

# Kapitel 1

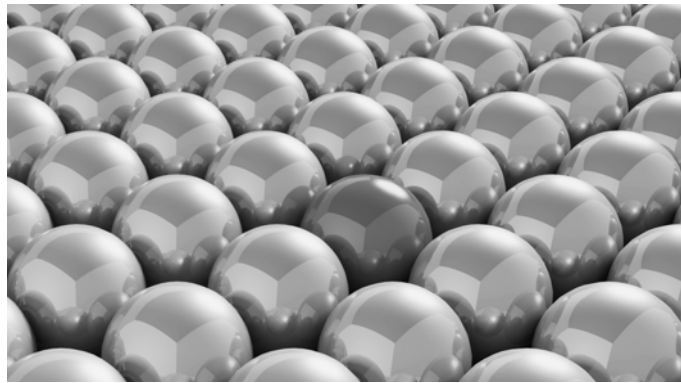
## Einführung und logistischer Hintergrund

*„Innovation ist nicht das Ergebnis logischen Denkens, auch wenn das Ergebnis logisch ist.“  
Albert Einstein*

### 1.1 Motivation

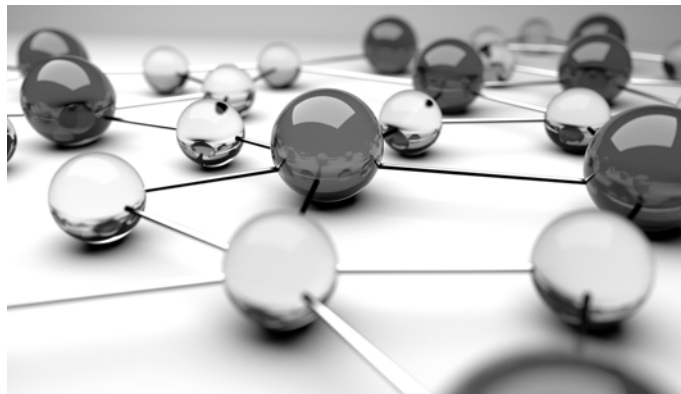
Stetig wechselnde Leistungsanforderungen aufgrund volatiler Märkte und die Individualisierung von Produkten stellen die innerbetriebliche Logistik vor schwer zu lösende Aufgaben. Klassische Fördermittel wie Rollen-, Bandförderer und Fahrerlose Transportsysteme können systembedingt diesen Anforderungen kaum gerecht werden. Zellulare Transportsysteme sind die aktuellen Antworten auf die genannten Anforderungen und gleichermaßen die flexibelsten wie auch wandelbarsten Systeme der Intralogistik (vgl. Abschnitt 1.3.3 und Abschnitt 2.9).

Grundsätzliche Fragestellungen nach den technologischen und wirtschaftlichen Vorteilen vernetzter Zellularer Transportfahrzeuge (s. Abschnitt 1.3.3.2) und die Steigerung ihrer Effektivität liegen aktuell im Fokus der Forschung auf dem Gebiet der Zellularen Transportsysteme (s. Abschnitt 1.3.3). Grundlegende Fähigkeiten Zellularer Transportfahrzeuge zur kooperativen Bewältigung von Transportaufgaben, Kollisionsvermeidung wie auch Nutzung von Sensordaten und Rechenkapazität sowie die damit verbundene Reduktion lokaler Steuerungs- und Sensorikkomponenten sind bis heute nicht hinreichend erforscht. Eine Vielzahl



**Abbildung 1.1:** Nicht vernetzte Individuen [Ft11]

gleichartiger Individuen (vgl. Abbildung 1.1), in diesem Fall Fahrzeuge, die Transportaufgaben bewältigen, machen keinen (interaktiven und vernetzten) Schwarm gemäß Definitionen (vgl. Abschnitt 2.8) aus. Erst durch die intelligente Nutzung aktueller Zustands-, Sensor-, Umgebungs- und Positionsdaten durch das Fahrzeugkollektiv wird die Zellulare Intralogistik zu einem Fahrzeugschwarm und erlaubt eine Nutzung von flexiblen Fördermitteln in kostensensitiven Märkten. Damit durchdringt das Internet der Dinge (vgl. Abschnitt 2.1) auch die Domäne der Transportfahrzeuge und vernetzt diese zu einem Kollektiv (vgl. Abbildung 1.2).

