Leitfaden

Simulation Fahrerloser Transportsysteme

Grundlagen, Simulationstypen, Simulationsdaten und Bewertung von Ergebnissen



STATISCHE SIMULATION · DYNAMISCHE SIMULATION · EMULATION

Herausgeber:

Forum-FTS (www.forum-fts.com)

VDI-Fachausschuss 309 „Mobile Robotik“

Ausgabe: Kurzfassung, November 2026, Version 1.0

Dieses Dokument wurde vom VDI FA 309 „Mobile Robotik“ erstellt und liegt der technischen Redaktion des VDI zur Erstellung der neuen VDI 2710 Blatt 3 vor.
Mit Veröffentlichung der neuen Richtlinie wird dieser Leitfaden zurückgezogen.

Haftungsausschluss: Die in dieser Informationsschrift enthaltenen Angaben, Abbildungen, Hinweise und Empfehlungen wurden nach bestem Wissen erstellt und sorgfältig recherchiert. Dennoch kann eine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität nicht übernommen werden. Soweit gesetzlich zulässig, ist jede Gewährleistung und Haftung ausgeschlossen.

Leitfaden zur Simulation Fahrerloser Transportsysteme

Inhalt

1. Anwendungsbereich 4
2. Einordnung der Richtlinie 6
3. Abkürzungen 8
4. Allgemeines 9
   4.1 Begriffe und Definitionen 9
   4.2 Simulationsziel 12
   4.3 Zeitpunkt der Simulation 13
   4.4 Rollen 14
5. Simulationstypen 17
   5.1 Statische Simulation 17
   5.2 Dynamische Simulation 19
   Simulation des Fahrerlosen Transportsystems als Teilsystem 19
   Simulation des Gesamtsystems 19
   5.3 Emulation 20
   5.4 Auswahl des Simulationstyps 22
6. Simulationsdaten 23
   6.1 Systemlastdaten 24
   6.2 Organisationsdaten 25
   6.3 Technische Daten 26
7. Experimentplanung 29
8. Ergebnisse 30
9. Simulation von autonomen Funktionen 34

Einleitung

Der Begriff „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS, engl. AGV System) wird in Europa seit mehr als sechzig Jahren verwendet. Ein FTS ist ein innerbetriebliches Logistiksystem, das primär dem automatisierten Materialtransport dient. Nach der Richtlinie VDI 2510 besteht es im Wesentlichen aus einer Leitsteuerung, einer Fahrzeugflotte, Einrichtungen zur Standortbestimmung und Datenübertragung sowie der peripheren Infrastruktur. Es fungiert als Organisationsmittel, das einen zuverlässigen Materialfluss mit definierter Leistung, Verfügbarkeit und Qualität garantiert. Typisch sind beispielsweise eine klassische Intralogistik-Anwendung (Taxibetrieb), Montagelinien für Serienprodukte (Fließlinien- oder Taktbetrieb) oder eine Aufgabenstellung im Lager, bei der Materialtransporte mittels einer Flotte automatischer Flurförderzeuge erledigt werden. Die Peripherie und alle parallelen Prozesse der Produktionslogistik müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein.

Ein typischer Anwendungsbereich ist eine durchgeplante Produktionslogistik in Unternehmen, in denen mittels Serien- / Massenfertigung produziert und sowohl beim Transport, Lagern und in der Kommissionierung ein hoher Durchsatz gefordert wird. Typische Beispiele sind: Logistikzentren, Automobilfertigung, Automobilzulieferbetriebe, Serienfertiger der weißen und braunen Ware, Lebensmittelindustrie, Warenströme (Essen, Müll, Apotheke, Magazin) in Krankenhäusern (abseits der Bettenstationen).

Die Fahrzeuge, die in solchen Systemen zum Einsatz kommen, werden üblicherweise „Fahrerlose Transportfahrzeuge“ (FTF, engl. AGV für Automated Guided Vehicle) 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 neben diesem klassischen FTS, das im Rahmen eines Systemgeschäfts beschafft und als Projekt realisiert wird, auch Bestrebungen, den Fokus auf das Fahrzeug zu legen (Produktgeschäft). Diese fahrerlosen Fahrzeuge werden häufig nicht als FTF, sondern als Mobiler Roboter (MR), Autonomer Mobiler Roboter (AMR), Mobiler Manipulator, Industrial Mobile Robot (IMR) oder schlicht „Robot“ bezeichnet. Daneben gibt es zahlreiche weitere Bezeichnungen, die häufig auch Produktnamen einzelner Hersteller sind. Meist wird die Disziplin als „Mobile Robotik“ bezeichnet, der dann die Technologien zugeordnet werden. Technologien sind beispielsweise:

- Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und die Fahrzeuge FTF / AGV / AMR
- Mobile Manipulatoren, Cobots
- Mobile Industrieroboter
- Schreitroboter
- Humanoide
- Drohnen, die meist ausgeschlossen werden, weil sie nicht flurgebunden arbeiten
- Ausgenommen sind außerdem meist Geräte, die als Verbraucherprodukte gemäß ProdSG auf dem Markt bereitgestellt werden.

Die vorliegende Richtlinie behandelt die Simulation für alle Flotten solcher Fahrzeuge, die flurgebunden, innerbetrieblich und in der Intralogistik eingesetzt werden. Zur Flotte gehören also mindestens ein automatisches Fahrzeug und alle Funktionen eines Flottenmanagers / einer Leitsteuerung; dabei ist es unerheblich, ob diese Funktionen stationär zentral oder dezentral in den Fahrzeugen realisiert sind. Im Folgenden verwenden wir die Begriffe FTS für das System, FTF für die Fahrzeuge und AMR für solche Fahrzeuge, die über autonome Funktionen verfügen.

1. Anwendungsbereich

Diese Richtlinie richtet sich insbesondere an Betreiber, Hersteller und Planer von FTS-Anlagen. Ziel ist es, einen Überblick über die relevanten Typen von Simulationen, die jeweils nötigen Simulationsdaten und die damit zu erzielenden Ergebnisse zu geben. Dabei wird zum einen darauf eingegangen, welcher Typ von Simulation welche Art von Aussage bzgl. des realen Systems erlaubt.

Zum anderen wird detailliert aufgelistet, welche Simulationsdaten wichtige Eingabedaten darstellen und möglichst erfasst werden sollten. Der Wahl und Erfassung der Eingabedaten kommt dabei besondere Bedeutung zu. Bei Simulationen gilt grundsätzlich, dass die Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse maßgeblich durch die Qualität und Genauigkeit der Eingabedaten bestimmt wird (GIGO-Prinzip).

Letztlich soll die in dieser Richtlinie vorgeschlagene Strukturierung nach Simulationstypen und Definition der Simulationsdaten den Vergleich und die Bewertung von Ergebnissen, die mit unterschiedlichen Simulationen erzielt wurden, erleichtern.

Darüber hinaus soll die Richtlinie die Bewertung von Simulationsergebnissen, sowie deren Aussagekraft erleichtern. Damit soll insbesondere den Herstellern von FTS die Auslegung einer Anlage, bzw. das Erstellen eines Angebots erleichtert werden.

Die vorliegende Richtlinie behandelt das Thema Simulation vor dem Hintergrund von FTS. Sie gibt einen Eindruck der typischerweise durch eine Simulation erzielbaren Ergebnisse und spezifiziert die zur Erzielung dieser Ergebnisse relevanten, FTS-spezifischen Simulationsdaten. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen Simulationstypen, sowie ihre Rolle im Entwurfsprozess des FTS erläutert.

Dabei ist zu beachten, dass die Ergebnisse einer Simulation von der Zusammenarbeit aller Beteiligten abhängen. Insbesondere bei der Ermittlung der Simulationsdaten sind Betreiber, Planer und Hersteller des FTS gleichermaßen gefragt. Daher ist dieser Aspekt ein Schwerpunkt der vorliegenden Richtlinie.

Auf die detaillierte Beschreibung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, sowie der diversen denkbaren Simulationsmodelle wird hier verzichtet. Ebenso werden Aspekte und Verfahren, die über das FTS hinausgehen, wie sie z.B. zur Optimierung des gesamten logistischen Prozesses notwendig sind, hier ausgeklammert. Diese Themen werden ausführlich in der VDI-Richtlinie 3633 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen“ adressiert.

Autonomie

Ein Aspekt dieser Richtlinie ist die Behandlung von automatischen Fahrzeugen mit autonomen Funktionen, also den autonomen mobilen Robotern (AMR). Ein AMR ist ein FTF, das über autonome Funktionen verfügt und dadurch in der Lage ist, auf Basis selbst generierter Informationen eigenständig, d. h. teilweise von der Leitsteuerung entkoppelt, Entscheidungen zu treffen. Der häufigste Unterschied zum klassischen FTF besteht darin, dass ein AMR die Betriebsumgebung ohne feste Spurvorgaben durchqueren kann, indem er Hindernisse mittels Sensorik erkennt und seine Pfade situationsbedingt selbstständig anpasst. Ein Fahrzeug kann zeitweise zum AMR werden, wenn solche autonomen Funktionen (wie die Hindernisumfahrung) aktiv geschaltet sind.

Der FTS-Leitfaden „Autonomie für mobile Roboter“ des VDI-Fachausschusses „Mobile Robotik“ beschreibt die unterschiedlichen autonome Funktionen. Fahrzeuge mit solchen Funktionen werden auch AMR (autonomer mobiler Roboter) genannt.

Bei den autonomen Funktionen handelt es sich um situatives Reagieren auf sich verändernde Umgebungs-/Rahmenbedingungen und Systemzustände, welche mittels mehrdimensionaler

Sensorinformationen erfasst und ausgewertet werden – und zwar ohne eine Abstimmung mit der Leitsteuerung oder anderen Fahrzeugen.

Für die Simulation bedeutet dies, dass die sich verändernden Umgebungsbedingungen als weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Mögliche Einflussfaktoren und die Auswirkung auf die Simulation werden in Kapitel 8 behandelt.

Mischbetrieb

Als Mischbetrieb werden Szenarien verstanden, in denen unterschiedliche Arten von Transportmitteln gleichzeitig in einer gemeinsamen Umgebung eingesetzt werden. Dies umfasst sowohl heterogene Flotten fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) unterschiedlicher Typen oder Hersteller als auch hybride Szenarien, in denen automatische und manuell betriebene Fahrzeuge (z. B. Stapler oder Routenzüge) parallel eingesetzt werden. Die beteiligten Systeme können dabei sowohl innerhalb einer gemeinsamen Leitsteuerung als auch in getrennten Verantwortungsbereichen organisiert sein, wobei betriebliche Wechselwirkungen entstehen können.

In der Simulation solcher Systeme wird üblicherweise eine zentrale Steuerung abgebildet, die alle relevanten Ressourcen verwaltet sowie die Disposition und Koordination der Fahrzeuge übernimmt. Dabei werden auch manuell betriebene Fahrzeuge als Ressourcen berücksichtigt, unterscheiden sich jedoch durch ihr spezifisches Verhalten. Voraussetzung für eine realitätsnahe Abbildung ist, dass die Interaktionen zwischen den Verkehrsteilnehmern hinreichend beschrieben vorliegen, sodass die zugrunde liegenden Regeln und Logiken in der Simulation abgeleitet werden können. Dies gilt insbesondere für gemeinsam genutzte Verkehrsbereiche, wie z. B. Engstellen oder Übergabepunkte, für die eindeutig festgelegt sein muss, nach welchen Regeln das Verhalten und die Abläufe im realen System erfolgen.

2. Einordnung der Richtlinie

VDI-Richtlinien zum Themenkomplex FTS beschäftigen sich auf der einen Seite mit der FTS-Technik und auf der anderen Seite mit der FTS-Planung. Dem Thema FTS-Technik dient die VDI 2510 als übergeordnete, zusammenfassende Richtlinie. Für spezielle Themen wurden weiterführende Blätter zur VDI 2510 erstellt. Die VDI 2710 ist die übergeordnete Richtlinie zum Themenbereich Planung (Abbildung 1).

Die vorliegende Richtlinie ist als Bindeglied zwischen der FTS-Planungsrichtlinie und der allgemeinen Richtlinie zur Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen VDI 3633 zu betrachten.

