

*Simulation in Produktion und Logistik 2023*  
*Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)*  
*Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023*  
*DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476*

# Herausforderungen für die Projektierung von Mobilen Robotern (FTS und AMR)

## *Challenges for Deploying Mobile Robots (AGV and AMR)*

Maximilian Dilefeld, DUALIS GmbH IT Solution, Dresden (Germany),  
mdilefeld@dualis-it.de / TU Dresden, Dresden (Germany),  
maximilian.dilefeld1@tu-dresden.de

**Abstract:** This paper elaborates the importance of extensive planning when deploying complex intralogistics systems involving Automated Guided Vehicles (AGV) and Autonomous Mobile Robots (AMR). The deployment for such a system is divided into different planning phases. Requirements for the tools which can be used in relation to the objectives in the respective phases are pointed out. An overview for different types of planning tools is given. Important challenges for a realistic implementation of AGVs and AMRs in (3D)-simulation and how they can be overcome is discussed in additional detail in relation to a simulation library developed for Visual Components. A virtual commissioning approach for connecting the real Fleet Manager and other software services that implement material flow logic is presented as a promising approach for Mobile Robot planning.

## 1 Motivation

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) haben sich seit ihrer Erfindung in den 1950er Jahren zu einem wichtigen Bestandteil der Intralogistik etabliert (Ullrich und Albrecht, 2019). Als wichtiges Werkzeug in automatisierten Transport- und Lagerkonzepten ist in den letzten Jahren eine gesteigerte Nachfrage für FTS zu beobachten (Schmid und Wilke, 2022). Als wichtigster Vorteil für den Einsatz von FTS wird immer wieder die Flexibilität des Systems genannt. Autonome Mobile Roboter (AMR) als Weiterentwicklung dieser Systeme in Hinblick auf Sensorik und Steuerung spielen hierfür eine wichtige Rolle und ermöglichen vielseitige Einsatzzwecke, die über den reinen Transport hinausgehen (Siegwart et al., 2011). Die Vielseitigkeit der am Markt verfügbaren Lösungen sowie die Anpassungsfähigkeit an sich dynamisch ändernde Bedingungen im Fabriklayout sind mit Schwierigkeiten in der korrekten Vorhersage des Systemverhaltens in den verschiedenen Planungsphasen verbunden.

## 2 Beschreibung

### 2.1 Planungsprozess

Die Umsetzung eines Projekts mit Mobilern Robotern kann in vier Phasen eingeteilt werden (Abbildung 1), welche unterschiedliche Anforderungen an zu nutzende Planungswerkzeuge stellen.

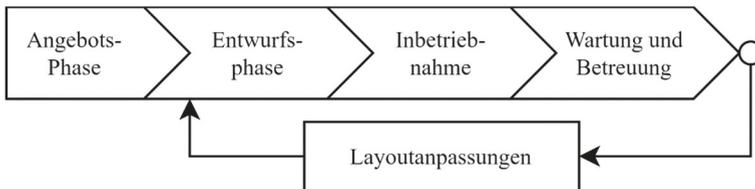


Abbildung 1: Planungsphasen für Anwendungen mit Mobilern Robotern

- In der *Konzeptionsphase* liegt ein besonderer Fokus auf der Effizienz der eingesetzten Planungswerkzeuge. Die investierten Aufwände sind so gering wie möglich zu halten. Eine verlässliche Ermittlung der Anzahl der benötigten Fahrzeuge, Stationen und des Zubehörs sind ausschlaggebend für eine korrekte Berechnung der Investitionskosten. Eine Visualisierung des Transportkonzepts kann einen entscheidenden Vorteil in der Diskussion mit dem Projektbeteiligten bieten, insbesondere bei fehlender Erfahrung des Endkunden mit Mobile Robotern.
- Die *Entwurfsphase* verlangt einen höheren Detailgrad. Das Layout wird anhand der verfügbaren Freiheitsgrade (z.B. Positionierung der Stationen, Anpassung der Regelsätze) optimiert. An die Kundenanforderungen angepasste Steuerungsstrategien müssen formuliert und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet werden.
- Die *Inbetriebnahme* bezieht sich sowohl auf die Hardware als auch die Softwaresysteme zur Steuerung des Materialflusses. Das zuvor erarbeitete Steuerungskonzept muss konfiguriert und anteilig implementiert werden. Neuentwicklungen müssen vor der Überführung in ein Produktivsystem validiert werden.
- In der Phase *Wartung und Betreuung* kann die Visualisierung des Systemzustands inkl. Fehlerzuständen einen Mehrwert für Betreiber und Hersteller bieten. Eine vorausschauende Instandhaltung basierend auf Rückmeldungen von der realen Anlage stellen einen weiteren möglichen Anwendungsfall dar.

