrdimensionaler Sensorinformationen erfasst und ausgewertet werden. Probate Mittel hierfür sind Verfahren der künstlichen Intelligenz, z.B. „Machine Learning“. Vorstellbar ist aber auch, dass in aufwendiger Hochsprachenprogrammierung vergleichbare Ergebnisse erzielt werden.

3.1 AUTOMATISCHE Funktionen

➤ Fahren auf bzw. Spurführung mittels Schienen

Auch wenn es trivial erscheint, sei darauf hingewiesen, dass ein schienengeführtes Fahrzeug weder ein FTF ist (widerspricht der Definition eines FTF) noch autonom agieren kann, also auch kein AMR sein kann: aufgrund der Zwangsführung durch die Schiene fehlen Bewegungsfreiheitsgrade, da solch ein Fahrzeug außer den durch die Ablaufsteuerung vorgegebenen Zuständen „fahren entlang der Schiene“ – ggf. mit unterschiedlicher Geschwindigkeit – und „nicht fahren“ (= stoppen an ausgewählten bzw. von außen vorgegeben Positionen) keine weiteren Bewegungsmöglichkeiten hat. Die Einsatzumgebung ist so wenig komplex, dass hier sämtliche Ereignisse und daraus abgeleiteten Zustände vom Programmierer „vorgedacht“ und in einfachen „Wenn-Dann-Entscheidungs-bäumen“ programmiert werden können.

➤ Fahren auf bzw. Spurführung mittels kontinuierlich vorhandener, physischer Spur

Ähnlich wie bei der Spurführung durch eine mechanische Schiene erlaubt auch die Spurführung mittels kontinuierlich vorhandener physischer Spur – induktiver Leitdraht im Boden, optische Leitlinie oder Magnetband auf dem Boden – dem Fahrzeug keinerlei Freiheiten bezüglich seiner Bewegung, d. h. das Fahren abseits der vorgegebenen Leitspur ist nicht möglich. Somit können Fahrzeuge mit dieser Art der Spurführung zwar automatisch Güter von A nach B transportieren, führen aber keine Bewegung aus, die ein Programmierer nicht zuvor festgelegt hat.

➤ Automatisches Energie-Management, d. h. ohne manuelle Eingriffe

Typischerweise das automatische Wechseln oder das Nachladen des Onboard-Energiespeichers an einer Wechsel- oder Ladestation in Verbindung mit Speichertechnologien (z. B. Batterien, Power-Caps, Tanks zum Nachfüllen).

➤ **Automatisches Lasthandling**

Eigenständiges Aufnehmen und Abgeben von Last/Ladungsträgern durch das Fahrzeug an genau definierten Positionen und nach exakt festgelegten Abläufen. Hierzu können auch Funktionen gehören wie z. B. das Aufstapeln und Abstapeln von Paletten/Ladungsträgern.

➤ **Geführtes Kartieren der Einsatzumgebung bei Inbetriebnahme und Erweiterungen/Änderungen**

Aufnahme der Kartendaten für eine konturbasierte Navigation in bisher unbekannter Umgebung. Dies erfolgt typischerweise manuell mit einem Fahrzeug oder mit einer dafür geeigneten mobilen Messeinrichtung (3D-Scanner, Kamera(s)) und wird in der Regel durch Fachpersonal durchgeführt. Mit den aufgenommenen Daten wird automatisch eine Karte erstellt. In der Regel ist eine manuelle Nachbearbeitung dieser Karte erforderlich. Diese automatische Kartierung erfolgt ausschließlich im Rahmen einer Erstinbetriebnahme, im Rahmen der Erweiterung des Einsatzbereiches oder im Rahmen einer umfangreicheren Änderung des Einsatzbereiches.

➤ **Lageerfassung**

Bestimmung der Pose (Position und Ausrichtung) eines Fahrzeuges im Raum entweder mit zusätzlichen Einrichtungen wie Bodenmarkierungen, Magnete, Reflektoren, Funkanker oder andere künstliche Landmarken, die für den Betrieb des Systems angebracht/montiert werden, oder mittels bereits vorhandener Umgebungsmerkmale (Säulen, Wände, Tore, Regale, Maschinen...).

➤ **Situationsbedingte dynamische Verteilung der Transportaufträge**

Situationsabhängige, dynamische Zuweisung von Transportaufträgen an die gesamte Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung der aktuellen Anlagensituation (z. B. Fahrzeugverfügbarkeit, Fahrzeugposition, Fahrzeugzustand, Batterieladezustand, Auftragspriorität, Verkehrsverhältnisse usw.).

➤ **Situationsbedingtes Umlanen von Routen durch das System (Dynamic Routing)**

Dynamische Routenplanung für die gesamte FTF-/AMR-Flotte unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrsverhältnisse und/oder der Systemauslastung sowie aktives Reagieren auf Verkehrsstörungen durch die eigene Flotte.

➤ **Situationsbedingte Verkehrsregelung**

Situationsbedingte, dynamische Verkehrsregelung der FTF-/AMR-Flotte unter Berücksichtigung der aktuellen Verkehrs- und Anlagensituation (z.B. Verkehrsaufkommen, Verkehrsverhältnisse, Auftragspriorität, Fahrzeugposition, Fahrzeugbeladezustand/-Batterieladezustand usw.).