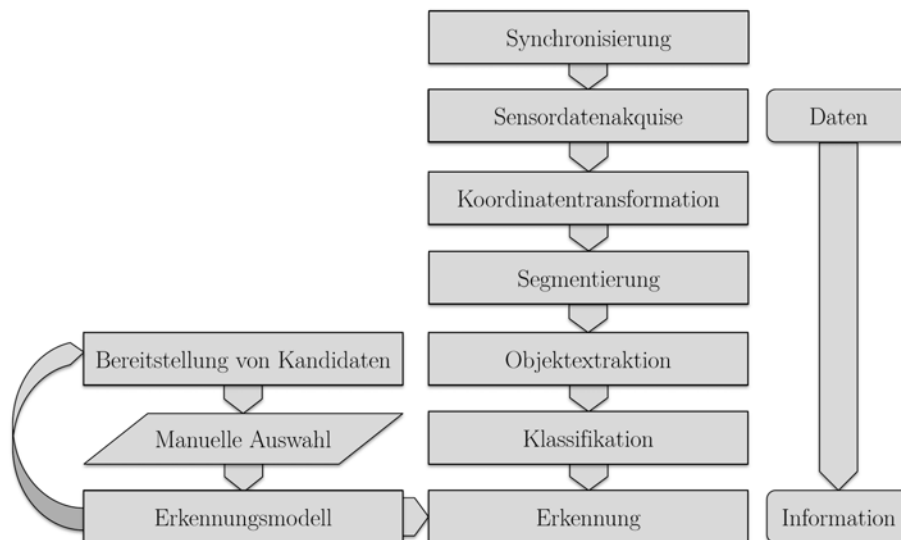


**Abbildung 1.2:** Vernetzte Systeme in einem Internet der Dinge [Fp11]

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Diese wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit den Fähigkeiten Zellularer Transportfahrzeuge zur kollektiven Nutzung von Sensordaten. Ein Schwarm von

Fahrzeugen, das sogenannte Zellulare Transportsystem, soll in der Lage sein, untereinander zu kommunizieren, sich gegenseitig zu erkennen, die Umwelt wahrzunehmen, aus den aktuellen Ereignissen zu lernen und somit als Schwarm zu agieren. In einer technischen Realisierung müssen Teile davon in Echtzeit abgearbeitet werden. Insbesondere die deterministische, kooperative Nutzung von Sensordaten für eine probabilistische Fahrzeugerkennung in einem vernetzten Intralogistiksystem wird im Rahmen dieser Dissertation untersucht und evaluiert. Die einzelnen Gesichtspunkte werden nach der ihnen im Rahmen des Ganzen zukommenden Wichtigkeit in der vorliegenden Dissertation betrachtet. Dies ermöglicht eine sukzessive Reduktion kognitiver Fähigkeiten einer Transportentität unter Beibehaltung der Autonomie und der Gesamtperformance des Zellularen Transportsystems mit limitierten technischen Mitteln. Sensor- und Zustandsdaten aller Fahrzeuge befinden sich in einer verteilten Entität im gesamten Zellularen Transportsystem, so dass das Steuerungssystem (hier ein Multi-Agenten-System) trotz limitierter lokaler kognitiver Fähigkeiten eine hinreichend optimale Entscheidung treffen kann.

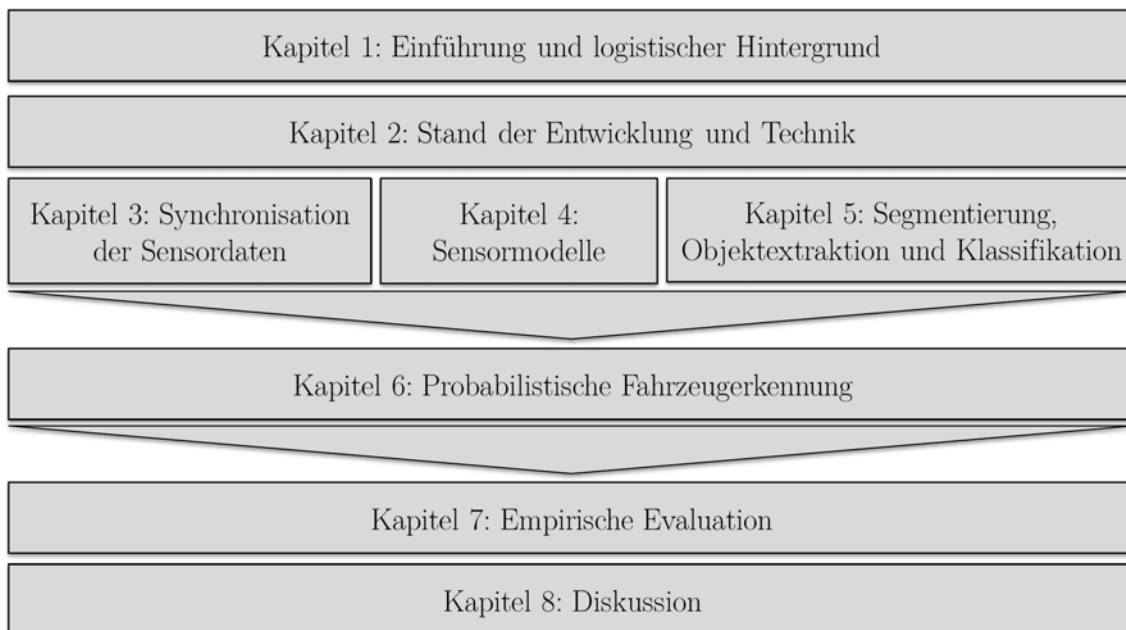


**Abbildung 1.3:** Methodisches Vorgehen und Struktur der Arbeit

Methodisch folgt diese Arbeit dem in der Abbildung 1.3 visualisierten Ansatz. Grundlegend werden aus einer Datenmenge, in diesem Fall Sensordaten eines Laserscanners, Informationen über die sichtbaren Zellularen Transportfahrzeuge aus einem Sensornetzwerk extrahiert. Der Informationsgehalt nimmt dabei in der Verarbeitung entlang der Pipeline (s. Abbildung 1.3) stetig zu, während der Datengehalt reduziert wird. Die Synchronisation der akquirierten Sensordaten spiegelt das Kapitel 3