Ein wesentlicher Vorteil für den Einsatz von Mobilern Robotern stellt die Möglichkeit dar, das Transportsystem kontinuierlich zu verbessern und an sich veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Dies ist in Form von Erweiterungen sowie reinen Softwareanpassungen möglich, welche weiteren Planungsbedarf erzeugen.

### 2.2 Planungswerkzeuge

Die Werkzeuge für den Planungsprozess lassen sich hinsichtlich ihrer Komplexität in vier Hierarchiestufen unterteilen:

- Der *statische Entwurfsansatz* nutzt klassische Berechnungsprogramme, um die benötigte Fahrzeug- und Stationsanzahl zu ermitteln. Wiederverwendbare Vorlagen ermöglichen eine schnelle Lösung ohne spezielle Softwarekenntnisse.

- Als Bestandteil der realen Flottenmanager-Software zur Steuerung der Fahrzeuge bieten einige Anbieter (z.B. Omron, BlueBotics) eine *integrierte Simulation* an. Die reale Steuerungskomponente und dynamisches Fahrzeugverhalten versprechen eine verbesserte Planungsqualität auch für größere Flotten.
- Die *Fabriksimulation* stellt einen holistischen Betrachtungsansatz dar. Dynamische und externe Faktoren werden berücksichtigt. Eine realistische Abbildung von Steuerungslogik und Fahrzeugverhalten ist möglich und Voraussetzung für ein aussagekräftiges Planungsergebnis. Der herstellerunabhängige Ansatz ermöglicht eine Abbildung umfangreicher Systeme mit verschiedenen Fahrzeug-Herstellern und -Typen. Visualisierungsmöglichkeiten von 3D-Simulationsplattformen bieten einen zusätzlichen Vorteil für die Kommunikation mit Projektbeteiligten.
- In einer *virtuellen Inbetriebnahme* (VIBN) werden reale Steuerungsbausteine (z.B. SPS- und Roboterprogramme, Lagerverwaltungssteuerung, Flottenmanager) mit einem digitalen Zwilling verbunden mit dem Ziel, Fehler früher zu erkennen und vor der realen Inbetriebnahme zu beheben (Hoffmann et al. 2010). Eine doppelte Implementierung von Logikbausteinen entfällt, da Änderungen direkt im angebotenen System erfolgen. Das Einbinden realer Steuerungskomponenten ermöglicht eine verglichen mit emulierter Logik verbesserte Planungssicherheit.

Der statische Entwurfsansatz vernachlässigt dynamische Aspekte (z.B. Ladeverhalten, Fahrzeugbegegnungen, schwankende Auftragslage). Ebenso werden, wie auch in der integrierten Simulation in der Flottenmanager-Software, externe Faktoren (z.B. Prozesslogik, Produktionsplan, andere Ressourcen) nicht abgebildet. Verfügbarkeit und Qualität einer integrierten Simulation hängen von der Implementierung des Herstellers ab. Der gemeinsame Einsatz von Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller stellt eine weitere Herausforderung dar (Aloui et al. 2022). Aus den genannten Gründen können diese Werkzeuge große oder steuerungstechnisch komplexe Anlagen nicht oder nur bedingt abbilden.

Die Fabriksimulation besitzt aufgrund des ganzheitlichen Betrachtungsansatzes ein großes Potential als einheitliches Tool für möglichst viele Planungsstufen. Die Implementierung von Mobilen Robotern in den etablierten Simulatoren erweist sich in der Praxis häufig als zu oberflächlich und liefert nicht die erwartete Ergebnisqualität. Notwendige Softwareschulungen, die zeitaufwendige Modellbildung und die umständliche Implementierung von kundenspezifischen Anforderungen im digitalen Modell sowie deren Überführung in das reale System erschweren die Nutzung der Technologie in der Praxis. Der folgende Teil dieses Papers beschäftigt sich mit Anforderungen und möglichen Lösungsansätzen, welche sich aus den genannten Problemen ergeben.

Im Gegensatz zur etablierten VIBN von SPS- und Roboterprogrammen ist eine VIBN des Flottenmanagers kein übliches Werkzeug im Planungsprozess. Die Struktur übergeordneter Steuerungen liegt deutlich näher an der üblichen Funktionsweise von Simulationsmodellen, was verglichen mit SPS- und Roboterprogrammen die Modellbildung des digitalen Zwillings vereinfacht. Wir sehen in der VIBN großes Potential als ergänzendes Werkzeug für die Projektierung von Mobilen Robotern ab einem Projektzeitpunkt, in welchem die realen Steuerungssysteme zur Verfügung stehen.