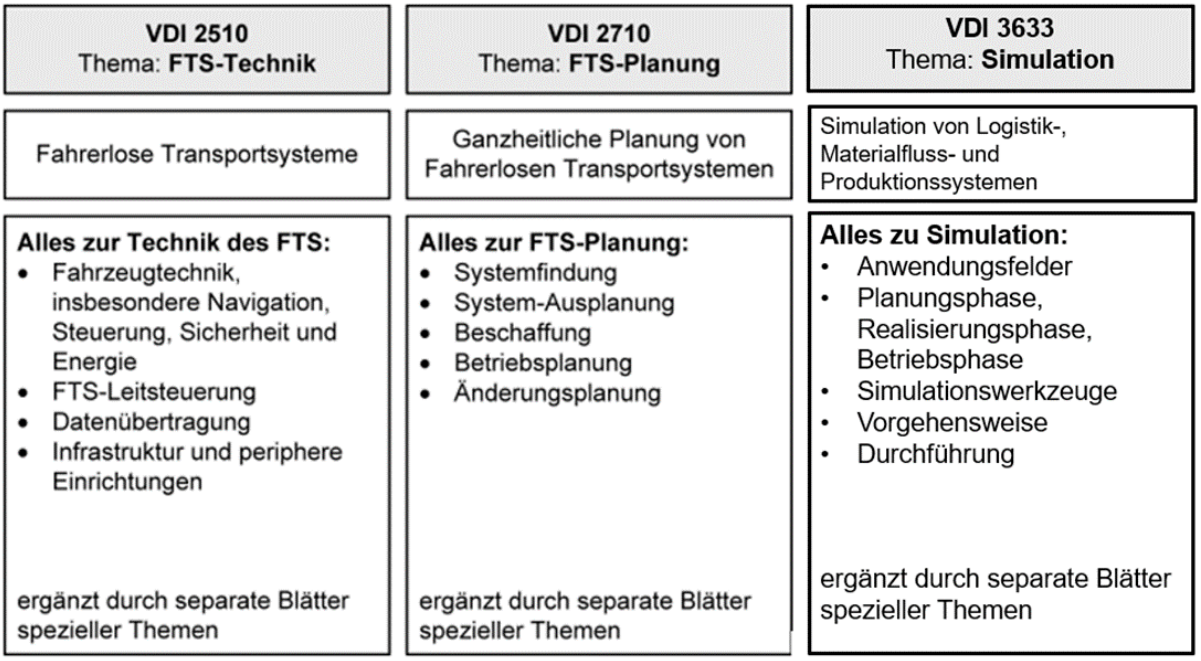

Abbildung 1: Einordnung der Richtlinie

Die zur VDI 2710 gehörenden Richtlinien sind:

- VDI 2710 Blatt 1
  „Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Entscheidungskriterien für die Auswahl eines Fördersystems“
- VDI 2710 Blatt 2
  „FTS-Checkliste – Planungshilfe für Betreiber und Hersteller von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS)“
- VDI 2710 Blatt 3
  „Einsatzgebiete der Simulation für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“, die hier vorliegende Richtlinie
- VDI 2710 Blatt 4
  „Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS)“
- VDI 2710 Blatt 5
  „Abnahmeregeln für Fahrerlose Transportsysteme (FTS)“
- VDI 2710 Blatt 6
  „Einführung und Betrieb eines fahrerlosen Transportsystems (FTS)“

Für die Emulation von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) sind darüber hinaus von Bedeutung:

- VDI 4497: “Einsatz der Emulation bei der Realisierung automatisierter Logistiksysteme”
- VDA 5050: „Interface for the communication between automated guided vehicles (AGV) and a master control” (Ab Version 2.1.0 wird die VDA 5050 ausschließlich in englischer Sprache publiziert.)

3. Abkürzungen

In dieser Richtlinie werden die nachfolgend aufgeführten Abkürzungen verwendet:

AGV	Automated Guided Vehicle
AMR	Autonomer Mobiler Roboter (Autonomous Mobile Robot)
ERP	Enterprise Resource Planning
FIFO	First In, First Out
FTS	Fahrerloses Transportsystem
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GIGO	Garbage In, Garbage Out
IMR	Industrial Mobile Robot
IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
LiDAR	Light Detection and Ranging
LKW	Lastkraftwagen
LVS	Lagerverwaltungssystem
MFS	Materialflusssystem
MR	Mobiler Roboter
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VDA	Verband der Automobilindustrie
V&V	Verifikation und Validierung

4. Allgemeines

Die vorliegende Richtlinie beschreibt den Einsatz von Simulationen als unterstützende Methode für die Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Durch die Darstellung wird ein Überblick über die relevanten Simulationstypen, die erforderlichen Daten und die in Folge erzielbaren Ergebnisse geschaffen. Die Richtlinie dient hauptsächlich als Unterstützung für die Betreiber, Hersteller sowie Planer von FTS. Neben den FTS-spezifischen Anforderungen, die für eine aussagekräftige Simulation zu erfassen sind, liegt der Fokus auf den beteiligten Akteuren. Grundsätzlich gilt, dass die Aussagekraft einer Simulation maßgeblich von der Qualität der Datengrundlage sowie dem Detaillierungsgrad des Modells abhängt. Der Einfluss der verschiedenen Rollen darf hierbei jedoch nicht unberücksichtigt bleiben. Um ein grundlegendes Verständnis zu schaffen, werden die verschiedenen Akteure eines Simulationsprojekts sowie deren Rolle im Entwurfsprozess eines FTS dargestellt und klassifiziert. Hervorgehoben wird dabei die enge Zusammenarbeit aller Beteiligten. Zusätzlich dazu besteht die Zielsetzung, eine Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen aus unterschiedlichen Ansätzen zu erreichen. Folglich sind zunächst die grundlegenden Definitionen und Begrifflichkeiten darzulegen und zu harmonisieren, um so eine einheitliche Schnittstelle für alle beteiligten Akteure zu schaffen.

4.1 Begriffe und Definitionen

Für die Anwendung der vorliegenden Richtlinie sind die folgenden Begrifflichkeiten einer Simulation zu definieren und zu berücksichtigen.

Man unterscheidet folgende Simulationstypen:

- Statische Simulation
- Dynamische Simulation
- Emulation

Hinweis: Häufig wird der Begriff des „digitalen Zwillings“ verwendet, und zwar meist unspezifisch für alles von der dynamischen Simulation bis zur Emulation. Da dieser Begriff nicht eindeutig verwendet wird, wird er hier nicht benutzt.

Eine **statische Simulation** ist ein Simulationstyp zur Analyse eines Systems auf Basis aggregierter Daten ohne oder mit stark vereinfachter Berücksichtigung zeitlicher Abläufe und dynamischer Wechselwirkungen.

Eine **dynamische Simulation** ist ein Simulationstyp zur Untersuchung des Systemverhaltens im zeitlichen Verlauf, bei dem Ereignisse, Zustandsänderungen, Wechselwirkungen und Ressourcenkonflikte explizit berücksichtigt werden.

Eine **Emulation** ist ein Simulationstyp, bei dem reale Steuerungs-, Leit- oder Softwaresysteme mit einer virtuellen Abbildung des Zielsystems gekoppelt werden, um deren Verhalten unter realitätsnahen Bedingungen zu entwickeln, zu testen und abzusichern.

Oft wird auch der Begriff einer **quasi-realen Entwicklungsplattform** verwendet. Darunter versteht man eine Simulations- und Entwicklungsumgebung zur physikalisch möglichst realitätsnahen Nachbildung von Systemen, Sensoren, Aktoren und Umgebungsbedingungen für die Entwicklung, Validierung und Absicherung von Software- und Automatisierungsfunktionen.

Eine **Simulationsstudie** ist ein Projekt zur simulationsgestützten Analyse eines Systems, das sich in mehrere Phasen gliedert: Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung, Experimente und Analyse, Datenbeschaffung und -aufbereitung. In Abhängigkeit von der Qualität des Ergebnisses werden die einzelnen Phasen iterativ durchlaufen.

Eine Simulationsstudie kann mehrere Experimente umfassen, die jeweils durch mehrere Simulationsläufe realisiert werden können.

Ein **Simulationsexperiment** nach VDI 3633 dient der gezielten empirischen Untersuchung des Modellverhaltens über einen definierten Betrachtungszeitraum. Dazu werden mehrere Simulationsläufe durchgeführt, bei denen Parameter oder die Modellstruktur systematisch variiert werden.

Ein **Simulationslauf** beschreibt dabei die zeitliche Nachbildung des Systemverhaltens mit einem ausführbaren Modell, wobei relevante Zustandsgrößen erfasst und ggf. statistisch ausgewertet werden.

Ein **Simulationsmodell** („Modell“) stellt ein vereinfachtes, abstrahiertes Abbild eines bestehenden oder geplanten Systems dar, das dessen relevante Prozesse sowie das Systemverhalten in einer simulationsfähigen Form nachbildet. Für die Nachbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems sowie der dazugehörigen Prozesse werden Simulationswerkzeuge verwendet.

Ein **Simulationswerkzeug**, wie Plant Simulation, FlexSim, Emulate3D, AnyLogic (Nennung hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Reihenfolge) ist ein Softwareprogramm, durch das Modelle erstellt und ausgeführt werden können. Die jeweils verwendete Programmiersprache wird als Simulationssprache bezeichnet.

Die **Systemgrenzen** werden durch die Quelle und Senken definiert. Nach VDI 3633 ist ein System gekennzeichnet durch die Festlegung seiner Grenze gegenüber seiner Umwelt, mit der es über Schnittstellen (Systemeingangs- und -ausgangsgrößen) kommunizieren kann. Hierzu sind eine genauere Betrachtung und Abstrahierung der Begriffe Quelle und Senke erforderlich.

Auf abstrakter, systemtheoretischer Ebene bezeichnet eine **Quelle** diejenige Systemgrenze, an der Objekte in das betrachtete System eintreten. Bezogen auf die Simulation bezeichnet sie den Startpunkt des Material- oder Informationsflusses. Eine **Senke** hingegen ist die Systemgrenze, an der die betrachteten Objekte aus dem System ausgeschleust werden. In der Simulation wird diese durch den Endpunkt des Flusses repräsentiert. Quelle und Senke bilden somit Ein- und Austrittspunkte relativ zu dem jeweils betrachteten System. Entscheidend ist dabei, dass diese Zuordnung vom gewählten Systemausschnitt abhängt. Wird beispielsweise ein FTS als eigenständiges System betrachtet, liegen Quelle und Senke an dessen Schnittstellen zur umgebenden Produktions- und Lagerstruktur. Wird das FTS hingegen als Subsystem modelliert, verschieben sich die Systemgrenzen entsprechend und somit auch die Definitionen von Quelle und Senke. Auf physischer Ebene handelt es sich bei Quellen und Senken um konkrete Übergabepunkte für materielle Objekte wie z.B. Paletten oder Behälter.

Durch die physische Bereitstellung und Aufnahme von Objekten wird für die weitere Ausarbeitung eine Abstrahierung der Begriffe in Quell- und Zielplatz vorgenommen. Der **Quellplatz** beschreibt den tatsächlichen Bereitstellungsort eines Transportguts. Der **Zielplatz** hingegen bezeichnet den Ort, an dem das Transportgut abgestellt bzw. übergeben wird. Die abstrahierte Definition und der direkte Bezug zu den Übergabeorten beugen Unklarheiten hinsichtlich des Systembegriffs vor. Durch die begriffliche Trennung von Quelle und Senke auf Systemebene sowie Quell- und Zielplatz auf physischer Ebene wird die Unterscheidung zwischen Modellperspektive und realer Umsetzung eindeutig herausgearbeitet. Zur Veranschaulichung der Systemgrenzen kann eine Materialflussmatrix aufgestellt werden.

Nach Definition der grundlegenden Simulations-Begriffe, bilden die geforderten Daten die inhaltliche und strukturelle Grundlage für die spätere Modellbildung. Folglich ist eine Beschreibung der Daten notwendig, auf deren Basis anschließend eine Einordnung und Analyse des FTS realisiert werden kann. Hierzu sind sowohl Rahmen- als auch Simulationsdaten zu definieren.

Die **Rahmendaten** nach VDI 2710 Blatt 1 umfassen alle wesentlichen Einflussgrößen, die für die Auswahl und Planung eines Fördersystems relevant sind und im Vorfeld detailliert erfasst werden müssen. Somit wird eine vollständige und flexible Konzeption unter Berücksichtigung technischer sowie wirtschaftlicher Aspekte gewährleistet. Zur besseren Übersicht erfolgt eine Unterteilung in die Hauptgruppen Umgebung, Transportgut und betriebliche Organisation.

Neben den Rahmendaten müssen die Simulationsdaten erfasst werden. Nach VDI 3633 sind **Simulationsdaten** Modell- und Experimentdaten. Die zu erstellende Datenbasis hat die Zielsetzung, die Problemstellung hinreichend zu beschreiben. Für die Abbildung in der Simulation werden hierzu sämtliche den Materialfluss betreffende Rahmendaten erfasst. Das betrifft neben Systemlastdaten, Organisationsdaten und Technische Daten ebenfalls Ergebnisse vorheriger Simulationen (VDI 3633_11).

Für eine nähere Betrachtung eines FTS sind weitere Begriffe zu definieren, die einen direkten Bezug zu der Thematik aufweisen. Da sich diese Richtlinie mit dem Einsatz von Simulationen als Methode zur Planung und Realisierung von FTS befasst, ist eine detailliertere Einordnung dieses Begriffs erforderlich. Ein **Fahrerloses Transportsystem (FTS)** ist nach VDI 2510 ein flurgebundenes System für den intralogistischen Transport von Gütern. Die Umsetzung erfolgt vollständig automatisiert und erfordert kein menschliches Eingreifen.

Nebem einem oder mehreren berührungslos geführten Rad-Fahrzeugen gehören zum FTS weitere Komponenten bzw. Teilsysteme; nur durch deren Zusammenspiel wird eine reibungslose und effiziente Materialbewegung gewährleistet:

- Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF)
- Leitsteuerung
- Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung (Navigation)
- Einrichtungen zur Datenübertragung
- Infrastruktur und periphere Einrichtungen

Ein **FTF** (engl.: AGV - Automated Guided Vehicle) ist ein flurgebundenes Fördermittel, das automatisch auf vorgegebenen oder freigegebenen Fahrwegen gesteuert wird; zur Navigation werden z. B. Laser-, Kontur-, Magnet- oder optische Verfahren eingesetzt (VDI 2510 Blatt 1) verwendet. Zur Führung werden in der Regel Sensoren, Magnetstreifen oder optische Markierungen eingesetzt. Die Bewegung der Transporteinheit erfolgt mithilfe aktiver oder passiver Lastaufnahmemittel und kann je nach Bauform unterschiedlich ausgeprägt sein. Im erweiterten Verständnis zählen dazu auch Fahrzeuge mit autonomen Funktionen.