wider. Die Sensordatenakquise wird im Rahmen der Sensormodelle in Kapitel 4 erläutert, Kapitel 5 beschreibt die Methoden der Segmentierung, Objektextraktion und Klassifikation. Abschließend werden die Fahrzeugerkennung und das überwachte maschinelle Lernen in Kapitel 6 beschrieben.

Die Gliederung der Arbeit ist in der Abbildung 1.4 dargestellt. Sie gibt eine Übersicht über die enthaltenen Kapitel. Im Anschluss an das erste Kapitel, das einen thematischen Überblick über die wissenschaftliche Arbeit und die logistischen Grundlagen gibt, wird in Kapitel 2 der Stand der Technik und Entwicklung aus interdisziplinär relevanten Bereichen wie Internet der Dinge, Schwarmintelligenz, Sensorfusion, kooperatives Verhalten, Fahrerlose Transportsysteme, Shuttle-Systemen sowie insbesondere die aktuellen Forschungen aus dem Bereich der Schwarmrobotik und der Zellularen Transportsysteme reflektiert. Der Fokus liegt hierbei sowohl auf den technischen Realisierungen als auch auf Forschungstrends. Der Stand der Forschung wird in den Kapiteln 3 bis 6 separat und kontextbezogen zur Eigenentwicklung dargestellt.



**Abbildung 1.4:** Gliederung der Arbeit

Die Kapitel 3, 4 und 5 schaffen einen Beitrag für die kognitiven Fähigkeiten der Zellularen Transportsysteme sowie für die in Kapitel 6 folgende probabilistische Fahrzeugerkennung. In Kapitel 3 liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Austausch von synchronisierten Sensordaten, die durch ein nichtdeterministisches Medium

(WLAN) versendet werden. Ziel dabei ist es, eine einheitliche verteilte Zeitbasis für die Sensordaten mittels geeigneter Methoden zu erstellen. Kapitel 4 zeigt die Basis der Sensormodellerstellung von unterschiedlich gearteten Abstandssensoren wie beispielsweise Laserscanner oder Time-of-Flight-Kameras. In Kapitel 5 wird ein Beitrag für eine Segmentierung, Objekterkennung und Klassifikation mittels Methoden der maschinellen Bildverarbeitung, basierend auf den vorher erläuterten Sensormodellen, geleistet, so dass die in Kapitel 3 bis 5 gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 6 für eine Erkennung von Zellularen Transportfahrzeugen genutzt werden können. Die Gesamtperformance der entwickelten Algorithmen wird in Kapitel 7 auf unterschiedlichen Systemen evaluiert und auf Echtzeitfähigkeit untersucht, die für die technische Implementierung von entscheidender Bedeutung ist. Die Diskussion in Kapitel 8 fasst die bearbeitete Thematik zusammen, gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Forschungsthemen und zieht ein Resümee der gesamten Arbeit.

Ausgangsbasis für diese wissenschaftliche Arbeit stellen die Zellularen Transportfahrzeuge (ZTF) des Fraunhofer IML dar, die über eine dreischichtige Steuerungsarchitektur (vgl. Abbildung 1.5) verfügen. Die Steuerung des ZTF lässt sich dabei folgendermaßen unterteilen:

- Sensor- und Aktorebene
- Operative Ebene
- Strategische Ebene.

Auf der Sensor- und Aktorebene werden Aufgaben wie Positionieren, Bedienung des Lastaufnahmemittels, Akquise der Sensordaten und allgemeine Steuerungsaufgaben auf unterster Ebene hardwarenah abgearbeitet. Die komplexere operative Ebene beschäftigt sich mit Aufgaben wie der intelligenten Auswertung der Daten aus Funkortung, Abstands- und Inertialsensoren. Die Kollisionsvermeidung und die Lokalisation sind ebenfalls Bestandteile dieses Layers. Dort wird auch die aktuelle Trajektorie des Fahrzeugs berechnet. Direkten Einfluss auf die operative Ebene übt die strategische Ebene aus. Letztere ist für die Funktion des Fahrzeugs als Individuum und als Teil eines Schwarms verantwortlich. Ein Software-Agent steuert dynamisch die Parameter der operativen Ebene, abhängig von seinem aktuellen Auftrag und den Aufträgen der anderen Fahrzeuge. Diese Arbeit erstellt einen Beitrag für die Realisierung der operativen und strategischen Ebene von vernetzten, kooperierenden, autonomen Fahrzeugen (vgl. [KG11], [KSNt11] und [tK11]).