Neben Schulungsaufwand und zeitaufwändiger Modellbildung besteht die größte Herausforderung in der Kopplung des digitalen Zwillings mit der realen Steuerungskomponente. Die in den letzten Jahren entwickelte VDA5050 Norm stellt eine Bemühung dar, die Kommunikation zwischen Mobilen Robotern und der Leitsteuerung zu

standardisieren. In Bezug auf die Anbindung einer Simulation als digitalen Zwillings sind dagegen noch keine konkreten Kommunikationsschnittstellen verfügbar. Ein wichtiger Bestandteil des vorgestellten Lösungsansatzes ist ein universelles Modell für Fabriksimulation und VIBN. Hierzu soll der Aufbau des Flottenmanagers in der Simulation möglichst nah am realen System gehalten und emulierte Logik durch die Anbindung der realen Steuerungskomponenten überbrückt werden.

### 2.3 Anforderungen an die Simulation von Mobilien Robotern

In Zusammenarbeit mit Herstellern, Planern und Anwendern wurde auf Basis von Beispielprojekten aus der Praxis ein Anforderungskatalog ausgearbeitet. Die konkreten Punkte können in folgende Bereiche unterteilt werden:

- *Planungsproblematik*: Für die Verwaltung von Fahrzeugen werden Planungsprobleme vom Flottenmanager und anderen Softwaresystemen gelöst. Um einen korrekten Ablauf zu simulieren, müssen Entscheidungen wie im realen System getroffen werden. Um die optimale Steuerungskonfiguration in der Entwurfsphase ermitteln zu können, muss das System flexibel gestaltet werden, um Strategien gegeneinander testen zu können. Ein Konzept für die Implementierung und Validierung von projektspezifischen Zusatzregeln ist notwendig.
- *Variantenreichtum*: Mobile Roboter eignen sich für den Transport verschiedenster Güter und weitere Anwendungsfälle, die über den Produkttransport hinausgehen. Dies zeigt sich auch in einer großen Varianten- und Herstellervielfalt. Parallel eingesetzte Fahrzeuge und Steuerungen müssen gemeinsam simuliert werden.
- *Detailgrad und Genauigkeit*: Ein wesentlicher Kritikpunkt an etablierten Lösungen ist die Genauigkeit der Ergebnisse. Für eine korrekte Ermittlung der Transportzeiten müssen Navigation und Bewegungsverhalten der Fahrzeuge, insbesondere das Verhalten bei Fahrzeugbegegnungen, realistischer modelliert werden. Ein generischer Ansatz birgt in Anbetracht der Variantenvielfalt das Risiko, Besonderheiten unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte zu stark zu vereinfachen.
- *Bedienkonzept*: Ein möglichst intuitives Bedienkonzept sollte immer Ziel der Softwareentwicklung sein. Eine Erhöhung des Detailgrads und des Variantenreichtums in Verbindung mit einer steigenden Anzahl von Konfigurationsparametern stellt eine besondere Herausforderung dar. Bei den potenziellen Nutzergruppen ist anzunehmen, dass in der Regel keine Programmierkenntnisse beim Bediener vorhanden sind. Anpassungen sollten daher über Konfigurationsparameter und Editoren im grafischen User Interface und nicht im Programmcode erfolgen.
- *Auswertung und Statistiken*: Zur Bewertung simulierter Systeme sowie dem Vergleich von Varianten müssen typische KPIs bereitgestellt werden. Dies schließt die Auswertung der Fahrzeuge (z.B. Auslastung, Anzahl der Transporte), das Netzwerk (z.B. Nutzungsgrad, Stauverhalten / Heatmap), Quelle-Senke-Beziehungen (z.B. Transportdauer, Zykluszeiten), aber auch externe Faktoren wie Prozesse und Puffer ein. Der Nutzer sollte die Möglichkeit haben, diese Kennzahlen mit möglichst geringem Aufwand zu erfassen. Der Vergleich von Varianten ist eine wesentliche Anforderung.

### 2.4 Umsetzung

Im Rahmen eines Entwicklungsprojekts wurde eine erweiterte Bibliothek zur Simulation von Mobilien Robotern mit der 3D-Simulationsplattform Visual Components

modelliert. Die entwickelten Modelle werden von der DUALIS GmbH IT Solution vertrieben und bereits von einigen Praxispartnern aktiv für die Planung eingesetzt.