Neben den FTF sind ebenfalls **autonome mobile Roboter (AMR)** im Einsatz. AMR erlauben eine vielfältige Integration in bestehende Einsatzumgebungen unter minimalem Aufwand hinsichtlich Vorbereitungs- und Inbetriebnahmezeit. AMR übernehmen in der Regel dienstleistungsbezogene Funktionen und Transporte.

Autonome Funktionen sind ebenfalls auf der Leitsteuerungsebene vorhanden. Die FTS-Leitsteuerung (eng. Fleet Manager) dient der Koordinierung und zentralen Steuerung von FTF/AMR in einem Logistik- oder Produktionsumfeld. Somit können die Fahrzeuge der Flotte koordiniert und das das FTS in die innerbetrieblichen Abläufe integriert werden. Bei der eigenständigen Planung oder Ausführung von Funktionen, gilt eine Leitsteuerung als autonom.

Zur Standortbestimmung und Lageerfassung können neben fahrzeugeigener Sensorik externe Einrichtungen (z. B. Reflektoren, Bodenmarken) erforderlich sein, um eine präzise Fahrbewegung zu gewährleisten. Für die Lokalisierung können verschiedene technologische Verfahren und Sensoren eingesetzt werden (z.B. Laser, Kameras, Magnetstreifen).

Die Datenübertragung bzw. der Datenaustausch zwischen den FTF und der Leitsteuerung oder den Peripheriegeräten wird durch drahtlose Kommunikationssysteme ermöglicht. Die Einrichtungen zur Datenübertragung verbinden Fahrzeuge, Leitsteuerung und Peripherie, in der Regel per WLAN oder Mobilfunk; stationäre Komponenten sind meist drahtgebunden angebunden.

Die Infrastruktur und die peripheren Einrichtungen umfassen alle ortsfesten und unterstützenden Anlagen, die für den Einsatz von FTF erforderlich sind. Hierzu zählen z.B. Lastübergabestationen, Ladestationen, Aufzüge, Brandschutztore sowie Fahrwege, bzw. Flächen. Sie bilden folglich die bauliche und technische Umgebung, in die das System eingebunden ist.

4.2 Simulationsziel

Ziel einer Simulation im Rahmen eines FTS-Projekts ist es, materialflussrelevante Rahmendaten zu definieren, zu validieren und ggf. zu optimieren. Dabei können mit gängigen Simulationswerkzeugen insbesondere Fragestellungen aus den Bereichen Ressourcendimensionierung, Layoutgestaltung, Strategien und Steuerung sowie Systemverhalten untersucht werden.

Im Bereich der Ressourcenbetrachtung steht insbesondere die Dimensionierung der erforderlichen Systemkomponenten im Fokus. Hierzu zählen beispielsweise die Ermittlung der benötigten Anzahl an Fahrzeugen, Ladestationen oder Pufferplätzen. Darüber hinaus kann die Auslegung dieser Ressourcen hinsichtlich Kapazität oder erforderlicher Mindestgeschwindigkeit analysiert werden. Auch die Auslastung der einzelnen Ressourcen ist eine zentrale Zielgröße, um Über- oder Unterdimensionierungen frühzeitig zu erkennen.

Die Layoutgestaltung steht in Zusammenhang mit der Bewertung der unterschiedlichen Ausprägungen der Fahrwege von FTS (einspurig, zweispurig, uni- oder bidirektional, gesperrte Bereich) möglich. Zusätzlich lassen sich Positionierungen zentraler Infrastrukturkomponenten wie z.B. Ladestationen, Aufnahme- und Abgabeplätze oder Pufferbereiche analysieren.

Darüber hinaus ermöglicht die Simulation die Untersuchung verschiedener Strategien und Steuerungsmechanismen. Hierzu zählen unter anderem Verkehrsregelungen an Kreuzungen, Koordinationsstrategien mit anderen Materialflusselementen (z.B. Routenzüge, Stapler) sowie Strategien zur Auftragsauswahl und -vergabe (z. B. FIFO, Prioritäten, Zonierungen). Weitere Fragestellungen betreffen:

- Fahrzeugzuordnung zu Aufträgen
- Fahrzeugzuordnung zu Prozessen
- Disposition der Leerfahrzeuge
- Ladestrategien.

Neben strukturellen und strategischen Fragestellungen kann ebenfalls das Systemverhalten analysiert werden. Dazu gehören:

- Systemverhalten in der Anlaufphase
- Systemverhalten unter verschiedenen Auftragsszenarien
- Verhalten des FTS im Kontext des Gesamtsystems
- Systemverhalten bei Störungen.

Wird das Simulationsmodell so aufgebaut, dass die Fahrzeuge durch eine externe Leitsteuerung koordiniert werden (Emulation), lassen sich zusätzliche Fragestellungen zu praktischen Systemimplementierungen untersuchen:

- Wie verhält sich das virtuelle FTF mit der definierten Leitsteuerung?
- Welche Funktionstests müssen hinsichtlich der virtuellen Inbetriebnahme durchgeführt werden?
- Wie muss die Leitsteuerung unter systemrelevanten Gesichtspunkten konfiguriert werden?
- Welche Anforderungen ergeben sich an die Leitsteuerung?

Im Rahmen von Massen-/ Stesstests kann das Verhalten des virtuellen FTF hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Stabilität und Skalierbarkeit analysiert werden. Dabei werden beispielsweise Systemreaktionen bei hoher Auslastung sowie mögliche Engpässe und Wechselwirkungen zwischen den Fahrzeugen untersucht.

Für die virtuelle Inbetriebnahme sind Funktionstests durchzuführen, die die korrekte Kommunikation zwischen Leitsteuerung und FTF, die Auftragsabwicklung, die Kollisionsvermeidung sowie das Verhalten in Stör- und Grenzsituationen überprüfen.

Hinsichtlich der Konfiguration muss die Leitsteuerung unter systemrelevanten Gesichtspunkten so konfiguriert werden, dass ein stabiler und effizienter Betrieb gewährleistet ist. Dies ist insbesondere hinsichtlich Priorisierungsstrategien, Ressourcenzuweisung, Verkehrsregelungen oder dem Störfallmanagement von Relevanz.

Um das Systemverhalten abzubilden, muss die Steuerungslogik der Simulation mit der Logik der Leitsteuerung übereinstimmen. Wenn die Leitsteuerung noch nicht festgelegt ist, müssen die in der Simulation genutzten Steuerungsregeln in der zukünftig genutzten Leitsteuerung abbildbar sein.

Aus den Ergebnissen ist außerdem eine Ableitung von Optimierungspotenzialen für die reale Implementierung möglich.

Die Grundlage jeder Simulation bilden die Simulationsdaten. Diese beziehen sich auf die Rahmendaten, die direkt oder in abstrahierter Form in das Modell eingehen. Für jedes Simulationsprojekt ist festzulegen, welche Daten bereits vor Beginn der Simulation feststehen, welche währenddessen variiert werden und welche durch die Simulation ermittelt werden. Der Anteil der zu untersuchenden Parameter steht im direkten Zusammenhang mit dem Simulationsaufwand. Der Aufwand ergibt sich zum einen aus dem Bedarf an flexibleren und variableren Modellen, zum anderen aus der steigenden Anzahl notwendiger Simulationsläufe und deren Auswertung.

Für eine zielgerichtete Durchführung der Simulation ist daher eine angemessene Wahl der Abbildungstiefe erforderlich. Das Modell muss ausreichend detailliert sein, um die relevanten Rahmendaten und Fragestellungen abzubilden. Gleichzeitig steigen mit zunehmender Detailtiefe der Simulationsaufwand und die Kosten. Für eine effiziente und wirtschaftliche Durchführung eines Simulationsprojekts ist daher eine klare Definition der Ziele vor Beginn des Modellaufbaus ausschlaggebend.

4.3 Zeitpunkt der Simulation

Der Einsatz von Simulationen für FTS ist grundsätzlich in verschiedenen Phasen eines Projekts möglich und sinnvoll. Je nach Projektfortschritt variieren dabei Zielsetzungen bzw. Detailtiefe, der Simulationstyp sowie die Verantwortlichkeiten. Abbildung 2 ordnet den Planungsphasen nach VDI 2710 Blatt 1 den empfohlenen Simulationstyp, den Zweck und die Verantwortung zu.

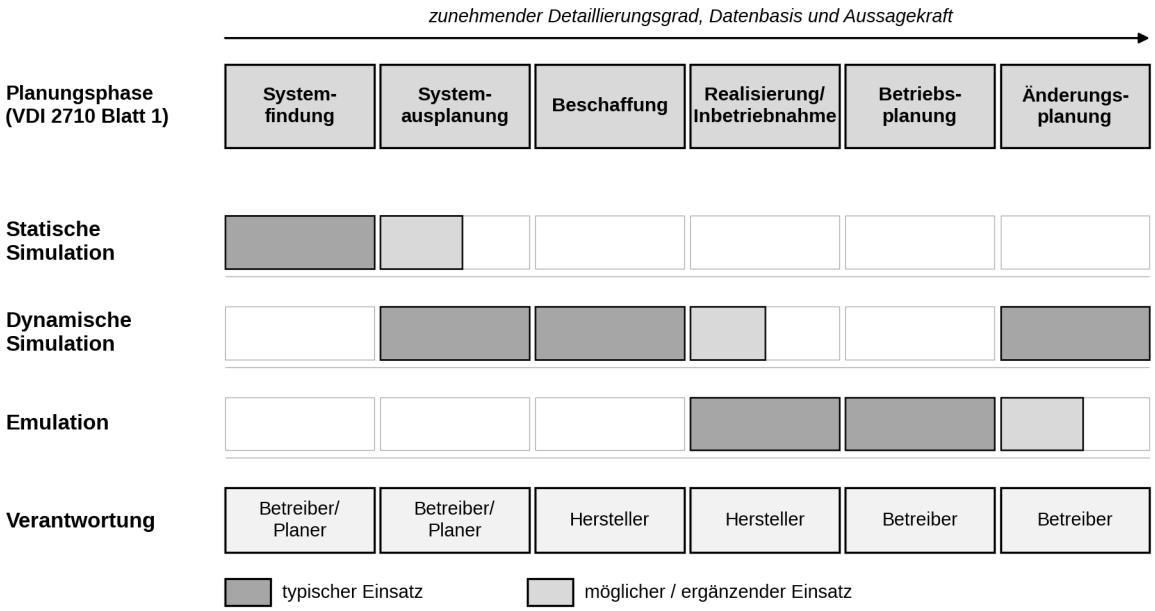

Abbildung 2: Simulation in den Planungsphasen

In Abhängigkeit des Einsatzzeitpunkts ändern sich Zweck und Rolle der Simulation im Projekt. Ebenso variieren der Modellierungsaufwand, die erforderliche Datengrundlage sowie die erreichbare Ergebnisgenauigkeit. Während in frühen Phasen häufig mit vereinfachten, abstrahierten Modellen gearbeitet wird, steigt im weiteren Projektverlauf der Detaillierungsgrad und damit auch die Aussagekraft der Simulation.

Insbesondere bei komplexen Systemstrukturen empfiehlt es sich, bereits in der Phase der Systemfindung und vor der Erstellung des Lastenhefts eine (statische) Simulation durchzuführen. Auf diese Weise können grundlegende Annahmen des Betreibers frühzeitig überprüft und validiert werden. Hierzu zählen beispielsweise Aspekte wie die technische Machbarkeit, die Leistungsfähigkeit oder die Dimensionierung. Potenzielle Engpässe sowie konzeptionelle Schwächen lassen sich somit bereits in einer Phase identifizieren, in der Anpassungen noch mit geringem Aufwand möglich sind.

Basierend auf diesen Erkenntnissen kann ein strukturierter Vorschlag zum zielgerichteten Einsatz von Simulationen in den einzelnen Planungsphasen eines FTS-Projekts erarbeitet werden.

4.4 Rollen

In der Simulation ist die enge Zusammenarbeit der beteiligten Akteure ausschlaggebend für eine realitätsnahe, belastbare und entscheidungsrelevante Abbildung der Prozesse inkl. des Materialflusses. So wird auch in FTS-Projekten die Simulation in ein interdisziplinäres Gesamtvorhaben eingebettet. Die Qualität der Ergebnisse steht im direkten Zusammenhang mit der Zusammenarbeit aller Beteiligten. Ziel ist es, technische, prozessuale und datenbasierte Perspektiven zusammenzuführen, um eine fundierte Systemauslegung und Optimierung zu erreichen (Abbildung 3).

Simulationsingenieure übernehmen die Verantwortung für den Aufbau des Simulationsmodells sowie für dessen methodische Qualität. Durch die Modellierung des Layouts und aller damit verbundenen Komponenten, Steuerungslogiken sowie Lade- und Priorisierungsregeln wird die reale Systemumgebung möglichst präzise abgebildet. Hierbei wird der Leitfaden „so genau wie nötig, so einfach wie möglich“ verfolgt. Die Durchführung von Szenarioanalysen und Variantenvergleichen ist für die Bewertung unterschiedlicher Auslegungsoptionen erforderlich. Die Qualitätssicherung des

entstehenden Simulationsmodells wird durch dessen Verifikation und Validierung sichergestellt. Diese Aspekte werden unter Betrachtung aller technischen Rahmenbedingungen des realen Prozesses untersucht.

