

ANDREAS TRENKLE

Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme

BAND 93

**Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Fördertechnik und
Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)**

 **KIT** Scientific
Publishing

Andreas Trenkle

Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme

WISSENSCHAFTLICHE BERICHTE

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

BAND 93

Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme

von
Andreas Trenkle

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie
KIT-Fakultät für Maschinenbau

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Juli 2018
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 0171-2772

ISBN 978-3-7315-0839-7

DOI 10.5445/KSP/1000085538

Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Inform. Andreas Trenkle

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

Korreferent:

09. Juli 2018

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie.

Meinem Doktorvater Kai Furmans danke ich für den Freiraum, das entgegengebrachte Vertrauen, die Ideen für neue Ansätze und für das richtige Maß zwischen Herausforderung und Unterstützung.

Vielen Dank an Rainer Bruns für die Übernahme des Koreferats und Jivka Ovtcharova für den Prüfungsvorsitz.

Meinen Kollegen danke ich für die tolle Atmosphäre am IFL: Wegen euch freue ich mich auf die Arbeit! Besonderer Dank geht an Katti, die an den vielen gemeinsamen Schreibwochenenden ein grandioser Sparringspartner war. Jonathan, Patric und Dali danke ich für die Motivation neue Themen anzugehen und die Ausdauer und gute Laune in stressigen Phasen!

Beim Schreiben der Dissertation bleibt nur wenig Freizeit – umso wichtiger ist die Qualität, die dank Rosi, Toni, Katti, Christian, Jussy, Jonas, Jonathan & Katrin äußerst hoch war!

Vielen Dank an meine Familie: Silvia und Wolfgang für das Korrekturlesen, die Zuversicht und die tatkräftige Unterstützung. Doris, Herbert und Oma Maria, vielen Dank für den bedingungslosen Rückhalt.

Zäzilia – ohne deine Beharrlichkeit wäre ich vielleicht immer noch am schreiben – vielen Dank für deine Geduld und deine Zuversicht. Schön dich zu haben – ich würde dich sofort wieder heiraten! ;-)

Karlsruhe, März 2019

Andreas Trenkle

Kurzfassung

Neben Robustheit ist Flexibilität eine grundlegende Anforderung an Materialflusssysteme. Hier bieten sich Fahrerlose Transportsysteme (FTS) als flexible Alternative zu starrer Fördertechnik an. FTS sind mobil und ihre vielfältigen Einsatzbereiche reichen von der Lagerung und Kommissionierung bis zur Produktionsverkettung und Materialversorgung am Band.

Am Markt sind zahlreiche Systeme mit unterschiedlichem Funktionsumfang verfügbar: von spurgeführten „Low-Cost“-Systemen ohne Sicherheitstechnik bis hin zu leistungsfähigen, frei navigierenden Systemen. Während einige „Low-Cost“-Systeme bereits eigenständig vom Kunden in Betrieb genommen werden können, erfolgt die Realisierung leistungsfähiger Systeme durch den Hersteller. Im Betrieb führen frei navigierende Systeme zahlreiche Funktionen wie z.B. die Umfahrung von Hindernissen ohne menschlichen Eingriff aus, während bei spurgeführten Systemen menschliche Eingriffe erforderlich sind.

Die vom Kunden gewünschten Eigenschaften werden von den am Markt verfügbaren Systemen nicht umfassend erfüllt. Beispielsweise ist bei einigen Systemen die Realisierung durch den Kunden möglich, allerdings fehlt die Sicherheitstechnik für den Transport von schweren Ladungsträgern, während andere Systeme mit der Sicherheitstechnik ausgestattet sind, jedoch eine Inbetriebnahme durch den Hersteller erfordern.

In dieser Arbeit werden Probleme und Lösungsansätze in Form von Entwurfsmustern aufgezeigt. Sie zerlegen komplexe Entwicklungsaufgaben in lösbare Teilprobleme. Die Muster basieren auf dem Stand der Technik Fahrerloser Transportsysteme, aktuellen technischen Entwicklungen und von Kunden gewünschten Eigenschaften. Sie betrachten die Themen Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und dezentrale Steuerung. Durch die Verbindung miteinander zeigen die Entwurfsmuster gegenseitige Wechselwirkungen auf, die für die Entwicklung Fahrerloser Transportsysteme

von Bedeutung sind. Die Entwurfsmuster dienen einerseits der Strukturierung von Lösungsansätzen und sind andererseits ein Hilfsmittel zur Entwicklung zukunftsgerichteter Fahrerloser Transportsysteme.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problembeschreibung und Forschungsfragen	4
1.2	Aufbau der Arbeit	6
2	Technik-Entwicklungen und Fahrerlose Transportsysteme	7
2.1	Technik-Entwicklungen und deren Potenzial für Fahrerlose Transportsysteme	7
2.1.1	Industrie 4.0 und cyber-physische Systeme	8
2.1.2	Internet der Dinge	9
2.1.3	Maschinelles Lernen	10
2.2	Stand der Technik Fahrerloser Transportsysteme	11
2.2.1	Spurgeführte „Low-Cost“-Systeme	11
2.2.2	Das Kiva-Prinzip: Ware-zur-Person in abgesperrten Bereichen	13
2.2.3	Frei navigierende Systeme	16
2.3	Fazit und Forschungslücke	23
3	Aufgaben und Funktionen im Lebenszyklus Fahrerloser Transportsysteme	27
3.1	Produktlebenszyklus Fahrerloser Transportsysteme	27
3.2	Automatisierungsgrad im FTS-Produktlebenszyklus	29
3.2.1	Systemfindung, Ausplanung und Beschaffung	30
3.2.2	Realisierung	31
3.2.3	Betrieb	33
3.2.4	Instandhaltung	39
3.2.5	Änderung	40
3.2.6	Funktionserweiterung	41
3.3	Fazit zu Aufgaben und Funktionen	42

4	Gewünschte Eigenschaften für Fahrerlose Transportsysteme	43
4.1	Gewünschte Eigenschaften für Fördertechnik	43
4.2	Gewünschte Eigenschaften für Fahrerlose Transportsysteme . . .	44
4.2.1	Einfache und schnelle Realisierung	44
4.2.2	Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion	46
4.2.3	Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen	47
4.2.4	Kooperation mit anderen Systemen	48
4.2.5	Ressourceneffizienz	48
4.2.6	Robustheit	49
4.2.7	Selbstanpassung	49
4.2.8	Rekonfigurierbarkeit	50
4.2.9	Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen	51
4.3	Fazit aus den gewünschten Eigenschaften für FTS	51
5	Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme	53
5.1	Einführung: Entwurfsmuster und Mustersprachen	53
5.2	Gestaltungsregeln für Plug&Work-Fördertechnik	56
5.3	Aufbau der Entwurfsmuster für FTS	57
5.4	Modularität	59
5.4.1	Modularer Systemaufbau	63
5.4.2	Trennung zwischen Basisfahrzeug und Wechselmodulen . .	66
5.4.3	Modularer Fahrzeugaufbau aus Komponenten	70
5.5	Sicherheit	74
5.5.1	In Fahrzeugen integrierte Sicherheitsfunktionen	76
5.5.2	In Komponenten integrierte Sicherheitsfunktionen	78
5.6	Mensch-Maschine-Interaktion	82
5.6.1	Benutzerschnittstelle am Fahrzeug	83
5.6.2	Mobile Benutzerschnittstelle	87
5.6.3	Cloud-gestützte Instandhaltung	92
5.6.4	Einrichtungsassistent	95
5.7	Navigation	99
5.7.1	Lokalisierung anhand vorhandener Umgebungsmerkmale	101
5.7.2	Pfadplanung durch das Fahrzeug	103
5.7.3	Reaktion auf Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer .	106
5.7.4	Gemeinsame aktualisierbare Kartendaten	109

5.7.5	Feinpositionierung an Übergabepositionen	112
5.8	Dezentrale Steuerung	114
5.8.1	Dezentrale Auftragsvergabe	115
5.8.2	Verteilte Auftrags- und Stellplatzverwaltung	119
5.9	Fazit aus den Entwurfsmustern	122
6	Analyse der Entwurfsmuster	123
6.1	Einfluss auf Aufgaben und Funktionen	123
6.2	Einfluss auf die gewünschten Eigenschaften	126
6.3	Analyse der Mustersprache	130
6.4	Fazit	131
7	Zusammenfassung	133
7.1	Zusammenfassung der Arbeit	133
7.2	Ausblick	134
	Abkürzungsverzeichnis	137
	Literatur	139
	Abbildungsverzeichnis	151
	Tabellenverzeichnis	155

1 Einleitung

Vernetzte Systeme und datengetriebene Dienste beeinflussen zunehmend unseren Alltag: Im Haushalt sind Status und aktueller Arbeitsfortschritt von Waschmaschine, Rasenmäher und Staubsauger jederzeit und überall abrufbar; im industriellen Umfeld werden unter dem Stichwort Industrie 4.0 vernetzte und flexible Systeme angestrebt. Für den Hochlohnstandort Deutschland sind flexible Automatisierungslösungen von hoher Relevanz, um international wettbewerbsfähig zu bleiben und Arbeitsplätze zu erhalten.

Die Anforderungen an die Produktion nach Robustheit, Flexibilität und Vernetzung werden auch an die Materialversorgung gestellt (Kersten et al. 2017). Als Alternative zu starrer Fördertechnik eignen sich besonders Fahrerlose Transportsysteme (FTS) – die Fahrzeuge sind mobil und bieten großes Potenzial für flexible Anwendungen. Ullrich (2014) benennt die vielfältigen Einsatzbereiche von der Verkettung von Produktionseinrichtungen, der Lagerung und Kommissionierung bis hin zur Materialversorgung am Band. Bereits in den 80er Jahren wurden FTS in großer Stückzahl in der Automobilbranche eingesetzt. Insgesamt waren die Systeme jedoch teuer, genügten nicht den Anforderungen an Robustheit und konnten die beworbene Flexibilität nicht erreichen.

Was hat sich heute geändert? Mit leistungsfähigeren Sensoren, Rechnern und Algorithmen können Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) eigenständig die eigene Position bestimmen, Pfade planen und Hindernissen ausweichen. Mit Industrie 4.0 sind auch die Anforderungen hinsichtlich Flexibilität gestiegen: Statt im Voraus festgelegter Übergabepositionen und Fahrwege sollen Transporte dynamisch angepasst werden können. Die Preise für die FTS sind immer noch hoch und letztendlich zeigen erst die Anwendungen im Kontext von Industrie 4.0, ob die erforderliche Robustheit und Flexibilität nun erreicht werden kann.

Kundenseitig beurteilt die BVL-Studie „Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management“ (Kersten et al. 2017) die Relevanz von FTS als mittelhoch bis hoch mit deutlichem Wachstumspotenzial bei aktuell geringer Verbreitung. Die Studie nennt viele weitere aktuelle Technologiekonzepte, die für die Weiterentwicklung von FTS relevant sind, wie z.B. Lokalisierungstechnologien und prädiktive Analyse. Andere genannte Technologiekonzepte stellen Schnittstellen dar, die für FTS von Bedeutung sind, z.B. Warehouse-Management- und ERP-Systeme sowie Roboter und selbstfahrende Landfahrzeuge (siehe Abbildung 1.1).

Neben etablierten FTS- und Fördertechnikherstellern erkennen auch neue Unternehmen das Potenzial: Zahlreiche Startups aus Robotik und Informatik entwickeln Lösungen für die innerbetriebliche Logistik. Die Treiber hierfür sind technische Innovationen, wodurch Komponenten wie Rechner und Sensoren günstiger werden und offene Softwarelösungen aus Robotik, Bildverarbeitung und maschinellem Lernen zur Verfügung stehen. Was in den 80ern absehbar war, ist heute offensichtlich: FTS benötigen eine solide Hardware – die Innovationen stecken jedoch in der Software.

Neben diesen positiven Aspekten sind die Hemmnisse aus den 80er Jahren nicht vollständig ausgemerzt: Laut BVL-Studie sind Inkompatibilität mit bestehenden Systemen, höhere Kosten als geplant, Koordination mit der IT, unklare Anwendungsfälle und nicht ausgereifte Technik die größten Herausforderungen.

Problematisch ist das heute vorherrschende Projektgeschäft: Gemeinsam mit dem Kunden konzipiert der Hersteller eine spezifische Lösung. Nach der Fertigung folgt die oft zeitintensive Realisierung durch den Hersteller beim Kunden. Auch bei Änderungen wird der Hersteller benötigt, um gewünschte Anpassungen individuell vorzunehmen. Neben der hohen Kosten des Projektgeschäftes zeigt sich hier auch ein Konflikt mit der geforderten Flexibilität im Kontext von Industrie 4.0. Wie können die Systeme gestaltet werden, um aus dem zeit- und kostenintensiven Projektgeschäft ein Produktgeschäft zu generieren, bei dem die Systeme möglichst vom Kunden selbst in Betrieb genommen und angepasst werden können?

Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung von Entwurfsmustern zur Entwicklung von FTS unter Berücksichtigung der technischen Entwicklungen und der

vom Kunden gewünschten Eigenschaften. Die Entwurfsmuster zerlegen die Entwicklungsaufgaben in beherrschbare Teilprobleme, um die Komplexität zu reduzieren und Zusammenhänge zwischen den Teilproblemen herzustellen sowie Lösungsansätze aufzuzeigen.

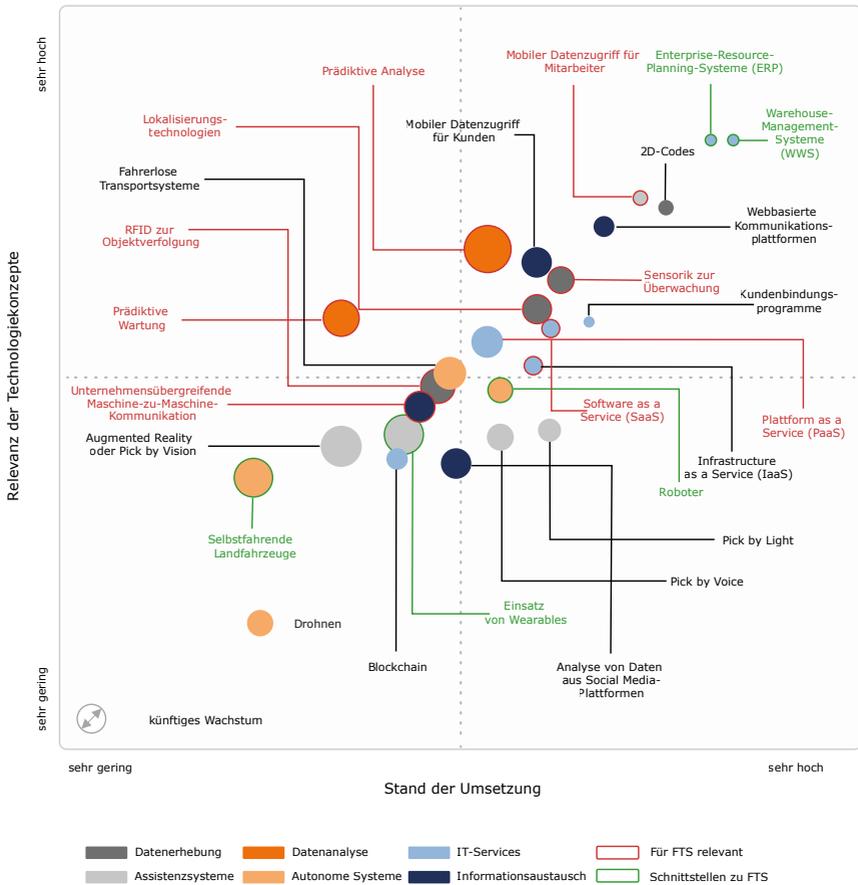


Abbildung 1.1: Technologiekonzepte und Relevanz für FTS nach Kersten et al. (2017)

1.1 Problembeschreibung und Forschungsfragen

Fahrerlose Transportsysteme wurden in den letzten Jahren – getrieben durch Fortschritte in IT und Elektronik – weiterentwickelt und in zahlreichen Forschungsprojekten untersucht. Jedoch ist der Einsatz von FTS heute ein Projektgeschäft, bei dem während der Vorbereitung und Realisierungsphase zahlreiche individuelle und manuell durchzuführende Aufgaben anfallen. Hieraus lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:

Stand der Technik: Welche Funktionen erfüllen aktuelle Systeme? In welchen Anwendungen werden die Systeme eingesetzt? Welche technischen Lösungen stecken hinter den Systemen?

Aufgaben und Funktionen: Welche Aufgaben und Funktionen übernehmen der Hersteller, der Betreiber und das System während der verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklusses? Welche Aufgaben, aktuell Menschen durchführen, können FTS in Zukunft eigenständig bewältigen?

Auch aktuelle Technik-Entwicklungen rücken FTS in den Fokus von Forschungs- und Innovationsprojekten. Hier stellen sich folgende Fragen:

Technik-Entwicklungen: Welche Technik-Entwicklungen sind für FTS relevant?

Potenzial: Welches Potenzial haben die Entwicklungen für die Verbesserung von FTS?

Neben dem Potenzial von Technik-Entwicklungen sind auch die Anforderungen der Kunden und Nutzer relevant. Nur mit Kenntnis der Kundenwünsche kann auch der Kundennutzen realisiert werden:

Gewünschte Eigenschaften: Welche Eigenschaften müssen ein FTS und dessen Teilsysteme für zukünftige Anwendungen aus Nutzersicht besitzen?

Technik-Entwicklungen bieten die Chance zur Verbesserung von FTS, deren Umsetzung erfordert Lösungsansätze. Durch die Anforderungen nach Flexibilität, Zuverlässigkeit und Personensicherheit steigt die Komplexität der Systeme, weshalb Entwicklungsmethoden erforderlich sind, die die Problemstel-

lungen in handhabbare Teilprobleme zerlegen. In zahlreichen Bereichen wie z.B. in der Architektur (Alexander et al. 1977), der Softwareentwicklung (Beck und Cunningham 1987) und der Mensch-Maschine-Interaktion (Borchers 2001) werden Entwurfsmuster eingesetzt, um wiederkehrende Probleme zu strukturieren und Lösungsansätze aufzuzeigen und weiterzugeben (Alexander et al. 1977). Diese Arbeit widmet sich der Erarbeitung von Entwurfsmustern für die Entwicklung von FTS. Daraus entstehen folgende Kernfragen:

Entwurfsmuster: Welche Entwurfsmuster lassen sich aus den Technik-Entwicklungen und den gewünschten Eigenschaften ableiten? Was sind Herausforderungen? Welche Vor- und Nachteile bergen verschiedene Lösungsansätze?

Eine Mustersprache besteht aus einer Menge von zusammenhängenden Entwurfsmustern, die durch Verbindungen untereinander strukturell als Netzwerk angeordnet sind (Alexander 1979, S. 314).

Mustersprachen: Wie sind die Entwurfsmuster miteinander verbunden und welchen Einfluss haben sie aufeinander? Welche Schlüsse lassen sich aus der Struktur der Entwurfsmuster in Bezug auf FTS ziehen?

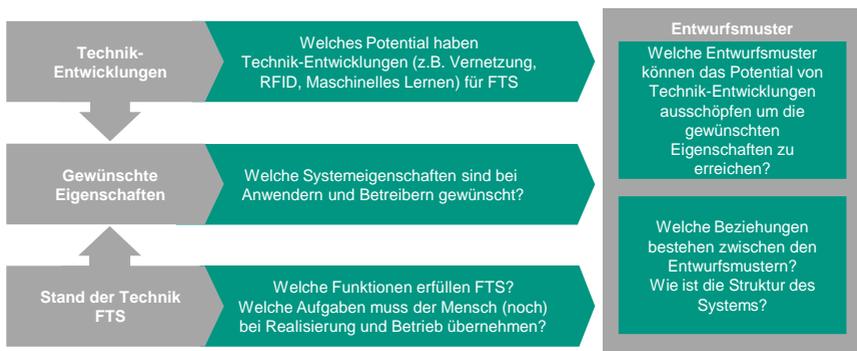


Abbildung 1.2: Fragestellungen der vorliegenden Arbeit

Abbildung 1.2 zeigt die Fragestellungen und Zusammenhänge dieser Arbeit. Die Technik-Entwicklungen und der Stand der Technik haben Einfluss auf die gewünschten Eigenschaften: Kunden beobachten den Markt, kommen – auch im privaten Umfeld – mit Technik-Entwicklungen in Kontakt und

passen ihre Erwartungen daran an. Die gewünschten Eigenschaften fließen als Motivation in die Entwurfsmuster ein. Aufbauend auf dem Stand der Technik werden in den Entwurfsmustern Lösungsansätze vorgestellt, die die Technik-Entwicklungen berücksichtigen.

Bei der Gestaltung der Entwurfsmuster fließen die Erfahrungen, Ergebnisse und auch „offene Baustellen“ des Forschungsprojektes KARIS PRO mit ein (Furmans et al. 2014). Die Ausführungen beziehen sich deshalb primär auf kompakte Transportfahrzeuge.

1.2 Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 2** werden ausgewählte Technik-Entwicklungen vorgestellt und deren Potenzial für FTS erläutert. Der Stand der Technik Fahrerloser Transportsysteme wird anhand repräsentativer Systeme und deren besonderer Merkmale erläutert.