➤ **Selbstdiagnose für eine vorbeugende Wartung**

Fahrzeuge führen eine Selbstdiagnose zur vorbeugenden Wartung durch mit dem Ziel, rechtzeitig vorab Verschleiß oder Ausfallgefahr zu melden, um rechtzeitig und situationsbedingt eine Wartung durchführen zu können. Somit kann ein vorzeitiger Ausfall vermieden werden.

➤ **Reagieren auf besondere Betriebszustände**

Betriebszustände werden durch externe elektrische Signale oder intern fest parametrisierte Ereignisse umgeschaltet. Beispiele hierfür sind:

- Reaktion auf Brandalarm, i. d. R. das Freifahren von Flucht- und Rettungswegen sowie Brandschutztüren
- Erkennen von Betriebsunterbrechungen (Schichtende, Wochenende, Feiertage, Betriebsurlaub) und Abschalten in einen energiesparenden Schlummermodus
- Erkennen von Betriebsbeginn (nach Schichtende, nach Wochenende, nach Feiertagen, nach Betriebsurlaub) und Wiedereinschalten in den Normalmodus
- Erkennen des Ausfalls einer nicht fahrrelevanten Funktion (z.B. Defekt eines Lastaufnahmemittel-Sensors) führt zu einer automatischen Fahrt zum Service-/Wartungsbereich.

3.2 Aktuell bekannte AUTONOME Funktionen

1. Selbstständige, dynamische Aktualisierung der Modellierung der Einsatzumgebung im laufenden Betrieb

Fortlaufende Aufnahme von Kartendaten durch die Fahrzeuge in Verbindung mit einer dynamischen Aktualisierung der Kartierung der Einsatzumgebung.

Ziel dabei ist es, neue markante Umgebungsmerkmale zu erkennen und in die Kartierung aufzunehmen und für die Navigation zu nutzen. Weiter werden nicht mehr vorhandene Umgebungsmerkmale aus der Kartierung entfernt und nicht mehr für die Navigation genutzt.

Im Idealfall werden die aktualisierten Kartendaten zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht, um alle Fahrzeuge in allen Bereichen zur dynamischen Aktualisierung zu nutzen und zugleich alle Kartendaten auf allen Fahrzeugen auf aktuellem Stand zu halten.

2. Fahren auf freigegebenen Flächen ohne vorgegebene physische oder virtuelle Spuren

Zusätzlich zur physischen oder virtuellen Spurführung optionales Fahren auf freigegebenen Flächen.

Das Fahrzeug kann auf diesen Flächen seine Fahrtroute eigenständig, i. d. R. unter Berücksichtigung von Regeln wie Rechtsfahrgebot, Einhalten von seitlichen Mindestabständen zu festen Einbauten, anderen Fahrzeugen, Personen etc., planen und abfahren.

3. Umfahren von Hindernissen

Eigenständiges Ausweichen vor statischen und dynamischen Hindernissen mit dem Ziel, um diese herum zu fahren.

Die Hindernisse werden zumindest zweidimensional mit geeigneter Sensorik erfasst, die Umfahrung erfolgt mit eigenständiger Bahnplanung ohne vorgegebene Fahrspuren oder Ausweichbuchten.

4. Situationsbedingtes Umfahren von Hindernissen mit 3D-Umfelderfassung

Eigenständiges Ausweichen vor statischen und dynamischen Hindernissen mit dem Ziel, um diese herum zu fahren.

Die 3D-Umfelderfassung deckt dabei die Kontur des Fahrzeugs einschließlich der zu transportierenden Last ab. Die Umfahrung erfolgt unter Beachtung der Fahrzeugkontur mitsamt Last sowie unter Berücksichtigung von Informationen über andere Fahrzeuge, die ggf. der momentan beabsichtigten Umfahrung entgegenstehen. Diese Informationen können von der Leitsteuerung oder direkt von anderen Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden. Die Bahnplanung erfolgt dabei durch das Fahrzeug eigenständig und ohne vorgegebene Fahrspuren oder Ausweichbuchten.

5. Agieren auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung

Erkennung von unterschiedlichen Objekten (z. B. Paletten, Personen, Flurförderzeuge, Kraftfahrzeuge) und, sofern vorhanden, deren Bewegungsrichtung, sowie damit verbunden angepasstes Reagieren auf diese.

Typisches Verhalten: Statische Hindernisse umfahren, auf bewegende Personen reagieren und ausweichen, z.B. von rechts kommenden Fahrzeugen die Vorfahrt gewähren, nicht aber das reine Lasthandling. Dies setzt in der Regel eine 3D-Umfelderfassung voraus. Die hierfür erforderliche Sensorik befindet sich wahlweise am Fahrzeug oder ist (flächendeckend) stationär montiert.

6. Lasthandling auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung

Eigenständiges Anfahren, Aufnehmen und Abgeben von Last / Ladungsträgern durch das Fahrzeug an grob definierten Positionen, einschließlich Anpassen an die genaue Lastposition auf Basis der Erkennung der Objekte und deren Klassifizierung.