### 2.4.1 Steuerung

Im realen System sind verschiedene Softwaretechnologien an der Steuerung von Mobilen Robotern beteiligt (z.B. MES, Flottenmanager). Die Anzahl der Steuerungskomponenten, die Zuständigkeit sowie deren Vernetzung untereinander variiert in der Praxis. Ullrich und Albrecht (2019) unterteilen die Planungsbereiche einer zentralen Leitsteuerung für FTS in Materialflusssteuerung, Transportauftragsverwaltung, Fahrzeugdisposition und Fahrauftragsabwicklung (Abbildung 2) und beschreiben die Aufgaben der Teilbereiche. Auch autonomer agierende AMRs nutzen in der Praxis eine vergleichbare zentrale Steuerung. Zusätzlich können durch diese Systeme auch Aufträge bearbeiten, die über den reinen Produkttransport hinausgehen. Für diese Aufgaben entfällt der Planungsschritt der Materialflusssteuerung. Die Verwaltung und Vergabe der Aufträge unterscheidet sich nicht von Transporttätigkeiten.

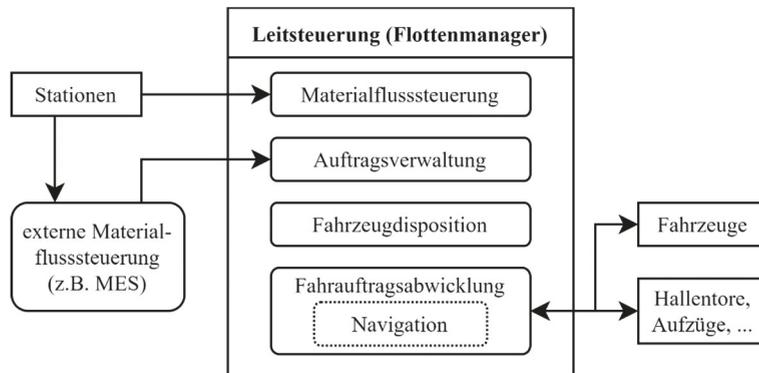


Abbildung 2: Planungsbereiche einer zentralen Leitsteuerung

In der Simulation werden die verschiedenen Planungsprobleme in einer zentralen Controller-Komponente implementiert, welche die Funktionsweise eines realen Flottenmanagers emuliert. Der interne Aufbau des Controllers in der Simulation entspricht dem vorgestellten Aufbau. Dies ermöglicht eine realistische Abarbeitung und den Austausch emulierter Logik mit realen Steuerungskomponenten in der VIBN.

Der implementierte Flottenmanager kann Anforderungen direkt von den Stationen oder bereits zusammengestellte Transportaufträge von der im Simulationstool integrierten Materialflusssteuerung entgegennehmen. Auch eine Anbindung an eine reale Materialflusssteuerung (z.B. MES) ist möglich. Die Implementierung einer eigenen Materialflusssteuerung bietet dem Nutzer mehr Möglichkeiten, Einfluss auf das Herstellen von Quelle-Senke-Beziehungen für die Erzeugung von Transportaufträgen zu nehmen. Übliche Strategien stellen das FIFO-Prinzip, kürzeste Distanz oder manuell festgelegter Prioritäten dar. Weiterhin können auch Abläufe umgesetzt werden, in denen Transportgüter ohne konkreten Bedarf aufgenommen werden.

Zahlreiche vom Nutzer konfigurierte Bedingungen bestimmen, welche Fahrzeuge für die Ausführung eines Auftrags in Frage kommen. Dazu zählen welche Produkttypen und wie viele gleichzeitig ein Mobiler Roboter transportieren kann. Aufträge können

direkt an einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen zugewiesen werden. Dynamische Faktoren, wie der aktuelle Ladezustand oder die Auftragswarteschlange, deren maximale Länge durch den Nutzer konfiguriert werden kann, werden berücksichtigt. Auch wird vor der Zuordnung geprüft, ob die Ziele durch das jeweilige Fahrzeug erreichbar sind.

Die Entscheidungslogik des Flottenmanagers zum Umgang mit entgegengenommenen Aufträgen kann der Nutzer durch die Auswahl verschiedener Strategien beeinflussen. Kriterien für die Sortierung der Auftragswarteschlange sind vom Nutzer festgelegte Prioritäten sowie das Alter (Erstellungszeitpunkt) des Auftrags. Kriterien für die Auswahl des besten Fahrzeugs sind die Entfernung des Mobilens Roboters vom Ziel sowie die Anzahl bzw. prognostizierte Dauer von weiteren Aufgaben, die sich bereits in der Warteschlange des jeweiligen Fahrzeugs befinden.