Kapitel 3 beschreibt den Produktlebenszyklus von FTS und erläutert dessen Phasen. Hierbei werden für jede Phase sowohl Aufgaben dargestellt, die heute von Menschen durchgeführt werden müssen, als auch Funktionen, die Systeme eigenständig erfüllen.

In **Kapitel 4** werden die Anforderungen aus Sicht der Nutzer dargestellt. Die gewünschten Eigenschaften bilden die Grundlage für kundenorientierte Systeme und sind ein wichtiger Einflussfaktor für die Entwurfsmuster.

Kapitel 5 stellt die für FTS relevanten Entwurfsmuster und deren Verknüpfungen untereinander dar. Die Struktur der Muster beinhaltet die Zerlegung in einzelne Entwicklungsthemen und reduziert somit die Komplexität. Die Muster enthalten die Problemstellung, eine Analyse der Einflussfaktoren und die erarbeiteten Lösungsansätze.

Neben den Mustern selbst sind die Verknüpfungen zwischen den Mustern relevant: Sie bilden die Mustersprache, deren Struktur in **Kapitel 6** untersucht wird.

2 Technik-Entwicklungen und Fahrerlose Transportsysteme

Neben den Trends und Herausforderungen aus der Logistik haben technische Fortentwicklungen großen Einfluss auf FTS-Lösungen. Doch welche Technik-Entwicklungen bieten Potential für FTS? Welche sind schon in Ansätzen erkennbar?

Abschnitt 2.1 beschreibt aktuelle Technik-Entwicklungen wie z.B. cyber-physische Systeme und stellt die sich daraus ergebenden Potentiale für FTS dar. Daraufhin wird in Abschnitt 2.2 eine Auswahl von FTS mit besonderen Alleinstellungsmerkmalen präsentiert, wie beispielsweise einem modularen Aufbau oder der Möglichkeit zur Inbetriebnahme durch den Kunden. Auf diesen Systemen und den Technik-Entwicklungen aufbauend, werden im Abschnitt 2.3 die Forschungslücken bezüglich FTS dargestellt.

2.1 Technik-Entwicklungen und deren Potenzial für Fahrerlose Transportsysteme

Wie Mertens und Barbian (2016) anmerken, sind zahlreiche als Neuheit dargestellte Entwicklungen nicht wirklich neu, sondern rücken lediglich Bekanntes in den Fokus. Auf den sehr unscharf definierten und äußerst weitläufig verwendeten Begriff der Digitalisierung wird nicht eingegangen – er wird als ein den nachfolgend dargestellten Technik-Entwicklungen übergeordneter Begriff betrachtet. Die vorgestellten Technik-Entwicklungen Industrie 4.0, Internet der Dinge und Maschinelles Lernen wurden ausgewählt, da jeweils konkretes Potential für FTS erkennbar ist und technische Lösungen ableitbar sind.

2.1.1 Industrie 4.0 und cyber-physische Systeme

Industrie 4.0 steht für die vierte industrielle Revolution und für Systeme in Produktion und Logistik, die mit Informations- und Kommunikationstechnik vernetzt sind und dabei mit Menschen interagieren. Nach den bisherigen industriellen Revolutionen mit Dampfmaschine, Fließfertigung und Automatisierung ist Vernetzung von Systemen zu „intelligenten Fabriken“ der Treiber der vierten Industriellen Revolution (Kagermann et al. 2013).

Technisch grundlegend für Industrie 4.0 sind cyber-physische Systeme (CPS): Mechatronische Einheiten, die mit Rechnern, Sensoren und Aktoren ausgestattet sind und sich durch einen hohen Grad an Komplexität auszeichnen (Lee 2008). CPS kombinieren Rechner, Netzwerkkommunikation und physische Prozesse: Sie kommunizieren nicht nur untereinander, sondern bilden die Schnittstelle zwischen virtueller und physischer Welt, indem sie die physische Umwelt durch Sensoren wahrnehmen und nach Verarbeitung der Daten mit Aktoren auf die Umwelt einwirken. Die Interaktion mit der Umwelt beinhaltet auch die Kooperation mit dem Menschen, was ein Verständnis der menschlichen Handlungen voraussetzt.

Ziel von Industrie 4.0 ist die Entwicklung sich selbstorganisierender Produktions- und Logistikprozesse in Kooperation mit dem Menschen. Diese Prozesse sollen kundenindividuelle Produkte und Dienstleistungen ermöglichen und Kosteneinsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette bringen (Kagermann et al. 2013).

Potentiale für FTS durch Industrie 4.0 sind auf Komponenten-, Fahrzeug- und Systemebene erkennbar:

Komponenten wie z.B. Antriebs- oder Sensorsysteme übernehmen selbstständig komplexe Aufgaben und Entscheidungen und stellen anderen Komponenten Funktionen zur Verfügung (Fürstenberg und Kirsch 2017). Diese Funktionsintegration in Komponenten ist grundlegend für einen modularen Aufbau der Fahrzeuge.

Fahrzeuge sind selbst CPS, die eigenständig Aufgaben übernehmen und Aufträge ausführen (Colling et al. 2016). Dank integrierter Komponenten

können Funktionen wie z.B. die Pfadplanung, die bisher eine Leitsteuerung übernommen hat, direkt in Fahrzeuge integriert werden.

Gesamtsystem: Besonders relevant ist die Flexibilität von FTS in Verbindung mit wandlungsfähigen Produktionssystemen (Nyhuis 2010). Durch die Interaktion zwischen Transport- und Produktionssystemen können Anpassungen auch ohne menschliche Eingriffe durchgeführt werden.

2.1.2 Internet der Dinge

Das Internet der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) beschreibt die Vernetzung von intelligenten Gegenständen und Diensten. Die technische Grundlage hierfür sind eingebettete Systeme. Im Internet der Dinge werden Sensoren und Aktoren nahtlos in die Umgebung integriert und gleichzeitig an Cloud-Dienste angebunden. Die direkte Integration erhöht den Gebrauchswert der Gegenstände, während die Technik selbst durch die einfache Bedienbarkeit aus dem Bewusstsein des Nutzers verschwindet (Gubbi et al. 2013).

Die Anwendungsfelder sind vielfältig: Im Privatbereich ermöglicht IoT Überwachung der Gesundheitsfunktionen, die Steuerung von Entertainment sowie die Hausautomatisierung (Andelfinger und Hänisch 2015). Industrielle bzw. öffentliche Anwendungen sind intelligente Stromnetze, Verkehrssteuerung, die Verfolgung von Transportgut sowie die Verschleißmessung von Maschinenteilen (Zanella et al. 2014).

Potentiale für FTS entstehen durch die Verfügbarkeit von Echtzeitdaten, indem die Interaktion der Fahrzeuge mit ihrer Umgebung durch IoT-Geräte ermöglicht wird:

Ladungsträger und Transportgut kommunizieren z.B. mittels RFID direkt mit den Fahrzeugen um Bestände zu übermitteln, Aufträge auszulösen oder Fahrziele vorzugeben (Strassner und Fleisch 2005).

Smartphones und Wearables ermöglichen die Positionsbestimmung von Personen und die Interaktion zwischen Mensch und Maschine (Khakurel et al. 2016). Der Aufenthaltsort einer Person und deren Bewegungen oder Benutzereingaben mithilfe mobiler Endgeräte können verwendet

werden, um Informationen über Materialbedarf oder Übergabepositionen für FTF zu ermitteln.

Infrastruktur: IoT-Geräte entlang der Fahrstrecken und Abholpositionen geben Aufschluss über die Verkehrssituationen und können die Planung von Transportaufträgen und Fahrstrecken verbessern.

2.1.3 Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, aus Erfahrungen Wissen zu generieren. Das Systemverhalten wird nicht programmiert, sondern mittels Daten trainiert. Lernfähige Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass sie auch in einer veränderten Umwelt Lösungen finden, ohne dass diese Veränderungen bei der Entwicklung vorgesehen und implementiert wurden (Alpayđın 2008). Besonders für die Bildverarbeitung ist Maschinelles Lernen relevant, da es die Erkennung von Objekten aus Bilddaten in Echtzeit ermöglicht (Redmon et al. 2016).

Potentiale für FTS durch Maschinelles Lernen ergeben sich durch Erkennung von Mustern in Sensor- und Auftragsdaten.

Reaktion auf Hindernisse: Durch Erkennung von Hindernissen kann das FTF zwischen verschiedenen Arten von Hindernissen unterscheiden (z.B. statisch, bewegt, Person, Fahrzeug) und adäquat reagieren.

Erkennung von Gütern: Mittels Erkennung und ggf. Identifizierung von Gütern und Ladungsträgern können FTF eigenständig Transportaufträge generieren, wenn sie z.B. feststellen, dass eine Übergabestation mit einem Ladungsträger belegt ist.

Erkennung von Übergabepositionen: Durch die automatische Erkennung von Übergabestationen wird der Realisierungsaufwand reduziert. Außerdem kann die Änderung der Übergabestationen im Betrieb selbstständig vom System erkannt werden.

Mensch-Maschine-Interaktion: Durch maschinelles Lernen können Äußerungen und Handlungen von Personen erkannt werden. Durch das Verstehen von Situationen werden Schnittstellen reduziert und

die Interaktionszeit mit Bedienern verringert. Die Identifikation von Personen ermöglicht auf den Nutzer bezogene Handlungen.

Auftragsprognose: Durch die Erkennung von Mustern bei eingehenden Aufträgen können zukünftige Aufträge prognostiziert werden. Hierdurch können Wartepositionen bereits vor Auftragseingang angefahren oder die Akkuladung entsprechend des prognostizierten Auftragsvolumens gesteuert werden.

Lernen über Systeme hinweg: Gelernte Muster können auch auf andere Anwendungen übertragen werden. Nutzer von FTS profitieren somit auch von dem Gelernten anderer Fahrzeugflotten. Dies kann besonders bei der Erkennung anderer Verkehrsteilnehmern nützlich sein.

Die Technik-Entwicklungen und die Potentiale lassen erkennen, dass aktuelle Entwicklungen vielfältige Möglichkeiten für die Verbesserung von FTS bergen. Anhand nachfolgender Systeme wird der aktuelle Entwicklungs- und Forschungsstand bei FTS aufgezeigt.

2.2 Stand der Technik Fahrerloser Transportsysteme

Nachfolgend werden einige FTS vorgestellt, die technisch oder aus der Anwendung heraus interessant sind. Der Fokus liegt in dieser Arbeit auf kompakten FTF, umfassende Darstellungen der verschiedenen Fahrzeugklassen finden sich in (VDI-2510 2005) und (Ullrich 2014).

Nach spurgeführten „Low-Cost“-Systemen, die trotz ihrer Einfachheit beachtenswerte Ansätze zeigen, wird das Kiva-System vorgestellt, das besonders aufgrund seiner Skalierbarkeit durch Multi-Agenten-Systeme interessant ist. In Abschnitt 2.2.3 werden frei navigierende Systeme vorgestellt, die sich durch ihre Flexibilität auszeichnen.

2.2.1 Spurgeführte „Low-Cost“-Systeme

Für den Transport einzelner Kleinladungsträger (KLT) oder Kartonagen mit einer Grundfläche von bis zu 400 x 600 mm existieren kleine und günstige „Low-

Cost“-Fahrzeuge. Sie folgen optischen Leitspuren und erfordern durch geringe Transportgewichte und reduzierte Fahrgeschwindigkeiten keine aufwendige Sicherheitstechnik.

LEO Locative (siehe Abb. 2.1) von Bito ist eine Entwicklung in Kooperation mit dem Fraunhofer IML und basiert auf dem Lastaufnahmemittel Kamm-LAM (Schroer 2010) und dem FTF Locative (IML 2015). LEO Locative zeichnet sich durch die **einfache Inbetriebnahme** aus: Der Kunde stellt die Übergabestationen auf und klebt die rote Leitlinie sowie Barcode-Marker auf den Boden. Die Barcode-Marker können Ziele, Positionen oder direkte Fahrbefehle (z.B. reduzierte Geschwindigkeit) enthalten. An den Aufnahmestationen werden Zielmarker neben die Leitlinie geklebt, die von der Spurführkamera erfasst werden. Da das System ausschließlich über die Zielmarker und die Leitlinie gesteuert wird, ist kein Leitreechner und keine WLAN-Infrastruktur nötig. Statt der Übergabe an einer Station können Ladungsträger auch direkt auf das Fahrzeug abgestellt werden – die Bestätigung erfolgt mit einem Sensor am hinteren Teil des Fahrzeuges. Besonders interessant ist die **Handhabungseinheit** des LEO Locative: Die Ladungsträger können an den Übergabestationen während der Fahrt abgestreift und aufgenommen werden, wodurch die Handhabungszeit vernachlässigbar wird (Bito 2017).



Abbildung 2.1: LEO Locative von Bito: Abstreifen von KLTs an einer Übergabestation (links), Bodenmarker mit Stationsinformation (Mitte) und Transportfahrzeug (rechts)

Weasel von SSI-Schäfer (siehe Abb. 2.2) nutzt eine Linie und Radio Frequency Identification (RFID) zur Navigation. Die RFID-Tags werden dabei unter die Fahrspur geklebt oder in den Boden eingelassen. Ein Leitreechner erhält die Aufträge durch manuelle Eingabe von einem Mitarbeiter oder über die

Schnittstelle zum WMS und weist den Fahrzeugen die Aufträge zu. Wie bei LEO Locative kann die Ladung während der Fahrt übergeben werden – allerdings ist hier eine aktiv angetriebene Übergabestelle erforderlich. Das Lastaufnahmemittel und die Handhabungseinheiten an den Übergabestellen ermöglichen den Transport von verschiedenen Kartons und Behältern, wodurch Weasel eine große **Ladungsträgerflexibilität** bietet (Schäfer 2016).



Abbildung 2.2: Weasel von SSI Schäfer (links) bei der Aufnahme eines Ladungsträgers während der Fahrt (rechts)

Das am Stuttgarter IFT erforschte **Doppelkufensystem** (Schröppel et al. 2011) wird von Eisenmann unter dem Produktnamen LogiMover industrialisiert (Eisenmann 2015). Eine der beiden Kufen orientiert sich an einer optischen Leitlinie, während die zweite Kufe synchron nebenherfährt (siehe Abbildung 2.3). Da die Kufen keine überstehenden Teile haben, können sie komplett unter Paletten durchfahren, was eine äußerst **dichte Lagerung** ermöglicht. Das Doppelkufensystem ist eine auf Paletten optimierte Lösung, bei der alle Komponenten im Lastaufnahmemittel integriert sind. Eine Herausforderung ist die Integration der Sensorik und Sicherheitstechnik – insbesondere bei der Zielgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde mit einer Last von einer Tonne.

2.2.2 Das Kiva-Prinzip: Ware-zur-Person in abgesperrten Bereichen

Das von Amazon akquirierte Unternehmen **Kiva Systems** – jetzt Amazon Robotics – (siehe Abb. 2.4) stellt auf Transportfahrzeugen basierende Ware-



Abbildung 2.3: Das Doppelkufensystem (links) und der von Eisenmann industrialisierte LogiMover (rechts)

zur-Person Lagersysteme her. Ein Kiva System besteht aus Transportfahrzeugen, Regalen, Abstellplätzen für die Regale und einigen Pufferplätzen in der Nähe der Entnahmestationen. Das System wird zur **Ware-zu-Person-Kommissionierung** eingesetzt, bei der die Transportfahrzeuge die von vier Seiten bestückbaren Regale von den Abstellplätzen zu den Entnahmestationen transportieren. Die Regale werden dabei unterfahren, angehoben und getragen. An der Entnahmestation entnimmt der Mitarbeiter die Produkte aus einem Regalfach, woraufhin das Regal wieder an einen freien Abstellplatz transportiert wird. Durch die Pufferplätze kann der Mitarbeiter kontinuierlich Güter entnehmen, da durchschnittlich alle sechs Sekunden ein neues Regal am Entnahmeplatz steht. Neben den Entnahmestationen gibt es Auffüllstationen mit einem ähnlichen Aufbau, bei denen die Regale vom Mitarbeiter befüllt werden. (Wurman et al. 2008).

Beim Einsatz eines Kiva Systems sollen die Mitarbeiter möglichst gut ausgelastet werden und gleichzeitig möglichst wenige Regale und Fahrzeuge genutzt werden. Hierzu müssen zahlreiche Allokationsaufgaben gelöst werden: Welche Bestellung soll welcher Station zugewiesen werden? Welches Regal wird als nächstes zum Picker transportiert? Falls ein Regal mehrere Stationen durchfahren soll, was ist die beste Reihenfolge? Wo sollen die Regale gelagert werden? In welchen Regalfächern soll welches Material eingelagert werden? Hinzu kommen die Zuweisungen der Transportaufträge zu den Fahrzeugen, die bei anderen Transportsystemen auch auftreten – mit der Randbedingung, dass die Fahrzeuge nach Ankunft an der Zielposition



Abbildung 2.4: Ware-zur-Person Kommissioniersystem von Amazon Robotics (früher Kiva Systems)

noch gebunden sind, bis sie durch den Pufferplatz vorgerückt sind und der Bediener das Gut entnommen hat (Enright und Wurman 2011). Diese *komplexen Planungsaufgaben* werden von einem **Multiagentensystem** auf einem zentralen Leitreechner ausgeführt (Wurman et al. 2008).

Zur Navigation nutzt das System Marker mit Barcodes, die während der Inbetriebnahme auf den Boden geklebt werden müssen. Außerdem müssen die Kommunikationsinfrastruktur und der Leitreechner installiert werden. Nach Wurman et al. (2008) beträgt die Inbetriebnahmezeit für ein kleines System mit zwei Stationen einen Tag, für ein Distributionszentrum mit 50 Stationen mehrere Wochen. Da Kiva Systeme nach der Übernahme durch Amazon Robotics nicht mehr am Markt vertrieben wird, wurden zahlreiche ähnliche Systeme entwickelt, die in Wurll (2017) ausführlich beschrieben und gegenübergestellt werden. Da die Arbeitsbereiche zwischen Mensch und System getrennt sind, werden die Fahrzeuge nicht mit Sicherheitsfunktionen ausgestattet. Stattdessen werden an den Entnahmestationen Lichtgitter genutzt, um die Fahrzeuge im Gefahrenfall stillzusetzen. Im Gegensatz zu technischen Schutzeinrichtungen, die an den Fahrzeugen angebracht sind, wird im Rahmen des Forschungsprojektes SafeLog (SafeLog 2017) ein Verfahren entwickelt, bei dem der Bediener eine aktive Sicherheitsweste trägt

– hierdurch sollen die Fahrzeuge gestoppt werden, sobald sie dem Bediener zu nahe kommen.

2.2.3 Frei navigierende Systeme

Die meisten frei navigierenden Systeme nutzen Simultaneous Localization and Mapping (SLAM), um initial eine Karte der Umgebung zu erstellen und sich zu lokalisieren. Hierbei werden Laserscannerdaten genutzt, um anhand natürlicher Umgebungsmerkmale eine Karte zu erstellen und die Position innerhalb dieser Karte zu bestimmen (Thrun et al. 2005). Statt der Installation von künstlichen Markern ist nur ein Einlernen erforderlich, bei dem die Karte erstellt wird. Die Verfahren sind in Umgebungen robust, in denen keine oder nur geringe Änderungen stattfinden. In dynamischen Umgebungen muss die Karte von Zeit zu Zeit wieder aktualisiert werden.

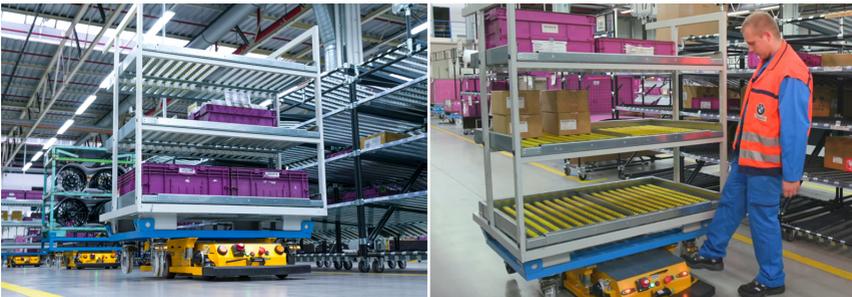


Abbildung 2.5: Smart Transportation Robot im Einsatz bei BMW in Wackersdorf

Der **Smart Transport Robot (STR)** ist ein gemeinsam von BMW und dem Fraunhofer IML entwickeltes FTS. Die Lokalisierung erfolgt mit einem Funkortungssystem von Kinexon. Bei der Inbetriebnahme müssen hierzu die Funksender installiert und die Fahrzeuge eingelernt werden. Außerdem nutzen die Fahrzeuge eine mittels SLAM erstellte Karte, die zur Planung der Pfade genutzt wird. Der STR fährt unter Regale mit einem Gewicht von bis zu 550 kg, hebt diese an und transportiert sie zum Ziel (siehe Abbildung 2.5). Um Hindernisse über oder unter der Sichtebene des Laserscanners erkennen zu können, ist der STR mit einer **Tiefenbildkamera zur Vermeidung von Kollisionen** ausgestattet (IML 2016).