Für den Aufbau einer aussagekräftigen Simulation ist eine entsprechende Datenbasis gefordert. Diese wird typischerweise durch Datenanalysten bereitgestellt. Datenanalysten befassen sich mit der Aufbereitung relevanter Prozess- und Bewegungsdaten, um so mögliche Ausnahmen oder Engpässe im System zu identifizieren. Basierend auf dieser Analyse können Bottlenecks sichtbar gemacht und mögliche Optimierungspotenziale quantifiziert werden. Als Zielsetzung werden fundierte Simulationsergebnisse sowie eine faktenbasierte Entscheidungsfindung definiert. In Bezug auf FTS müssen bei der Ermittlung der Datenbasis alle Beteiligten in gleichen Teilen zusammenwirken. Hierzu zählen sowohl die Betreiber und Planer als auch die Hersteller des FTS.

Die Qualität bzw. Aussagekraft eines Simulationsmodells basiert auf dem eingebrachten Prozesswissen. Folglich sind Fachexperten für die Wissensvermittlung der zu betrachtenden Bereiche Produktion und Intralogistik gefordert. Sie gewährleisten eine operative Betrachtung der realen Abläufe und können Annahmen im Modell bewerten sowie Ergebnisse validieren. Eine daraus resultierende Strategieentwicklung dient der stetigen Verbesserung des Simulationsmodells. Durch ihre Expertise wird sichergestellt, dass eine Simulation neben theoretisch stimmigen auch praktisch umsetzbare Lösungen liefert.

Ergänzend dazu sind übergreifende Aufgaben entscheidend für den Projekterfolg. Dazu zählen unter anderem die strukturierte Aufbereitung und verständliche Darstellung von Daten und Ergebnissen. Die Koordination von Ressourcen und Zeitplänen sowie die Kommunikation und Abstimmung zwischen den einzelnen Fachbereichen ist ebenfalls zu beachten. Eine transparente Kommunikation ist ausschlaggebend für einen zielgerichteten Einsatz der Simulation zur Generierung eines messbaren Mehrwerts für das FTS-Projekt.

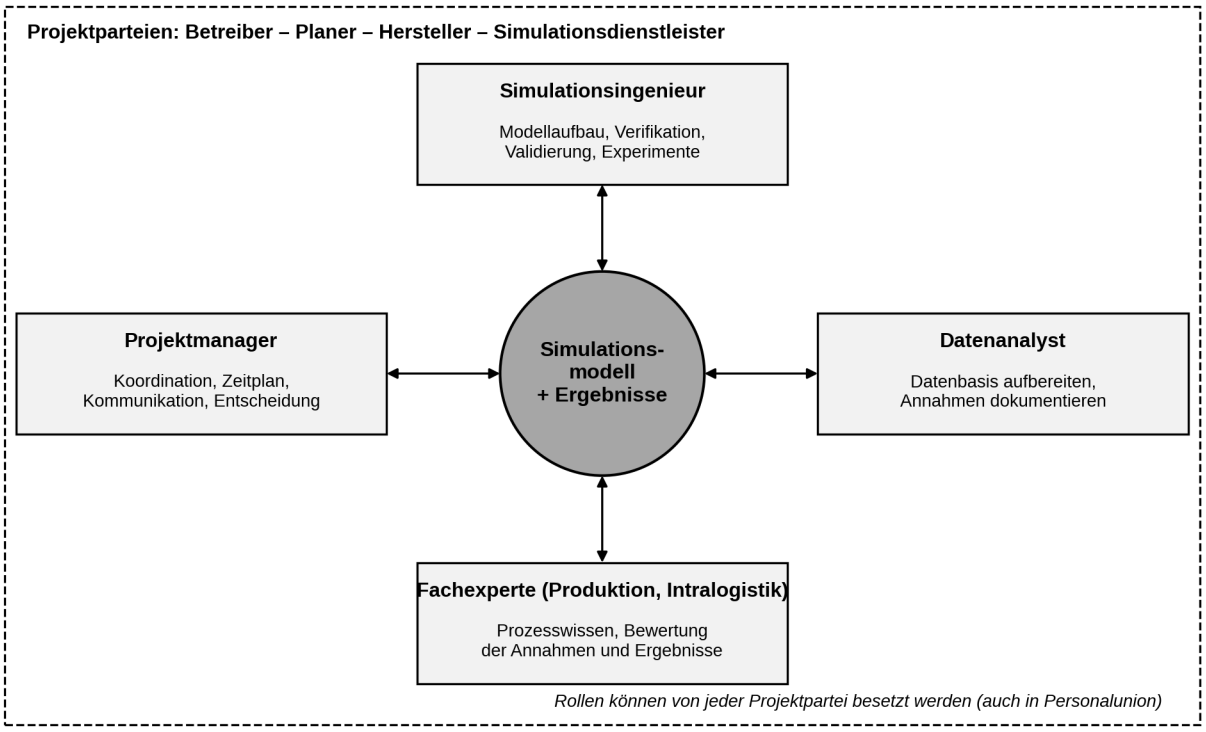

Abbildung 3: Rollen im Rahmen der FTS-Simulation

Die beschriebenen Funktionen können durch die Rolle des Projektmanagers ergänzt werden (Abbildung 3). Dieser übernimmt die übergreifende Koordination des Projekts und stellt sicher, dass die Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure strukturiert und zielgerichtet erfolgt. Folglich zählen zu seinen Tätigkeiten hauptsächlich die Planung und Steuerung der Ressourcen, Zeitpläne und Projektmeilensteine. Zusätzlich dazu übernimmt er die Abstimmung zwischen den beteiligten Fachbereichen. Um eine gemeinsame Entscheidungsgrundlage zu schaffen, ist eine strukturierte Aufbereitung und Kommunikation von Ergebnissen gegenüber allen Projektbeteiligten gefordert. Die Rolle des Projektmanagers kann entweder als zusätzliche Funktion oder durch eine der vorab definierten Positionen besetzt bzw. übernommen werden. Im Fall einer Zusatzfunktion erweitert sich der Aufgabenbereich entsprechend um die projektspezifischen Tätigkeiten.

5. Simulationstypen

Die Simulation ist ein wichtiges Werkzeug bei der Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS). Es stehen unterschiedliche Simulationstypen zur Verfügung. Sie werden beim Proof-Of-Concept, bei einer Machbarkeitsstudie, zur technischen Auslegung, Optimierung und Validierung eingesetzt. Die Auswahl des geeigneten Simulationstyps hängt insbesondere von der zugrunde liegenden Fragestellung, der verfügbaren Datenbasis (Eingangsdaten), der geforderten Aussagekraft (Detaillierungsgrad) sowie der jeweiligen Projektphase ab.

Im Kontext dieser Richtlinie werden die nachfolgend beschriebenen Simulationstypen betrachtet (Abbildung 4):

Statische Simulation
Dynamische Simulation
Emulation

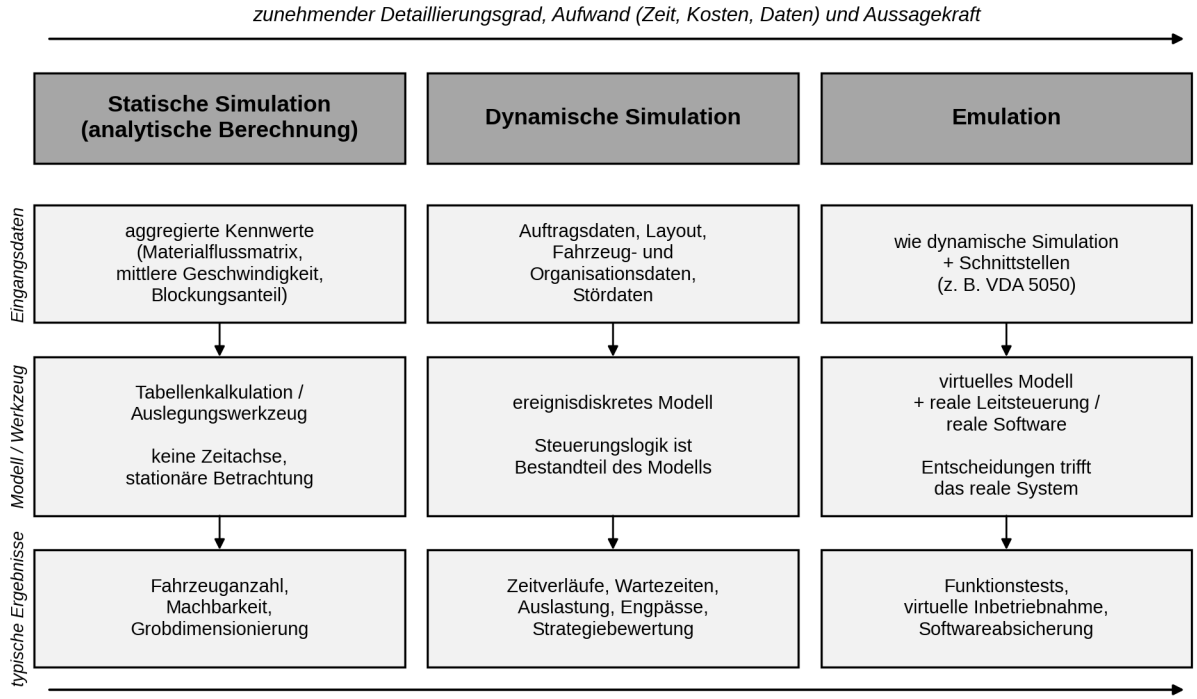

Abbildung 4: Detaillierungsgrad der Simulationstypen

Während die statische Simulation vorwiegend für erste Auslegungs- und Dimensionierungsaufgaben eingesetzt wird, ermöglicht die dynamische Simulation die Untersuchung des Systemverhaltens im zeitlichen Verlauf. Die Emulation erweitert diesen Ansatz um die Einbindung realer Steuerungs- oder Softwarekomponenten und wird insbesondere während Entwicklung, Test und Inbetriebnahme genutzt.

Insbesondere bei der dynamischen Simulation kann der Betrachtungsumfang variieren. Die Untersuchung kann sich auf das Fahrerlose Transportsystem als isoliertes Teilsystem beschränken oder das gesamte logistische System einschließlich angrenzender Prozesse berücksichtigen.

5.1 Statische Simulation

Die statische Simulation ist für eine technische Machbarkeitsstudie oder einen ersten Proof-Of-Concept geeignet und dient der überschlägigen Analyse und Dimensionierung Fahrerloser Transportsysteme. Sie ermöglicht die Bewertung logistischer Zusammenhänge auf aggregierter Ebene und wird in frühen Planungsphasen eingesetzt.

In Literatur und industrieller Praxis wird für diesen Ansatz häufig auch der Begriff „analytische Berechnung“ verwendet. Beide Begriffe beschreiben im Wesentlichen denselben Ansatz und werden im Kontext dieser Richtlinie synonym verwendet.

Bei der statischen Simulation werden zeitabhängige Abläufe und dynamische Wechselwirkungen nicht oder nur stark vereinfacht berücksichtigt. Die Betrachtung kann von Planern erfolgen, die keine Simulationsexperten sind und erfolgt typischerweise auf Basis aggregierter Kennwerte und dient der Ermittlung grundlegender Systemgrößen.

Charakteristisch für die statische Simulation ist:

- keine oder nur stark vereinfachte Berücksichtigung zeitlicher Abläufe
- Betrachtung stationärer Zustände
- Verwendung aggregierter Eingangsdaten
- geringe Modellierungs- und Rechenaufwände
- schnelle Bewertung verschiedener Auslegungsvarianten

Typische Fragestellungen
Die statische Simulation eignet sich insbesondere für Fragestellungen wie:

- Kann die angedachte FTS-Lösung funktionieren (Machbarkeit)?
- Wie viele Fahrzeuge werden grundsätzlich benötigt?
- Welche grundsätzliche Auslegung des Systems erscheint geeignet?
- Welche Auswirkungen ergeben sich aus veränderten Transportmengen?

Typische Eingabedaten

Für die statische Simulation werden häufig aggregierte Materialflussdaten verwendet. Eine zentrale Datengrundlage stellt dabei häufig die Materialflussmatrix dar, welche die Transportbeziehungen zwischen Quellen und Senken beschreibt.

Weitere Informationen zu den verwendeten Datengrundlagen sind Kapitel 6 „Simulationsdaten“ zu entnehmen.

Typische Werkzeuge
Für die statische Simulation werden häufig Tabellenkalkulationsprogramme oder spezialisierte Auslegungswerkzeuge auf Basis analytischer Berechnungsverfahren eingesetzt.

Grenzen
Aufgrund der fehlenden oder stark vereinfachten Berücksichtigung zeitlicher Abläufe können insbesondere folgende Effekte nicht oder nur eingeschränkt bewertet werden:

- Lastspitzen
- Wartezeiten
- Reihenfolgeeffekte
- Ressourcenkonflikte
- Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten

Für die Untersuchung solcher Fragestellungen ist in der Regel eine dynamische Simulation erforderlich. Blockungen und Staus müssen in der statischen Simulation als Zuschlag geschätzt werden, siehe Abschnitt 6.3.