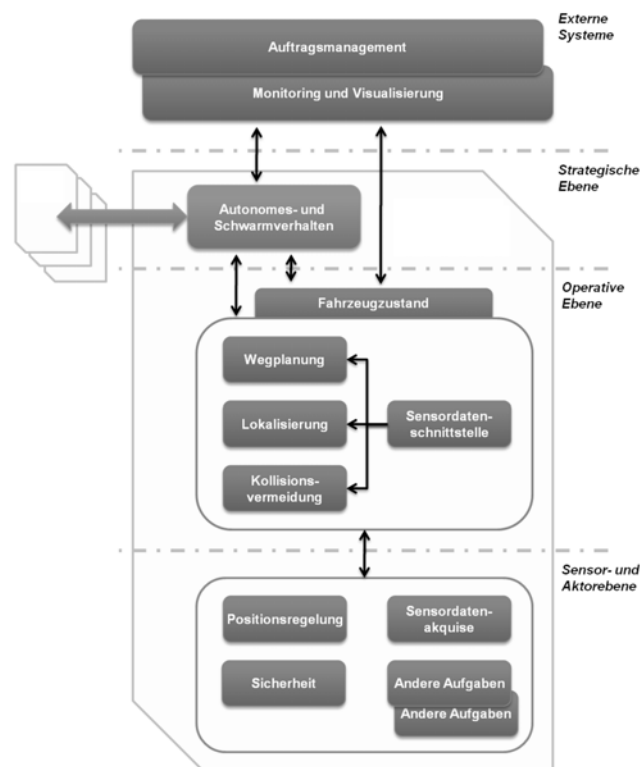
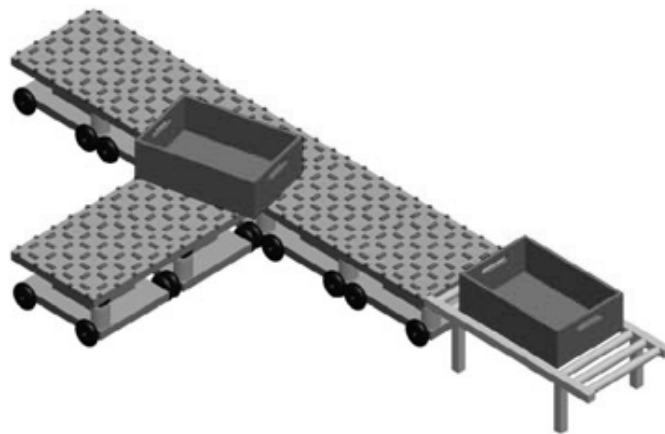


Abbildung 1.5: Steuerungskonzept des Fraunhofer ZTF [KG11]

### 1.3 Logistischer Hintergrund

Fördermittel können allgemein in Stetig- und Unstetigförderer eingeteilt werden. Für eine stetige und kontinuierliche Förderung von Stück- und Schüttgütern ohne eine zeitliche Unterbrechung werden Stetigförderer eingesetzt. Diese zeichnen sich durch einen hohen Durchsatz und die Möglichkeit einer Be- und Entladung ohne Betriebsunterbrechung aus. Da Förderstrecken meist starr sind und große Rahmen, Ständerwerke oder Führungsschienen benötigen, ist das System der Stetigförderer wenig flexibel und an die vorgegebenen Ortsbedingungen angepasst zu installieren [tSN07]. Zur Flexibilisierung des Materialflusses werden verstärkt Unstetigförderer eingesetzt, da an diesen Fördermitteln Topologieänderungen aufgrund geänderter Produktions- oder Logistikabläufe kosteneffizienter abgebildet werden können. Aktuelle Technologien zeigen bereits die Verknüpfung von Stetig- und Unstetigförderern und verdeutlichen die Notwendigkeit einer Neuordnung, da beispielsweise Zellulare Transportsysteme sowohl als Stetig- als auch als Unstetigförderer betrieben werden können (s. Abbildung 1.6).



**Abbildung 1.6:** Zellulares Transportsystem KARIS – *Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistik System* [Nob11]

Die Zellularen Transportsysteme schaffen eine Symbiose aus Stetig- und Unstetigfördertechnik. Logistische Vorteile beider Fördermittel wie der hohe Durchsatz, die Flexibilität und Wandelbarkeit werden zu einer Gesamtlösung vereint und zusätzlich mit den Fähigkeiten aus der mobilen Robotik erweitert (s. Abschnitt 2.7 und Abschnitt 2.8). In den nachfolgenden Unterkapiteln werden jeweils die logistischen Eigenschaften der Fördermittel erklärt. Die für die Zellulare Intralogistik relevanten Systeme, die eine symbiotische Beziehung zwischen Stetig- und Unstetigfördertechnik herstellen lassen, sind in der Abbildung 1.7 hervorgehoben.