Hierzu können auch Funktionen gehören wie das eigenständige Einstellen des Lastaufnahmemittels auf die klassifizierte Last (Gabelzinken auf erkannten Ladungsträger angepasst einstellen). Die Klassifizierung der Last hinsichtlich ihrer Transportierbarkeit (Lastgewicht, Lastabmessungen/Überstände, ggf. Lastsicherung, Qualität des Ladehilfsmittels etc.) und der lastabhängigen Auswahl der Personenschutzfelder setzt eine speziell dafür geeignete Sensorlösung voraus.

Bei sicherheitsrelevanten Funktionen muss diese Lösung den dafür erforderlichen Performance-Level gemäß Maschinenrichtlinie erreichen. Auch hier kann diese Sensorik wahlweise am Fahrzeug oder stationär montiert sein.

7. Situationsbedingtes Umplanen von Routen im Mischbetrieb

Dynamische Routenplanung für die gesamte FTF-/AMR-Flotte unter Berücksichtigung der anderen Flurförderzeuge und Verkehrsteilnehmer. Berücksichtigt werden die aktuellen Verkehrsverhältnisse und/oder die Systemauslastung sowie das aktive Reagieren auf Verkehrsstörungen durch die eigene Flotte, andere Verkehrsteilnehmer oder durch sonstige Objekte.

Hier wird vorausgesetzt, dass die Automatikfunktion „Situationsbedingtes Umplanen von Routen durch das System (Dynamic Routing)“ vorhanden ist.

Hinweis: die Wirksamkeit der Funktion ist abhängig von der Qualität der Daten, insbesondere der Ortungsinformationen.

8. Verkehrsregelung unter Berücksichtigung des Mischbetriebs

Verkehrsregelung, die auf Regeln (allgemeine, temporäre oder räumlich begrenzte) oder Zeichen (Verkehrsschilder, Ampeln) basiert und die nicht nur die eigene FTF-/AMR-Flotte berücksichtigt, sondern auch den Mischverkehr aus Flurförderzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern.

Hier wird vorausgesetzt, dass die Automatikfunktion „Situationsbedingte Verkehrsregelung“ vorhanden ist.

9. Selbstständiges Erkennen und Reagieren auf Fahrzeugzustandsdaten ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebes

Fahrzeuge werten Zustandsdaten aus (z.B. schwergängige Antriebe, stark erhöhter Schlupf, keine ausreichend genaue Lokalisierung, Probleme der Energieversorgung, ...) und reagieren situationsabhängig auf unvorhergesehene Zustände. Sie versuchen beispielsweise selbstständig, sich aus dem Verkehrsfluss und aus dem System herauszunehmen, ggf. mit reduzierter Geschwindigkeit, um für den Rest der Flotte kein Hindernis darzustellen.

10. Teilweises oder komplettes Verlagern von Leitsteuerungsfunktionen auf die Fahrzeugseite

Gemeint ist hiermit bei einer Flotte von zwei oder mehr Fahrzeugen die Auslagerung von Entscheidungsaufgaben an die Fahrzeuge unter Verzicht auf zentrale Leitsteuerungsfunktionen.

Beispiele für derartige Entscheidungsaufgaben sind die Verteilung von Transportaufträgen an einzelne Fahrzeuge (vollständiger Verzicht auf eine Leitsteuerung) oder die Regelung des Verkehrs in einzelnen Verkehrsbereichen wie Kreuzungen und Einmündungen oder an Übergabestationen (ohne Einbeziehung der Leitsteuerung). Hierbei können Multiagentensysteme oder dezentrale Verhandlungsstrategien zum Einsatz kommen. Zwingende Voraussetzung für derartige dezentrale Entscheidungsaufgaben ist ein leistungsfähiges (breitbandiges, schnelles, latenzarmes) und flächendeckend vorhandenes Funkkommunikationssystem.

Ein Sonderfall ist die gemeinsame Ausführung von speziellen Aufgaben, wie der Transport von Lasten, die vom Gewicht und/oder den Abmessungen her nicht von einem Fahrzeug allein ausgeführt werden können. Hierbei bilden zwei oder mehr Fahrzeuge physisch durch Ankoppeln oder virtuell durch softwareseitige Synchronisierung einen entsprechenden Verbund, der den Transport der Last bewältigen kann. Nach Abschluss der Aufgabe löst sich der Verbund eigenständig wieder auf.

4 Bestimmung von Autonomie- und Anforderungserfüllungs-Index

Nachdem im vorigen Kapitel sowohl typische Automatikfunktionen als auch eine Reihe von derzeit möglichen bzw. üblichen autonomen Funktionen von Fahrerlosen Transportsystemen beschrieben wurden, soll nun mittels eines EXCEL-Arbeitsblatts erfasst werden,

- welche Autonomiefunktionen bei dem betrachteten (entweder bereits vorhandenen oder geplanten / in der Beschaffungsphase befindlichen) System vorhanden sind
- und inwieweit die jeweilige Funktion für den Anwendungsfall relevant (sinnvoll, nützlich, erforderlich) ist.

Im Ergebnis entstehen also

- der Autonomie-Index (Alx): eine Klassifizierung des Fahrzeugs bzw. des Fahrzeugsystems hinsichtlich seiner Autonomie und
- der Anforderungserfüllungs-Index (AEIx): eine Beurteilung der Lösung hinsichtlich der Eignung für eine konkrete Aufgabenstellung.