5.2 Dynamische Simulation

Die dynamische Simulation ermöglicht die Untersuchung des Verhaltens eines Fahrerlosen Transportsystems im zeitlichen Verlauf. Im Gegensatz zur statischen Simulation können hier zeitliche Abläufe, Schwankungen und gegenseitige Abhängigkeiten der beteiligten Systeme realitätsnah berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei komplexen Systemen mit dynamischen Verkehrsflüssen, wechselnden Lastsituationen, Unsicherheiten und Störeinflüssen sowie bei Fragestellungen zur Betriebsstrategie, Auslegung von Ladekonzepten und Systemoptimierung von Bedeutung.

Typische Merkmale sind:

- explizite Berücksichtigung des Zeitverlaufs
- ereignisorientierte Modellierung
- Abbildung von Warteschlangen und Ressourcenkonflikten
- Untersuchung von Lastschwankungen
- Bewertung von Betriebsstrategien

Abhängig vom Untersuchungsziel kann sich der Betrachtungsumfang unterscheiden.

Simulation des Fahrerlosen Transportsystems als Teilsystem

Bei dieser Form der dynamischen Simulation wird das Fahrerlose Transportsystem als eigenständiges System betrachtet. Angrenzende Systeme werden nur so weit modelliert, wie dies zur Erzeugung der erforderlichen Transportaufträge notwendig ist. Dieser Ansatz wird häufig eingesetzt, um die Leistungsfähigkeit des FTS zu bewerten und Optimierungspotenziale innerhalb des FTS zu identifizieren.

Typische Eingabedaten sind:

- Materialflussmatrizen
- Transportrelationen
- Lastprofile
- Aufkommensdaten

Die Materialflussmatrix dient dabei häufig als Ausgangslage zur Erzeugung der Transportaufträge innerhalb des Simulationsmodells.

Typische Fragestellungen sind:

- Fahrzeuganzahl
- Fahrzeugauslastung
- Verkehrsbelastung
- Leitstrategien
- Dimensionierung von Ladeinfrastruktur
- Bewertung von Fahrwegen

Simulation des Gesamtsystems

Bei der Simulation des Gesamtsystems werden neben dem Fahrerlosen Transportsystem weitere relevante Prozesse und Anlagen modelliert (Abbildung 5).

Hierzu können beispielsweise gehören:

- Produktionsanlagen
- Fördertechnik
- Lagerbereiche
- Kommissionierprozesse
- manuelle Arbeitsplätze

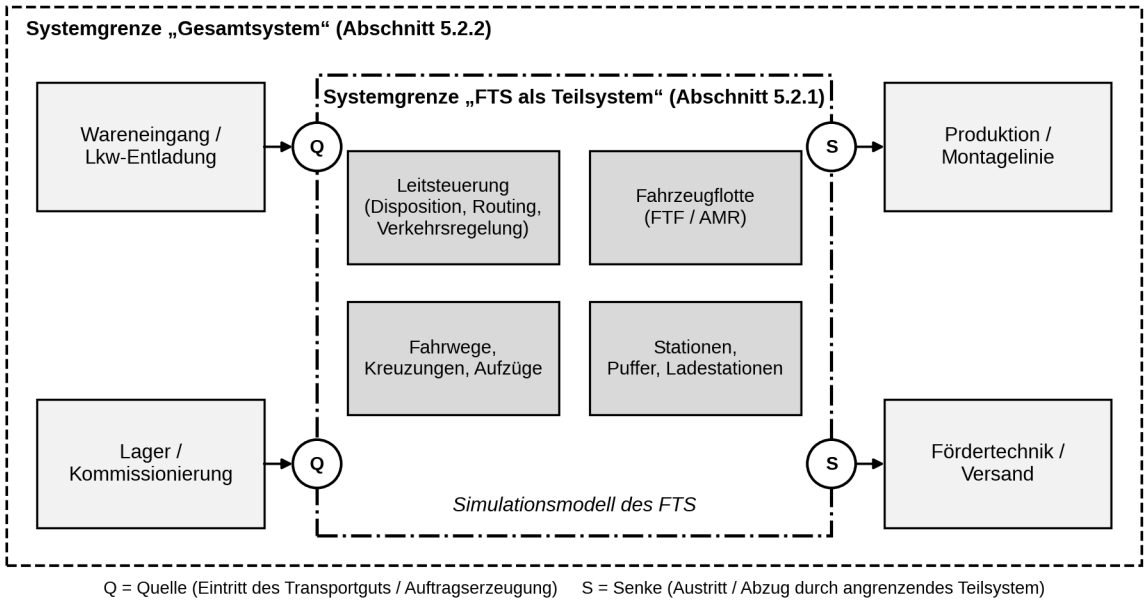

Abbildung 5: Systemgrenzen des FTS

Durch die gemeinsame Betrachtung lassen sich Wechselwirkungen zwischen dem FTS und seiner Umgebung analysieren. Im Vergleich zur isolierten Betrachtung des FTS werden häufig detailliertere Eingangsdaten verwendet. Anstelle einer reinen Materialflussmatrix können beispielsweise reale oder synthetisch erzeugte Auftragsdaten verwendet werden. Dadurch lassen sich zeitliche Schwankungen, betriebliche Abhängigkeiten sowie die Auswirkungen von Störungen und Lastspitzen detaillierter abbilden.

Typische Fragestellungen sind:

- Systemengpässe
- Wartezeiten
- Auswirkungen von Lastspitzen
- Dimensionierung angrenzender Ressourcen
- Bewertung logistischer Gesamtkonzepte
- Optimierung von Produktions- und Transportprozessen

5.3 Emulation

Die Emulation ist ein Simulationstyp, bei dem reale Steuerungs- und Leitsysteme mit einer virtuellen Abbildung des Zielsystems gekoppelt werden. Sie wird bei der Entwicklung, Absicherung, Validierung und Inbetriebnahme von Automatisierungslösungen eingesetzt.

Im Gegensatz zur dynamischen Simulation steht hierbei nicht primär die Bewertung logistischer Kennzahlen im Vordergrund, sondern die Validierung realer Software- und Steuerungskomponenten in einer virtuellen Umgebung. Gleichzeitig kann die Emulation auch zur Bearbeitung typischer

Aufgabenstellungen der dynamischen Simulation eingesetzt werden, beispielsweise zur Bewertung von Systemkonfigurationen, Betriebsstrategien oder logistischen Abläufen unter realitätsnahen Randbedingungen.

Bei der Emulation werden einzelne oder sämtliche Entscheidungsinstanzen des Systems durch reale externe Steuerungen ersetzt. Das virtuelle Modell stellt die hierfür erforderlichen Schnittstellen bereit und übernimmt die Nachbildung der physikalischen Umgebung. Der Umfang der eingebundenen Systeme ist projektspezifisch festzulegen.

Beispielsweise können folgende reale IT-Systeme eingebunden werden:

- Leitsteuerungen
- Fahrzeugsteuerungen
- Flottenmanagementsysteme
- ERP-Systeme
- Lagerverwaltungssysteme
- Materialflusssteuerungen

Bei der Einbindung realer Systeme empfiehlt sich die Nutzung standardisierter Schnittstellen. Im Umfeld fahrerloser Transportsysteme stellt die VDA 5050 einen etablierten Standard für die Kommunikation zwischen Leitsteuerungen und Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller dar.

Je nach Zielsetzung der Emulation kann die erforderliche Abbildungstiefe der virtuellen Umgebung stark variieren. Für eine ausführliche Betrachtung der Emulation wird auf die VDI-Richtlinie 4497 „Einsatz der Emulation bei der Realisierung automatisierter Logistiksysteme“ verwiesen (Abbildung 6).

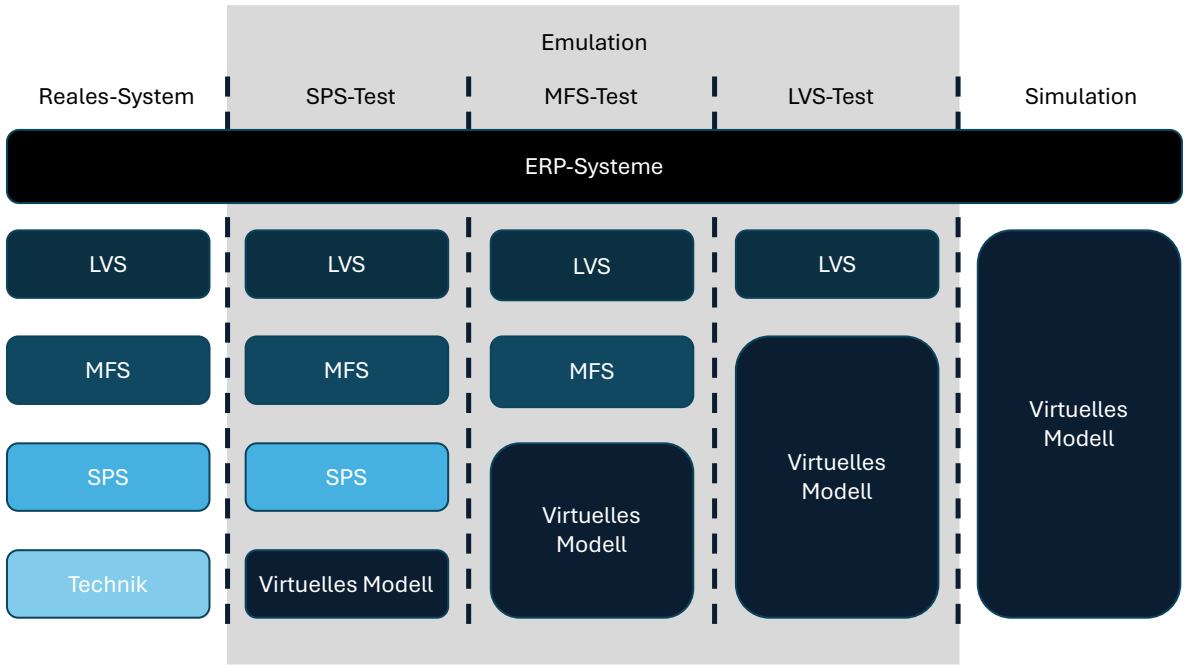

Abbildung 6: Strukturvarianten der Emulation nach VDI 4497

Typische Aufgabenstellungen

Die Emulation wird insbesondere für folgende Aufgabenstellungen eingesetzt:

- Entwicklung von Steuerungssoftware
- Test neuer Softwarestände
- Validierung von Schnittstellen
- Absicherung logistischer Steuerungsfunktionen
- virtuelle Inbetriebnahme
- Fehleranalyse
- Integration unterschiedlicher Systemkomponenten

5.4 Auswahl des Simulationstyps

Die Wahl des geeigneten Werkzeugs hängt maßgeblich von den Anforderungen an die Abbildung physikalischer Zusammenhänge ab. Bei Fragestellungen mit begrenzten Anforderungen an physikalische Effekte können klassische Simulationswerkzeuge ausreichend sein. Steigen die Anforderungen an die realitätsnahe Abbildung physikalischer Zusammenhänge, kann der Einsatz quasi-realer Entwicklungsplattformen erforderlich werden. Dies betrifft insbesondere Anwendungen, bei denen Sensor- und Aktordaten möglichst realitätsnah nachgebildet werden müssen.

Beispiele hierfür sind:

- LiDAR-Sensoren mit realistischer Punktwolkengenerierung,
- Kamerasysteme mit Bilddatensimulation,
- Personen- und Objekterkennung,
- Sicherheitsfunktionen auf Basis virtueller Schutzfelder,
- Navigationsverfahren mit realitätsnahen Sensordaten,
- Untersuchung von Abschattungen und Sichtbehinderungen,
- Berücksichtigung von Reflexions- und Beleuchtungseffekten,
- Verhalten bei Sensorausfällen oder gestörten Umgebungsbedingungen.

Mit zunehmendem Bedarf an einer physikalisch detaillierten Abbildung steigen die Anforderungen an die eingesetzten Werkzeuge und Modelle sowie der Aufwand (Kosten und Ressourcen) erheblich.

Da der Schwerpunkt dieser Richtlinie auf der Betrachtung der dynamischen Simulation liegt, fokussieren sich die folgenden Kapitel auf diese.

6. Simulationsdaten

Um ein technisches System adäquat simulieren zu können, ist eine Vielzahl an Informationen und Daten erforderlich. Gemäß VDI 3633 Blatt 1 lassen sich diese Daten in drei Hauptkategorien unterteilen: Systemlastdaten, Organisationsdaten und technische Daten (Abbildung 7). Der Umfang und die Tiefe der zu erfassenden Daten hängen maßgeblich vom jeweiligen Untersuchungsziel, den Systemgrenzen sowie von der Komplexität des zu simulierenden Systems ab.

Die Aufstellung der nachfolgenden Daten gibt einen Überblick über mögliche relevante Eingangsdaten aber erhebt aufgrund der Vielzahl an mögliche Szenarien keinen Anspruch auf Vollständigkeit (siehe Abbildung 7).

Je nach Zeitpunkt der Simulation stehen bestimmte Daten bereits zur Verfügung, während andere durch fundierte Annahmen ergänzt werden müssen. Ist beispielsweise ein konkretes System oder ein Lieferant noch nicht festgelegt, so sind Eigenschaften wie Fahrzeugparameter auf Basis plausibler Annahmen zu definieren. Liegt hingegen bereits ein festes System vor – etwa im Rahmen eines Erweiterungsprojekts – können die erforderlichen Informationen aus technischen Datenblättern oder durch gezielte Datenerhebungen gewonnen werden.