Lynx von Omron Adept wird beim Teach-In mit einem kabelgebundenen Joystick gesteuert, während die Laserscannerdaten aufgezeichnet werden. Mit der PC-Anwendung MobilePlanner wird aus den aufgezeichneten Daten die Karte erstellt. Anschließend können diese Daten nachbearbeitet und Ziele, bevorzugte Fahrwege, verbotene Bereiche, Andockpositionen und Verkehrsregeln in die Karte eingetragen werden (Adept 2014). Bei Lynx können **verschiedene Lokalisierungsverfahren** genutzt werden: Für die Laser-Lokalisierung kann ein Schwellenwert festgelegt werden, ab dem das FTF als delokalisiert gilt; dann muss ein Bediener eingreifen und die Fahrzeugposition manuell angeben. Als Alternative zur Laser-Lokalisierung kann eine „Licht-Lokalisierung“ genutzt werden, um mit einer nach oben ausgerichteten Kamera die Deckenleuchten als Referenz zu nutzen. Die Licht-Lokalisierung wird in dynamischen Umgebungen empfohlen, da die eingesetzte Laser-Lokalisierung die Karte nicht selbstständig aktualisiert und nach größeren Veränderungen keine Lokalisierung mehr möglich ist (Adept 2013).



Abbildung 2.6: Adept-Lynx Plattform mit verschiedenen Handhabungsmodulen
(Quelle: Omron Adept)

Die Aufträge können entweder über die Bedienfelder am Fahrzeug, eine Ruftaste oder über eine Schnittstelle zum Flottenmanager erzeugt werden. Sie werden den Fahrzeugen vom zentralen Flottenmanager aus zugewiesen. Die Lokalisierung erfolgt durch die Fahrzeuge selbst. Die Planung der Pfade erfolgt auf dem Fahrzeug und wird bei mehreren Fahrzeugen im System vom Flottenmanager koordiniert.

Auf die Lynx-Fahrplattform (siehe Abbildung 2.6) können **unterschiedliche Handhabungseinheiten** montiert werden, um Ladungsträger automatisch an Übergabestellen bzw. angebundene Fördertechnik zu übergeben oder die Ladung von einem Bediener entnehmen zu lassen. Der auf der gleichen Fahrplattform aufbauende Lynx Cart-Transporter kann kleine Wagen mit einer Nutzlast von bis zu 130 kg transportieren. Die Konfiguration und der Anbau der Handhabungseinheiten erfolgt durch den Hersteller.

Die Plattformen sind mit einem Sicherheitslaserscanner ausgestattet und erkennen mit zusätzlicher Sensorik Hindernisse hinter dem Fahrzeug. Die verschiedenen Handhabungseinheiten sind mit weiterer Sensorik ausgestattet – im Falle des Lynx Carts mit drei weiteren Laserscannern.



Abbildung 2.7: Verschiedene Konfigurationen des Aethon TUG mit Differentialantrieb

TUG von Aethon wird in Krankenhäusern und im Produktionsumfeld eingesetzt und existiert in zwei Antriebsvarianten: Eine Plattform mit Differentialantrieb und verschiedenen Aufbauten (siehe Abb. 2.7) sowie eine omnidirektionale Unterfahrplattform, die Regale und Wagen trägt und eigenständig aufnimmt und abstellt. Bei der Inbetriebnahme durch den Hersteller werden die Kartendaten aufgezeichnet und die Übergabepositionen festgelegt. Im Betrieb werden mobile Endgeräte oder Ruftasten genutzt um die Aufträge einzugeben. TUG steht in Verbindung mit dem Cloud-Command-Center, wo die Systeme vom Hersteller überwacht und Softwareupdates gesteuert werden (Wolfe et al. 2014). Laut Herstellerangaben können hierdurch 97 % des **Supports per Cloud-Plattform** durchgeführt werden, ohne dass der Anwender involviert ist (Aethon 2017).

Die vom Fraunhofer IML gemeinsam mit Dematic entwickelten **Zellularen Transportsysteme** kombinieren die Funktionen eines **frei navigierenden FTS mit denen eines Shuttles** (Abbildung 2.8). Hierdurch kann auf Stetigförder- und Sortiertechnik in der Vorzone des Lagers verzichtet werden, da das zellulare Transportsystem das Material direkt zum Bedarfsort bringt, beispielsweise dem Kommissionierbereich. Die Fahrzeuge werden mittels Multi-Agenten-Software gesteuert und erlauben damit eine einfache Skalierung des Systems (Kamagaew et al. 2011).



Abbildung 2.8: Zellulares Transportsystem frei navigierend im FTS-Betrieb (links) und im Shuttlebetrieb auf Regalschienen (rechts)

FiFi ist ein am IFL in Zusammenarbeit mit Bär Automation GmbH entwickeltes FTF, das auf **Gesten und Bewegungen** des Bedieners reagiert. FiFi erfasst die Umgebung mit einer Tiefenbildkamera, erkennt Personen und interpretiert Gesten (Trenkle et al. 2013). FiFi ist besonders für die Kommissionierung geeignet, da die menschlichen Fähigkeiten beim Greifen gefordert sind und das Tragen der Last vom Fahrzeug übernommen wird.

Durch die berührungslose Interaktion entfällt ein Handbediengerät zur Steuerung. Nach Durchführung einer Anmeldegeste hat der Bediener seine Hände frei und kann schwere Lasten ohne Bedien- und Kraftaufwand bewegen. Im Folgemodus folgt FiFi dem angemeldeten Bediener; im Rangiermodus orientiert sich das Fahrzeug an den Handflächen des Bedieners und im Linienfolgemodusmodus kann FiFi an eine optische Spur abgegeben werden, um dann eigenständig Transporte durchzuführen (siehe Abbildung 2.9). Um Kollisionen zu verhindern, ist FiFi mit einem Sicherheitslaserscanner aus-

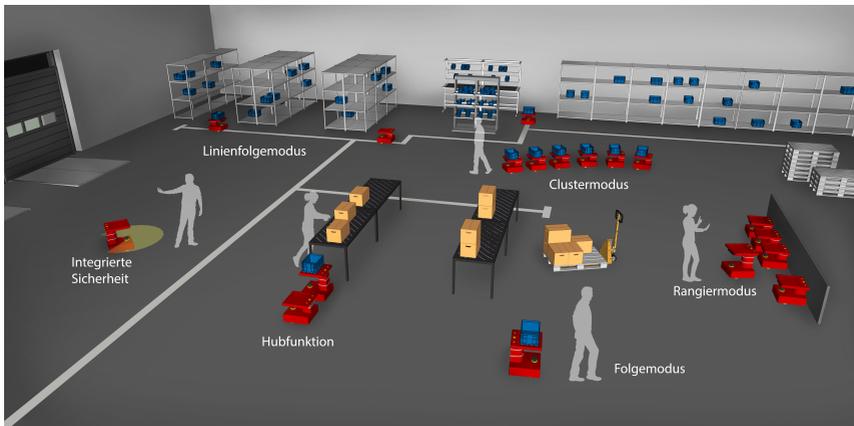


Abbildung 2.9: Betriebsarten und Funktionen von FiFi

gestattet, dessen Schutzfeldgröße in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit angepasst wird.

KARIS PRO ist ein Fahrerloses Transportsystem, das aus mehreren autonomen Transportfahrzeugen besteht, die sich **ohne zentrale Leitsteuerung** koordinieren (Furmans et al. 2014). Die Vision des vom BMBF geförderten Verbundforschungsprojektes ist in Abbildung 2.10 dargestellt; sie zeigt die verschiedenen Transportmodi des Systems und die angestrebte Flexibilität: Ein Fahrzeug kann Kisten oder Warenkörbe transportieren, während die Fahrzeuge im Verbund größere Ladungsträger tragen oder im Stetigclusterbetrieb höhere Durchsätze erzielen.

Die Inbetriebnahme erfolgt durch einen Einrichtungsassistenten mittels Tablet: Per Webinterface wird das Fahrzeug zur Erstellung der Karte durch die Arbeitsumgebung gesteuert. Nach Erstellung der Karte werden die Übergabepositionen angefahren und eingelesen. Die laserbasierte Lokalisierung mittels SLAM aktualisiert die Kartendaten, die anschließend zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden, wodurch das System auch in **dynamischen Umgebungen zuverlässig** arbeitet (Sun et al. 2016).



Abbildung 2.10: Die Vision des Forschungsprojektes KARIS PRO

Im Rahmen der Pilotanwendungen wurden die Aufträge von den Bedienern mittels an den Übergabepositionen montierten Tablets eingegeben (siehe Abbildung 2.11). Der bei einem Fahrzeug per Webinterface eingegangene Auftrag wird zuerst an die anderen Fahrzeuge übermittelt. Die Vergabe der Aufträge erfolgt dezentral: Die Fahrzeuge verhandeln untereinander, wer welchen Auftrag übernimmt – hierdurch entfällt die Installation und Konfiguration einer zentralen Leitsteuerung (Colling et al. 2016).

Abbildung 2.12 zeigt den Grundaufbau eines Fahrzeuges. Das Basisfahrzeug besteht aus vier baugleichen Antriebsmodulen, in denen bereits die notwendigen **Sicherheitsfunktionen integriert** sind. Hierdurch lassen sich von dem Transportprozess abhängige sicherheitstechnische Parameter wie maximale Fahrgeschwindigkeiten oder Kurvenradien im Betrieb automatisiert anpassen: Bei KARIS PRO ist die Fahrgeschwindigkeit beim Transport von Warenkörben auf 1 m/s reduziert, während sie beim Transport von Kleinladungsträgern 2 m/s beträgt. Die Erkennung des aktuellen Betriebszustandes erfolgt über Wechselmodule, die mittels Hubeinheit automatisch getauscht werden können. Durch die Aufnahme eines entsprechenden Moduls werden die relevanten Sicherheitsparameter gesetzt – hierzu kommuniziert das Basismodul sicherheitsgerichtet mit dem Wechselmodul, das die relevanten Parameter enthält.



Abbildung 2.11: Pilotanwendungen von KARIS PRO bei Bosch (links) und Audi Sport (rechts)

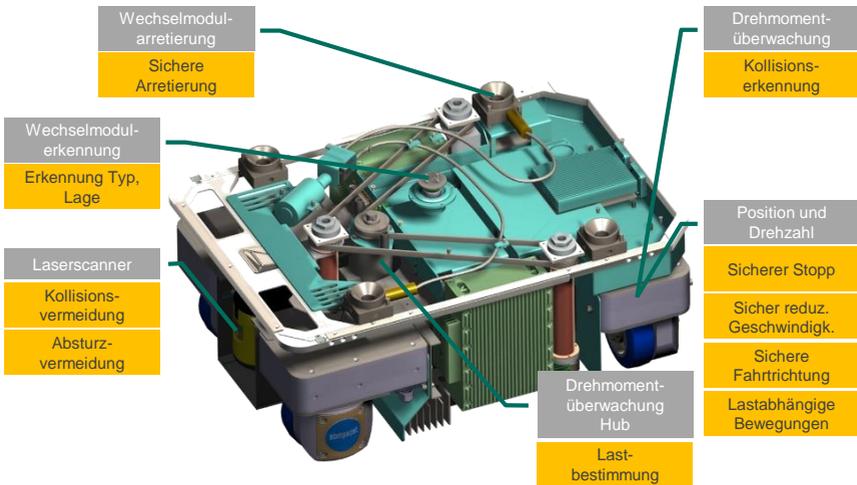


Abbildung 2.12: Grundaufbau und Sicherheitsfunktionen eines KARIS PRO Fahrzeuges

2.3 Fazit und Forschungslücke

Die vorgestellten Systeme zeigen, dass zahlreiche verschiedene Lösungen für den Materialtransport durch FTS existieren. Tabelle 2.1 zeigt die Merkmale der Systeme. Low-Cost-Lösungen nutzen einfache optische Spurführungen und verzichten auf Sicherheitstechnik indem sie Fahrgeschwindigkeit und Traglast beschränken, während leistungsfähigere Systeme frei navigieren und die Sicherheitstechnik in die Fahrzeuge integriert ist. Bei zahlreichen Systemen werden verschiedene Fahrzeugvarianten angeboten: Hierbei werden vom Hersteller die entsprechenden Aufbaumodule verbaut, die für das Transportgut benötigt werden. KARIS PRO ermöglicht den Austausch der Aufbaumodule durch den Kunden. Die Vergabe der Aufträge erfolgt bei den meisten Systemen über einen zentralen Leitreechner, bei Kiva Systemen und den zellularen Transportsystemen in Form von Multiagentensystemen. KARIS PRO verzichtet auf einen Leitreechner, indem die Fahrzeuge Aufträge mittels Auktionsverfahren untereinander verhandeln, Bestände dezentral verwalten und Verkehrsstörungen durch Verkehrsregeln vermeiden. Bei Leo Locative erfolgen die Transporte allein durch Markerinformationen, wodurch auf einen Leitreechner und Kommunikation untereinander verzichtet werden kann. Die Einfachheit des Systems ermöglicht Realisierung und Inbetriebnahme durch den Kunden, wodurch aus dem Projektgeschäft ein Produktgeschäft wird.

Offen bleibt, wie sich dieser Wandel vom **Projekt- zum Produktgeschäft** auch mit komplexen Systemen realisieren lässt. Welche Planungs- und Realisierungsaufgaben müssen vor der Inbetriebnahme durchgeführt werden? Welche Lösungen sind erforderlich, um die Realisierung, den Betrieb und Änderungen weitestgehend durch den Kunden zu ermöglichen? Bevor die Entwurfsmuster erarbeitet werden, wird im nachfolgenden Kapitel der Produktlebenszyklus eines FTS untersucht. Von Interesse sind die Aufgaben, bei denen ein menschlicher Eingriff notwendig ist, da hier weiteres Potential für Automatisierung steckt.

Tabelle 2.1: Merkmale der vorgestellten Transportsysteme

System	Transportgut	Handhabung	Navigation	Auftrags- vergabe	Sicherheits- technik	Varianten/ (MultiFkt.)	Realisierung
Bito LEO Locative	KLT, Kartonagen	bei Fahrt, passive Station	optische Spur, Passermarken	direkt	keine offen	keine	Kunde
				zentral		Aufbau- module	
SSI Weasel	KLT, Hängeware, Kartonagen	bei Fahrt, aktive Station	Passermarken	zentral	keine offen	Aufbau- module	Hersteller
Doppelkufen	Paletten						
Kiva System	Regale	unterfahren & tragen	Passermarken	Multitagenten- system auf Leitrechner	in Infrastruktur	keine	Hersteller
Smart Transport Robot	Transportgestelle					Funk- lokalisierung, Odometrie	
Aethon TUG	Regale, Wagen, Kleinteile	Rollenförderer, Teleskop-LAM, unterfahren & ziehen	Laser- navigation	zentral	in Fahrzeugen	Fahrwerke, Aufbau- module	Kunde / Hersteller
Adept Lynx	KLT, Transportgestelle, Kleinteile						
Zellulare Transportsysteme	KLT	Teleskop-LAM	Laser- navigation	Multitagenten- system auf Leitrechner	in Fahrzeugen	(FTS, Shuttle)	Hersteller
FH	KLT	passiv		optische Spur, Person		zentral	
KARIS PRO	KLT, Paletten, Transportgestelle	unterfahren & tragen /ziehen, Rollenförderer	Laser- navigation	Multitagenten- system auf Fahrzeugen		Aufbau- module (Cluster)	Kunde

Im Kontext der Technik-Entwicklungen wird deutlich, dass bei aktuellen FTS noch Verbesserungspotential hinsichtlich Flexibilität, Vernetzung und dem Einsatz von Verfahren des maschinellen Lernens besteht: Beispielsweise müssen die vorgestellten Systeme bei Veränderungen in der Umgebung manuell angepasst werden, können ihre Umgebung nicht mittels Verfahren der Objekterkennung interpretieren und kommunizieren Kartendaten nicht mit anderen Systemen. Welche Muster für die Entwicklung von FTS lassen sich aus bestehenden Systemen ableiten? Wie kann dabei das Potential aktueller Technik-Entwicklungen bei FTS zum Einsatz kommen?

Während in der Literatur die Lösungen einzeln behandelt werden, fehlt eine umfassende Erläuterung und **Gegenüberstellung der einzelnen Lösungsansätze**. Welche Ansätze sind für welche Anforderungen geeignet? Was sind die gewünschten Eigenschaften für ein FTS? Welche **Wechselwirkungen** bestehen zwischen verschiedenen Lösungsansätzen?

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung von Entwurfsmustern, die die vielfältigen und komplexen Herausforderungen bei der Entwicklung von FTS in Teilprobleme zerlegen und Lösungsansätze aufzeigen.

3 Aufgaben und Funktionen im Lebenszyklus Fahrerloser Transportsysteme

Im Folgenden werden Aufgaben und Funktionen erläutert, die in den verschiedenen Phasen des FTS-Lebenszyklus entstehen. Die vom Menschen durchgeführten Tätigkeiten werden als Aufgaben bezeichnet, die vom System durchzuführenden als Funktionen. Die Trennung von Aufgaben und Funktionen ermöglicht eine Übersicht über die Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine und bietet die Grundlage für eine Aussage zum Automatisierungsgrad der Systeme über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Interessant sind die nicht automatisierten Aufgaben, da sie Potential zur Erweiterung der Systeme um neue Funktionen aufzeigen.

3.1 Produktlebenszyklus Fahrerloser Transportsysteme

Der in Abbildung 3.1 dargestellte Produktlebenszyklus für konventionelle FTS ist abgeleitet aus (Westkämper 2013), (Feldhusen und Gebhardt 2008), (VDI-2710 2010) und (Lüder 2017). Er zeigt drei Grundphasen sowie die Hauptaktivitäten und unterscheidet zwischen Hersteller- und Nutzersicht. Die Aufgaben sind hierbei klassisch verteilt: Der Hersteller übernimmt in der Vorbereitungsphase die Realisierung und Inbetriebnahme und während der Nutzungsphase meist auch die Instandhaltung, Änderungen und Funktionserweiterungen.

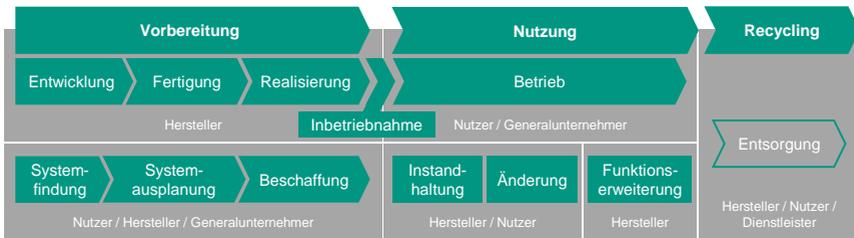


Abbildung 3.1: Produktlebenszyklus für konventionelle FTS nach Westkämper (2013), Feldhusen und Gebhardt (2008), VDI-2710 (2010) und Lüder (2017)

Die **Vorbereitung** beinhaltet die Entwicklung, Fertigung und Realisierung durch den Hersteller sowie die Systemfindung, Systemausplanung und Beschaffung, die vom Kunden selbst, vom Hersteller oder von einem Generalunternehmer durchgeführt werden kann. Die jeweiligen Vor- und Nachteile werden in (VDI-2710 2010) erläutert. Häufig sind die Systeme auf individuelle Kundenwünsche abgestimmt, wodurch bereits die Entwicklung von den Kundenanforderungen mitbestimmt wird. Hierdurch ist eine Fließfertigung der Fahrzeuge unmöglich – stattdessen findet die Fertigung in kleinen Stückzahlen statt, wodurch Skaleneffekte ausbleiben. Die Realisierung von FTS beinhaltet die Anpassung der Infrastruktur für Kommunikation und bei Bedarf auch die Anbringung von künstlichen Landmarken für Lokalisierung sowie die Installation der Peripherie. Zur Peripherie gehören Ladestationen, Übergabestationen und ggfs. Leitreechner, die das System koordinieren und überwachen. Die Vorbereitungsphase wird mit der Inbetriebnahme abgeschlossen, bei der das System nach einem Probetrieb in den Realbetrieb eingebunden und an den Kunden übergeben wird.

Während der **Nutzung** übernimmt der Nutzer oder der Hersteller Instandhaltungsarbeiten wie Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung (DIN-31051 2012). Die Instandhaltung dient der Schadensvorbeugung und wird deshalb in festgelegten Abständen oder nach definierten Kriterien durchgeführt. Während der Instandhaltungsmaßnahmen stehen die betroffenen Fahrzeuge nicht für den Betrieb zur Verfügung.

Änderungen sind notwendig, um z.B. die Transportleistung durch weitere Fahrzeuge zu erhöhen, die Abholpositionen und Fahrstrecken zu ändern

oder anderes Material zu transportieren. Je nach Grad der Änderungen muss während der Änderungsphase die Nutzungsperiode unterbrochen und Teile der Realisierung erneut durchgeführt werden.