Der Alx errechnet sich aus der Summe der vorhandenen, bezogen auf alle zehn in Kap. 3.2 beschriebenen Autonomiefunktionen.

Der AElx ergibt sich aus dem Abgleich des Alx mit den Anforderungen der Anwendung. Dabei müssen vom Anwender alle Autonomiefunktionen hinsichtlich ihrer Notwendigkeit für die betrachtete Anwendung bewertet werden: erwünscht – egal – nicht erwünscht.

**Eine autonome Funktion ist nicht grundsätzlich gut oder schlecht –
sie muss vielmehr zur jeweiligen Anwendung passen!**

Beispielsweise ist die „Autonome Hindernisumfahrung“ für den Reinigungsroboter in der Flughafenhalle sicherlich eine die Produktivität steigernde und daher notwendige Funktion – für ein FTF in einer durchgetakteten und auf größtmögliche Effizienz des Transportsystems ausgelegten Produktion ist sie aber möglicherweise nicht zielführend.

Excel-Tool mit Makros: „vdi-fa-fts-amr-autonomie-makro_Dez-2021_v100.xlsm“

Pos.	Bezeichnung der autonomen Funktion	Funktion (laut Anbieter)		Funktion (in der Anwendung / im Use Case)			Erfüllungsgrad (für Anwendung)	Bemerkungen (Relevanz der autonomen Funktion für den Usecase unter Berücksichtigung der Stärken und Schwächen)
		vorhanden	nicht vorhanden	erwünscht	egal (nicht relevant)	unerwünscht		
1	Dynamische Aktualisierung der Modellierung der Einsatzumgebung	☑	○ 1	☑	○ 1	○ 1	1	
2	Fahren auf freigegebenen Flächen	○ 2	☑	○ 2	☑	○ 2	0	
3	Umfahren von Hindernissen	☑	○ 1	○ 3	○ 3	☑	0	
4	Umfahren von Hindernissen mit 3D-Umfelderfassung	○ 2	☑	○ 2	☑	○ 2	0	
5	Agieren auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung	☑	○ 1	☑	○ 1	○ 1	1	
6	Lasthandling auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung	○ 2	☑	○ 2	☑	○ 2	0	
7	Situationsbedingtes Umlanen von Routen im Mischbetrieb	☑	○ 1	○ 3	○ 3	☑	0	
8	Verkehrsregelung unter Berücksichtigung des Mischbetriebs	○ 2	☑	○ 2	☑	○ 2	0	
9	Erkennen und Reagieren auf Fahrzeugzustandsdaten	☑	○ 1	☑	○ 1	○ 1	1	
10	Leitsteuerungsfunktionen in den Fahrzeugen	○ 2	☑	○ 2	☑	○ 2	0	
Autonomie-Funktionen		5 (von 10)		3	5	2	3 (von 5)	
		50,0%					60,0%	
		Autonomie-Index Alx		Bemerkung: Alx ist bezogen auf alle Autonomiefunktionen, AEIx ist bezogen auf die relevanten Autonomiefunktionen			Anforderungs-Erfüllungs-Index AEIx	

Eine autonome Funktion ist nicht grundsätzlich gut oder schlecht – sie muss vielmehr zur jeweiligen Anwendung passen!

Excel-Tool ohne Makros: “vdi-fts-amr-autonomie_Dez-2021_v100.xlsx”

Pos.	Bezeichnung der autonomen Funktion	Funktion (laut Anbieter)		Funktion (in der Anwendung / im Use Case)			Erfüllungsgrad (für Anwendung)	Bemerkungen (Relevanz der autonomen Funktion für den Usecase unter Berücksichtigung der Stärken und Schwächen)
		vorhanden	nicht vorhanden	erwünscht	egal (nicht relevant)	unerwünscht		
1	Dynamische Aktualisierung der Modellierung der Einsatzumgebung	x		x			1	
2	Fahren auf freigegebenen Flächen		x		x		0	
3	Umfahren von Hindernissen	x				x	0	
4	Umfahren von Hindernissen mit 3D-Umfelderfassung		x		x		0	
5	Agieren auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung	x		x			1	
6	Lasthandling auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung		x		x		0	
7	Situationsbedingtes Umlanen von Routen im Mischbetrieb	x				x	0	
8	Verkehrsregelung unter Berücksichtigung des Mischbetriebs		x		x		0	
9	Erkennen und Reagieren auf Fahrzeugzustandsdaten	x		x			1	
10	Leitsteuerungsfunktionen in den Fahrzeugen		x		x		0	
Autonomie-Funktionen		5 (von 10)		3	5	2	3 (von 5)	
		50,0%					60,0%	
		Autonomie-Index Alx		Bemerkung: Alx ist bezogen auf alle Autonomiefunktionen, AEIx ist bezogen auf die relevanten Autonomiefunktionen			Anforderungs-Erfüllungs-Index AEIx	

5 Kritische Auseinandersetzung mit den Autonomie-Funktionen

Folgende allgemeine Aussagen beziehen sich auf alle Funktionen:

- Generell positiv: Autonome Funktionen versprechen einen Mehrwert.
- Generell negativ: Jede zusätzliche Funktion bedeutet erhöhte Kosten durch Hard- und/oder Software und belastet die Wirtschaftlichkeit.
- Genereller Sicherheitsaspekt: Auch Fahrzeuge mit autonomen Funktionen unterliegen grundsätzlich der Maschinenrichtlinie! Somit ist immer eine Risikobeurteilung gemäß DIN EN ISO 12100 erforderlich. Hinweise zur Risikominimierung finden sich insbesondere in den entsprechenden Typ B-Normen oder der Typ C-Norm DIN EN ISO 3691-4. Bei Abweichungen ist eine gleichwertige Risikominimierung nachzuweisen.