Der relevanteste Unterschied zwischen FTS und AMRs besteht in der Navigation und Verkehrssteuerung, welche bei klassischen FTS Bestandteil der Fahrauftragsabwicklung ist (Ullrich & Albrecht, 2019). Für die Navigation von AMRs existieren unterschiedliche Ansätze, in welchen unterschiedliche Algorithmen angewendet werden, wie klassische regelbasierte Entscheidungssysteme, evolutionäre Algorithmen (Dang & Nguyen 2016), k-Means-Algorithmus (Elango et al. 2011) und neuronale Fuzzy-Systeme (Al-Aubidy et al. 2015). Dezentrale Systeme besitzen Zugriff auf Karteninformationen zur Streckenberechnung und führen die Navigation auf niedrigstem Level selbstständig durch. Die Mobilens Roboter kommunizieren untereinander und nutzen Sensoren, um Hindernisse zu erkennen. Auch diese autonomen Systeme nutzen die übergeordnete Verkehrssteuerung im Flottenmanager, um Einschränkungen umzusetzen und Deadlocks zu vermeiden (Souto et al. 2021). Für die Simulation spielt es eine untergeordnete Rolle, ob das Verhalten zum Erkennen und Vermeiden von Fahrzeugbegegnungen im Fahrzeug oder in der übergeordneten Steuerung implementiert ist. Wichtig ist, dass Einschränkungen des jeweiligen realen Systems korrekt berücksichtigt werden. Dies betrifft insbesondere, ob und wie Fahrzeugbegegnungen bereits in vorausschauender Weise bei der Zusammenstellung der Fahrstrecke berücksichtigt werden können oder erst bei tatsächlicher Begegnung mögliche Alternativstrecken geprüft werden.

### 2.4.2 *Missionsmanagement*

Um projektspezifische Regeln und Abläufe einfacher modellieren zu können, wurde das manuelle Missions-Management für die Mobilens Roboter entwickelt. Für einzelne Fahrzeuge können mehrere Missionen konfiguriert werden. Der Start einer Mission ist an eine beliebige Anzahl von Bedingungen geknüpft (z.B. Verfügbarkeit oder Bedarf eines bestimmten Transportguts, Ladezustand, Eigenschafts- oder Signalwert eines beliebigen Simulationsobjekts). Pro Fahrzeug kann nur eine Mission aktiv sein. Die Auswahl der nächsten Mission erfolgt auf Basis manuell festgelegter Prioritäten. Eine Mission besteht aus beliebig vielen sequenziell ausgeführten Aufgaben (z.B. Produktaufnahme, Produktabgabe, reiner Fahrbefehl, Ladevorgang) und Kontrollstrukturen (z.B. if-Anweisungen, while-Schleifen, auf Signaleingang warten). Auf diese Weise lassen sich sowohl eine festgelegte Reihenfolge von Stationen abfahren (Routenzug) als auch anwendungsspezifische Entscheidungslogiken implementieren.

Durch die Nutzung eines Editors (Abbildung 3) für die Konfiguration von Missionen werden für den Bediener keine Programmierkenntnisse vorausgesetzt. Der Missionsfortschritt durch einen grünen Punkt auf der rechten Seite des Editors visualisiert.