Funktionserweiterungen ersetzen bestehende Komponenten eines Systems durch leistungsstärkere. Hierbei kann es sich sowohl um Software- als auch um Hardwarekomponenten handeln. Beinhalten die Aktualisierungen lediglich die Behebung von Fehlern, handelt es sich um ein Update, das auch im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden kann.

Das **Recycling** beinhaltet den Abbau und die Entsorgung des Systems. Üblicherweise findet keine Wiederverwendung einzelner Systemkomponenten statt.

3.2 Automatisierungsgrad im FTS-Produktlebenszyklus

Für die in Abbildung 3.1 dargestellten Phasen werden nun die zugehörigen Aufgaben und Funktionen dargelegt. Entwicklung und Fertigung werden hier nicht berücksichtigt, da die dort anfallenden Tätigkeiten Teil der Automatisierung anderer Systeme sind. Nachfolgend werden Tätigkeiten aufgezeigt, die bei konventionellen FTS in verschiedenen Phasen vom Menschen (👤) als Aufgabe oder vom System (⚙️) als Funktion durchgeführt werden. Hierbei werden zwei Referenzsysteme berücksichtigt: ein technisch einfacheres *spurgeführtes System*, das einer optischen Leitspur folgt (ℒ, vgl. Bito LEO Locative in Kapitel 2.2.1) und ein technisch umfangreicheres *frei navigierendes System* (📍, vgl. Adept Lynx in Kapitel 2.2.3).

Die Einteilung wird mit folgender Symbolik gekennzeichnet:

- (👤): vom Menschen durchgeführte Aufgabe
- (⚙️): vom System / Fahrzeug durchgeführte Funktion
- (👤/⚙️): vom Menschen durchgeführte Aufgabe durch System / Fahrzeug unterstützt

3.2.1 Systemfindung, Ausplanung und Beschaffung

Die einzelnen Planungsschritte für FTS beinhalten die Systemfindung, die Ausplanung und die Beschaffung. Die nachfolgende Zusammenfassung orientiert sich an (VDI-2710 2010).

Für die **Systemfindung** und die Entscheidung, ob ein FTS zum Einsatz kommen soll, fallen die folgenden Aufgaben an:

Ist- und Bedarfsanalyse (👤): Sie beinhaltet die Beschaffung aller erforderlichen Informationen über den aktuellen Zustand und den gewünschten Zielzustand. Entscheidend für den Aufwand der Planungsschritte ist die Qualität der verfügbaren Daten zum Ist-Zustand und das Wissen über den Zielzustand.

Untersuchung der Rahmendaten (👤): Hierzu zählt die Prüfung des Layouts, die Abschätzung des Transportaufkommens und die Bestimmung des Fördergutes. Außerdem muss geprüft werden, ob eine Energieversorgung vorhanden ist und welche Kommunikationsmittel bzw. Schnittstellen für die Auftragseingabe benötigt werden.

Systemauswahl (👤): Diese erfolgt auf Basis der vorangegangenen Schritte. Sie beinhaltet die grundsätzliche Entscheidung, ob ein FTS eingesetzt werden soll.

Soll ein FTS eingesetzt werden, folgt die **Systemausplanung**. Sie umfasst folgende Planungsschritte:

Gebäude- und Layoutplanung (👤/⚙️) umfasst die Festlegung der Übergabepositionen, Ladepositionen und Transportwege. Bei Systemen mit vielen Fahrzeugen ist eine Simulation (👤/⚙️) hilfreich. Dabei müssen Fahrwegbreiten, Bodenbeschaffenheit und Verkehrsaufkommen berücksichtigt werden.

Bestimmung der Fahrzeuganzahl (👤/⚙️): Hierzu bietet sich die Durchführung einer Simulation (👤/⚙️) an, welche Umgebungsbedingungen, Materialflüsse und Fahrzeugeigenschaften (Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeiten pro Akkuladung, Ladezeit) sowie andere Verkehrsteilnehmer berücksichtigt.

Infrastruktur- und Peripherie-Planung (👤) beinhaltet sämtliche Veränderungen an der Umgebung, die für den Einsatz des FTS nötig sind wie z.B. Leitlinien, Übergabestationen, Ladestationen, Kommunikationssysteme sowie Gebäudeeinrichtungen wie Türen/Tore und Aufzüge.

Gefährdungsbeurteilung (👤) umfasst die Abschätzung der Gefährdungen beim Einsatz eines FTS in der vorgesehenen Umgebung.

Ausplanung der Materialflusssteuerung (👤): Eine Materialflusssteuerung koordiniert die Fahrzeuge. Während der Planung ist zu klären, welche Informationen aus anderen Systemen verfügbar sind und welche Prozesse die Materialflusssteuerung koordinieren muss.

Die Ergebnisse der Ausplanung werden in Form eines Lastenheftes (👤) festgehalten. Neben der technischen Machbarkeit ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (👤) notwendig. Sofern die FTS-Lösung wirtschaftlich ist, wird die **Beschaffung** durchgeführt:

Analyse des Anbietermarktes (👤) ist die Grundlage für die Anfragen an Anbieter.

Ausschreibung (👤) beinhaltet die Aufforderung an mögliche Anbieter zur Angebotsabgabe. Die Ausschreibung basiert auf dem Lastenheft.

Angebotsauswertung und Auftragsvergabe (👤): Die Auswertung der eingegangenen Angebote erfolgt nach technischen und kaufmännischen Kriterien. Nach der Entscheidung für einen Anbieter erfolgt die Vergabe des Auftrages.

Pflichtenheft (👤) stellt die Antwort auf das Lastenheft dar und enthält konkrete Beschreibungen des Vorgehens und der technischen Lösungen. Im Pflichtenheft ist außerdem die Zeit- und Ressourcenplanung enthalten.

Wie aus Tabelle 3.1 hervorgeht, ist die Planungsphase sehr personalintensiv. Grund ist, dass hier eine Vielzahl anwendungsspezifischer Kriterien erfasst und berücksichtigt werden muss.

3.2.2 Realisierung

Nach der Beauftragung erfolgt die Realisierung. Hierbei kann es von Vorteil sein, wenn Teile des Systems vorab beim Kunden im Testbetrieb erprobt

werden, wodurch eventuelle Fehler beseitigt werden können, ohne den regulären Betrieb zu beeinträchtigen.

Zur **Installation der Peripherie** gehören Übergabepositionen, Akku-Ladestationen, Kommunikationsinfrastruktur und Leitreechner (VDI-2510-1 2009). Der Installationsaufwand der Komponenten ist stark vom System abhängig:

Akku-Ladestationen (👤) müssen installiert und elektrisch angebunden werden.

Übergabepositionen (👤) bestehen bei Unterfahrlösungen für Wagen lediglich aus Markierungen am Boden. Tragende Systemen für KLT oder Paletten erfordern jedoch die Installation von Übergabestationen. Diese können entweder rein mechanisch gestaltet oder aktiv mit Antrieben, Sensorik und Kommunikationseinrichtungen ausgestattet sein.

Stationäre Sicherheitseinrichtungen (👤) können als Ergänzung zu den am Fahrzeug angebrachten Sicherheitseinrichtungen notwendig sein. Hierzu zählen beispielsweise Bodenmarkierungen, Lichtschranken oder Ampelanlagen.

Kommunikationsinfrastruktur (👤) muss je nach Systemdesign an den Übergabepositionen oder im gesamten Aktionsbereich des Systems installiert werden. Falls möglich kann auch die Infrastruktur des Betreibers genutzt bzw. erweitert werden.

Leitreechner (👤) müssen installiert und an die Kommunikationsinfrastruktur angebunden werden.

Grundlegend für Transportprozesse ist die **Einrichtung und Konfiguration** der Navigation und Auftragsverwaltung des FTS. Abhängig von der Navigationsart (Kapitel 2.2) variiert der Aufwand bei der Realisierung:

Kartierung (👤/⚙️) wird bei frei navigierenden Systemen durchgeführt indem das Fahrzeug vom Bediener durch den Arbeitsbereich gesteuert (👤) und mittels Laserscanner- und Odometriedaten eine Karte der Umgebung erstellt (⚙️) wird. Die Karte ist Grundlage für Lokalisierung und Pfadplanung. Bei spurgeführten Systemen wird die Topologie der Fahrspur manuell erfasst (👤) und im System hinterlegt.

Festlegung von Übergabe- und Ladepositionen (👤) findet nach der Kartierung statt, indem die Positionen angefahren und per Nutzerinterface bestätigt oder alternativ auf der Karte festgelegt werden.

Konfiguration der Fahrwege (👤/⚙️) erfolgt bei spurgeführten Systemen durch das Kleben der Spur (👤), bei frei navigierenden Systemen werden Fahrwege entweder per Software konfiguriert (👤) oder vom System selbst generiert (⚙️).

Festlegung von Verkehrsregeln (👤) bestimmt das Verhalten von frei navigierenden Systemen an bestimmten Positionen oder bei Kontakt mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Definition von Transportbeziehungen (👤) legt den Materialfluss im System fest. Hierzu zählen sowohl feste Quelle-Senke-Beziehungen als auch dynamische Beziehungen, die sich abhängig vom Auftrag oder der Materialverfügbarkeit oder freien Stellplätzen ändern.

Schnittstellen für Auftragsvergabe (👤) können z.B. angebundene Materialflussrechner, Fördertechniksysteme oder Bediengeräte sein.

Zum Abschluss der Realisierungsphase wird das System unter Realbedingungen getestet und im Rahmen der **Inbetriebnahme** (👤) an den Kunden übergeben. Laut Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) muss die Dokumentation zu diesem Zeitpunkt vollständig abgeschlossen, die CE-Kennzeichnung angebracht sein und die EU-Konformitätserklärung vorliegen. Der Kunde prüft im Rahmen einer **Abnahme** (👤), ob das System die im Lastenheft definierten Anforderungen erfüllt. Mit Abschluss der Abnahme wird das System an den Kunden übergeben, für den nun die Betreiberpflichten entsprechend der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) gelten.

Tabelle 3.1 zeigt, dass die Vorbereitung stark von manuellen Aufgaben geprägt ist, die teilweise durch Werkzeuge/Systeme (z.B. Simulation) unterstützt werden können. Bei der Realisierung frei navigierender Systeme kommen bereits Funktionen der Fahrzeuge zur Kartierung zum Einsatz.

3.2.3 Betrieb

Der Betrieb umfasst sämtliche Koordinations- und Transportfunktionen mitsamt Sicherheitsfunktionen und Energieverwaltung.

Tabelle 3.1: Aufgaben der Planungs- und Realisierungsphase für Low-Cost und High-Performance Systeme

Phase	Aufgabe	Ausführung	
		ψ	Ⓢ
Systemfindung	Istzustand und Bedarf analysieren		
	Rahmendaten untersuchen		
	System auswählen		
Systemausplanung	Gebäude und Layout planen	/⚙️	/⚙️
	Fahrzeuganzahl bestimmen	/⚙️	/⚙️
	Infrastruktur und Peripherie planen		
	Gefährdungsbeurteilung durchführen		
	Materialflusssteuerung planen		
	Lastenhefte erstellen		
	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchführen		
Beschaffung	Anbietermarkt analysieren		
	Ausschreibung erstellen		
	Angebote auswerten & Auftrag vergeben		
	Pflichtenheft erstellen		
Realisierung	Akkuladestationen installieren		
	Übergabepositionen installieren		
	Kommunikationsinfrastruktur installieren	–	
	Stationäre Sicherheitseinrichtungen		
	Leitrechner installieren	–	
	Kartierung durchführen	–	/⚙️
	Übergabe- und Ladepositionen festlegen		/⚙️
	Fahrwege konfigurieren		/⚙️
	Verkehrsregeln festlegen		/⚙️
	Transportbeziehungen definieren		
	Auslöser für Transporte konfigurieren		
	Inbetriebnahme durchführen		
	Abnahme durchführen		

Die **Auftrags- und Stellplatzverwaltung** beinhaltet folgende fahrzeugübergreifende Funktionen:

Aufträge einlasten (👤/⚙️): Die Erstellung der Transportaufträge findet entweder in einem übergeordneten ERP-System, auf dem Leitrechner oder auf den Fahrzeugen selbst statt. Auslöser für die Generierung von Aufträgen sind Materialbestellungen oder Materialversandanweisungen, die wiederum durch einen Bediener manuell, zeitgesteuert oder durch Sensoren an den Übergabepositionen ausgelöst werden können.

Auftragsverwaltung (⚙️): Sie verwaltet die Transportaufträge und weist diese den Fahrzeugen zu. Ziel der Auftragsverwaltung ist eine möglichst effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge.

Stellplätze verwalten (⚙️): Voraussetzung für die Auftragsgenerierung ist die Überprüfung, ob das benötigte Material bereits an einer Abholposition verfügbar ist und ob die Zielposition frei ist. Hierfür kommt eine Stellplatzverwaltung zum Einsatz, die den Bestand der Übergabepositionen erfasst.

Energie verwalten (👤/⚙️): Hierzu zählen die Entscheidungen, zu welchem Zeitpunkt und wie lange ein Akku geladen wird. Für eine möglichst gleichmäßige Auslastung während des Betriebs muss sichergestellt werden, dass zu jedem Zeitpunkt genügend Fahrzeuge zur Verfügung stehen und die Fahrzeuge nicht gleichzeitig entladen sind.

Ladeplätze verwalten (👤/⚙️): Sofern nicht jedes Fahrzeug eine zugeordnete Akku-Ladestation hat, muss die Vergabe der Ladeplätze organisiert werden.

Nachdem ein Fahrzeug einen Auftrag übernommen hat, müssen die einzelnen Schritte der **Auftragsabarbeitung koordiniert** werden: Ein Ausführungs-Manager im Fahrzeug übernimmt die Koordination aller Fahrzeugkomponenten, die während der Fahrt zum Abholort, der Aufnahme der Ladung sowie des anschließenden Transports und der Abgabe am Zielort genutzt werden. Um den Systemzustand zu ermitteln, müssen die einzelnen Komponenten ihren Status entweder auf Anfrage melden, oder eine **Komponentenverwaltung** sammelt kontinuierlich die Informationen. Hierzu gehören auch Daten, die zur Fehlerdiagnose genutzt werden können.

Die **Navigation** beinhaltet mehrere Funktionen auf Fahrzeugebene, die nötig sind, um ein Fahrzeug an den richtigen Ort zu bewegen:

Lokalisierung (🛠️) ermittelt die Position und die Orientierung im Raum. Freinavigierende Systeme nutzen Karten- und Sensordaten, spurgeführte Systeme orientieren sich an der Spur und Datenträgern (z.B. RFID oder Barcodes) mit Positionsinformationen.

Pfadplanung (🛠️) plant vor der Fahrt die mit aktuell verfügbaren Daten beste Route. Zur Ermittlung des Fahrweges werden die Kartendaten und die Sensordaten genutzt.

Hindernissen ausweichen (👤/🛠️): Erfassen die Sensoren entlang des geplanten Pfades ein Hindernis, wird es umfahren (🛠️). Falls eine Umfahrung nicht möglich ist, sucht die Pfadplanung einen alternativen Pfad. Bei spurgeführten Systemen ist eine Hindernisumfahrung meist nicht möglich - hier bleibt das Fahrzeug stehen, bis das Hindernis beseitigt wird (👤).

Karte aktualisieren (👤/🛠️): Hierdurch werden Hindernisse bereits bei der Pfadplanung vermieden. Die Aktualisierung der Kartendaten ist in dynamischen Umgebungen außerdem erforderlich, um die auf den Kartendaten basierte Lokalisierung funktionsfähig zu halten.

Hat ein Fahrzeug den Abhol- oder Ablieferort erreicht, muss die Ladung übernommen bzw. übergeben werden:

Handhabung (👤/🛠️) bedeutet die Aufnahme oder Abgabe von Ladungsträgern oder Transporthilfsmitteln. Hierzu zählen Einzelteile, Kleinladungsträger, Großladungsträger oder Transportwagen.

Ladungssicherung (🛠️) verhindert das Verrutschen oder Herabfallen der Ladung, insbesondere bei Bremsmanövern.

Identifikation (👤/🛠️): Sofern die Ladungsträger mit Identifikationstechnik ausgestattet sind, werden die Informationen nach der Aufnahme ausgelesen (🛠️). Neben der Überprüfung, ob es sich um das richtige Transportgut handelt, können auf dem Datenträger auch Informationen zum Zielort oder zu Merkmalen der Ladung wie Gewicht und Größe gespeichert sein. Sofern keine automatisierte Identifikation stattfindet,

muss ggfs. manuell überprüft werden, ob sich das richtige Material an einer Übergabeposition befindet (👤).

Um das Verletzungsrisiko für Mitarbeiter im Wirkungsbereich von FTF zu reduzieren, sind neben konstruktiven Maßnahmen und der Benutzerinformation die folgenden **technischen Schutzmaßnahmen** von Bedeutung:

Kollisionsvermeidung (⚙️): Während Fahrzeuge mit geringem Eigen- und Transportgewicht auf eine sicherheitsgerichtete Kollisionsvermeidung verzichten, werden bei größeren Systemen meist Sicherheitslaserscanner eingesetzt, um den Fahrbereich abzusichern. Die Schutzfeldgröße wird dabei abhängig von der Fahrgeschwindigkeit eingestellt.

Bewegungsüberwachung (⚙️): Abhängig vom Sichtfeld der Sicherheits-sensorik müssen auch die Bewegungen des Fahrzeuges sicher überwacht werden. Hierzu zählt neben der Fahrgeschwindigkeit auch die Fahrtrichtung. Abhängig vom Betriebszustand – beispielsweise beladen oder unbeladen – können sich die Parameter für die zulässige Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtungen auch ändern.

Sicheres Bremsen (⚙️) bringt das Fahrzeug im Gefahrenfall in einen sicheren Zustand. Der sichere Stopp ist das Ergebnis ausgelöster Sicherheitsfunktionen. Er muss so ausgelegt sein, dass das Fahrzeug auch bei Ausfall der Energieversorgung sicher zum Stehen kommt.

Die **Mensch-Maschine-Interaktion** kann direkt mit dem Fahrzeug oder auf Systemebene stattfinden.

Warn- und Statussignale (⚙️) informieren den Bediener im direkten Umfeld des Fahrzeuges über den aktuellen Betriebszustand und geplante Aktionen. Beispielsweise zeigen optische Signale dem Bediener die Fahrtrichtung oder Richtungsänderungen an und informieren über notwendige Systemeingriffe durch den Bediener.

Systemstatus darstellen (⚙️): Der Zustand einzelner Fahrzeuge oder des gesamten Systems kann über eine Benutzerfläche eingesehen werden. Hierüber können auch Änderungen an der Konfiguration vorgenommen werden.

Die Aufgaben auf **Hardwareebene** sind die Ansteuerung verschiedener Komponenten und die Erfassung von Umgebungsinformationen durch Sensoren:

Kommunikation (⚙️) findet zwischen fahrzeuginternen Komponenten (z.B. Steuerung und Fahrtrieb), zwischen Fahrzeugen und Leitrechner und zwischen den Fahrzeugen untereinander statt.

Erfassung von Sensordaten (⚙️) auf Fahrzeugebene ermöglicht die Wahrnehmung der Umgebung. Hierzu zählen Distanzsensoren, Kameras, Lichtschranken, Beschleunigungssensoren, Drehratensensoren und Sensorik zur Identifikation z.B. RFID-Lesegeräte. Innerhalb der Fahrzeugkomponenten erfassen Sensoren den Zustand der Komponenten: von Positionssensoren in Antrieben bis hin zu Temperatursensoren in den Steuerungseinheiten.

Akkuladung steuern (⚙️) dient der Überwachung und Steuerung des Ladevorgangs der Akkus. Hierbei sollen die Energiespeicher einerseits möglichst schnell geladen werden, andererseits sollen die Ladezyklen die Akkus möglichst wenig belasten um viele Ladezyklen zu ermöglichen.

Fahrbefehle generieren (⚙️): Aus den von der Pfadplanung generierten Pfadpunkten werden Fahrbefehle (z.B. in Form eines Fahrtvektors) berechnet.

Antriebe ansteuern (⚙️): Aus den Fahrbefehlen werden Sollwerte für die Antriebe bestimmt. Hierbei muss die Fahrzeugkinematik berücksichtigt werden.

Tabelle 3.2 zeigt, dass im Betrieb die vom System ausgeführten Funktionen überwiegen. Bei spurgeführten Systemen ist der Anteil der vom Menschen durchgeführten Aufgaben höher als bei frei navigierenden Systemen.

Tabelle 3.2: Aufgaben und Funktionen während des Betriebs

Phase	Aufgabe	Ausführung	
			
Betrieb	Aufträge einlasten		
	Aufträge verwalten		
	Stellplätze verwalten		
	Energie verwalten		
	Ladeplätze verwalten		
	Auftragsabarbeitung koordinieren		
	Komponenten verwalten		
	Position bestimmen		
	Pfad planen		
	Hindernissen ausweichen		
	Karte aktualisieren		
	Ladung handhaben		
	Ladung sichern		
	Ladung identifizieren		
	Kollisionen vermeiden	-	
	Bewegungen überwachen	-	
	Sicher bremsen	-	
	Warn- und Statussignale ausgeben		
	Systemstatus darstellen		
	Kommunizieren		
	Sensordaten erfassen		
	Akkuladung steuern		
	Fahrbefehle generieren		
	Antriebe ansteuern		

3.2.4 Instandhaltung

Nach (DIN-31051 2012) dient die Instandhaltung dem Erhalt oder der Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustandes. Während der Instandhaltung ist der Betrieb der betroffenen Fahrzeuge ausgesetzt. Sie umfasst vier Grundmaßnahmen:

Wartung (👤) stellt einen Teil der präventiven Instandhaltung dar und beinhaltet Maßnahmen, die die Abnutzung verzögern. Verbrauchsmittel werden ersetzt und Verschleißteile planmäßig ausgetauscht.