**Abbildung 1.7:** Relevante Fördermittel für die Einordnung Zellularer Transportsysteme, in Abwandlung von [tSN07]

### 1.3.1 Stetigförderer

Stetigförderer erzeugen einen kontinuierlichen (Schüttgut) oder diskret kontinuierlichen (Stückgut) Fördergutstrom und sind für den Dauerbetrieb ausgelegt. Ihre

Be- und Entladung erfolgt während des Betriebs und ihre Lastaufnahmemittel sind dabei stets aufnahme- oder abgabebereit. Stetigförderer sind mit einer ortsfesten Einrichtung wie beispielsweise einem Ständerwerk versehen [tSN07]. Zur Förderung von Stückgut, insbesondere von Kleinladungsträgern, werden in der Intralogistik häufig Rollen- und Bandförderer eingesetzt.

### 1.3.1.1 Rollenförderer

Rollenförderer, auch angetriebene Rollenbahnen genannt (s. [VDI71] und [VDI07b]), werden ausschließlich zur Förderung von Stückgut genutzt. Rollenförderer bestehen aus einer Vielzahl kaskadierter angetriebener und nicht angetriebener Rollen, die an zwei Profilen befestigt sind. Dabei erfolgt die Kraftübertragung zwischen den angetriebenen und nicht angetriebenen Rollen mittels Keilriemen oder Kette. Rollenförderer haben einen sehr hohen mechanischen Wirkungsgrad (vgl. *Prasse et al.* in [PKG<sup>+</sup>11]) und können Geschwindigkeiten von bis zu 2 m/s erzielen. Berechnungsgrundlagen und Details können *ten Hompel et al.* in [tSN07] und der Norm [VDI07b] entnommen werden.

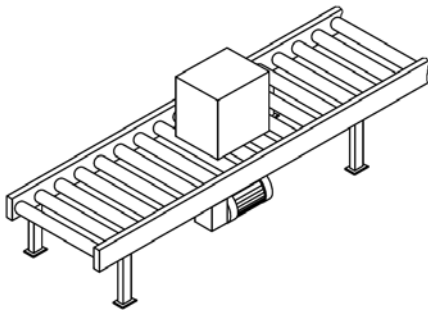


Abbildung 1.8: Rollenförderer [tSN07]

### 1.3.1.2 Bandförderer

Bandförderer (s. [VDI79], [VDI83] und [VDI07a]) sind Stetigförderer mit Bändern aus unterschiedlichsten Materialien, die gleichzeitig die Trag- und Zugfunktion übernehmen. Dabei werden die Bänder von Tragrollen oder einer Unterlage mit einem niedrigen Gleitreibungskoeffizienten getragen. Sonderfälle mit einer Hybridkonstruktion aus Rollen und Gleitflächen existieren ebenfalls. Die Bänder eines Förderers werden stets über mindestens zwei Trommeln angetrieben und stehen unter Spannung. Die Gleitreibung des Bandes wirkt sich negativ auf den mechanischen Wirkungsgrad



eines Bandförderers aus (vgl. *Prasse et al.* in [PKG<sup>+</sup>11]). Berechnungsgrundlagen und Details können *ten Hompel et al.* in [tSN07] und der Norm [VDI07a] entnommen werden.

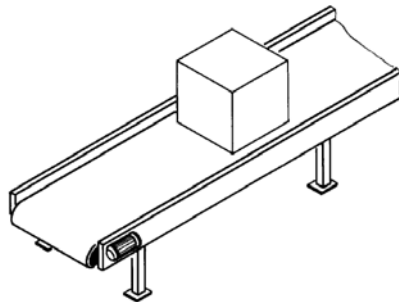


Abbildung 1.9: Bandförderer [tSN07]

### 1.3.2 Fahrerlose Transportsysteme

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrantrieb, die automatisch gesteuert und berührungslos geführt werden. Sie dienen dem Materialtransport, und zwar zum Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln. Dies ist die Definition eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs (FTF) nach [VDI05]. Die Einordnung der FTF, auch Automated Guided Vehicles (AGV) oder automatische Flurförderzeuge genannt, wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Fahrerlose Transportsysteme sind Unstetigförderer und bilden ein flexibles Transportsystem von unabhängig operierenden und zentral gesteuerten Fahrzeugen, die das Transportgut an vordefinierten Aufnahme- und Abgabestationen im Stillstand aufnehmen oder abgeben. Der Förderstrom ist dadurch diskontinuierlich und kann in unterschiedliche Zeitanteile wie Leer-, Last-, Anschlussfahrten und Stillstandzeit differenziert werden. Es ist möglich, Unstetigförderer ortsfest zu installieren oder nach vorgegebener Topologie frei verfahrbar an unterschiedliche Gegebenheiten anzupassen, wodurch die Flexibilität erhöht werden kann. Der im Vergleich zu Stegigförderern niedrigere Durchsatz kann durch die Erhöhung der Fahrzeuganzahl bei Unstetigförderern kompensiert werden [tS10].