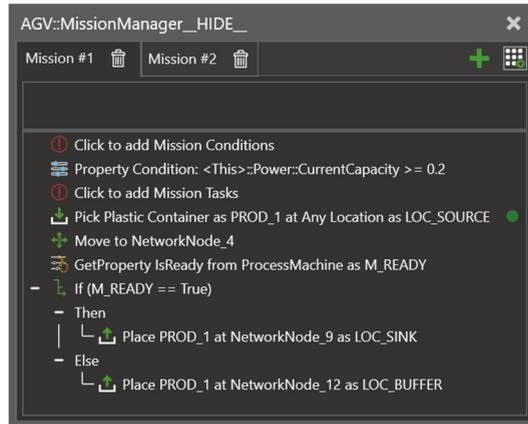


Abbildung 3: Nutzerinterface für den Missionsmanager für einen Mobilen Roboter

### 2.4.3 Fahrzeuge

Bei der Bibliotheksentwicklung wurden Besonderheiten der zu simulierenden Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Fortbewegungsart sowie beweglicher Achsen für die Produktaufnahme berücksichtigt. Beispielsweise müssen für eine korrekte Abbildung von Staplerfahrzeugen der Gabelhub sowie die korrekte Anfahrt an die Prozesse (Fahrt mit Gabel nach hinten, kollisionsfreie Drehung am Ziel) berücksichtigt werden. Die Fahrweise der Mobilen Roboter (z.B. omnidirektionales Fahrwerk, Lastaufnahme entgegen Fahrtrichtung) und die Anfahrt an einen Prozess kann durch den Nutzer konfiguriert werden und ist unabhängig von den konkreten Fahrzeug-Modellen implementiert, um Kombinationen ermöglichen. Die Unterstützung verschiedener Bewegungsarten stellt weiterhin Anforderungen an die Definition von Fahrwegen im Simulationsmodell, insbesondere bei Fahrtrichtungswechseln. Für ein Staplerfahrzeug, welches sich mit der Lastaufnahme entgegen der Fahrtrichtung bewegt, muss definiert werden, an welcher Position Drehbewegungen durchgeführt und auf welche Höhe die Gabel gehoben werden soll.

Eine weitere Besonderheit stellt die Simulation von Anhängern dar. Das Be- und Entladen von Ladungsträgern kann direkt auf einen am Fahrzeug angebrachten Anhänger durchgeführt werden. Auch das An- und Abkoppeln von fertig beladenen Anhängern an den Quellen und Senken ist denkbar. Eine entsprechende Funktionserweiterung befindet sich noch in der Planung.

Das Erkennen von Hindernissen erfolgt in der Praxis meist über am Fahrzeug angebrachte Sensoren. Es wurde eine Funktion zur Simulation dieser Scanfelder implementiert, welche die Geschwindigkeit des Fahrzeuges reduzieren bzw. dieses komplett stoppen, wenn ein Hindernis innerhalb des definierten Bereichs erkannt wird. Die aktiven Scanfelder unterscheiden sich je nach Situation (z.B. beladener / unbeladener Zustand, Kurvenfahrt, Rückwärtsfahrt). Die explizite Simulation der Sensorik ist mit Nachteilen bezüglich Performance und Modellierungsaufwand verbunden, da in diesem Modus wie im realen System Deadlocks entstehen können. Diese Situationen müssen über die Definition von Regeln zur Verkehrssteuerung vermieden oder über entsprechende Umfahrungs- und Ausweichstrategien gelöst werden. Durch die detailliertere Simulation dieses Verhaltens lassen sich zusätzliche Erkenntnisse über

Regeln gewinnen, welche auf das reale System übertragen werden können. Um Mehraufwand für die Modellbildung insbesondere in frühen Projektphasen zu vermeiden, kann alternativ ein vereinfachter rein kapazitätsbasierter Ansatz ausgewählt werden. Bei dieser Abstraktion ist darauf zu achten, dass das Simulationsergebnis im Vergleich zur Realität keine bessere Leistung implizieren darf, als das System leisten kann. Vereinfachungen sollten daher pessimistische Annahmen treffen.

Übliche Funktionen wurden aus dem Standardumfang der Simulationssoftware übernommen und teilweise verbessert. Der Strombedarf der Mobilen Roboter wird anhand von verschiedenen Zuständen definiert (z.B. Fahrt mit / ohne Produkt, Achshub, Idle-Zustand), um den Ladezustand des Akkus zu simulieren. Dabei können Ladevorgänge sowohl an dedizierten Ladestationen als auch induktiv am Prozess simuliert und über verschiedene Regeln angesteuert werden. Die Anzahl und Positionierung der verschiedenen Transportgüter, welche ein Mobiler Roboter zeitgleich aufnehmen kann, wird durch den Nutzer angegeben. Die Fahrgeschwindigkeit wird für verschiedene Zustände definiert (z.B. Fahrt mit / ohne Produkt, Kurvenfahrt, Rotationsgeschwindigkeit) und kann durch externe Faktoren beeinflusst werden (z.B. Scanfelder, manuelle Geschwindigkeitsbegrenzung für bestimmte Streckenbereiche).

#### 2.4.4 Fahrwege

Fahrwege werden als klassisches Netzwerk aus Knoten und Kanten konfiguriert. Die Netzwerkknoten können verschiedene Funktionen erhalten (z.B. Lade- und Idle-Positionen, Produktaufnahme und -abgabe an Prozessen). Die Verbindungen zwischen den Knoten können anhand unterschiedlicher Kriterien eingeschränkt werden (z.B. Fahrtrichtung, maximale Geschwindigkeit, Freigabe nur für bestimmte Fahrzeuge / Produkte / Zielknoten). Verbindungen können Geraden oder Kurven sein.