Inspektion (👤/⚙️) ist die Erfassung und Beurteilung des Istzustandes und Bestimmung von Ursachen für die Abnutzung. Eine in das System integrierte Verschleißmessung (⚙️) kann den Prozess automatisieren. Bei der Erfassung des Istzustandes der Software helfen gesammelte Betriebsdaten, deren Analyse Schwachstellen und Verbesserungspotentiale aufzeigen können.

Instandsetzung (👤) beinhaltet die Wiederherstellung einer Funktion im Fehlerfall, beispielsweise durch Reparatur oder Austausch von Teilen.

Verbesserung (👤) beinhaltet alle Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit der Einheit. Hierbei wird die Funktion nicht erweitert, sondern es werden Fehler behoben, die die geplante Funktion beeinträchtigt haben. Hierzu zählen neben Änderungen an der Hardware auch Software-Verbesserungen in Form von Updates.

Die Instandhaltung beinhaltet keine Erweiterung der Funktion. Werden Funktionen hinzugefügt, handelt es sich um eine Funktionserweiterung (siehe 3.2.6).

3.2.5 Änderung

Bei einer Änderung werden keine Veränderungen an Fahrzeugen durchgeführt; stattdessen wird die Struktur des Systems verändert. Die Anpassung des Systems kann zu unterschiedlichen Zwecken erfolgen und umfasst dementsprechend unterschiedliche Aufgaben und Funktionen:

Fahrzeuganzahl ändern (👤): Die Transportleistung kann durch die Beschaffung (3.2.1) und Realisierung (3.2.2) weiterer Fahrzeuge gesteigert oder durch die Verminderung der Fahrzeuganzahl reduziert werden. Die Aufgaben hängen von der Funktion des Systems ab. Während einige Systeme keine Konfiguration erfordern (z.B. BITO Leo Locative 2.1) müssen bei anderen die Konfigurationsaufgaben der Realisierungsphase für

hinzugefügte Fahrzeuge durchgeführt bzw. entnommene Fahrzeuge aus der Systemkonfiguration entfernt werden.

Einsatzort ändern (👤): Hierfür müssen die umgebungsrelevanten Schritte aus der Systemausplanung (3.2.1) und der Realisierung (3.2.2) durchgeführt werden.

3.2.6 Funktionserweiterung

Bei einer Funktionserweiterung wird das System per Hard- und/oder Software um nach Abschluss der Realisierung nicht umgesetzte Funktionen erweitert.

Fördergut ändern(👤): Um anderes Fördergut zu transportieren als bisher, sind möglicherweise Änderungen an der Handhabungseinheit erforderlich. Diese erfordern möglicherweise Anpassungen der Funktionen der Handhabung, der Auftragsausführung sowie der Übergabestationen.

Fahrverhalten ändern (👤): Bei Veränderungen in der Umgebung, beispielsweise neuen Verkehrsteilnehmern, können Erweiterungen nötig sein, die dem FTF z.B. ermöglichen, die neuen Verkehrsteilnehmer zu erkennen und auf diese passend zu reagieren.

Sicherheitsfunktionen erweitern (👤): Risiken, die sich durch Veränderungen im Betriebsbereich des FTS ergeben, erfordern möglicherweise die Erweiterung der Sicherheitsfunktionen.

Schnittstellen zur Materialübergabe ändern (👤): Veränderte Schnittstellen an den Übergabepositionen können Anpassungen bei dem Lastaufnahmemittel und der Handhabungstechnik des FTF nötig machen.

Schnittstellen übergeordneter Systeme erweitern: (👤): Sofern sich die direkten Schnittstellen von übergeordneten Systeme (z.B. ERP) verändern, ist eine Anpassung der Software-Schnittstellen erforderlich.

Im Rahmen einer Funktionserweiterung muss überprüft werden, welchen Einfluss die Änderungen auf die Sicherheit haben und ob gegebenenfalls Sicherheitsfunktionen angepasst bzw. ergänzt und die CE-Konformität erneut geprüft werden müssen.

Tabelle 3.3 zeigt, dass Instandhaltung, Änderungen und Funktionserweiterungen vom Menschen durchgeführt werden.

Tabelle 3.3: Aufgaben bei Instandhaltung, Änderung und Erweiterung

Phase	Aufgabe	Ausführung	
			
Instandhaltung	Wartung durchführen		
	Inspektion durchführen		
	Instandsetzung durchführen		
	Verbesserung realisieren		
Änderung	Fahrzeuganzahl ändern		
	Einsatzort ändern		
Funkt.-erweiterung	Fördergut ändern		
	Fahrverhalten ändern		
	Sicherheitsfunktionen erweitern		
	Materialübergabe ändern		
	Schnittstellen übergeordneter Systeme ändern		

3.3 Fazit zu Aufgaben und Funktionen

Der Anteil manueller Aufgaben während des FTS-Lebenszyklusses ist besonders während der Planungs- und Realisierungsphase hoch. Auch Änderungen erfordern die erneute Durchführung zahlreicher Schritte der Realisierungsphase. Sie müssen vom Menschen – meist Mitarbeitern des Herstellers – durchgeführt werden, wodurch die Flexibilität von FTS stark eingeschränkt wird. Im Betrieb zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen verschiedenen Systemen: Hier führen frei navigierende Systeme zahlreiche Funktionen selbstständig aus (z.B. die Energieverwaltung und die Hindernisumfahrung), während bei spurgeführten Systemen ein menschlicher Eingriff notwendig ist. Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie Aufgaben automatisiert und FTS weiterentwickelt werden können – weg vom Projektgeschäft und hin zum Produktgeschäft. In dieser Arbeit werden daher bei Erarbeitung der Entwurfsmuster auch die manuellen Aufgaben miteinbezogen, damit ein höherer Automatisierungsgrad erreicht wird.

4 Gewünschte Eigenschaften für Fahrerlose Transportsysteme

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Aufgaben und Funktionen von FTS über den Produktlebenszyklus hinweg betrachtet. Ergänzend dazu werden im Folgenden gewünschte Eigenschaften Fahrerloser Transportsysteme aus der Sicht des Nutzers erörtert. Die gewünschten Eigenschaften basieren auf den in (Furmans et al. 2010) dargestellten Eigenschaften für Materialflusssysteme und werden nun um die detaillierten Anforderungen an FTS ergänzt. Der Fokus liegt hierbei auf den Anforderungen; die technischen Lösungsansätze werden in den Entwurfsmustern im darauffolgenden Kapitel erläutert.

4.1 Gewünschte Eigenschaften für Fördertechnik

Furmans et al. (2010) nennt acht gewünschte Eigenschaften, die Nutzer von Materialflusssystemen fordern:

What You See Is What You Get (WYSIWYG): Der Nutzer muss sich nur um das physisch sichtbare System kümmern. Es ist nicht nötig, physische Änderungen auf Softwareebene nachzuvollziehen.

Plug-and-Play (Plug-and-Work)-Fähigkeit: Nach dem physischen Aufbau des Fördertechniksystems ist es sofort betriebsbereit. Auch Änderungen oder Anpassungen können durch Neupositionierung oder Hinzufügen neuer Elemente erfolgen.

Skalierbarkeit: Das System kann hoch- bzw. herunterskaliert werden um geänderten Leistungsanforderungen gerecht zu werden.

Rekonfigurierbarkeit: Bediener können das System ohne Unterstützung durch Programmierer oder Elektriker verändern. Die Veränderung ist innerhalb weniger Minuten möglich.

Verfügbarkeit durch Vor-Ort-Austausch: Der Ausfall einzelner Module wird vom System selbst erkannt. Falls möglich werden alternative Transporte genutzt, um die Gesamtsystemverfügbarkeit zu erhalten. Die ausgefallene Komponente kann einfach ersetzt werden und wird vom System direkt – ohne Neustart – erkannt und verwendet.

Inhärente Sicherheit: Das System ist inhärent sicher aufgebaut bzw. mit technischen Schutzmaßnahmen ausgestattet, um das Verletzungsrisiko zu minimieren.

Ressourceneffizienz: Durch die Wiederverwendbarkeit und den Betrieb der Module, die momentan benötigt werden, werden Ressourcen bei der Herstellung und beim Betrieb geschont.

Selbstanpassung: Das System kann sich an Änderungen des Materialflusses selbst anpassen. Idealerweise erkennt das System erforderliche Änderungen und passt sich entsprechend an.

4.2 Gewünschte Eigenschaften für Fahrerlose Transportsysteme

Abbildung 4.1 zeigt in grau die gewünschten Eigenschaften für Fördertechnik nach (Furmans et al. 2010). Diese gewünschten Eigenschaften für Fördertechnik werden nun für Fahrerlose Transportsysteme konkretisiert und ergänzt (Abb. 4.1, grün). Sie wurden von den Anforderungen mehrerer Pilotanwendungen zur Produktionsversorgung innerhalb des BMBF-Forschungsprojektes KARIS PRO abgeleitet und dienen als Basis für die Lösungsansätze in Form von Entwurfsmustern im nächsten Kapitel.

4.2.1 Einfache und schnelle Realisierung

Die Realisierung und Inbetriebnahme von FTS ist besonders in produktionsnahen Anwendungen zeitkritisch, da hierbei meist die laufenden Prozesse

verändert oder unterbrochen werden müssen. Eine Realisierung und Inbetriebnahme durch den Hersteller ist – bedingt durch den Personaleinsatz beim Nutzer – mit hohen Kosten verbunden. Ziel ist deshalb eine möglichst **kurze Realisierungsphase** (Seemann 2017), die vom System unterstützt und möglichst ohne Expertenwissen vom Nutzer durchgeführt werden kann.

Das setzt voraus, dass für den Betrieb des Systems möglichst **wenige Anpassungen an der Infrastruktur** erforderlich sind und die Peripherie des Systems (vgl. Kapitel 3.2.2) einfach installiert werden kann. Auch sollte die **Einrichtung und Konfiguration weitestgehend vom System** durchgeführt werden, während der Bediener durch die einzelnen Schritte geleitet wird – ähnlich wie bei der Einrichtung von Consumer-Produkten wie Staubsauger- oder Rasenmäherrobotern (Schiedermeier 2013).

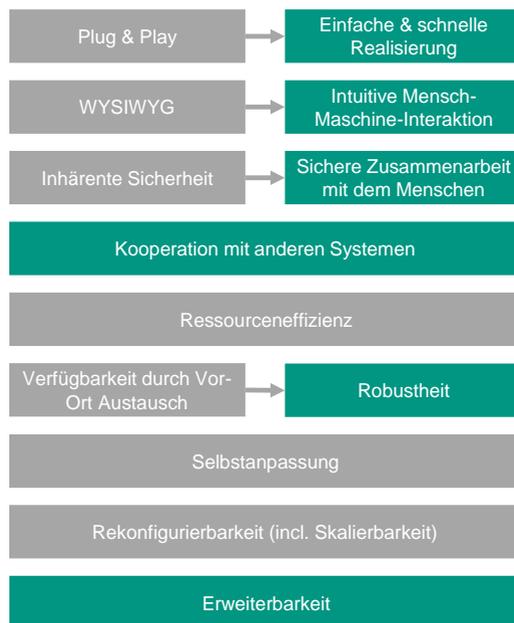


Abbildung 4.1: Gewünschte Eigenschaften für Förderer (grau) und Ergänzungen für Fahrerlose Transportsysteme (grün)

4.2.2 Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion

Da sich Mensch und FTF in den gleichen Arbeitsbereichen bewegen und Tätigkeiten gemeinsam durchführen, findet eine vielfältige Interaktion statt: Goodrich und Schultz (2007) unterscheiden bei der Kommunikation zwischen Mensch und Maschine zwischen entfernter Interaktion oder naher Interaktion. Hierbei kann zwischen verschiedenen Nutzerrollen unterschieden werden, beispielsweise dem Supervisor, der Änderungen am Systemverhalten vornimmt, dem Bediener, der Aktionen auslöst oder dem unbeteiligten Mitarbeiter, der sich lediglich eine Wegstrecke mit dem FTF teilt (vgl. Rollen in der Mensch-Roboter Interaktion in (Scholtz 2003)). Die Qualität der Nutzerschnittstellen ist entscheidend für die Qualität der Zusammenarbeit und des daraus resultierenden Arbeitsergebnisses.

Preim und Dachzelt (2015, S. 472) beschreiben die natürliche Benutzungsschnittstelle (engl. Natural User Interface – NUI) als „System [...], mit dem Benutzer mittels intuitiver und zumeist direkter Bedienhandlungen interagieren, die einen klaren Bezug zu natürlichem, realweltlichem menschlichem Alltagsverhalten aufweisen. Natürlich heißt dabei nicht angeboren, sondern bezieht sich auf [...] durch den Alltag vertraute und erlernte Handlungen bzw. auf solche Handlungen, die Benutzern im Moment der Interaktion als angemessen erscheinen.“ Hier setzen die von Leonhard (1999, S. 118) als wichtigste Eigenschaften genannten Merkmale an: Einfachheit und Selbsterklärung, wodurch intuitive Abläufe eine Nutzerschulung oder das Lesen einer Betriebsanleitung überflüssig machen. Nielsen (1994) untermauert die Ansätze durch Usability-Heuristiken, die eine minimale Belastung des Gedächtnisses, Konsistenz der Ein- und Ausgaben sowie die Rückgabe von Feedback empfehlen. Jede bewusste Interaktion kostet Zeit und Aufmerksamkeit. Mit „The best Interface is no Interface“ warnt Krishna (2015) vor dem leichtfertigen Einsatz von Benutzerschnittstellen, da die Überladung mit Schnittstellen den Nutzer überfordern und hierdurch die Gebrauchstauglichkeit reduzieren. Bezogen auf FTS bedeutet dies beispielsweise, dass ein Mitarbeiter bereits nach einer kurzen Einweisung Transportaufträge auslösen kann oder ein Milkrun-Fahrer das Verhalten der Fahrzeuge einschätzt und entsprechend reagiert.

Implizierendes Verstehen des Menschen erfordert, dass das Transportsystem durch Wahrnehmung mittels Sensorik oder durch Kommunikation mit ande-

ren Geräten relevante Äußerungen des Menschen und Arbeitsabläufe erkennt und darauf reagiert, ohne dass der Mensch explizit manuelle Eingaben tätigen muss: Statt einer Eingabe kommuniziert der abgestellte Ladungsträger direkt mit dem Transportsystem und generiert den Auftrag. Die Umpositionierung einer Lade- oder Übergabestation muss nicht neu eingelesen werden, sondern wird vom FTS selbst erkannt.

Für den Menschen muss erkennbar sein, in welchem Zustand sich das System befindet und was es als nächstes tut. Das klare **Erkennen des Systemzustandes** ist grundlegend für die sichere und verzögerungsfreie Interaktion. Im Stillstand muss ein Mitarbeiter erkennen, ob ein Fahrzeug z.B. gerade auf einen Ladungsträger wartet, den Akku lädt oder ob der Schutzbereich eines Laserscanners verletzt ist. Kommunikation und vorhersehbares Verhalten sind für das Erkennen des Systemzustandes durch den Menschen entscheidend. Insbesondere bei steigendem Autonomiegrad ist wichtig, dass der Mensch sowohl den aktuellen Fahrzeugzustand erkennt, als auch den Gesamtsystemzustand sowie vergangene und zukünftige **Entscheidungen des Systems nachvollziehen** kann: Verständlich aufbereitete Daten geben Hinweise auf die Systemauslastung und zeigen die relevanten Kennzahlen. Falls Eingriffe oder Wartungsarbeiten nötig sind, meldet das Transportsystem kritische Fahrzeug- und Systemzustände.

4.2.3 Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen

Für die sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine sind Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich, die **Verletzungsrisiken minimieren** und und trotzdem die geforderte Systemverfügbarkeit gewährleisten (Degenhard 2017). Die Maßnahmen zur Risikominderung können mittels inhärent sicherer Konstruktion, technischen Schutzmaßnahmen oder der Benutzerinformation erfolgen (DIN-12100 2011). Die Schutzmaßnahmen sollen hierbei möglichst keine Eingriffe in die bestehende Infrastruktur erfordern und die direkte Interaktion zwischen Mensch und FTF erlauben. Dies bedeutet, dass Schutzmaßnahmen bereits bei der Entwicklung berücksichtigt und im System integriert werden und möglichst wenige Maßnahmen vom Betreiber umgesetzt werden müssen.

4.2.4 Kooperation mit anderen Systemen

Beim Einsatz von FTS werden die Fahrwege auch durch andere Verkehrsteilnehmer genutzt. Hierzu zählen neben Fußgängern und Radfahrern auch manuell geführte Flurförderzeuge wie Gabelstapler, Routenzüge oder Gabelhubwagen. Außerdem ist nicht ausgeschlossen, dass andere FTS im Einsatz sind.

Für Fahrzeugführer von **manuell geführten Flurförderzeugen** ist es wichtig, die Fahrbewegungen des FTF klar zu erkennen, um Entscheidungen über die eigenen Fahrbewegungen treffen zu können. Insbesondere Routenzug-Fahrer müssen wissen, welche Fahrbewegungen das FTF durchführen wird, da die Rangierfähigkeit der Routenzüge eingeschränkt ist.

Für das FTF kann die Erkennung der **Art des Flurförderzeuges** relevant sein: So sollen möglicherweise stehende Gabelhubwagen überholt werden, während hinter stehenden Routenzügen gewartet werden muss, da ein Überholvorgang zu einer Behinderung des Entladens führen könnte.

FTS-Leitsysteme werden vom jeweiligen FTS-Hersteller installiert und genutzt, wodurch der Einsatz verschiedener Systeme erschwert wird (Ullrich 2014, S. 193). Sind **mehrere FTS verschiedener Hersteller** im Einsatz, müssen gemeinsame Fahrwege und Stellplätze so genutzt werden, dass Verklemmungen verhindert werden.

Bei zeitkritischen Prozessen kann es notwendig sein, dass bestimmte Verkehrsteilnehmer durch eine systemübergreifende **Priorisierung** Vorrang erhalten.

4.2.5 Ressourceneffizienz

Die Ressourceneffizienz bezieht sich im Folgenden auf betriebswirtschaftliche Ressourcen, also Betriebs- und Werkstoffe, Energie, Kapital, Personal, Know-how und Zeit (Schebek et al. 2016).

Die Verfahren zur Auftragsvergabe, Pfadplanung und Energieverwaltung sollen eine möglichst **hohe Auslastung der Fahrzeuge** bewirken und damit einen kosteneffizienten Betrieb ermöglichen.

Neben der Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung hat die Handhabung, also die Aufnahme und Abgabe der Ladungsträger an die angebotenen Arbeitsplätze oder Systeme Einfluss auf die Systemleistung (VDI-2710-3 2014). Neben dem effizienten Einsatz sind auch die Anschaffungspreise relevant: Statt eines individuell hergestellten Produktes ist ein in **hohen Stückzahlen gefertigtes Massenprodukt** gewünscht, das ein breites Einsatzspektrum bietet und durch Skaleneffekte einen günstigen Stückpreis ermöglicht (Christensen und Greene 1976).

4.2.6 Robustheit

Das FTS soll robust gegenüber Störungen sein und zu einem möglichst hohen zeitlichen Anteil für den vorgesehenen Zweck zur Verfügung stehen (Seemann 2017). Ausfälle von Fahrzeugen sollen möglichst von anderen Fahrzeugen kompensiert werden.

Grundlage hierfür ist die **Selbstdiagnose** der einzelnen Fahrzeuge: Sie erkennen, dass ein Fehler oder ein Ausfall einer Komponente vorliegt. Je nach Grad des Fehlers führt ein Fahrzeug seine Funktionen nicht weiter fort, um schwerwiegendere Schäden zu vermeiden.

Mittels **Fernzugriff** kann der Hersteller die nächsten Schritte zur Instandsetzung einleiten: Hierdurch kann schnell auf eine Störung reagiert werden, indem beispielsweise Anpassungen an der Konfiguration vorgenommen oder Ersatzteile bzw. Ersatzfahrzeuge zur Verfügung gestellt werden (Seemann 2017).

Zur Beseitigung von Softwarefehlern muss das System regelmäßig mit **Updates** versorgt werden. Besonders bei vernetzten Softwaresystemen sind fortlaufende Aktualisierungen notwendig, um die sicherheitskritischen Lücken zu schließen (Beattie et al. 2002).