Allerdings sind die Autonomiefunktionen nicht für alle Einsatzfälle (Anwendungen, Usecases) gleich gut geeignet oder sinnvoll. So hat jede Autonomiefunktion positive wie negative und auch spezielle Sicherheitsaspekte. Auf diese soll im Folgenden hingewiesen werden.

1. Selbstständige, dynamische Aktualisierung der Modellierung der Einsatzumgebung im laufenden Betrieb

Fortlaufende Aufnahme von Kartendaten durch die Fahrzeuge in Verbindung mit einer dynamischen Aktualisierung der Kartierung der Einsatzumgebung.

Ziel dabei ist es, neue markante Umgebungsmerkmale zu erkennen und in die Kartierung aufzunehmen und für die Navigation zu nutzen. Weiter werden nicht mehr vorhandene Umgebungsmerkmale aus der Kartierung entfernt und nicht mehr für die Navigation genutzt.

Im Idealfall werden die aktualisierten Kartendaten zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht, um alle Fahrzeuge in allen Bereichen zur dynamischen Aktualisierung zu nutzen und zugleich alle Kartendaten auf allen Fahrzeugen auf aktuellem Stand zu halten.

Positiv: Durch stets aktuelle Kartendaten erreicht man eine robuste Lokalisierung und ggf. weniger Störungen bei der Lokalisierung.

Da keine bei der Erstkartierung erfassten temporären Objekte durch manuelle Nachbearbeitung gelöscht werden müssen, sinkt der Inbetriebnahme- und Wartungsaufwand.

Negativ: Es besteht ein Risiko, dass sich Ungenauigkeiten in die Lokalisierung einschleichen und erst (zu) spät erkannt werden.

Sicherheit: Die Funktion hat keine besonderen sicherheitstechnischen Aspekte.

2. Fahren auf freigegebenen Flächen ohne vorgegebene physische oder virtuelle Spuren

Zusätzlich zur physischen oder virtuellen Spurführung optionales Fahren auf freigegebenen Flächen. Das Fahrzeug kann auf diesen Flächen seine Fahrtroute eigenständig, i. d. R. unter Berücksichtigung von Regeln wie Rechtsfahrgebot, Einhalten von seitlichen Mindestabständen zu festen Einbauten, anderen Fahrzeugen, Personen etc., planen und abfahren.

Positiv: Diese Funktion sorgt für einen geringeren Inbetriebnahme-Aufwand, insbesondere bei heterogenen Fahrzeugflotten, da (Abstands-) Regeln automatisch eingehalten werden. Auch ist der laufende Aufwand bei Änderungen der freigegebenen Flächen und/oder der Anordnung von Layoutelementen (z.B. Quellen, Senken, Ladeplätze etc.) geringer.

Negativ: Wenn die freigegebene Fläche genutzt wird, wird auch der Flächenbedarf größer – im Vergleich zu geplanten festen Spuren.

Auch sollte man mit dem Vergeben der Freiflächen vorsichtig sein, da die gesamte freigegebene Fläche über die komplette Höhe des Fahrzeugs inkl. Last frei sein muss. Die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen mit zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme nicht bekannten Objekten (z.B. Dreiecksleiter, Gabelspitze, Deichsel, schwebende Last etc.) ist auf freigegebenen Flächen größer als auf vorgegebenen Spuren.

Die Vorhersagbarkeit von Fahrzeugbewegungen nimmt ab, was zu Irritationen bei den Mitarbeitern führen kann.

Sicherheit: Die freigegebenen Flächen müssen über die komplette Höhe des Fahrzeugs inkl. Last frei sein. Für die Einhaltung der Sicherheitsabstände sind Maßnahmen mit dem erforderlichen Sicherheitsniveau zumindest gemäß der Typ B-Norm DIN EN ISO 13854 umzusetzen.

3. Umfahren von Hindernissen

Eigenständiges Ausweichen vor statischen und dynamischen Hindernissen mit dem Ziel, um diese herum zu fahren. Die Hindernisse werden zumindest zweidimensional mit geeigneter Sensorik erfasst, die Umfahrung erfolgt mit eigenständiger Bahnplanung ohne vorgegebene Fahrspuren oder Ausweichbuchten.

Positiv: Störungen im Ablauf durch temporäre Hindernisse werden vermieden.

Negativ: Diese Funktion hebt den generellen Vorteil des FTS auf, als Organisationsmittel die Abläufe der Produktionslogistik zu optimieren: Der Zwang zur Sauberkeit und Ordnung (aufgeräumte Einsatzumgebung) lässt nach und die Abläufe werden chaotischer.

Die Vorhersagbarkeit von Fahrzeugbewegungen nimmt ab, was zu Irritationen bei den Mitarbeitern führen kann.

Die Gefahr von Deadlocks nimmt zu.