Dieser Ansatz bietet in der Konfiguration deutliche Vorteile. Das Prinzip eines Netzwerks ist den meisten Nutzern vertraut und Fahrwege können schnell erfasst werden. Der Bediener erhält volle Kontrolle über Fahrbahnen und kann Einschränkungen durch Selektion der Verbindungen und Knoten konfigurieren. Die Erzeugung neuer Knoten und Verbindungen erfolgt über einen Editor. Eine weitere Reduzierung des Modellierungsaufwandes in Bezug auf Fahrstrecken durch Optimierung des Editors und automatische Netzwerkgenerierung sind wesentliche Ziele für die zukünftige Entwicklung.

Der Aufbau der Fahrstrecken entspricht weitestgehend der Funktionsweise klassischer spurgeführter FTS. Für die Navigation vom AMRs muss im realen System zunächst eine Karte aus rauschbelasteten und unsicheren Sensormessdaten erstellt werden. Die darauf aufbauenden Algorithmen zur Bahnplanung sind vielseitig, wobei die Nutzung von Graph Datenbanken einen praxisüblichen Lösungsansatz darstellt (Sariff & Buniyamin, 2003). Somit kann für die Ermittlung von Fahrstrecken in der Simulation der Ansatz für FTS grundlegend auch auf AMRs übertragen werden. Die Ermittlung der Kartendaten unter Berücksichtigung von Hindernissen analog zum realen System ist in der Simulation möglich, setzt jedoch voraus, dass Hindernisse als Objekte in das Simulationsmodell inkludiert werden. Für AMRs sollen verfügbare Fahrstrecken ebenfalls manuell als Netzwerk konfiguriert werden können. Im Gegensatz zu klassischen FTS sollten AMRs das definierte Netzwerk jedoch als Leitlinie interpretieren, von welcher unter Berücksichtigung tatsächlicher verfügbarer Fahrbreiten auch abgewichen werden kann.

### 2.4.5 Auswertung & Statistiken

Für die Auswertung von Systemen mit Mobilen Robotern werden zusätzliche KPIs bereitgestellt. Für die Auswertung der Fahrstrecken werden die Häufigkeit, Dauer und Zykluszeit für das Befahren einer Netzwerkverbindung sowie die Wartezeit aufgrund von anderen Ressourcen erfasst. Genutzte Routen werden aufgezeichnet und können ausgewertet werden. KPIs für den Mobilen Roboter selbst (z.B. prozentuale Verteilung der Zustände, Auslastung, zurückgelegte Distanz, Anzahl der Transporte) gehören zum Standardumfang des genutzten Simulationstools. Ein wichtiges Argument für den Einsatz von Fabriksimulation ist der holistische Betrachtungsansatz. Daher sollten auch Objekte, mit welchen die Mobilen Roboter interagieren (insb. Stationen, Prozesspunkte, Puffer, andere Ressourcen), in die Auswertung einbezogen werden.

Um die Auswertung und den Vergleich von Layoutvarianten zu vereinfachen, wurde ein Reporting-Modul entwickelt, welches automatisiert Kennzahlen erfasst und in einen standardisierten Excel-Report exportiert. Dieses Werkzeug lässt sich für alle mit Visual Components erstellten Simulationsmodelle anwenden und wurde für die Auswertung von Mobilen Robotern um die zuvor genannten KPIs erweitert.

## 3 Ergebnisse

Die vorgestellte Modellbibliothek für Visual Components wurde in verschiedenen Praxisprojekten eingesetzt und erfolgreich getestet. Es wurde der Produkttransport mit 6 AMRs zwischen SMD-Linien zunächst mit den Standardmitteln und anschließend mit der neu entwickelten Bibliothek modelliert. In einem weiteren Projekt mit 12 Mobilen Robotern wurde unsere Implementierung mit Plant Simulation verglichen. Dabei wurden die getroffenen Planungsentscheidungen als nachvollziehbar und der realen Steuerungskomponente entsprechend bewertet. Die Bewegung der Mobilen Roboter und Fahrzeiten werden detaillierter und realitätsnaher berechnet und visualisiert. Ein wesentlicher Erfolg besteht in einer Verbesserung der Variantenvielfalt und Flexibilität. Mehrere realisierte Projekte waren mit den Standardmitteln nicht oder nur mit großer Ungenauigkeit in der Simulation umzusetzen.