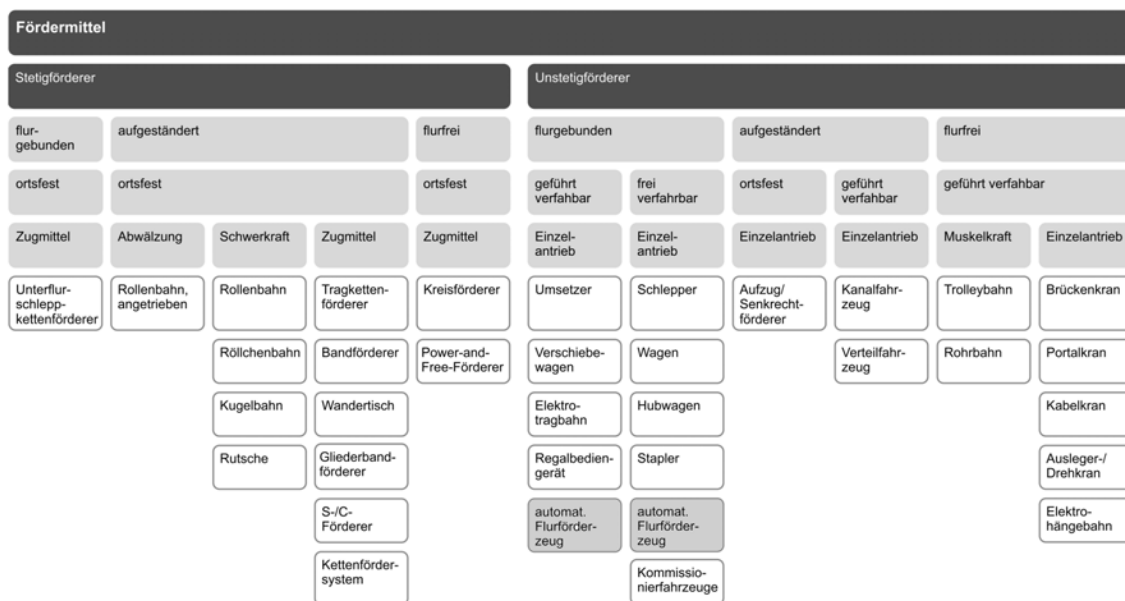


Abbildung 1.10: Einordnung Fahrerlose Transportsysteme in Fördermittel [tSN07]

Abbildung 1.10 zeigt die unterschiedliche Einteilung und weitere Untergliederung von Stetig- und Unstetigförderern. Es wird im Weiteren nur auf die Unstetigförderer eingegangen, da die Fahrerlosen Transportsysteme (automatische Flurförderzeuge) in diese Gruppe einzuordnen sind [VDI05].

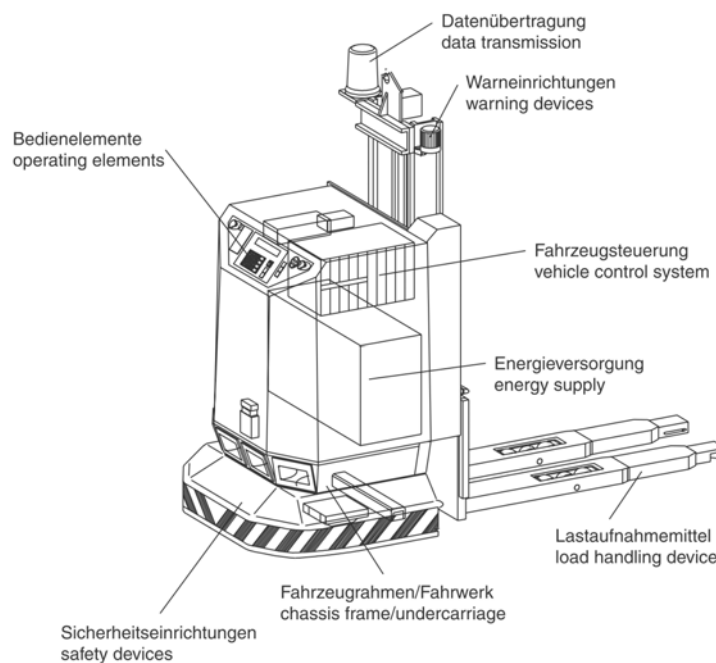
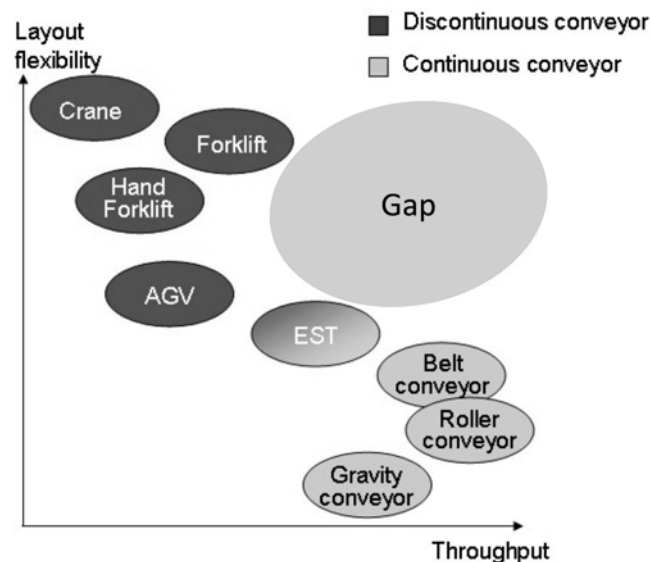