4.2.7 Selbstanpassung

Idealerweise trifft ein autonomes Transportsystem die richtigen Entscheidungen selbstständig: Eingriffe vom Betreiber werden nicht benötigt, sodass der Aufwand für den Betrieb und die Interaktionszeit mit dem System

reduziert wird. Durch Selbstanpassung funktioniert das System auch bei Veränderungen zuverlässig – sei es systembedingt durch Ausfälle einzelner Fahrzeuge, durch **veränderte Aufträge** oder durch **Änderungen an der Umgebung**.

Zur Selbstanpassung eines FTS zählen Entscheidungen über Fahrstrecken, Fahrgeschwindigkeiten, Energieladestrategien und die Annahme und Abarbeitungsreihenfolge von Aufträgen – auch dann, wenn sich die Leistungsanforderungen ändern (Degenhard 2017).

4.2.8 Rekonfigurierbarkeit

Die mit manuellen Transporten erreichte Flexibilität wird auch für automatisierte Systeme gewünscht und ist in flexiblen Produktionsanwendungen zwingend erforderlich: Das System soll sich durch den Betreiber leicht anpassen lassen.

Der Bedarf an Transporten kann sich durch Nachfrageänderungen oder saisonale Schwankungen verändern. Das Transportsystem muss entsprechend veränderter Anforderungen an das Transportaufkommen **skalierbar** sein (Seemann 2017): Das System kann einfach und schnell um einzelne Fahrzeuge reduziert oder erweitert werden. Neue Fahrzeuge werden ohne Einrichtungsaufwand automatisch und ohne Beeinträchtigung laufender Transportprozesse in das System integriert.

Ladungsträger-Flexibilität bedeutet, dass ein Transportsystem unterschiedliche Ladungsträger transportieren kann (Ullrich 2014, S. 193). Zu den Ladungsträgern zählen unterschiedlich große Kleinladungsträger, Paletten sowie Fahrgestelle wie Bodenroller oder Transportwagen. Die Ladungsträger-Flexibilität ermöglicht den vielfältigen Einsatz des Fahrerlosen Transportsystems unter Beibehaltung bestehender Ladungsträger. Neben den Ladungsträgern müssen auch die Übergabepositionen und die Handhabung berücksichtigt werden.

Das Transportsystem kann in einer neuen Umgebung schnell und einfach eingelernt werden, wodurch das System auch hinsichtlich des Einsatzortes flexibel ist. Die **Flexibilität bezüglich des Einsatzortes** bezieht sich auf alle Komponenten des Systems. Hierzu zählen Ladestationen, Kommunikationseinrichtungen und Leitreechner (VDI-2710 2010).

4.2.9 Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen

Bei der Planung von FTS sind oft nicht alle erforderlichen Funktionen bekannt, die das Transportsystem im Laufe seines Produktlebenszyklusses erfüllen soll. Die **Funktionserweiterung** ermöglicht die Ergänzung von Funktionen, die bei der Entwicklung noch nicht mit berücksichtigt wurden (Degenhard 2017). Entscheidend für die Möglichkeit einer wirtschaftlich sinnvollen Erweiterung sind die vorhandenen Hard- und Softwareschnittstellen, die die **Upgradefähigkeit** sicherstellen.

4.3 Fazit aus den gewünschten Eigenschaften für FTS

Die meisten gewünschten Eigenschaften lassen sich, in unterschiedlich starker Ausprägung, bereits in am Markt verfügbaren Systemen wiederfinden: So steht bei den Low-Cost-Systemen wie dem Leo Locative (Bitto 2017) die einfache und schnelle Realisierung im Vordergrund. Das Potential der Mensch-Maschine-Interaktion wird bisher nur vereinzelt in Systemen wie dem iGo neo von Still (Still 2017) ersichtlich. Die sichere Mensch-Maschine-Interaktion wird in allen vorgestellten Systemen berücksichtigt – bei komplexen Systemen durch Sicherheitstechnik, bei einfachen Systemen durch die Beschränkung der Fahrgeschwindigkeit und Traglast. Bei der Kooperation mit anderen Systemen besteht Potential – dort wo sich Arbeitsbereiche unterschiedlicher FTS überschneiden, sind aufwändige Anpassungen erforderlich. Ein Großteil der FTS wird in kleinen Stückzahlen hergestellt. Eine Ausnahme stellt Amazon dar, wo 45.000 Transportfahrzeuge in skalierbaren Systemen im Einsatz sind (Shead 2017). Die Robustheit ist besonders in dynamischen Umgebungen eine Herausforderung. Aethon TUG bietet mit der automatisierten Analyse in der Cloud einen interessanten Ansatz (Aethon 2017). Die Selbstanpassung bei freinavigierenden Systemen ist lediglich durch die eigenständige Planung von Fahrwegen gegeben – lernfähige Systeme kommen noch nicht zum Einsatz. Die Rekonfiguration und Erweiterungen werden – ähnlich wie die Realisierung – meist vom Hersteller durchgeführt.

Es wird deutlich, dass in keinem System alle gewünschten Eigenschaften vorhanden sind. Bei der Gestaltung der Entwurfsmuster im folgenden Kapitel wird die Vereinigung aller gewünschten Eigenschaften berücksichtigt.

5 Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme

Die folgenden Entwurfsmuster stellen Lösungsansätze dar, um FTS mit den gewünschten Eigenschaften des vorangegangenen Kapitels zu entwickeln. Hierbei werden auch die in Kapitel 2 erläuterten Technik-Entwicklungen berücksichtigt um die in Kapitel 3 beschriebenen Aufgaben zu vereinfachen oder zu automatisieren. Obwohl der Fokus auf kompakten Transportfahrzeugen liegt, lassen sich die Muster auch auf Systeme mit größeren Fahrzeugen übertragen.

Nach einer allgemeinen Einführung in Entwurfsmuster, Mustersprachen und deren Anwendungsbereiche werden die Entwurfsmuster für FTS für die Themen Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und dezentrale Steuerung beschrieben.

5.1 Einführung: Entwurfsmuster und Mustersprachen

Entwurfsmuster sind Lösungsansätze, die zur Lösung von wiederkehrenden Problemen genutzt werden. Sie wurden von dem Architekten Christopher Alexander entwickelt, der sie wie folgt beschreibt:

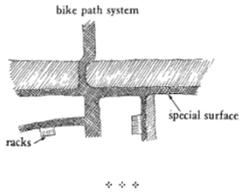
„Each pattern describes a problem which occurs over and over again in our environment, and then describes the core of the solution to that problem, in such a way that you can use the solution a million times over, without ever doing it the same way twice.“ (Alexander et al. 1977)

Da Entwurfsmuster die Kernaspekte beschreiben, geben sie einen Überblick über die Risiken und die Komplexität von Problemen und lassen gleichzeitig Raum für Anpassungen und Innovation. Während der Erstellung dienen sie der Strukturierung von Erfahrung und Wissen (Rebovich und DeRosa 2013).

Abbildung 5.1 zeigt die Struktur der Entwurfsmuster Alexanders. Eine einleitende Fotografie stellt das Problem dar; die Vorgängermuster erläutern den Kontext. Darauf folgt eine prägnante Beschreibung des Problems, das anschließend mithilfe von Einflussfaktoren und Belegen erklärt wird. Die Beschreibung der Lösung wird durch eine Skizze ergänzt. Abschließend werden Folgemuster aufgeführt, wodurch das Muster in den Gesamtkontext gesetzt wird, welcher die Grundlage für die Mustersprache bildet.

Nr., Name	56 BIKE PATHS AND RACKS*		
Foto			Lösung
Kontext (Vorgängermuster)	<p>... within a LOCAL TRANSPORT AREA (11) there is a heavy concentration of small vehicles like bikes, electric carts, perhaps even horses, which need a system of bike paths. The bike paths will play a very large role in helping to create the local transport area, and may also help to modify LOOPED LOCAL ROADS (49) and NETWORK OF PATHS AND CARS (2).</p>		Skizze zur Lösung
Problem	<p>Bikes are cheap, healthy, and good for the environment; but the environment is not designed for them. Bikes on roads are threatened by cars; bikes on paths threaten pedestrians.</p>		
Einflüsse & Belege	<p>In making the environment safe for bikes, the following problem must be solved:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Bikes are threatened where they meet or cross heavy automobile traffic. 2. They are also threatened by parked cars. Parked cars make it difficult for the bike rider to see other people, and they make it difficult for other people to see him. In addition, since the bike rider usually has to ride close to parked cars, he is always in danger of someone opening a car door in front of him. 		Kontext (Nachfolgemuster)

Build a system of paths designated as bike paths, with the following properties: the bike paths are marked clearly with a special, easily recognizable surface (for example, a red asphalt surface). As far as possible they run along local roads, or major pedestrian paths. Where a bike path runs along a local road, its surface may be level with the road—if possible, on the sunny side; where a bike path runs along a pedestrian path, keep it separate from that path and a few inches below it. Bring the system of bike paths to within 100 feet of every building, and give every building a bike rack near its main entrance.



Build the racks for bikes to one side of the main entrance, so that the bikes don't interfere with people's natural movement in and out—MAIN ENTRANCE (110), and give it some shelter, with the path from the racks to the entrance also under shelter—ARCADES (119); keep the bikes out of quiet walks and quiet gardens—QUIET BACKS (59), GARDEN WALL (173). . . .

Abbildung 5.1: Struktur der Entwurfsmuster in Alexander et al. (1977, S. 289)

Meszaros und Doble (1997) beschreiben Entwurfsmuster für die Gestaltung von Entwurfsmustern. Sie gehen auf die Struktur von Entwurfsmustern, Benennung und Referenzierung zwischen den Mustern, Möglichkeiten zur Steigerung der Verständlichkeit und auf die Struktur der Mustersprache ein.

Eine **Mustersprache** besteht aus der Sammlung von Entwurfsmustern, die strukturell als Netzwerk (siehe Abb. 5.2) angeordnet sind (Alexander 1979, S. 314). Ziel einer Mustersprache ist die Definition einer einheitlichen Sprache für Probleme und Lösungen, um die Kommunikation zwischen Entwicklern

unterschiedlicher Fachrichtungen und den Nutzern zu fördern und Erfahrungen über Lösungen typischer Fragestellungen an andere weiterzugeben (Borchers 2001, S. 361).

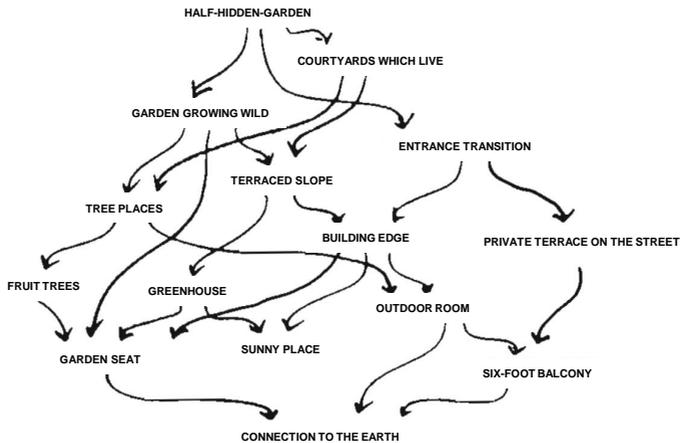


Abbildung 5.2: Beziehungs-Netzwerk der Entwurfsmuster in Alexander (1979, S. 313)

Ward Cunningham, der Entwickler des ersten Wikis, das er für die Darstellung von Softwaremustern nutzte, beschreibt Mustersprachen wie folgt:

„A set of patterns becomes a pattern language when each of its patterns, once solved, leads to more patterns that should then be considered.“ (Cunningham 2006)

Alexander et al. (1977) verwendet mit der Mustersprache einen Top-Down-Ansatz, indem er die Entwurfsmuster großer Einheiten wie Regionen und Städte hin zu kleinen Elementen, wie konstruktiven Details, anordnet. Innerhalb einer Mustersprache sind Entwurfsmuster nicht isoliert, sondern benötigen größere Muster, denen sie zugehören, und ihnen zugehörige, kleinere Entwurfsmuster (Alexander 1979, S. 311). Dies begründet Alexander damit, dass ein Entwurfsmuster – ebenso wie ein Bauwerk – keine isolierte Entität darstellt und deshalb im zugehörigen Kontext betrachtet werden muss. Die Lösungen sind so dargestellt, dass die relevanten Beziehungen erkennbar sind, um das Problem eigenständig und den eigenen Präferenzen

entsprechend zu lösen. Sie enthalten deshalb die wichtigsten Merkmale, die unverzichtbar sind, um das Problem zu lösen (Alexander et al. 1977, S. xiii).

Entwurfsmuster und Mustersprachen wurden später unter anderem in der objektorientierten Softwareentwicklung (Beck und Cunningham 1987), der Mensch-Computer-Interaktion (Borchers 2001), dem Systems-Engineering (Rebovich und DeRosa 2013) und der Pädagogik (Goodyear 2005) angewandt.

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten FTS zeigen, dass es sich dabei einerseits um komplexe Systeme handelt und dass andererseits eine Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten zur Realisierung der Aufgaben und Funktionen bestehen. Um die Komplexität zu reduzieren, die Möglichkeiten gegenüberzustellen und Lösungen aufzuzeigen, scheint die Nutzung von Entwurfsmustern sinnvoll.

5.2 Gestaltungsregeln für Plug&Work-Fördertechnik

Furmans et al. (2010) beschreiben folgende Gestaltungsregeln für Plug&Work-Fördertechnik. Sie basieren auf den in Kapitel 4.1 vorgestellten gewünschten Eigenschaften für Plug&Work-Fördertechnik und beschreiben das Gesamtergebnis, ohne konkrete Lösungsschritte vorzugeben:

Modularität: Das System ist aus unabhängigen Funktionsmodulen aufgebaut, die miteinander interagieren, um den Materialtransport durchzuführen. Die einzelnen Module können einfach kombiniert und angeordnet werden, um ein lauffähiges System zu bilden. Die Verbindung zwischen den Modulen wird durch die Module selbst hergestellt.

Funktionsintegration: Innerhalb der Module sind alle notwendigen Funktionen integriert. Hierzu gehören die Identifizierung der transportierten Güter, die Suche der Zielstelle im System, die Erkennung der Umgebungsbedingungen, der Transport in die richtige Richtung und die Kommunikation mit anderen Modulen.

Dezentrale Steuerung: Die einzelnen Module entscheiden selbstständig mit eigenen Steuerungen über die Durchführung von Transportaufgaben, anstatt von einer zentralen Steuerung koordiniert zu werden.

Interaktion zwischen Modulen: Benachbarte Module tauschen Informationen direkt aus. Es gibt keinen zentralen Knotenpunkt, der für den Informationsaustausch zuständig ist.

Standardisierte Schnittstellen: Damit die Module miteinander interagieren können und deren Anordnung verändert werden kann, müssen mechanische, elektrische und informationstechnische Schnittstellen standardisiert sein. Der Austausch der Informationen sollte auf einem hohen logischen Niveau erfolgen.

Die Gestaltungsregeln werden in den nachfolgenden Entwurfsmustern aufgenommen und erweitert. Dabei werden auf Grundlage der gewünschten Eigenschaften (siehe Kapitel 4.2) Entwurfsmuster für FTS zu den Themen Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und dezentraler Steuerung vorgestellt. Die Themen ergeben sich aus der engen thematischen Verbindung der zugeordneten Entwurfsmuster. Abbildung 5.3 zeigt eine Übersicht über alle Entwurfsmuster und deren Verbindungen. Hierbei wird zwischen zwei Verbindungstypen unterschieden: Verbindungen, die sich daraus ergeben, dass aus der Lösung eines Problems eine weitere Fragestellung auftaucht (Cunningham 2006) und Verbindungen nach dem Top-Down-Ansatz (Alexander et al. 1977), die ein Muster als Spezialisierung eines anderen kennzeichnen.

5.3 Aufbau der Entwurfsmuster für FTS

Der Aufbau der Entwurfsmuster orientiert sich an der Struktur der Muster in Alexander et al. (1977) und Rebovich und DeRosa (2013) und enthält folgende Elemente:

-  **Kontext:** Zuordnung zu VORGÄNGERMUSTERN und *gewünschten Eigenschaften*(👍) (Kap. 4.2).
-  **Problem:** Beschreibt die negativen Aspekte von bestehenden Lösungen.
-  **Einflussgrößen:** Einflüsse auf das Problem sowie Vor- und Nachteile möglicher Lösungsansätze.
-  **Lösung:** Lösungsvorschlag für das Problem.

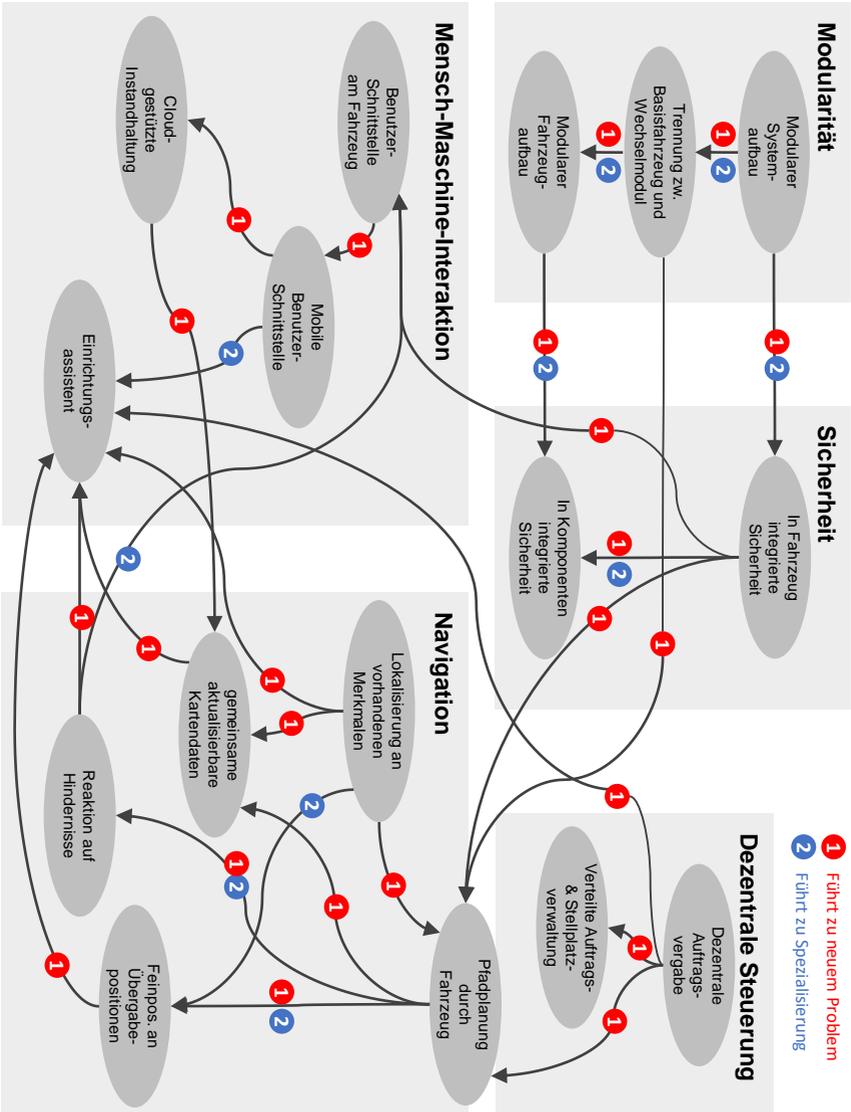


Abbildung 5.3: Übersicht der Entwurfsmuster

★ **Ergebnis:** Beschreibung der Veränderung nach Umsetzung der Lösung und Fragen bzw. Nachfolgemuster, die sich nach der Lösung ergeben.

Kohls (2012) zeigt anhand der Pfad-Metapher die Kernaspekte von Entwurfsmustern: Der *Kontext* ist die Umgebung und die Tatsache, dass man sich in der Umgebung an einem Startpunkt befindet, der vom Ziel verschieden ist. Der direkte Weg ist aufgrund von Hindernissen nicht nutzbar – hierin besteht das *Problem*. Die *Lösung* ist ein nutzbarer Pfad zum Ziel. Bei der Nutzung dieses Pfades müssen mögliche Einflussgrößen berücksichtigt werden. In der Metapher sind dies Felsen, für die spezielles Equipment erforderlich ist, begrenzte Ausdauer oder Nahrung, die eingeplant werden muss (Kohls 2012).

Die Entwurfsmuster sind, wie in Kapitel 5.1 erläutert, miteinander verknüpft und bilden eine Mustersprache. Die Verknüpfungen sind in den Entwurfsmustern auf zwei Arten beschrieben:

Vorgängermuster: Das betrachtete Entwurfsmuster ist Teil des Vorgängermusters.

Folgemuster: Die Lösung des betrachteten Musters führt zu den im Folgemuster dargestellten Fragestellungen.

Ergänzend zum Aufbau von Alexanders Mustern wird das folgende Entwurfsmuster aus Meszaros und Doble (1997) angewandt:

Pattern Language Summary Bevor die Muster erläutert werden, wird in einer Zusammenfassung in das Thema eingeführt und der Zusammenhang der Muster erläutert.