Insbesondere die simulationsrelevanten Unterschiede zwischen FTS und AMRs sollten in Zukunft genauer betrachtet werden. Für Ausweichvorgänge entgegenkommender AMRs, bei denen in breiten Bereichen die vorgegebene Fahrstrecke verlassen wird, fehlt zum aktuellen Zeitpunkt eine ausreichend genaue Implementierung.

Gleichzeitig wurde auf die Bedienbarkeit großer Wert gelegt, um den Zeitaufwand zur Erstellung von Simulationsmodellen zu reduzieren. Bei gleichzeitiger Steigerung des Funktionsumfangs konnte der Schulungsaufwand sowie die Modellbildung jedoch nicht verkürzt werden. Einen wichtigen Fokus besitzt der Import von existierenden Daten aus vorgelagerten Planungsschritten sowie die Bereitstellung von Daten, um den Zeitaufwand für den Planungsprozess insgesamt zu verringern. Zeitaufwändige Toolwechsel können reduziert werden, wenn die Simulation als einheitliches Werkzeug in möglichst vielen Planungsschritten etabliert werden kann.

Die Möglichkeit zur direkten Nachnutzung eines Simulationsmodells für die Fabriksimulation als digitalen Zwilling für die Virtuelle Inbetriebnahme stößt bei Praxisanwendern auf großes Interesse. Die Umsetzung eines Demonstrators für die Anbindung eines realen Flottenmanagers stellt einen wichtigen nächsten Schritt dar.

## Literatur

- Al-Aubidy, K.M., Ali, M.M., Derbas, A.M.: Multi-robot task scheduling and routing using neuro-fuzzy control, in: 2015 IEEE 12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD15) (2015).
- Aloui, K.; Hammadi, M.; Guizani, A.; Soriano, T.; Haddar, M.: Development of an AGV System Using MBSE Method and Multi-agents' Technology. In: Walha, L.; Jarraya, A.; Djemal, F.; Chouchane, M.; Aifaoui, N.; Chaari, F.; Abdennadher, M.; Benamara, A.; Haddar, M. (Hrsg.): Design and Modeling of Mechanical Systems - V, Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing 2022, S. 103–114.
- Dang, Q.-V., Nguyen, L.: A Heuristic Approach to Schedule Mobile Robots in Flexible Manufacturing Environments. *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use 40 (2016), S. 390–395.
- Elango, M., Nachiappan, S., Tiwari, M.K.: Balancing task allocation in multi-robot systems using K-means clustering and auction based mechanisms. *Expert Systems with Applications* 38 (2011), S. 6486–6491.
- Grznar, P.; Gregor, M.; Gaso, M.; Gabajova, G.; Schickerle, M.; Burganova, N.: Dynamic Simulation Tool for Planning and Optimisation of Supply Process. *Int. j. simul. model.* 20 (2021), S. 441–452.
- Hoffmann, P.; Maksoud, T.M.A.; Schumann, R.; Premier, G.C.: Virtual Commissioning Of Manufacturing Systems A Review And New Approaches For Simplification. In: 24th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2010 Proceedings. Kuala Lumpur (Malaysia) 2010, S. 175–181.
- Law, A.M.; Simulation modeling and analysis, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. Tucson, Arizona (USA): McGraw-Hill Education (2015) 5.
- Lee, C.G; Park, S.C.; Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. *Journal of Computational Design and Engineering* 1 (2014), S. 213–222.
- Sariff, N.; Buniyamin, N.: An Overview of Autonomous Mobile Robot Path Planning Algorithms. 4th Student Conference on Research and Development (2006), S. 183-188.
- Schmid, K.; Wilke, P.: Branchenanalyse Fördertechnik und Intralogistik: Perspektiven für Arbeit und Beschäftigung (Working Paper No. 235). Working Paper Forschungsförderung 2022.
- Sieglwart, R.; Nourbakhsh, I.R.; Scaramuzza, D.: Introduction to Autonomous Mobile Robots, second edition. MIT Press 2011.
- Souto, A., Prates, P.A., Lourenço, A., Al Maamari, M.S., Marques, F., Taranta, D., DoÓ, L., Mendonça, R., Barata, J.: Fleet Management System for Autonomous Mobile Robots in Secure Shop-floor Environments, in: 2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (2021).
- Ullrich, G.; Albrecht, T.: Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2019.
- Wu, G.; Sun, X.: AGV Task Distribution Study. *Journal of Physics: Conference Series* 1486 (2020).