Alle getroffenen Annahmen sind nachvollziehbar zu dokumentieren und eindeutig als solche zu kennzeichnen. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob diese Annahmen in der Experimentplanung als variable Eingangsgrößen berücksichtigt werden sollten. Auf diese Weise kann mittels einer Sensitivitätsanalyse ermittelt werden, welchen Einfluss Abweichungen der Annahmen auf die Gesamtleistung des Systems haben.

Im Folgenden werden die einzelnen Datenkategorien im Kontext der Simulation fahrerloser Transportsysteme (FTS) näher erläutert.

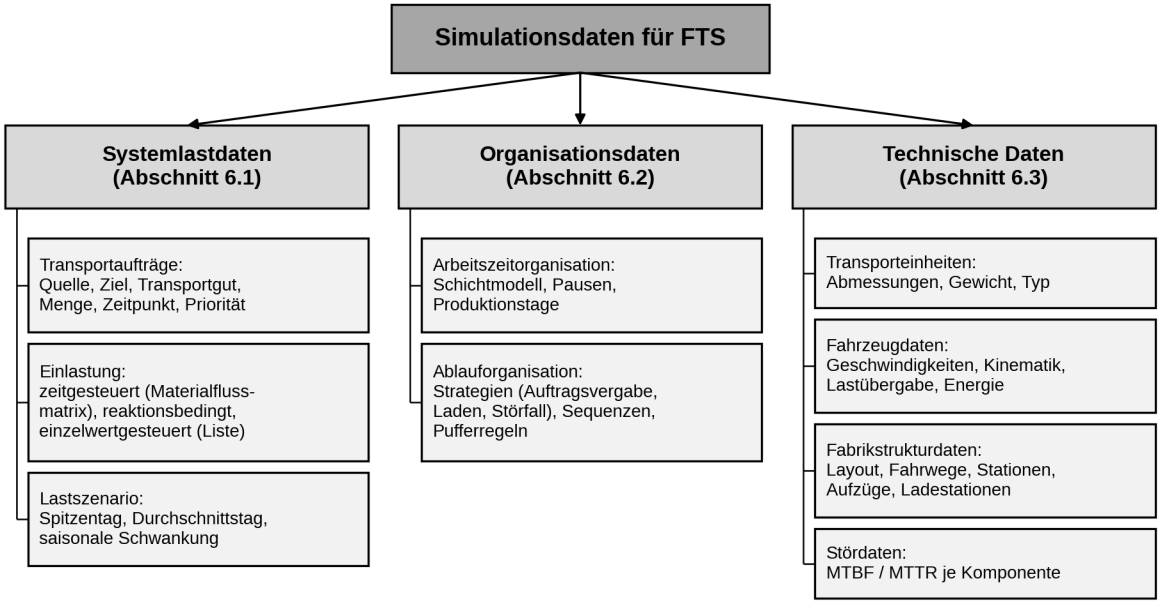

Abbildung 7: Simulationsdaten für die FTS-Planung

6.1 Systemlastdaten

Bei der Simulation von fahrerlosen Transportsystemen beinhalten die Systemlastdaten Informationen über die Transportaufträge. Diese sind gekennzeichnet durch Angabe von Start- und Zielort, Transportgut, Menge, Restriktionen von Maschinen und dem gewünschten Hilfstransportmittel (z. B. Lifte) samt zeitlicher Eintaktung.

Die Systemlast spezifiziert die Art und Anzahl der Aufträge mit deren Arbeitsgängen und Terminen. Gegebenenfalls müssen weiterführende Angaben zu den Transporteinheiten enthalten sein.

Die Systemlastmodellierung (Auftragseinlastung) kann z. B. auf folgenden Methoden basieren:

- zeitgesteuert
  - Die Eintaktung in das Modell erfolgt hierbei in fest vorgegebenen Zeitintervallen.
  - Die Materialflussmatrix ist ein gutes Beispiel für eine zeitgesteuerte Auftragseinlastung. In ihr werden die mengenmäßigen Transportbeziehungen zwischen Quelle und Ziel pro Zeiteinheit definiert, siehe Abbildung 8.
  - Der exakte Zeitpunkt der Auftragseinlastung kann über Zufallsverteilungen definiert werden (z.B. Normal-, Gleich-, Exponentialverteilung).
- ereignisgesteuert
  - Hierbei erfolgt die Einlastung über die Erreichung von bestimmten Systemzuständen. Beispielsweise könnte ein bestimmter Pufferfüllgrad einen Transportauftrag zum Leeren des Puffers auslösen.
- auftragslistenbasiert
  - z.B. liegen einzelne Transportaufträge und deren Startzeitpunkt in einer Liste vor. Diese Liste kann beispielsweise auf historischen Daten bzw. anhand von historischen Daten interpolierten Daten basieren. Für die Materialflussmatrix sind der Bezugszeitraum (z. B. Spitzenstunde, Tag) und die Verteilung der Aufträge innerhalb des Zeitraums (gleichverteilt, stochastisch, Ganglinie) anzugeben.

Die Methoden zur Modellierung der Systemlast können auch in kombinierter Form angewendet werden. Beispielsweise lassen sich bestimmte Transportflüsse durch eine Materialflussmatrix definieren (Abbildung 8), während andere Flüsse ereignis- oder reaktionsbedingt innerhalb der Simulation entstehen.

Von zentraler Bedeutung ist die klare Kenntnis darüber, welche Lastszenarien durch die Eingangsdaten abgebildet werden. Dabei kann es sich beispielsweise um einen Spitzentag, einen durchschnittlichen Betriebstag mit temporären Spitzenlasten oder einen spezifischen Tag innerhalb einer saisonalen Schwankung handeln. Diese Einordnung ist essenziell für die Interpretation der Simulationsergebnisse und die Ableitung belastbarer Aussagen.

Ein weiterer Aspekt, der nicht eindeutig den Systemlast- oder Organisationsdaten zugeordnet werden kann, betrifft den Zeitpunkt, zu welchem dem Transportsystem die Transportaufträge bekannt sind. Diese Information ist in jedem Fall mit allen beteiligten Parteien eindeutig abzustimmen, da sie häufig einen wesentlichen Spielraum für die Optimierung des Gesamtsystems bietet.

Beispiel: Transportaufträge pro Stunde (Spitzenstunde), Bezugszeitraum und Verteilung innerhalb des Intervalls sind anzugeben

nach (Senke / Zielplatz)

von (Quelle / Quellplatz)

von \ nach	Wareneingang	Lager A	Lager B	Montage 1	Montage 2	Versand	Summe
Wareneingang	–	18	12	–	–	–	**30**
Lager A	–	–	–	14	10	–	**24**
Lager B	–	–	–	6	9	–	**15**
Montage 1	–	–	–	–	–	16	**16**
Montage 2	–	–	–	–	–	12	**12**
Leergut	4	5	3	–	–	–	**12**
Summe	**4**	**23**	**15**	**20**	**19**	**28**	**109**

Abbildung 8: Materialflussmatrix

Die aufgeführten Methoden können zusätzlich über weitere Parameter beeinflusst werden. Diese können beispielsweise sein:

- Prioritäten
  - Erlaubte maximal Zeit zur Durchführung von Aufgaben
  - Auslastung von Ressourcen
- Maximale Verweilzeiten an Quellen (Puffer)
- Reihenfolge (z. B. FIFO) bezogen auf Quellen und Senken
- Abhängigkeiten von vor- oder nachgelagerten Prozessen

6.2 Organisationsdaten

Die zu betrachtenden Organisationsdaten sind betreiberspezifische Daten, die Einfluss auf die Leistungsdaten eines Fahrerlosen Transportsystems haben.

Arbeitszeitorganisation

Je nach Untersuchungsziel können Informationen über die Arbeitszeitorganisation relevant sein. Dies hängt im Wesentlichen davon ab, welcher Zeitraum in der Simulation betrachten werden soll. Wird beispielsweise ein Zeitfenster von wenigen Stunden simuliert, ist eine detaillierte Abbildung des Arbeitszeitmodells in der Regel nicht relevant. Sollen hingegen mehrere Tage bzw. das Zusammenwirken von Arbeitsbereichen mit unterschiedlichen Schichtmodellen untersucht werden, so sind Informationen über die Arbeitszeitorganisation erforderlich.

Relevante Parameter eines Arbeitszeitmodells sind z. B.:

- Schichtmodell (ein-, zwei-, dreischichtig; fünf, sechs, sieben Tage pro Woche)
- Pausenzeiten
- Arbeits-/Produktionstage pro Jahr (Wochenenden, Feiertage)
- Evtl. besondere, betriebsspezifische Modelle

Das Arbeitszeitmodell bzw. die Arbeitszeitorganisation kann relevanten Einfluss auf das FTS und damit auf die Datenbasis einer Simulation haben:

- Beispielhafte Nutzung von Pausenzeiten, Wochenenden, Freischichten:
- automatische Batterieladung oder Batteriewechsel in den Pausen
- Abbau von Auftragsspitzen in Freischichten
- Bereitstellung von Material nachts (Versand, Leergut etc.)

Das jeweilige Konzept ist abzustimmen und bei der Simulation entsprechend zu berücksichtigen.

Ablauforganisation

Im Rahmen der Simulation sind alle relevanten Strategien, Steueralgorithmen sowie ablauftechnischen Besonderheiten zu berücksichtigen, die sowohl auf Ebene der Leitsteuerung oder des Lagerverwaltungssystems als auch in unterlagerten Steuerungen – beispielsweise in Fahrzeugen oder anderen Subsystemen – bereits implementiert sind oder vorgesehen werden. Sofern diese Aspekte für die Simulation relevant sind, sind sie eindeutig zu definieren und mit allen Beteiligten abzustimmen.

Typische Beispiele für solche Besonderheiten sind:

- Sequenz- oder Chargenbildung (Reihenfolgebildung)
- FIFO-Strategien bei der Behandlung von Pufferplätzen
- Doppelspielbildung
- Zuweisungsstrategien zwischen Fahrzeug und Auftrag
- Störfallbehandlungen (z. B. belegte Plätze, gesperrte Aufzüge, Ausweichstrategien)
- Batterieladestrategien (z. B. manuelles Batteriewechseln, Zwischen- oder Ausgleichsladungen)

6.3 Technische Daten

Neben den Systemlast- und Organisationsdaten sind die technischen Daten der verwendeten Systemkomponenten abhängig vom Untersuchungsziel in einem adäquaten Detailierungsgrad zu beschreiben.

Als Systemkomponenten sind u. a. zu sehen:

- Transportgut (Transporteinheiten)
- Fahrzeugtypen (und deren Anzahl)
- Lifte, Vertikalumsetzer
- Stationen (Pufferplätze, Lastübergabestellen)
- Fahrwege
- Energiesystem (Batterie, Ladetechnik)

Daten zu den verwendeten Transporteinheiten

Als weitere Systemparameter für die Modellierung eines Simulationsmodells sind die Daten der Transporteinheit eine Einflussgröße, die Restriktionen während des Transports verursachen können. Diese können beispielsweise sein:

- Abmessungen und Gewicht der Transporteinheit
- Typ und Geometrie der Transporteinheit
- Handhabungsattribute (z. B. Stapelbarkeit, Ausrichtung, Gefahrgut)

Fahrzeugdaten

Um Fahrzeugparameter in übergreifend vergleichbarer Weise bewerten zu können, müssen grundlegende Eigenschaften des Fahrzeugs sowie dessen Zusammenspiel mit der Umgebung innerhalb der Simulation angegeben werden. Dazu zählen insbesondere:

- Geschwindigkeiten: Normalgeschwindigkeit auf Geraden und in Kurven, Geschwindigkeiten in besonderen Bereich (z. B. Kommissionierung, öffentlich zugängliche Bereiche, Kreuzungsbereiche), Beschleunigung/Verzögerung
- Batteriekapazität, Ladeleistung bzw. -kennlinie
- Kinematik, hinsichtlich Wendekreis und Kurvenradien
- Fahrzeugtypen (siehe VDI 2510, Abschnitt 3.3.1 und 3.3.2)
- Lastübergabe, einschließlich
  - Übergabezeiten
  - Art der Lastübergabe (z. B. gleichzeitige Aufnahme mehrerer Einheiten)
- Abmessungen

Je nach angestrebtem Detaillierungsgrad der Simulation kann die Fahrzeuggeschwindigkeit auf unterschiedliche Weise berücksichtigt werden. Möglich ist beispielsweise:

- die Verwendung eines mittleren Geschwindigkeitswerts über die gesamte Anlage,
- die Differenzierung nach mittleren Geschwindigkeiten in bestimmten Anlagenbereichen oder
- eine detaillierte Zuordnung der Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fahrweg (z. B. Kurven, Gefährdungsbereiche) und weiteren Einflussfaktoren.

Dabei kann die Geschwindigkeit zusätzlich differenziert werden nach:

- Fahrtrichtung (Vorwärts- und Rückwärtsfahrt) sowie
- Beladungszustand (mit und ohne Last).