5.4 Modularität

Die Modularität eines Systems ist in dessen Architektur erkennbar, die nach Ulrich (1995) drei Kriterien beinhaltet:

1. Die Anordnung der funktionalen Elemente (Funktionsstruktur).
2. Die Zuordnung funktionaler Elemente zu physischen Komponenten.
3. Die Spezifikation von Schnittstellen zur Interaktion physischer Komponenten.

Abhängig von diesen Kriterien unterscheidet Ulrich (1995) zwischen einer integralen und einer modularen Architektur:

Eine integrale Architektur zeichnet sich durch ein komplexes Beziehungsgeflecht zwischen funktionalen Elementen und physischen Komponenten und starr gekoppelten Schnittstellen aus.

Eine modulare Architektur enthält viele Eins-zu-Eins-Beziehungen zwischen funktionalen Elementen und Komponenten mit entkoppelten Schnittstellen.

Ulrich (1995) erläutert, dass bei der Entwicklung keine Gesamtentscheidung stattfindet, ob das gesamte Produkt modular oder integral aufgebaut wird. Stattdessen muss untersucht werden, welche funktionalen Elemente des Produktes modular sein sollen und welche nicht.

Bei der Unterscheidung zwischen integraler und modularer Architektur muss immer die genaue Betrachtungsebene berücksichtigt werden: So ist beispielsweise ein Transportsystem, mit den Fahrzeugen als Modulen, modular aufgebaut – während ein Fahrzeug mit integrierten Komponenten einer integralen Architektur entspricht.

Ulrich (1995) unterteilt die modulare Architektur in drei **Architekturvarianten** (siehe Abbildung 5.4). Jede Varianten hat eine Eins-zu-eins-Zuordnung von funktionalen Elementen zu Komponenten und entkoppelte Schnittstellen. Die modularen Architekturen unterscheiden sich in der Art der Interaktion zwischen den Komponenten:

Slot: Die Schnittstellen zwischen den Komponenten sind unterschiedlich. In dem dargestellten Beispiel nutzt der Wagenaufbau eine andere Schnittstelle als die Radaufhängung. Trotzdem ist das System modular, da der Wagenaufbau – im Gegensatz zu dem integralen Beispiel – ausgetauscht werden kann.

Bus: Die Schnittstellen zwischen den Komponenten und dem Bussystem sind vom selben Typ. Das Trägersystem dient als einheitliche Schnittstelle für verschiedene Komponenten. Die Komponenten Wagenaufbau und Radaufhängung besitzen die gleiche Schnittstelle, über die sie an dasselbe Trägersystem angebunden sind.

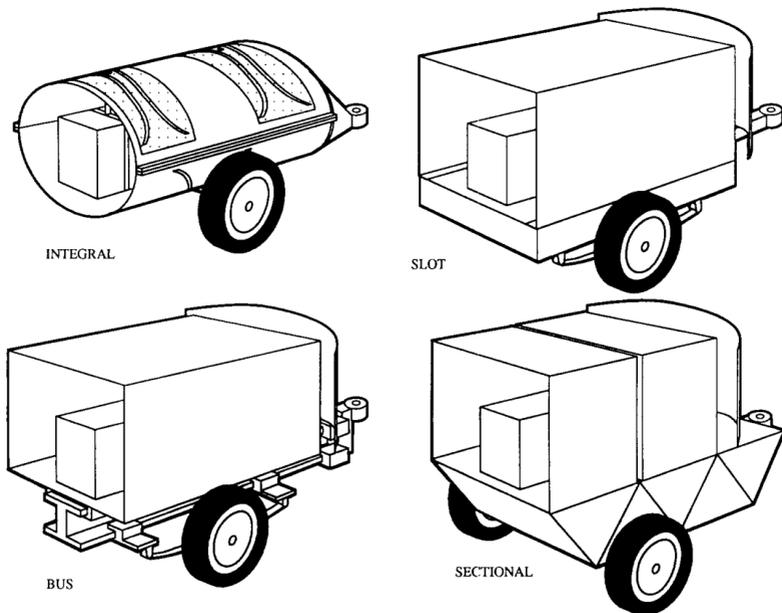


Abbildung 5.4: Integrale Architektur und modulare Architekturen (Slot, Bus und Sectional) am Beispiel eines Anhängers (Ulrich 1995)

Sectional: Die Schnittstellen sind vom selben Typ, allerdings sind nicht alle mit einem einheitlichen Element verbunden; stattdessen sind die Komponenten jeweils miteinander verbunden. Wagenaufbau und Radaufhängung nutzen die gleichen Schnittstellen.

Ein modulares Design hat folgende Vorteile:

- Komponenten können über mehrere Produkte hinweg genutzt werden, wodurch der Hersteller Entwicklungsressourcen einspart [S. 18] (Sanchez 2002) während gleichzeitig für den Kunden eine größere Variantenvielfalt entsteht.
- Durch definierte Schnittstellen und Funktionen können Komponenten von verschiedenen Teams zur gleichen Zeit entwickelt, gefertigt (Baldwin und Clark 2006) und bereits vor dem Einbau in das System umfassend getestet werden (Ulrich 1995, S. 435).

- Komponenten können verändert oder durch leistungsfähigere ersetzt werden, sofern die Schnittstellen bestehen bleiben. Hierdurch kann auf sich in Zukunft ändernde Anforderungen reagiert werden (Baldwin und Clark 2006).
- Indem die Schnittstellen definiert werden, bevor die Entwicklung der Hauptkomponenten beginnt, werden aufwändige Änderungen im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess vermieden, wodurch der Entwicklungsprozess verkürzt wird (Sanchez 2002, S. 12).

Nachteile und Herausforderungen eines modularen Designs sind:

- Die Weiterentwicklung eines Systems mit modularer Architektur ist aufwändig, da die Schnittstellen aller Komponenten angepasst werden müssen (Ulrich 1995, S. 436)
- Die Modularisierung kann zu einer geringeren Gesamtleistung führen, da nur innerhalb der Module optimiert werden kann. Die physischen Schnittstellen benötigen mehr Material und Platz (Ulrich 1995, S. 436)

Abbildung 5.5 zeigt die Anordnung der nachfolgend dargestellten Entwurfsmuster zur Modularität, die ausgehend vom Gesamtsystem die Fahrzeuge und die Komponenten in den Fahrzeugen betrachten.

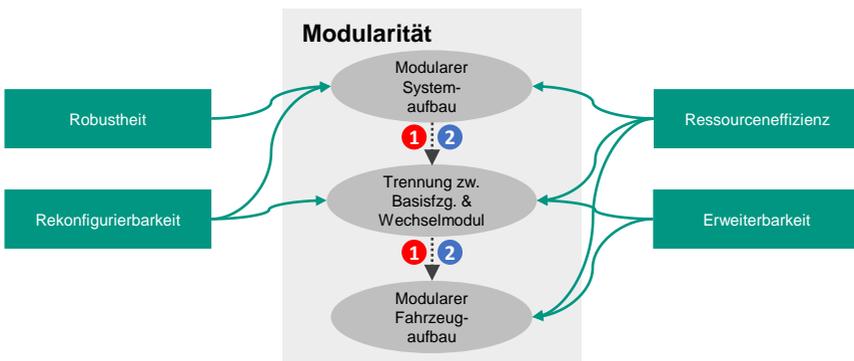


Abbildung 5.5: Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zu Modularität

5.4.1 Modularer Systemaufbau mit multifunktionalen Fahrzeugen

- ⚙️ **Kontext:** Logistik- und Produktionsbereiche, in denen FTS zum Einsatz kommen können, variieren stark. Individuellen Anforderungen der Kunden wird mit individuellen FTS-Lösungen begegnet (VDI-2510 2005).
- ⊖ **Problem:** Werden FTF individuell für Kundenanforderungen entwickelt und nach integralen Ansätzen hergestellt, sind sie teuer, da positive Skaleneffekte (Christensen und Greene 1976) ausbleiben. Die Veränderung der Fahrzeuganzahl oder der Austausch von Fahrzeugen ist aufwendig, da Änderungen an den Fahrzeugen oder dem Leitsystem nötig sind.



Abbildung 5.6: Nach integralen Ansätzen für die kundenindividuelle Anwendung hergestelltes Transportsystem (Bild: SEW eurodrive)

⚙️ Einflussgrößen

Für die Fertigung unterscheidet Jodlbauer (2008, S. 11ff) zwischen verschiedenen **Organisationsprinzipien** und Ausbringungsmengen. Zu den Organisationsprinzipien zählen Fließ-, Gruppen-, Werkstatt- und Baustellenfertigung; zu den Ausbringungsmengen Massen-, Serien- und Einzelfertigung. Bei FTS kann zwischen folgenden Fertigungsvarianten unterschieden werden:

- Einzel- und Kleinserienfertigung: Für individuelle Kundenanforderungen, die durch Serienfahrzeuge nicht bedient werden können, werden Fahrzeuge in einer Werkstatt- oder Gruppenfertigung hergestellt. Im Rahmen von Projektgeschäften ermöglicht dies eine hohe Individualisierung, führt jedoch zu hohen Kosten pro Fahrzeug.

- Fließfertigung für Serienfahrzeuge: Das Serienfahrzeug erfüllt die Anforderungen des Kunden direkt oder indem aus einem Baukasten die passende Konfiguration realisiert wird.
- Fließfertigung für Serienfahrzeug mit individuellem Handhabungsmodul: Das Serienfahrzeug ist mit einer Schnittstelle ausgestattet, die die Nutzung verschiedener Handhabungsmodule ermöglicht.
- Baustellenfertigung: Nach Fertigung der Fahrzeuge findet die Installation der Peripherie und die Konfiguration direkt beim Kunden statt. Die Baustellenfertigung wird meist mit einer der vorherigen Fertigungsverfahren kombiniert.

Bei einem modularen Systemaufbau werden die Fahrzeuge als baugleiche Module des FTS betrachtet. Die Fahrzeuge sollen universell einsetzbar sein und gleichzeitig individuelle Anforderungen der Kunden erfüllen. Eine Herausforderung ist die **Vereinbarung der Kundenwünsche mit der Standardisierung von Fahrzeugen**. Möglicherweise sind bei Standard-Fahrzeugen kundenseitige Anpassungen erforderlich, die beim Einsatz eines individuellen Systems nicht nötig sind, beispielsweise an Ladungsträgern oder Übergabestationen. Durch die Standardisierung der Fahrzeuge muss bei der Funktionsintegration entschieden werden, welche Komponenten aufgrund des Bedarfes integriert werden und welche nicht. Einige spezielle Anforderungen (z.B. besonders flache Bauformen) können mit Standard-Fahrzeugen nicht abgedeckt werden und erfordern individuelle Lösungen.

Für ein redundantes System, das bei Fehlern den einfachen **Austausch von Fahrzeugen** ermöglicht, müssen relevante mechanische, elektrische und softwaretechnische Schnittstellen der Fahrzeuge einheitlich sein (Ulrich 1995, S. 436). Um dem Bediener den Ausfall zu signalisieren oder den Ausfall eigenständig zu kompensieren, müssen Ausfälle erkannt und kommuniziert werden (siehe MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE).

 **Lösung: Die Fahrzeuge werden für möglichst viele Einsatzgebiete und Kundenanforderungen ausgelegt. Baugleiche Fahrzeuge kommen in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz.**

Bei der Auslegung der Fahrzeuge auf verschiedene Einsatzgebiete sind die folgenden Kriterien relevant:

- Durch einen **kompakten Aufbau** erhöht sich die Zahl der möglichen Einsatzbereiche. Der kompakte Aufbau ermöglicht KARIS PRO die Kombination der beiden in (VDI-2510 2005) aufgeführten Bauformen der Lasttragenden-FTF und Unterfahrschlepper. Dadurch ist sowohl der Transport von Kleinladungsträgern als auch Warenkörben möglich (siehe Abb. 5.7).
- Die Auslegung auf eine möglichst **hohe Traglast** erhöht die Bandbreite an möglichen Transportgütern. Die Auslegung beinhaltet die Dimensionierung der tragenden Baugruppen und der Antriebseinheiten.
- Funktionen, die sich in den Einsatzbereichen unterscheiden, werden implementiert – bei KARIS PRO beispielsweise das **variierende Fahrverhalten** beim Trage- und Schleppebetrieb und die zugehörigen **Sicherheitsfunktionen** (DIN-1525 1997) wie die Anpassung der Laserscanner-Schutzbereiche und Fahrgeschwindigkeiten.



Abbildung 5.7: Modularität auf Systemebene durch baugleiche Fahrzeuge für verschiedene Anwendungen, hier beim Transport von Kleinladungsträgern (links) und Warenkörben (rechts)

Baugleiche Fahrzeuge sind Grundlage für die **Skalierung** der Flottengröße und den **einfachen Austausch** von Fahrzeugen: Nachdem sich ein Fahrzeug im

System angemeldet hat, werden alle benötigten Daten für die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE zur Verfügung gestellt und das Fahrzeug wird in die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE einbezogen.

- ★ **Ergebnis:** Der Einsatz von baugleichen Serienfahrzeugen ermöglicht kürzere Lieferzeiten der Fahrzeuge. Durch höhere Stückzahlen sinken die Kosten für die Fahrzeuge (*Ressourceneffizienz* (👍)). Konstruktionsfehler können in frühen Anwendungen erkannt und für den Einsatz in zukünftigen Systemen behoben werden. Die Redundanz ermöglicht den schnellen und einfachen Austausch von einzelnen Fahrzeugen, wodurch die Systemfunktionen erhalten bleiben und die *Robustheit* (👍) gesteigert wird. Die *Rekonfigurierbarkeit* (👍) ist durch das einfache Hinzufügen neuer Fahrzeuge gegeben.

Nach dem modularen Systemaufbau sind TRENnung ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN für individuelle Anpassungen an die Bedürfnisse der Kunden von Relevanz. Um die Fahrzeuge in Bereichen einsetzen zu können, in denen sich Menschen bewegen, sind IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN erforderlich.

5.4.2 Trennung zwischen Basisfahrzeug und applikationsspezifischen Wechselmodulen

- 🏗️ **Kontext:** Das Muster MODULARER SYSTEMAUFBAU zeigt die Kriterien und Vorteile der Modularität auf Systemebene. Da sich die Anwendungen für FTS in der Art der Ladungsträger, Ladehilfsmittel, Transportgewichte und Übergabestellen unterscheiden, zeigt das folgende Muster den Nutzen der Modularität auf Fahrzeugebene – zwischen Basisfahrzeug und Wechselmodul – und stellt somit ein Untermuster des Vorgängermusters dar.
- ⊖ **Problem:** Fahrzeuge können jeweils nur für die im Voraus definierte Art von Transportgut genutzt werden, für die die Handhabungseinheit verbaut ist (siehe Abb. 5.6). Anpassungen an Kundenanforderungen bezüglich Transportgut erfordern Veränderungen am Fahrzeug. Fahrzeuge, die bereits im Einsatz sind, können nur mit hohem Aufwand verändert werden.



Abbildung 5.8: Integriertes Fahrzeug ohne Möglichkeit zum Austausch von Handhabungseinheiten (Bild: Grenzebach)

≡ Einflussgrößen

Der überwiegende Anteil der in Tabelle 3.2 dargestellten Aufgaben und Funktionen zählt zu den **Grundfunktionen**, die in allen Anwendungen identisch sind, beispielsweise die Lokalisierung und Navigation. Zu den **anwendungsspezifischen Funktionen** gehören die Handhabung, die Ladungssicherung und die Identifikation: Je nach Ladungsträger, Ladehilfsmittel oder Übergabeposition sind verschiedene Lastaufnahmemittel und Ladungssicherungen erforderlich. Beispiele hierfür sind Einheiten zur Handhabung von Großladungsträgern und Kleinladungsträgern im Tragebetrieb oder Wagen im Schleppbetrieb (VDI-2510 2005). Die Identifikation der Ladungsträger unterscheidet sich je nach Anwendung: Neben unterschiedlichen optischen Codes werden RFID-Transponder in verschiedenen Frequenzbereichen (Finkenzeller 2015, S. 187) eingesetzt. Die Transponder sind kundenspezifisch an verschiedenen Positionen am Ladungsträger angebracht, worauf die Identifikationstechnik angepasst werden muss.

Die Festlegung der Schnittstelle zwischen Basisfahrzeug und Wechselmodulen birgt die Gefahr für längerfristige Einschränkungen: Wird die Schnittstelle zu eng definiert, können zukünftige Applikationen nicht realisiert werden. Andererseits müssen bei der Gestaltung der Schnittstelle auch die Kosten für die Schnittstelle selbst berücksichtigt werden, die möglicherweise in vielen Anwendungen nicht zum Einsatz kommt (Ulrich 1995).

🔧 **Lösung: Die Grundfunktionen werden im Basisfahrzeug und anwendungsspezifische Funktionen werden in Wechselmodule integriert. Die Schnittstelle überträgt Kräfte, elektrische Energie und Daten.**



Abbildung 5.9: Die Grundfunktionen sind in der Lynx-Plattform integriert und die Handhabungseinheiten für verschiedene Ladungsträger in den Wechselmodulen (Bild: Omron Adept).

Bei der Entwicklung der Fahrzeuge müssen möglichst viele **Anwendungen** berücksichtigt werden. Für die in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 beschriebenen Funktionen muss entschieden werden, ob sie in den Anwendungen jeweils gleich oder kundenindividuell gestaltet werden.

Die **Schnittstelle** bietet die Möglichkeit, auch zum Planungszeitpunkt nicht berücksichtigte Funktionen in Wechselmodule zu integrieren, beispielsweise zusätzliche Sensorik oder Bedienschnittstellen.

Bei hohem Energieverbrauch – beispielsweise durch einen in die Handhabungseinheit integrierten Roboterarm – kann die **Integration einer Energieversorgung** in das Wechselmodul sinnvoll sein.

Die **Offenlegung der Schnittstellen** ermöglicht den Kunden die eigenständige Entwicklung und Integration von Wechselmodulen.

Für den Einsatz und Austausch von Wechselmodulen sind verschiedene Szenarien möglich:

- Initialer Einsatz durch den Hersteller: Ein Wechselmodul ist eine Komponente, die vom Hersteller mechanisch verbunden wird (z.B. bei Adept Lynx in 2.2, siehe Abb. 5.9). Die Übertragung von elektrischer Energie und Daten wird mit einfachen Steckverbindungen realisiert.
- Manueller Austausch im Betrieb durch den Kunden: Wechselmodule sind ein Baustein, der vom Kunden selbst ausgetauscht werden kann

(z.B. bei SSI Weasel in 2.2). Die Schnittstellen müssen robust und verpolungssicher gestaltet werden. Auch die mechanischen Schnittstellen müssen von außen gut zugänglich sein, um einen einfachen Austausch zu ermöglichen.

- Automatischer Austausch im Betrieb durch die Fahrzeuge: Wechselmodule sind Bausteine, die automatisiert getauscht werden können. Sie ermöglichen ein hohes Maß an Flexibilität ohne menschlichen Eingriff. Die Schnittstellen für mechanische Kräfte, elektrische Energie und Daten müssen so gestaltet sein, dass die Verbindung zwischen Fahrzeug und Wechselmodul automatisch hergestellt werden kann. Außerdem muss das Fahrzeug oder eine Übergabestation mit Aktorik zur Aufnahme des Wechselmoduls auf dem Fahrzeug ausgestattet sein.

Damit das Basisfahrzeug die Funktionen nutzen kann, muss das Wechselmodul die eigenen Funktionen kennen und kommunizieren. Die Ansteuerung der Einzelfunktionen im Wechselmodul finden dabei im Wechselmodul selbst statt – die Aktionen werden lediglich vom Basisfahrzeug angestoßen bzw. Rückmeldungen zum Status werden an das Basisfahrzeug gemeldet.

★ **Ergebnis:** Durch individuelle Wechselmodule können anwendungsspezifische Anpassungen vorgenommen werden, ohne die Basiseinheit zu verändern. Durch den Austausch von Wechselmodulen kann das System unterschiedliche Ladungsträger identifizieren, handhaben und transportieren (*Rekonfigurierbarkeit* (👍)). Der Hersteller kann sein Portfolio an Wechselmodulen erweitern und Kunden können Systeme auch nach der Realisierung noch an geänderte Anforderungen anpassen (*Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen* (👍)), ohne kostspielige Änderungen am Basisfahrzeug vornehmen zu müssen. Durch baugleiche Basismodule ergeben sich Skaleneffekte (Christensen und Greene 1976), wodurch die Montage von Werkstattfertigung auf Serienfertigung ausgerichtet werden kann und somit die Fertigungskosten reduziert werden (*Ressourceneffizienz* (👍)).

Nachdem die Integration von Funktionen in Fahrzeuge und Wechselmodule betrachtet wurde, beschäftigt sich das Muster MODULARER FAHRZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN mit der Modularität auf Komponentenebene. Hierzu zählen die Komponenten im Basisfahrzeug und in den Wechselmodulen.

5.4.3 Modularer Fahrzeugaufbau aus Komponenten

Kontext: Die TRENnung ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN teilt das Fahrzeug in zwei Einheiten. Beim Aufbau eines Basisfahrzeuges selbst stellt sich die Frage, wie die Modularität innerhalb eines Fahrzeuges auf Komponentenebene erreicht werden kann, um die Entwicklungskosten bei Anpassungen zu reduzieren indem Komponenten in mehreren Fahrzeugserien genutzt werden.