Sicherheit: Die bei der Hindernisumfahren benutzte Fläche muss über die komplette Höhe des Fahrzeugs inkl. Last frei sein. Das Fahrzeug muss hierbei die erforderlichen Sicherheitsabstände entsprechend der Typ B-Norm DIN EN ISO 13854 oder einer C-Norm wie der DIN EN ISO 3691-4 einhalten.

Wird beim Umfahren eines Hindernisses die Gegenfahrbahn benutzt, ist ggf. für die Reichweite der Personenerkennungseinrichtungen die Summe der Bremswege der beteiligten Fahrzeuge zu berücksichtigen (insbesondere bei heterogenen Flotten). Das Sicherheitsniveau ergibt sich aus der Risikobeurteilung. Diese muss Personenschäden, die durch die Kollision entstehen können, berücksichtigen.

Dem Betreiber obliegt die Verantwortung, organisatorische Maßnahmen zum Schutz der Mitarbeiter zu formulieren und deren Einhaltung sicherzustellen. Abhängig von der sensorischen Ausstattung der Fahrzeuge können diese Maßnahmen ggf. sehr umfangreich ausfallen.

4. Situationsbedingtes Umfahren von Hindernissen mit 3D-Umfelderfassung

Eigenständiges Ausweichen vor statischen und dynamischen Hindernissen mit dem Ziel, um diese herum zu fahren. Die 3D-Umfelderfassung deckt dabei die Kontur des Fahrzeugs einschließlich der zu transportierenden Last ab. Die Umfahrung erfolgt unter Beachtung der Fahrzeugkontur mitsamt Last sowie unter Berücksichtigung von Informationen über andere Fahrzeuge, die ggf. der momentan beabsichtigten Umfahrung entgegenstehen. Diese Informationen können von der

Leitsteuerung oder direkt von anderen Fahrzeugen zur Verfügung gestellt werden. Die Bahnplanung erfolgt dabei durch das Fahrzeug eigenständig und ohne vorgegebene Fahrspuren oder Ausweichbuchten.

Positiv: Entsprechend Nr. 3.

Die positiven Aspekte sollten durch die 3D-Umfelderfassung und dem damit möglichen intelligenteren Agieren stark verbessert werden.

Negativ: Diese Funktion hebt den generellen Vorteil des FTS auf, als Organisationsmittel die Abläufe der Produktionslogistik zu optimieren, d.h. der Zwang zur Sauberkeit und Ordnung (aufgeräumte Einsatzumgebung) lässt nach.

Die Vorhersagbarkeit von Fahrzeugbewegungen nimmt ab, was zu Irritationen bei den Mitarbeitern führen kann. Weitere Nachteile sollten bei guter Implementierung nicht auftreten.

Sicherheit: Entsprechend Nr. 3. Da die sensorische Ausstattung der Fahrzeuge hier umfangreicher als im vorigen Punkt ist, sind voraussichtlich weniger organisatorische Maßnahmen erforderlich.

5. Agieren auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung

Erkennung von unterschiedlichen Objekten (z. B. Paletten, Personen, Flurförderzeuge, Kraftfahrzeuge) und, sofern vorhanden, deren Bewegungsrichtung, sowie damit verbunden angepasstes Reagieren auf diese. Typisches Verhalten: Statische Hindernisse umfahren, auf bewegende Personen reagieren und ausweichen, z.B. von rechts kommenden Fahrzeugen die Vorfahrt gewähren, nicht aber das reine Lasthandling. Dies setzt in der Regel eine 3D-Umfelderfassung voraus. Die hierfür erforderliche Sensorik befindet sich wahlweise am Fahrzeug, ist (flächendeckend) stationär montiert oder ist eine Kombination hieraus.

Diese Funktion ist eine grundlegende autonome Funktion und kann als Voraussetzung für intelligentes Verhalten der FTF/AMR angesehen werden.

Positiv: Das Fahrzeug kann sich an seine Umgebung anpassen und angemessen reagieren. Es kommt auch mit anspruchsvolleren Umgebungen zurecht.

Negativ: Nutzt man dieses Potenzial lediglich für die Umfahrung von Hindernissen, gelten die gleichen Nachteile wie unter Pos. 3 / 4.

Sicherheit: Die Anforderungen an die Sicherheit entsprechen den Angaben in Nr. 4. mit einem der Risikobeurteilung entsprechenden Sicherheitsniveau.

6. Lasthandling auf Basis von Objekterkennung und Klassifizierung

Eigenständiges Anfahren, Aufnehmen und Abgeben von Last / Ladungsträgern durch das Fahrzeug an grob definierten Positionen, einschließlich Anpassen an die genaue Lastposition auf Basis der Erkennung der Objekte und deren Klassifizierung.

Hierzu können auch Funktionen gehören wie das eigenständige Einstellen des Lastaufnahmemittels auf die klassifizierte Last (Gabelzinken auf erkannten Ladungsträger angepasst einstellen). Die Klassifizierung der Last hinsichtlich ihrer Transportierbarkeit (Lastgewicht, Lastabmessungen/Überstände, ggf. Lastsicherung, Qualität des Ladehilfsmittels etc.) und der lastabhängigen Auswahl der Personenschutzfelder setzt eine speziell dafür geeignete Sensorlösung voraus. Bei sicherheitsrelevanten Funktionen muss diese Lösung den dafür erforderlichen Performance-Level gemäß Maschinenrichtlinie erreichen. Auch hier kann diese Sensorik wahlweise am Fahrzeug oder stationär montiert sein.