Weiterhin kann es erforderlich sein, den Energieverbrauch der Fahrzeuge in unterschiedlichen Betriebszuständen in das Modell zu integrieren:

- Fahren (je nach Beladung)
- Standby
- Lastaufnahmebewegungen
- Batterieladung

Fabrikstrukturdaten

Die Fabrikstrukturdaten werden u.a. durch das Layout beschrieben. Das Layout zeigt die räumliche Anordnung aller verwendeten Komponenten. Es sollte mindestens folgende Detailangaben enthalten:

- die zur Verfügung stehenden Fahrwege (mit Breite, Höhe, Steigung, Bodenbeschaffenheit)
- die räumliche Anordnung von Quellen und Senken, Park- und Batterieladestationen (mit Höhe, Breite)
- die räumliche Anordnung von Liften, Aufzügen etc. die als Transportweg verwendet werden
- periphere Einrichtungen (VDI 2510 Blatt 1)

Abhängig von den räumlichen Gegebenheiten und der verwendeten Fahrzeugkinematik ist ein wesentlicher Anteil von gegenseitiger Verblockung zu berücksichtigen. Bei komplexen Anlagen kann der Blockungsanteil bis zu 50 % betragen. Die dynamische Simulation und die Emulation liefern diese Blockungen als Ergebnis, bei der statischen Simulation muss ein entsprechender Anteilgeschätzt werden.

Stördaten

In der Realität kommt es immer wieder zu Störungen, die den geplanten Betriebsablauf behindern oder unterbrechen und damit die Verfügbarkeit reduzieren. Gemäß VDI 2710 wird dabei zwischen ausfallbedingten Zeiten, die durch den Auftragnehmer verursacht werden, und solchen, die dem Auftraggeber zuzuschreiben sind, unterschieden. Für die Bewertung des Durchsatzes (Leistung x Verfügbarkeit) eines Systems ist es unerheblich, wer oder was die Ursache einer Störung war. Die Unterscheidung ist jedoch notwendig, wenn es um die Abnahme des Systems geht. Denn hier werden ausfallbedingte Zeiten, die vom Auftraggeber verursacht wurden, in der Regel nicht berücksichtigt. Andererseits kann es für den Auftraggeber aufschlussreich sein zu erkennen, welche Störungen einen besonders großen Einfluss auf den Betrieb haben, um bereits vor der Inbetriebnahme geeignete Präventionsmaßnahmen zu ergreifen.

Folgende Auftragnehmer spezifischen Störungen können auftreten:

- Stillstandzeiten der Aufzüge
- Ausfälle einzelner Fahrzeuge während der Fahrt (können Fahrwegblockaden verursachen)
- Ausfälle einzelner Fahrzeuge durch fehlerhafte Lastaufnahme oder -abgabe
- Ausfälle von Übergabestationen

Auftraggeber spezifische Störungen können sein:

- Fahrwegblockaden durch externe Verkehrsteilnehmer
- Fehlende Freigabe von Übergabepunkten (z. B. durch belegte Pufferflächen oder Verzögerungen in vorgelagerten Prozessen)
- Fehlende Transportaufträge aufgrund von IT-Störungen oder Schnittstellenproblemen
- Fehlende oder fehlerhafte Behälterbereitstellung an Quellstationen
- Störungen in der Fördertechnik außerhalb des FTS (z. B. Stau auf Rollenbahnen)

Je nachdem, an welcher Komponente eine Störung auftritt, hat dies einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Verfügbarkeit des Gesamtsystems. Fällt beispielsweise ein zentraler Lift aus, können zahlreiche Fahrzeuge und Transportaufträge betroffen sein. Ebenso kann eine Störung auf einem stark frequentierten Fahrweg („Highway“) zu weitreichenden Blockaden führen. Findet die Störung hingegen bei der Aufnahme oder Abgabe von Transportgütern statt, sind in der Regel nur das betroffene Fahrzeug und die jeweilige Übergabestation betroffen.

Für jede Art der Störung muss festgelegt werden, wie häufig sie auftritt und wie lange die Störung “aktiv” ist. Üblicherweise werden hierfür die Kennzahlen MTBF (Mean time between failure) und MTTR (Mean time to repair) verwendet:

- MTBF = Gesamtbetriebszeit / Anzahl der Ausfälle
- MTTR = Gesamte Reparaturzeit / Anzahl der Reparaturen.

Das Wort “Repair” bzw. “Reparatur” ist in diesem Kontext als Behebung der Störung bzw. Zeit zur Behebung der Störung anzusehen. Für die Simulation sind neben den Mittelwerten die Verteilungen (z. B. Exponential-, Weibull-Verteilung) oder empirische Häufigkeiten anzugeben.

7. Experimentplanung

Die Erstellung eines Simulationsmodells stellt lediglich einen Teil der Gesamtarbeit innerhalb einer Simulationsstudie dar. Insbesondere die anschließende Experimentierphase verursacht in der Praxis häufig einen größeren Anteil des Gesamtaufwandes. Ein zentraler Aspekt ist hierbei die erreichbare Simulationsgeschwindigkeit (Dauer eines Simulationslaufes).

Modelle mit einfacher Logik, kleinem Layout und/oder wenigen Fahrzeugen benötigen für einen Simulationslauf deutlich weniger Zeit als Modelle mit komplexer Logik, großem Layout und vielen Fahrzeugen. Das liegt daran, dass der Computer bei komplexen Modellen deutlich mehr Rechenoperationen auszuführen hat.

Auch der Aufwand für die Aufbereitung, Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse darf nicht unterschätzt werden. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, Simulationsexperimente so zu planen, dass sie mit möglichst geringem Aufwand zu belastbaren Aussagen bezüglich des Simulationsziels führen.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Planung ist die Festlegung und Strukturierung der zu variierenden Einflussgrößen. Dabei ist sicherzustellen, dass die Abfolge der Experimente logisch aufgebaut ist und effizient zur Beantwortung der Fragestellung beiträgt. Im Verlauf der Analyse entstehen häufig neue Fragestellungen, die systematisch dokumentiert werden müssen. Nach Abschluss der Auswertung ist zu reflektieren und festzuhalten, inwieweit die ursprüngliche Fragestellung beantwortet wurde.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und Größe der Wertebereiche ist es in der Regel nicht zielführend, sämtliche Konstellationen zu simulieren. Eine strukturierte Vorgehensweise zur Variation der Einflussgrößen wird in der statistischen Experimentplanung gemäß VDI 3633 Blatt 3 beschrieben. Diese umfasst insbesondere:

- Festlegung der Anzahl der erforderlichen Simulationsläufe,
- Definition der Stufenkombinationen der in den Experimenten zu untersuchenden Einflussgrößen,
- Bestimmung der Simulationsdauer,
- Festlegung der Messzeitpunkte und Messintervalle.

Im Zuge der Experimentplanung sind zudem folgende Aspekte zu berücksichtigen, siehe Tabelle 1:

Tabelle 1: Aspekte der Experimentplanung

Aspekt	Beispiele
Identifikation aller relevanten Einflussgrößen	Fahrzeuganzahl, Layoutvarianten, Lastszenarien
Abschätzung der Auswirkungen der Einflussgrößen auf die Zielgrößen	Durchlaufzeiten, Produktionsmengen
Festlegung der relevanten Einflussgrößen mit hohem Einfluss auf die Zielgrößen	Einfluss hoch: Batterieladezeigen Einfluss niedrig: Detaillierte Geschwindigkeitsprofile
Festlegung konstanter und variabler Einflussgrößen	Ist der Hersteller noch nicht festgelegt, werden Übergabezeiten, Geschwindigkeitsprofile und Batteriekonzept als variable Einflussgrößen geführt.
Bestimmung sinnvoller Wertebereiche für die variablen Einflussgrößen unter Berücksichtigung der Randbedingungen	Puffergrößen (1-x, begrenzt durch vorhandenen Platz)

8. Ergebnisse

Ein FTS ist in der Regel Teilsystem eines Gesamtsystems und trägt zu dessen Leistungszielen bei. Diese werden durch allgemeine Kenngrößen beschrieben:

- Durchsatz und Auslastung
- Pufferbestände und Warteschlangen
- Termintreue
- Wartezeiten

Wie jedes Teilsystem besitzt das FTS-Schnittstellen zur „Außenwelt“ und/oder anderen Teilsystemen und beeinflusst über die FTS-Senken das Verhalten der angrenzenden Teilsysteme bzw. wird über die FTS-Quellen vom Verhalten der Teilsysteme beeinflusst. Deshalb müssen die Ergebnisauswertungen eines FTS immer im Zusammenhang mit den anderen Teilsystemen bzw. des Gesamtsystems betrachtet/bewertet werden.

Beispiele:

- Ist die durchschnittliche Auslastung der FTF einer FTS-Flotte so gering, weil deutlich mehr FTF eingesetzt wurden als erforderlich, oder sind Engpässe in angrenzenden Teilsystemen dafür verantwortlich, dass an den FTS-Quellen nicht die geforderte Anzahl Transportaufträge bereitgestellt wird?
- Erbringt das FTS nicht die geforderte Durchsatzleistung, weil die Anzahl der eingesetzten FTF zu gering ist bzw. die Regeln der Transportauftragszuweisungen nicht ausreichend ein z.B. asymmetrisches Transportauftragsaufkommen berücksichtigen, oder führt ein unzureichendes Abzugsverhalten der an den FTS-Senken angrenzenden Teilsysteme dazu, dass durchgeführte Transporte nicht abgeschlossen werden können, weil FTF über Gebühr gebunden sind, da sie häufig auf freiwerdende Abgabeplätze warten müssen?

Durch eine Definition der Schnittstellen kann ein FTS freigeschnitten und dessen Verhalten weitgehend unabhängig von seiner „Außenwelt“ simulativ betrachtet und bewertet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Übertragung der Ergebnisse eines freigeschnittenen FTS in ein Gesamtsystem die o.g. Einflüsse des Gesamtsystems berücksichtigt werden müssen.

Ergänzende Kenngrößen zur Bewertung/Interpretation der Simulationsergebnisse von FTS

Neben den üblichen Bewertungsgrößen wie z.B. Anzahl FTF, durchschnittliche Auslastung der FTF-Flotte, Wartezeitverteilungen auf Abholung und Anzahl durchgeführter Transporte pro Zeiteinheit können zusätzliche FTS-typische Kenngrößen zur Bewertung herangezogen werden, die eine Interpretation ermöglicht, weshalb ein FTS z.B. eine geforderte Leistung nicht erbringt.

Im Folgenden sind einige Beispiele dieser FTS-typischen Kenngrößen aufgeführt. Je nach Aufgabenstellung bzw. Untersuchungsziel sind weitere Kenngrößen denkbar. Abbildung 9 zeigt, wie sich die Betriebszeit eines FTF aufteilt.

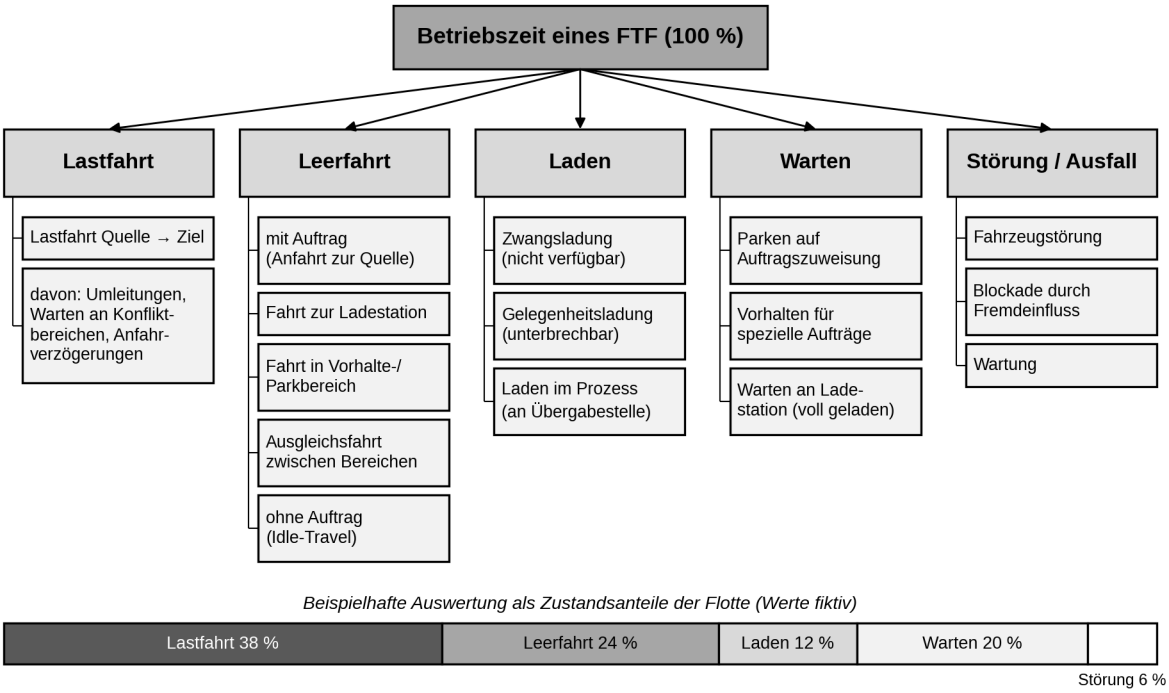

Abbildung 9: Anteile der FTF-Betriebszeit

- Auswertung der Zustandsanteile der FTF-Flotte
  Pauschal lassen sich grundsätzlich folgende Zustandsanteile unterscheiden:
  - Lastfahranteil
  - Leerfahranteil
    - mit zugewiesenem Transportauftrag (= „Retrieve-Fahrt“)
    - ohne speziellen Transportauftrag (= „Idle-Travel“)
  - Ladezeiten
  - Parkanteil (= Wartezeiten auf Zuweisung eines Fahrauftrags an ausgewiesenen Wartepositionen)
  - Vorhalteanteil (= Wartezeiten auf Zuweisung spezieller Fahraufträge an i.d.R. speziellen Wartepositionen, z.B. rechtzeitige Bereitstellung einer bestimmten Anzahl FTF vor Beginn einer LKW-Entladung am Wareneingang zwecks Reduzierung der Reaktionszeit)
  - Ausfall- und Störanteile