Abbildung 1.11: Fahrerloses Transportfahrzeug [VDI05]

Die automatischen Flurförderzeuge finden sich in der Kategorie der flurgebundenen Fördermittel, die sowohl geführt als auch frei verfahrbar sein können [tSN07]. Im Unterschied zu z. B. Gabelstaplern, die durch Personen gelenkt werden, gibt es bei FTF spezielle Anforderungen an die Lokalisation, Navigation und Steuerung im Raum (siehe Abschnitt 2.5), die auch für die Zellularen Transportfahrzeuge von großer Bedeutung sind (vgl. Abschnitt 2.9).

### 1.3.3 Zellulare Transportsysteme

Zellulare Transportsysteme, auch Zellulare Intralogistiksysteme genannt, schließen die Lücke, die sich bei den Stetig- und Unstetigförderern bildet, wenn diese nach Durchsatz und Flexibilität eingeordnet werden (vgl. Abbildung 1.12).



**Abbildung 1.12:** Einordnung der Zellularen Intralogistiksysteme [May09]

Wie in Mayer [May09] vorgestellt, gliedern sich die Zellularen Transportsysteme in das in Abbildung 1.12 hervorgehobene Feld ein. Dabei muss zwischen Zellularen Transportfahrzeugen und Zellularer Fördertechnik unterschieden werden. Diese beiden Arten der fördertechnischen Entitäten flexibilisieren das Transportsystem. Zellulare Fördertechnikmodule können beliebig (manuell) verknüpft werden und erkennen eigenständig ihre Topologie (s. [FM09] und [May09]). Zellulare Transportfahrzeuge können hingegen eigenständig ihre Topologie an die jeweiligen Anforderungen (automatisch) anpassen.

### 1.3.3.1 Zellulare Fördertechnik

Zellulare Fördertechniksysteme basieren auf autonomen und verknüpfbaren Fördertechnikelementen. Dies sind beispielsweise Band- oder Rollenfördermodule mit einer intelligenten, integrierten Steuerung und Kommunikationseinheit. Die Kommunikation der Module untereinander erfolgt, wie auch die Steuerung selbst, mit einer dezentralen Architektur (z. B. durch ein Multi-Agenten-System). Zellulare Fördertechniksysteme sind *topologieflexibel*: Die Anordnung der Transportentitäten im Raum (das Streckennetz bzw. Layout) kann jederzeit manuell geändert werden, jegliche Änderungen werden zur Laufzeit erkannt und in die Steuerungsstrategie einbezogen (s. [FM09] und [May09]).

Werden den logistischen Objekten „Missionen“ und Strategien bzw. entsprechende autonome und kooperative Verhaltensweisen implantiert, so verfolgen deren Steuerungen in der Kommunikation mit der Umgebung und untereinander das vorgegebene Ziel selbständig (z. B. Ein-/Auslagerung, Transport, Sortierung etc.). Ferner können gewöhnliche Stetigfördertechnikelemente mitgesteuert werden [GEB11]. Auch die gewünschte Emergenz im Sinne einer ressourcenschonenden Zielerfüllung der Zellularen Fördertechnik ergibt sich durch Interaktion zwischen den fördertechnischen Entitäten und einer serviceorientierten Umgebung selbständig. Somit sind Zellulare Fördertechniksysteme intralogistische Systeme hoher Flexibilität (*in Abwandlung von* [tH11]).

Zellulare Fördertechniksysteme erweitern und ersetzen konventionelle Stetigfördersysteme dort, wo ein hohes Maß an Flexibilität und Durchsatz gefragt ist oder die Planungssicherheit nicht gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zur einmal installierten starren Stetigfördertechnik transportiert und lagert in einem Zellularen Fördertechniksystem eine Vielzahl kleiner und autonomer Stetigförderer Kleinladungsträger. Die Zellularen Fördertechniksysteme unterscheiden sich von konventionellen Stetigförderern dadurch, dass sie über eine eigene Intelligenz verfügen, eigenständig die Topologie des Systems zur Laufzeit erkennen und dynamisch auf Änderungen der Topologie reagieren.