Positiv: Diese Funktion ist die Basis für mehr Fehlertoleranz beim Lasthandling: Die Lastbereitstellung vereinfacht sich dadurch deutlich. Bei der manuellen Bereitstellung (z.B. mit Gabelhubwagen/Stapler...) muss die Ladeinheit nicht mehr so genau positioniert werden. Bei der automatischen Bereitstellung (z.B. Rollen-/Kettenförderer...) unterschiedlicher, ggf. auch verschieden breiter Ladeinheiten, können Zentriervorrichtungen entfallen.

Die Störanfälligkeit sinkt, und die Verfügbarkeit steigt.

Negativ: Fahrzeuge brauchen ggf. mehr Platz zum Rangieren vor ungenau bereitgestellten Ladeeinheiten.

Sicherheit: Die sicherheitsrelevanten Anforderungen werden anspruchsvoller.

Das Fahrzeug hat bei der Annäherung an Lasthandling-Positionen die erforderlichen Sicherheitsabstände einzuhalten. Unterschreitet es die Sicherheitsabstände, sind zusätzliche Maßnahmen mit dem entsprechenden Sicherheitsniveau umzusetzen.

Achtung: Ggf. ist die Umschaltung von Schutzfeldern aufgrund unterschiedlicher Ladeinheiten mit dem entsprechenden Sicherheitsniveau umzusetzen.

Bei der Planung und Inbetriebnahme ist der Fokus auf die technischen Schutzeinrichtungen (z.B. Sicherheitslichtvorhang, Zäune, Stehverhinderer...) zu legen. Weiterhin sind organisatorische Schutzmaßnahmen (z.B. Bodenmarkierung, Beschilderung, Mitarbeiterunterweisung...) zu ergreifen.

7. Situationsbedingtes Umplanen von Routen im Mischbetrieb

Dynamische Routenplanung für die gesamte FTF-/AMR-Flotte unter Berücksichtigung der anderen Flurförderzeuge und Verkehrsteilnehmer. Berücksichtigt werden die aktuellen Verkehrsverhältnisse und/oder die Systemauslastung sowie das aktive Reagieren auf Verkehrsstörungen durch die eigene Flotte, andere Verkehrsteilnehmer oder durch sonstige Objekte.

Hier wird vorausgesetzt, dass die Automatikfunktion „Situationsbedingtes Umplanen von Routen durch das System (Dynamic Routing)“ vorhanden ist.

Hinweis: die Wirksamkeit der Funktion ist abhängig von der Qualität der Daten, insbesondere der Ortungsinformationen.

Positiv: Bei einer Behinderung/Störung auf der geplanten Route zum Zielpunkt können Transportaufträge dennoch erledigt werden.

Negativ: Der Zeitzuschlag für die Alternativroute kann ggf. länger dauern als die durch die Behinderung verursachte längere Fahrzeit auf der ursprünglichen Strecke. Es besteht das Risiko, dass die Funktion von den Mitarbeitern missbräuchlich benutzt wird, indem sie z.B. Hindernisse im Fahrweg zur Regel machen und/oder nicht zeitnah beseitigen.

Eine genaue Planbarkeit der Transportaufträge hinsichtlich der Durchführungszeit pro Auftrag ist nicht mehr möglich. Genau geplante Abläufe mit dem Ziel einer exakten bedarfsgerechten Anlieferung werden erschwert.

Sicherheit: Es sind keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich, solange das Wegenetz nur aus geeigneten Routen besteht.

8. Verkehrsregelung unter Berücksichtigung des Mischbetriebs

Verkehrsregelung, die auf Regeln (allgemeine, temporäre oder räumlich begrenzte) oder Zeichen (Verkehrsschilder, Ampeln) basiert und die nicht nur die eigene FTF-/AMR-Flotte berücksichtigt, sondern auch den Mischverkehr aus Flurförderzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern.

Hier wird vorausgesetzt, dass die Automatikfunktion „Situationsbedingte Verkehrsregelung“ vorhanden ist.

Positiv: Es kann ein höherer Durchsatz des Gesamtsystems erreicht werden.

Negativ: Es wird eine umfangreiche Sensorik und Software zur Erfassung der Umgebung und Klassifizierung benötigt, um ein gutes Ergebnis zu erreichen. Das bedeutet einen hohen Realisierungsaufwand (Kosten).

Sicherheit: Genauso wie bei der Automatikfunktion "Situationsbedingte Verkehrsregelung" muss die Risikobeurteilung Personenschäden, die durch eine Kollision entstehen können, berücksichtigen.

9. Selbstständiges Erkennen und Reagieren auf Fahrzeugzustandsdaten ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebes

Fahrzeuge werten Zustandsdaten aus (z.B. schwergängige Antriebe, stark erhöhter Schlupf, keine ausreichend genaue Lokalisierung, Probleme der Energieversorgung, ...) und reagieren situationsabhängig auf unvorhergesehene Zustände. Sie versuchen beispielsweise selbstständig, sich aus dem Verkehrsfluss und aus dem System herauszunehmen, ggf. mit reduzierter Geschwindigkeit, um für den Rest der Flotte kein Hindernis darzustellen.