- Zusätzliche Detaillierung der Lastfahranteile der FTF-Flotte

  Bei einer gegebenen Leistungserfüllung einer vorgegebenen Systemlast ist die Summe der Lastfahranteile der FTF-Flotte i.d.R. nahezu konstant, da Quell- und Zielort des Transports vorgegeben sind. Mögliche Abweichungen resultieren ggf. aus:

  – Umleitungen zum Umfahren von Staubereichen
  – Wartezeiten zum Passieren von Konfliktbereichen (Vorfahrtregelungen z.B. an Kreuzungen, einspurige bidirektionale Strecken)
  – zusätzliche Wartezeiten an kapazitativ limitierten Engpässen
    - Wartezeit auf das Freiräumen einer Abgabestelle
    - Wartezeit auf Einfahrt in Aufzüge, Heber etc.
    - Sonstige Zufahrtrestriktionen, z.B. platzbedingte Begrenzung der zulässigen Anzahl FTF in bestimmten Bereichen
    - aufgetretene zusätzliche Anfahrverzögerungen (Reaktionszeit vor dem Wiederanfahren aus dem Stand) aufgrund z.B. von Stausituationen bzw. Auffahrverhalten auf der Strecke

- Zusätzliche Detaillierung der Leerfahranteile der FTF-Flotte

  Leerfahrten der FTF sind i.d.R. unvermeidbar und können die verfügbare Transportkapazität der FTF-Flotte erheblich reduzieren. Eine Differenzierung der Leerfahranteile ermöglicht eine weitere Interpretation des Gesamt-Simulationsergebnisses.

  – Leerfahrt mit zugewiesenem Transportauftrag (=Retrieve-Fahrt). Gemeint ist hier der Anteil der Fahrzeit zwischen Zuweisung des Transportauftrags bis zum Erreichen der Aufnahmeposition.
  – Zwingend notwendige Leerfahrt eines FTF zu einer Ladestelle, wenn der Akku einen definierten Mindestfüllstand unterschreitet.
    - anschließend erfolgt eine „Zwangsaufladung“ des Akkus
  – Leerfahrt eines FTF aufgrund eines Fahrauftrags, um die geforderte FTF-Anzahl eines Vorhaltebereichs zu erfüllen (rechtzeitige Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl FTF in speziellen Bereichen zu bestimmten Zeitpunkten)
  – sog. IDLE-Travel, d.h. Leerfahrt ohne konkreten Transportauftrag, i.d.R. RoundRobin bis zur nächsten freien Ladestelle bzw. bis eine Transportauftragszuweisung erfolgt
  – Leerfahrt zum Ausgleich von Differenzen der Verteilung der FTF der FTF-Flotte zwischen unterschiedlichen Bereichen mit dem Ziel einer ausgewogenen/bedarfsgerechten Verteilung der FTF im System

- Zusätzliche Detaillierung der Ladezeiten an Ladestationen

  Eine differenzierte Auswertung der Ladezeitanteile kann Rückschlüsse z.B. darüber erlauben, weshalb zu bestimmten Zeiten das FTS nicht die geforderte Leistung erbringt.

  – FTF im Zustand „Zwangsaufladung“

    Der Akku des FTF hat einen kritischen Füllstand unterschritten und wird bis zum Erreichen eines definierten Mindestfüllstands geladen.
    - Das FTF steht während dieser Zeit nicht für die Zuweisung eines Transportauftrags zur Verfügung
  – FTF im Zustand „Normal-Laden“

    Der Akku des FTF wird derzeit geladen und hat noch nicht den 100%-Füllstand erreicht.
    - Bei Bedarf kann der Ladevorgang für die Durchführung eines Transportauftrags beendet werden und das FTF mit der Retrieve-Fahrt zur Quellposition des Transportauftrags beginnen.

- Zusätzliche Detaillierung der Wartezeitanteile
  - Wartezeiten an Vorhaltepositionen bzw. Verweilzeiten in Puffer-Strecken (z.B. Bereitstellung einer bestimmten Anz. FTF vor Beginn der LKW-Entladung am Wareneingang oder Warteschlange für FTF an einem Arbeitsplatz)
    - Durch die Wartezeiten für das Vorhalten von FTF wird temporär die verfügbare Transportkapazität der FTF-Flotte reduziert
  - Wartezeiten auf Ladestellen, wenn FTF voll geladen ist
    - Mögliches Indiz, dass die Transportkapazität der FTF eine ausreichende Reserve für eventuelle Belastungsschwankungen besitzt
  - Wartezeiten an ausgewiesenen Warte-/Parkpositionen auf Auftragszuweisung, um die Reaktionszeit bis zum Erreichen der Quellposition des Transportauftrags zu reduzieren.
- Weitere mögliche Kenngrößen zur Bewertung/Interpretation der Simulationsergebnisse eines FTS
  - Darstellung und Auswertung des zeitlichen Verlaufs der durchschnittlichen Akkufüllung der FTF der FTF-Flotte.

    Ggf. ergänzt durch Histogramm je Zeiteinheit über den Anteil FTF mit bestimmter Akkufüllung (z.B.: kleiner 25%, zw. 25%und 75%, größer 75%)
  - Häufigkeit, Dauer und Zeitpunkte von zwingend erforderlichen Zwangsaufladungen, die temporär die verfügbare FTF-Flotte reduzieren.
  - Anteil der Ladezeiten außerhalb der ausgewiesenen Ladestellen, z.B. Kurzaufladungen während Lastübergaben (“In-Process-Charging”) oder an definierten Wartepunkten bzw. vor Kreuzungen.
  - Anzahl durchgeführter Doppelspiele (ggf. differenziert je Quelle/Senke-Paar)

    Unter einem Doppelspiel soll hier eine Zuweisung eines neuen Transportauftrags zu einem FTF verstanden werden, dessen Aufnahmeposition (Quelle) in räumlicher Nähe zur Abgabeposition (Senke) eines gerade abgeschlossen Transportauftrags befindet. Ein Doppelspiel verringert somit den Leerfahranteil eines FTF und erhöht den Anteil der genutzten Transportkapazität.
  - Darstellung der Verteilung der Anzahl FTF der FTF-Flotte auf definierte Bereiche des FTS (z.B. „Bereich Nord“ vs. „Bereich Süd“ oder Bereich “Versorger“ vs. Bereich „Verbraucher“)
  - Auswertung der Häufigkeitsverteilung der Distanzen zwischen Quellort des Transportauftrags und aktueller Position des FTF zum Zeitpunkt der Auftragszuweisung.

Die Dokumentation von Simulationsergebnissen spielt eine zentrale Rolle, um aus einer Vielzahl von Daten, Kennzahlen und Auswertungen belastbare Erkenntnisse abzuleiten. Hierbei werden die Ergebnisse auf Basis der Experimentplanung in einer klar strukturierten und nachvollziehbaren Form aufbereitet, sodass Zusammenhänge, Auswirkungen und Optimierungspotenziale schnell erkannt werden können. Dabei werden alle relevanten Informationen, wie Annahmen, Systemgrenzen, Parametrierungen, Szenarien sowie die verwendeten Datenquellen, strukturiert erfasst. Besonders bei komplexen Modellen mit großen Datenmengen ist es wichtig, die wesentlichen Erkenntnisse zu verdichten und die entscheidenden Einflussfaktoren transparent darzustellen.

Neben den reinen Simulationsergebnissen können auch die Simulationsmodelle der FTS als Lieferobjekt dienen. Vor allem, wenn eine spätere Nutzung angedacht ist, um z.B. die Änderung der Anzahl an Fahrzeugen bei sich veränderndem Produktionsvolumen oder eine veränderte Wegegestaltung zu untersuchen. Bei einer Modellübergabe für die Weiternutzung ist eine umfassende Modelldokumentation essenziell, um die Nachvollziehbarkeit, Wartbarkeit und Weiterentwicklung der Modelle sicherzustellen. Je nach Komplexität sind Schulungen zu empfehlen.

9. Simulation von autonomen Funktionen

Im Allgemeinen führt das Hinzufügen von Funktionen zu komplexeren Simulationsmodellen. Dies liegt daran, dass zusätzliche Funktionen mehr Einflussfaktoren aufweisen und zu einer komplexeren Logik mit zusätzlichen Entscheidungen führen. Bei einigen der autonomen Funktionen, wie sie im „Leitfaden Autonomie“ des VDI-Fachausschusses „Mobile Robotik“ aufgeführt werden, handelt es sich wie im Abschnitt „Anwendungsbereich“ beschrieben um ein situatives Reagieren auf sich verändernde Umgebungsbedingungen.

Da Simulationsmodelle nur so detailliert modelliert werden, wie es die Fragestellung erfordert, muss dementsprechend für jede autonome Funktion abgeschätzt werden, ob sie im jeweiligen Simulationsprojekt einen relevanten Einfluss auf das Simulationsergebnis hat.

Ist die Funktion zu berücksichtigen, ist festzulegen, wie diese im digitalen Modell abgebildet werden kann, ggf. als zusätzliche Einflussgröße. Bei einer relevanten Änderung der Umgebungsbedingungen muss die Funktion mit der entsprechenden Logik ausgeführt werden. Der Aufwand hierfür ist von der genutzten Simulationssoftware abhängig bzw. bestimmt ggfls. die zu nutzende Software.

Tabelle 2 führt autonome Funktionen von FTF auf und nennt mögliche zusätzliche Einflussgrößen. Die Validierung ist nur in der realen Referenzanlage möglich. Die Tabelle 2 enthält nur fahrzeugseitige Autonomiefunktionen; es sind auch autonome Leitsteuerungsfunktionen denkbar.

Tabelle 2: Autonome Funktionen und ihre Einflussgrößen

Autonome Funktion	Benötigte zusätzliche Einflussgrößen
Umfahren von Hindernissen	- Ort, Zeitpunkt, Dauer, Art des Hindernisses im Layout - Bedingungen, ob Umfahren möglich ist (z.B. Gegenverkehr beachten) - Dauer des Umfahrens
Selbstständige, dynamische Aktualisierung der Modellierung der Einsatzumgebung im laufenden Betrieb	- Ort, Zeitpunkt, Dauer, Art der Umgebungsänderung - Auswirkung auf die Befahrbarkeit und Kapazität des Bereichs bzw. der Fahrstrecke und der Routenfindung der einzelnen Fahrzeuge
Fahren auf freigegebenen Flächen	- Wegeauswahl, z.B. des kürzest möglichen Weges - Geeignete Software zur Abbildung des Fahrens auf Flächen oder Zeitaufschläge in Abhängigkeit der Anzahl anderer Fahrzeuge auf der Fläche. Hinweis: Validierung nur durch reale Referenzanlage möglich.
Fahren und Reagieren auf Basis von Objekterkennung und -klassifizierung	- Ort, Zeitpunkt, Dauer, Art des Objektes - Bewegungsrichtung des Objektes - Logik des Verhaltens des Fahrzeuges in Abhängigkeit des Objektes
Lasthandling auf Basis von Objekterkennung und -klassifizierung	- Art des Objektes - Zeitaufschlag in Abhängigkeit des Objektes
Situationsbedingtes Umplanen von Routen im Mischbetrieb	- Ort und Zeitpunkt des Ereignisses, welches eine Umplanung auslöst - Logik zur Berechnung der neuen Route
Verkehrsregelung unter Berücksichtigung des Mischbetriebs	- Verkehrsregeln pro Akteur des Mischbetriebes
Selbstständiges Erkennen und Reagieren auf Fahrzeugzustandsdaten ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebes	- Keine, sofern sich das Auftreten der Ereignisse und die Logik mit dem Umgang der Ereignisse nicht ändert.
Teilweises oder komplettes Verlagern von Leitsteuerungsfunktionen auf die Fahrzeugseite	- Bei einer reinen Verlagerung der Funktionen keine. In der Simulation muss keine Trennung in Leitsteuerungsfunktion und Fahrzeugfunktion erfolgen.

In der Tabelle 2 wird ersichtlich, dass einige der zusätzlichen Einflussgrößen sich auf den Ort, den Zeitpunkt und die Dauer eines Ereignisses beziehen. Sind diese nicht bestimmbar, verringert sich die Aussagekraft der Simulation. Generell gilt: Je mehr autonome Funktionen eingesetzt werden, desto schwieriger ist das Systemverhalten vorherzusagen; die Aussagekraft einer Simulation, die diese Funktionen nur vereinfacht abbildet, sinkt entsprechend.

Mit der Simulation lässt sich prüfen, ob durch geordnete Systemzustände (z. B. abgestimmte Verkehrsregeln, freie Fahrwege) der Bedarf an autonomen Reaktionen reduziert werden kann. Autonome Reaktionen kosten in der Regel Zeit; ihr Einfluss auf den Durchsatz ist im Einzelfall zu bewerten.