### 1.3.3.2 Zellulare Transportfahrzeuge

Zellulare Transportsysteme unterscheiden sich in einigen wesentlichen Punkten von den Zellularen Fördertechniksystemen – insbesondere im Bereich der Topologieflexibilität weisen die Zellularen Transportfahrzeuge gegenüber den Fördertechnikmodulen

Vorteile auf, da sie in der Lage sind, eigenständig ohne manuelle Eingriffe die Topologie an die neuen Gegebenheiten anzupassen. Aufgrund der Mobilität der Transportentitäten kann von den Zellularen Transportfahrzeugen im Gegensatz zur Zellularen Fördertechnik die Steuerung konventioneller Stetigförderer nicht übernommen werden, so dass für die Zellularen Transportfahrzeuge folgende Definition getroffen werden kann:

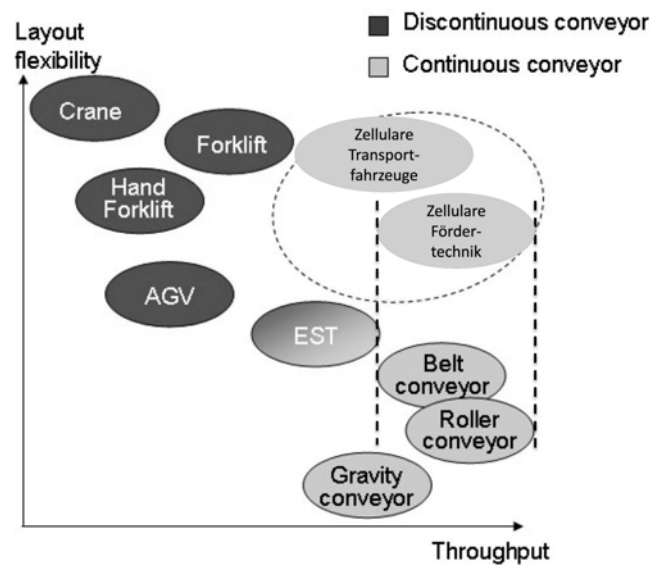
Zellulare Transportfahrzeuge basieren auf autonom fahrenden Transportentitäten. Dies sind autonome Transportfahrzeuge wie Shuttles oder intelligente Fahrerlose Transportfahrzeuge. Die Kommunikation der Entitäten untereinander erfolgt, wie auch die Steuerung selbst, mit einer dezentralen Architektur (z. B. durch ein Multi-Agenten-System). Zellulare Transportfahrzeuge sind *topologieflexibel* – die Anordnung der Transportentitäten im Raum (das Streckennetz bzw. Layout) kann jederzeit manuell oder durch das System selbständig geändert werden. Werden den logistischen Objekten „Missionen“ und Strategien bzw. entsprechende autonome und kooperative Verhaltensweisen implantiert, so verfolgen deren Steuerungen in der Kommunikation mit der Umgebung und untereinander das vorgegebene Ziel selbständig (z. B. Ein-/Auslagerung, Transport, Sortierung etc.). Auch die gewünschte Emergenz im Sinne einer ressourcenschonenden Zielerfüllung der Zellularen Transportfahrzeuge ergibt sich durch Interaktion zwischen den Transportentitäten und einer entsprechenden serviceorientierten Umgebung selbständig. Somit sind Zellulare Transportfahrzeuge intralogistische Systeme höchster Flexibilität (*in Abwandlung von [tH11]*).

Zellulare Transportfahrzeuge ersetzen konventionelle Stetigfördersysteme dort, wo ein hohes Maß an Flexibilität und Wandelbarkeit gefragt ist oder die Planungssicherheit nicht gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zur einmal installierten starren Stetigfördertechnik transportiert und lagert in einem Zellularen Transportsystem eine Vielzahl autonomer und kleinskaliger Transportfahrzeuge Kleinladungsträger oder Paletten. Die Zellularen Transportfahrzeuge unterscheiden sich von konventionellen Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) dadurch, dass sie völlig frei auf der Fläche ohne Leitlinien/Induktionsschleifen fahren und dynamisch auf Hindernisse reagieren. Das gesamte Transportsystem kann dabei aufgrund einer dezentralen Steuerungsarchitektur beliebig hoch- bzw. herunterskaliert werden (vgl. [tK11], [KG11]).

### 1.3.3.3 Einordnung Zellularer Transportsysteme

Sowohl Zellulare Fördertechniksysteme als auch Transportfahrzeuge sind intralogistische Systeme der höchsten Flexibilität und Wandelbarkeit. Die Wandelbarkeit und die Automatisierungstiefe Zellularer Transportfahrzeuge sind jedoch höher einzustufen, da die Topologie autonom geändert werden und auf unvorhergesehene Ereignisse automatisch reagieren kann. Zellulare Fördertechnikmodule ermöglichen die Anwendbarkeit von aus der Stetigfördertechnik bekannten Steuerungsstrategien mit einer flexibleren Topologie, die sich manuell ändern lässt. Bei direkter Verbindung der Quellen und Senken durch eine Kette von Zellularen Förderern wird ein höherer Durchsatz erreicht, jedoch müssen Nachteile in der Flexibilität im Vergleich zu den Zellularen Transportfahrzeugen in Kauf genommen werden.

Aus diesen Gründen bieten die Zellularen Transportfahrzeuge eine höhere Flexibilität und Zellulare Fördertechnikmodule einen höheren Durchsatz – so ergibt sich die in Abbildung 1.13 dargestellte Einordnung der Systeme.



**Abbildung 1.13:** Einordnung der Zellularen Transportfahrzeuge und Zellularen Fördersysteme, in Abwandlung von [May09]