Positiv: Es kann ein höherer Durchsatz für die verbliebenen Fahrzeuge erreicht werden.

Negativ: Damit das möglich ist, sind zusätzliche Sensoren samt intelligenter Auswertung im Fahrzeug erforderlich.

Sicherheit: Es sind keine zusätzlichen Sicherheitsanforderungen gegenüber dem Normalbetrieb erforderlich.

10. Teilweises oder komplettes Verlagern von Leitsteuerungsfunktionen auf die Fahrzeugseite

Gemeint ist hiermit bei einer Flotte von zwei oder mehr Fahrzeugen die Auslagerung von Entscheidungsaufgaben an die Fahrzeuge unter Verzicht auf zentrale Leitsteuerungsfunktionen. Beispiele für derartige Entscheidungsaufgaben sind die Verteilung von Transportaufträgen an einzelne Fahrzeuge (vollständiger Verzicht auf eine Leitsteuerung) oder die Regelung des Verkehrs in einzelnen Verkehrsbereichen wie Kreuzungen und Einmündungen oder an Übergabestationen (ohne Einbeziehung der Leitsteuerung). Hierbei können Multiagentensysteme oder dezentrale Verhandlungsstrategien zum Einsatz kommen. Zwingende Voraussetzung für derartige dezentrale Entscheidungsaufgaben ist ein leistungsfähiges (breitbandiges, schnelles, latenzarmes) und flächendeckend vorhandenes Funkkommunikationssystem.

Ein Sonderfall ist die gemeinsame Ausführung von speziellen Aufgaben, wie der Transport von Lasten, die vom Gewicht und/oder den Abmessungen her nicht von einem Fahrzeug allein ausgeführt werden können. Hierbei bilden zwei oder mehr Fahrzeuge physisch durch Ankoppeln oder virtuell durch softwareseitige Synchronisierung einen entsprechenden Verbund, der den Transport der Last bewältigen kann. Nach Abschluss der Aufgabe löst sich der Verbund eigenständig wieder auf.

Positiv: Durch die Verteilung der Funktion auf mehrere Rechner wird eine höhere Resilienz erreicht.

Negativ: Jedes Fahrzeug benötigt einen entsprechend leistungsfähigen Rechner, und es ist ein leistungsfähiges Funkkommunikationssystem erforderlich. Beides führt ggf. zu höheren Kosten.

Sicherheit: Es ist zu prüfen, ob durch die Verlagerung ein sicherheits-technischer Zusammenhang entsteht. Trifft dies zu, dann ergibt sich die Notwendigkeit einer CE-Zertifizierung nicht nur für

die einzelnen Fahrzeuge, sondern für das komplette System (s. VDI Statusreport Technik – FTS-Leitfaden Sicherheit für Planer).

Im Falle eines Fahrzeugverbundes besteht unabhängig der Verlagerung von Leitsteuerungsfunktionen immer ein sogenannter sicherheitstechnischer Zusammenhang.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der VDI-Fachausschuss FTS veröffentlicht diesen Leitfaden in der Hoffnung, den Umgang mit der modernen Begriffswelt des FTS/AMR zu erleichtern. Es soll ein neutrales, praktikables und aussagekräftiges Hilfsmittel zur Verfügung gestellt werden, mit dem angebotene/beschriebene FTS/AMR-Lösungen hinsichtlich der Autonomie bewertet werden können. Das beigefügte Excel-Tool² erfüllt diese Anforderungen. Es liegt in zwei Varianten vor, nämlich einmal eine Eingabe-optimierte Fassung, die Makros verwendet und andererseits eine einfache Fassung ohne Verwendung von Makros.

Den Autoren dieses Leitfadens ist klar, dass nicht alle Leser/Nutzer allen Ausführungen zustimmen werden. Auch wenn hier versucht wurde, unvoreingenommen, neutral und kompetent zu arbeiten, ist eine weiterführende Diskussion beabsichtigt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass es in unregelmäßigen Abständen neue, verbesserte Versionen des Textes sowie des Excel-Tools geben wird. Diskussionsbeiträge können per E-Mail gerichtet werden an: vdi@forum-fts.com

7 Abkürzungen und Begriffe

AGV	Automated Guided Vehicle
AGVS	Automated Guided Vehicle System
AMR	Autonomous Mobile Robot
Durchsatz	Transportleistung x Verfügbarkeit
FF	Forum-FTS (www.forum-fts.com)
FFZ	Flurförderzeug
FT	Fördertechnik
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
IGV	Intelligent Guided Vehicle
LAM	Lastaufnahmemittel (fahrzeugseitig)
LE	Ladeinheit
LHM	Ladehilfsmittel (lastseitig)
MR	Mobile Robot
STR	Smart Transport Robot
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (www.vdi.de)

² Die beiden Versionen des Excel-Tools heißen vdi-fts-amr-autonomie_Dez-2021_v100.xlsx und vdi-fa-fts-amr-autonomie-makro_Dez-2021_v100.xlsm. Die Dateien stehen zur kostenlosen Nutzung zur Verfügung, die Rechte liegen beim VDI Fachausschuss FA 309; eigenmächtige Änderungen sind nicht gestattet.