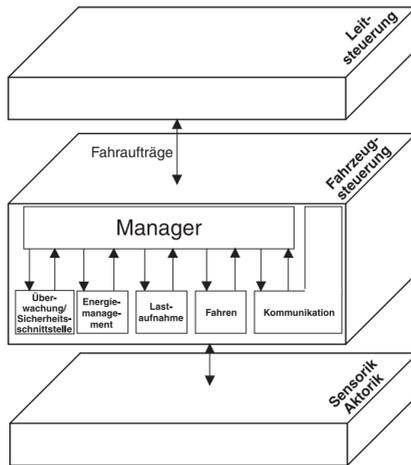


Abbildung 5.10: FTS-Interne Steuerung nach integralen Ansatz (Quelle: VDI 2510)

Problem: Bei integral aufgebauten Fahrzeugen steuert eine zentrale Fahrzeugsteuerung die im Fahrzeug verbauten Komponenten (Abb. 5.10). Die Komponenten übernehmen hierbei nur wenige eigenständige Funktionen (VDI-2510 2005). Der Einsatz verschiedener Komponenten in unterschiedlichen Fahrzeugserien ist kostspielig, da durch die geringe Stückzahl der Komponenten Synergien ausbleiben und der Integrationsaufwand aufgrund verschiedener Schnittstellen größer ist.

Einflussgrößen

Modulare Baukastensysteme werden beim Automobilbau eingesetzt, um die angebotene Variantenvielfalt mit möglichst wenigen Komponenten zu

erreichen. So kommen bei Volkswagen modulare Baukästen für verschiedene Komponenten zum Einsatz: Der modulare Querbaukasten (MQB) ermöglicht die Nutzung von Bauteilen über viele verschiedene Fahrwerkskomponenten hinweg. Beispielsweise kommt je nach Motorisierung eine Leichtbauachse oder eine Performanceachse zum Einsatz, die jeweils unabhängig vom Fahrzeug-Hinterwagen verbaut werden kann. Für die Fahrwerksregelung kommt über den gesamten MQB hinweg nur eine Steuerungshardware und -software zum Einsatz, die jeweils nur noch mit Abstimmungsparametern während der Fahrzeugproduktion angepasst werden (Gies und Brendes 2012). Vergleichbare Baukastensysteme existieren für Elektro-, Diesel- und Ottomotoren (Kahrstedt et al. 2012), Infotainmentsysteme (Tanneberger und Paetz 2012) und die Produktionsstrukturen selbst, wodurch auf einer Linie zahlreiche Fahrzeugvarianten hergestellt werden können (Burkert 2014).

Auch für FTF sind bereits Komponenten mit hoher **Funktionsintegration** am Markt, beispielsweise Antriebssysteme (Wittenstein 2017); Lokalisierungs- und Navigationseinheiten (Tomatis 2011) oder Sensorik (Fürstenberg und Kirsch 2017). Bei den Ansätzen werden Aufgaben einer zentralen Fahrzeugsteuerung in die Komponenten verlagert, wodurch die Dauer der Systementwicklung reduziert wird.

Beim modularen Ansatz werden im ersten Schritt die Schnittstellen definiert und anschließend die modularen Komponenten unabhängig voneinander entwickelt. Nach Sanchez (2002) lassen sich durch die Entwicklung von modularen Komponenten bis zu 50 % an Entwicklungskosten einsparen.

Beim Entwurf eines **Baukastensystems** muss entschieden werden, welche Funktionen in welche Komponenten integriert werden und welche modulare Architektur (siehe Kap. 5.4) geeignet ist. Hierbei können für unterschiedliche Schnittstellen einer Komponente auch verschiedene Architekturen zum Einsatz kommen: Mechanische Schnittstellen folgen eher der Slot-Architektur, da Komponenten in einem Fahrzeug unterschiedliche mechanische Schnittstellen nutzen. Schnittstellen für Daten und Energie sind hingegen gleich und orientieren sich an der Bus-Architektur.

Eine Herausforderung ist die Gestaltung der **Schnittstellen**: Während die Funktion innerhalb einer Komponente verändert werden kann, sind Veränderungen an den Schnittstellen nur sehr eingeschränkt möglich, da die

Kompatibilität zur vorherigen Generation der Schnittstelle erhalten bleiben muss. Je nach Geometrie kann der Platzbedarf bei Aufbau mit Komponenten höher sein als bei der vollständigen Integration in ein System.

🔧 Lösung: Funktionen werden in Komponenten integriert, die mit standardisierten Schnittstellen ausgestattet sind. Hierbei werden Funktionen aus der Fahrzeugsteuerung in die Komponenten verlagert.

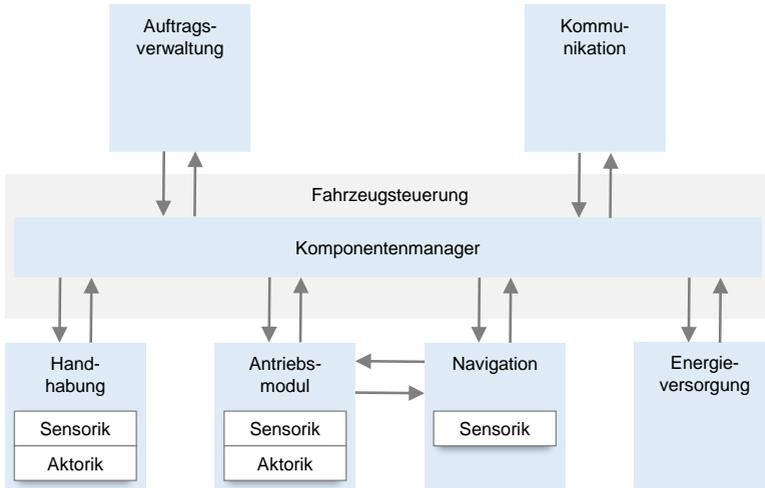


Abbildung 5.11: Modulare Architektur mit in Komponenten integrierten Funktionen

Werden die Funktionen in Komponenten (Abbildung 5.11) integriert, können diese in verschiedenen Ausprägungen realisiert werden, wodurch sich insgesamt eine Vielzahl an Konfigurationen ergibt:

- Auftragsverwaltung: Software-Baustein auf dem Fahrzeug (siehe DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE).
- Kommunikation: innerhalb des FTS und mit anderen Systemen z.B. andere FTE, Steigfördertechnik, Übergabepositionen und Produktionssysteme.
- Handhabung: Lastaufnahmemittel werden an das Transportgut angepasst (siehe TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN).

- Antriebsmodul: Kinematik, Leistung und Tragfähigkeit lassen sich durch Anordnung und Variation der Antriebseinheiten verändern.
- Navigation: Abhängig von den Umgebungsbedingungen, Nutzung von künstlichen (z.B. optische Spurführung) oder natürlichen Landmarken (z.B. durch Laser oder Kamera, siehe Kapitel 5.7).
- Energieversorgung: Art und Kapazität der Akkutechnik ermöglichen einen in der jeweiligen Anwendung effizienten Fahrzeugeinsatz.

Die jeweiligen Funktionen werden in die Komponenten integriert. Hierbei sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Standardisierte Schnittstellen für Daten, Energieversorgung und Mechanik reduzieren die Komplexität der Schnittstellen im Fahrzeug und erlauben die Erweiterung durch andere Module.
- Die Funktionen in den Komponenten können entsprechend der Anwendung ausgewählt und parametrisiert werden.
- Der Zugriff auf Grundfunktionen bzw. Rohdaten ist über die angebotenen Schnittstellen möglich.
- Die Selbstdiagnose und die Bereitstellung der Diagnoseergebnisse ermöglichen eine schnelle Fehlerdiagnose und -behebung.
- Durch externe Speicherung der Parameter einer Komponente entfällt die Konfiguration nach dem Austausch einer defekten Komponente.
- Von außen zugängliche Schnittstellen für Updates ermöglichen die Softwareaktualisierung der Komponenten.

★ **Ergebnis:** Ein modularer Aufbau mit im Voraus getesteten Komponenten bringt zahlreiche Vorteile über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg: Er reduziert den Entwicklungs- und Fertigungsaufwand (*Ressourceneffizienz* (👍)) und erleichtert die Instandhaltung durch Diagnosefunktionen und der Möglichkeit für Softwareupdates (Kap. 3.2.4). Durch standardisierte Schnittstellen sind auch Funktionserweiterungen (Kap. 3.2.6) in Form von Komponenten-Upgrades (*Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen* (👍)) möglich.

Durch Kombination unterschiedlicher Komponenten können verschiedene Fahrzeugserien mit geringerem Aufwand realisiert werden.

Da sich bei unterschiedlichen Modulen auch die Anforderungen an die Sicherheit ändern, sind IN KOMPONENTEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN wichtig.

5.5 Sicherheit

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, kann bei FTS, die nur eine geringe Traglast haben und einer festen Spur folgen, auf den Einsatz von Sicherheitstechnik verzichtet werden, sofern die Kraft beim Auftreffen auf einen definierten Prüfkörper 400 N nicht übersteigt (DIN-1525 1997). Da dies die Anwendungsbereiche stark einschränkt, werden im Folgenden Konzepte berücksichtigt, bei denen technische Schutzmaßnahmen erforderlich sind.

Die Sicherheitsfunktionen eines FTS müssen das Verletzungsrisiko auf ein vertretbares Maß reduzieren. Für FTS gilt die C-Norm DIN-1525 (1997), in der Gefährdungen und Anforderungen erläutert werden. Bedingt durch das Alter der Norm sind einige Gefährdungen nicht berücksichtigt, die bei frei navigierenden Systemen auftreten können. Mit steigendem Funktionsumfang und einem höheren Autonomiegrad steigt auch das potentielle Risiko für Personen im Umfeld von FTS. So müssen beispielsweise bei freifahrenden Systemen auch mögliche Abstürze an Treppen berücksichtigt werden, die für spurgeführte Systeme nicht relevant sind. Grundlage für die Entwicklung von FTS ist deshalb eine **Risikobeurteilung** nach DIN-12100 (2011), bei der die Grenzen des Systems festgelegt, die Gefährdungen ermittelt und die Risiken abgeschätzt werden. Ausgehend von den Risiken müssen Maßnahmen zur Risikominderung festgelegt werden. Hierzu zählen neben inhärent sicherer Konstruktion insbesondere technische Schutzmaßnahmen und letztendlich auch die Benutzerinformation.

Die Sicherheitsfunktionen bilden eine **überwachende Instanz**, die im Normalfall nicht aktiv eingreift, sondern beobachtet. Dies bedeutet, dass die nicht-sicherheitsrelevanten Steuerungseinrichtungen wie die Navigation bereits alle Sicherheitsanforderungen berücksichtigen und das System im Normalfall im sicheren Zustand halten. Die Sicherheitsfunktionen lösen nur aus, wenn ein nicht-sicheres System ausfällt oder schnell auf eine Gefährdung reagiert werden muss, z.B. bei einer unvorhersehbaren Schutzfeldverletzung.

Der Ausfall einer Sicherheitsfunktion kann unmittelbar zur Erhöhung eines Risikos führen (DIN-12100 2011).

Neben dem Schutz der Mitarbeiter ist bei der Gestaltung der Sicherheitsfunktionen auch der Erhalt der **Systemleistung** von großer Bedeutung. Ein gutes Sicherheitssystem reagiert auf Gefahren und ist gleichzeitig robust gegenüber Fehlauflösungen. Hierbei können erweiterte Sicherheitsfunktionen sogar die Basis für eine höhere Leistung sein: Kennt ein Fahrzeug sicherheitsgerichtet seinen Beladungszustand, kann die Fahrgeschwindigkeit der jeweiligen Situation angepasst werden. Leerfahrten werden dann mit einer höheren Geschwindigkeit durchgeführt als Fahrten mit Ladung. Besonders bei Transportsystemen mit hoher Flexibilität bezüglich der Ladungsträger (vgl. *Rekonfigurierbarkeit* (👍)) müssen die Sicherheitsfunktionen auch an diese Bedingungen z.B. durch Änderung der Schutzfeldgrößen angepasst werden.

Sobald die Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen definiert sind, stellt sich die Frage, an welcher Stelle sie im System integriert werden sollen: In der Infrastruktur oder im Fahrzeug? In einer zentralen Sicherheitssteuerung oder in den Fahrzeug-Komponenten? Hierauf gehen die in Abbildung 5.12 dargestellten Entwurfsmuster ein.

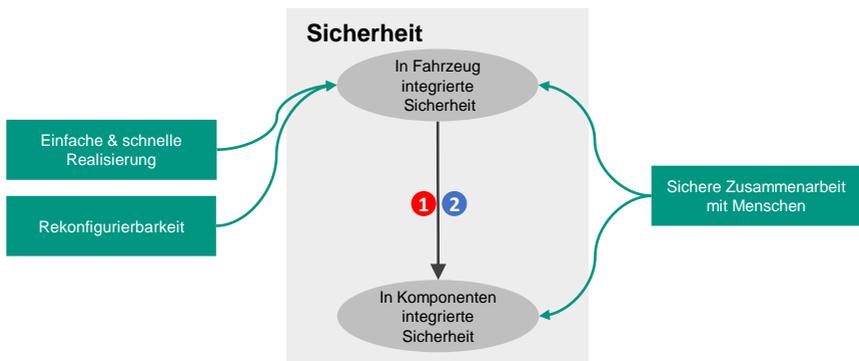


Abbildung 5.12: Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Sicherheit

5.5.1 In Fahrzeugen integrierte Sicherheitsfunktionen

- 👤 **Kontext:** Für FTS sind technische Schutzeinrichtungen erforderlich, die das Risiko auf ein vertretbares Maß reduzieren. Die Schutzmaßnahmen können an der Infrastruktur oder an den Fahrzeugen realisiert werden.
- ⊖ **Problem: Technische Schutzmaßnahmen an der Infrastruktur (Abb 5.13) schränken die Flexibilität ein, da bei einem Ortswechsel auch die Sicherheitstechnik umgebaut werden muss. Beim Betreten des abgesperrten Bereiches muss die gesamte darin aktive Fahrzeugflotte stillgesetzt werden, wodurch z.B. die Wartung eines Fahrzeuges negative Auswirkungen auf die Systemverfügbarkeit hat.**



Abbildung 5.13: Schutzzäune und Lichtgitter trennen den Arbeitsbereich zwischen Mensch und FTS (Bild: Audi AG)

☰ Einflussgrößen

FTF ohne Personenschutzeinrichtungen am Fahrzeug dürfen sich nur in **abgesperrten Bereichen** bewegen. Die Arbeitsbereiche zwischen Mensch und System sind durch Schutzzäune getrennt und durch Lichtgitter oder Türkontakte abgesichert. Die Integration der Sicherheitstechnik in die Fahrzeuge ist nicht notwendig, wenn sich in den Fahrbereichen im Normalbetrieb keine Personen bewegen (z.B. Kiva-Anwendungen, siehe Kapitel 2.2.2). Hier sind bauliche Maßnahmen wie Schutzzäune in Verbindung mit Lichtgittern (DIN-12100 2011, S. 44) günstiger als die Integration von Sicherheitslaserscannern in jedes Fahrzeug. Ein entscheidender Nachteil ist,

dass die Auslösung eines Lichtgitters oder Türkontaktes das gesamte System stilllegt. Bei Wartungsarbeiten an einzelnen Fahrzeugen müssen ebenfalls alle Fahrzeuge in dem Bereich gestoppt werden, was sich negativ auf die Gesamtsystemverfügbarkeit und damit auch auf die *Ressourceneffizienz* (👍) auswirkt. Werden die Sicherheitsfunktionen in das Fahrzeug integriert, betrifft deren Auslösung nur das jeweilige Fahrzeug (DIN-1525 1997).

Für eine *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) und die *Rekonfigurierbarkeit* (👍) – insbesondere bezüglich des Layouts – müssen Änderungen an der Infrastruktur wie die Anbringung von Schutzzäunen vermieden werden. Ohne Sicherheitsmaßnahmen an der Infrastruktur müssen die Fahrzeuge die Sicherheitsfunktionen selbst realisieren.

Tabelle 5.1 stellt die Integration der Sicherheitsfunktionen in Infrastruktur und in Fahrzeuge gegenüber. Hier wird deutlich, dass besonders für flexible Änderungen eine Integration in die Fahrzeuge vorteilhaft ist.

Tabelle 5.1: Gegenüberstellung von Sicherheitsfunktionen in Infrastruktur und im Fahrzeug

Kriterien	Infrastruktur	Fahrzeug
Anzahl Sicherheitskomponenten	gering	hoch
Wirkbereich der Auslösung	gesamtes System	Fahrzeug
Realisierungsaufwand vor Ort	hoch	gering
Layout-Flexibilität	gering, teuer	hoch
Direkte Interaktion mit Personen	nicht gegeben	gegeben

🔧 Lösung: Schutzmaßnahmen werden in Form von inhärent sicherer Konstruktion, technischen Schutzmaßnahmen und ergänzenden Schutzmaßnahmen in die Fahrzeuge integriert.

Durch die Integration der Schutzmaßnahmen ins Fahrzeug können Änderungen an der Infrastruktur vermieden und der Arbeitsbereich der Fahrzeuge

kann ohne aufwendige Umbaumaßnahmen verändert werden. Beispiele für in die Fahrzeuge integrierte Sicherheitsfunktionen sind:

- Kollisionsvermeidung: Laserscanner im Fahrzeug (DIN-1525 1997) anstatt trennender Schutzeinrichtungen wie Schutzzäunen (DIN-14120 2016). Die festgelegten Schutzfelder müssen bei der PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG und der REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER berücksichtigt werden.
- Ladungssicherung: Insbesondere bei Bremsvorgängen, die zur Kollisionsvermeidung durchgeführt werden, muss die Ladung gegen Herabfallen gesichert werden (DIN-1525 1997).
- Absturzvermeidung: „Taststock“-Sensorik erkennt Absturzgefährdungen z.B. an Treppenabgängen wodurch auf mechanische Absturzsicherungen verzichtet werden kann (Trenkle et al. 2013).
- Unterstützte manuelle Steuerung: Während der manuellen Steuerung sind die Sicherheitsfunktionen weiterhin aktiv. Hierdurch ist die Fernsteuerung mit einem nicht sicherheitsgerichteten Interface z.B. per Smartphone möglich und ein sicherheitsgerichtetes Bediengerät ist nicht erforderlich (DGUV 2014) (siehe. MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE).

★ **Ergebnis:** Durch die Integration der Sicherheitsfunktionen muss das System nicht durch trennende Schutzeinrichtungen wie Zäune gesichert werden, wodurch eine *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) möglich ist und das System räumlich flexibel bleibt (*Rekonfigurierbarkeit* (👍)). Sowohl im Betrieb als auch bei Wartungsarbeiten können sich Personen im direkten Umfeld der Fahrzeuge bewegen (*Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen* (👍)).

Die in das Fahrzeug integrierten Sicherheitsfunktionen sind Grundlage für die BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG, mit der Warnsignale ausgegeben werden. Das Entwurfsmuster IN KOMPONENTEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN betrachtet die Integration in die Komponenten des Fahrzeuges.

5.5.2 In Komponenten integrierte Sicherheitsfunktionen

🏗️ **Kontext:** IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN müssen an den richtigen Stellen im Fahrzeug integriert werden. Ein MODULARER FAHR-

ZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN bildet die Grundlage für die Integration der Sicherheitsfunktionen in die Komponenten.

- **Problem: Werden die Sicherheitsfunktionen auf einer zentralen Sicherheitssteuerung im Fahrzeug realisiert, sind Schnittstellen erforderlich, die die sicherheitsrelevanten Informationen aus den Komponenten übermitteln. Hierdurch entsteht ein hoher Entwicklungs- und Integrationsaufwand.**

≡ Einflussgrößen

Grundlegende Sicherheitsfunktionen wie der sichere Stopp bei Schutzfeldverletzungen können durch die in Sicherheits-Laserscanner¹ integrierten Funktionen realisiert werden: Mithilfe von externen Drehgeberinformationen werden geschwindigkeitsabhängige Schutzfelder aktiviert. Wird ein Schutzfeld verletzt, wirken die Ausgänge des Laserscanners direkt auf die Sicherheitsbremse und setzen das Fahrzeug still (SICK 2016).

Eine **komplexere Sicherheitsfunktion** ist beispielsweise die Aktivierung unterschiedlicher Laserscanner-Schutzfelder in Abhängigkeit von der Beladung. Hierfür werden weitere Sensoren zur Erfassung des Beladungszustandes und eine zentrale Sicherheitssteuerung eingesetzt, in der sämtliche Sicherheitsfunktionen integriert werden.

Der Einsatz von zentralen Sicherheitsfunktionen hat jedoch Nachteile:

- Die Komponenten können nicht unabhängig getestet und parametrierbar werden. Ein Funktionstest der Sicherheitsfunktion ist erst nach der Integration möglich.
- Die Sensordaten in nicht sicheren Komponenten (z.B. die Drehgeber in Fahrtrieben) können für Sicherheitsfunktionen oft nicht genutzt werden, da intern bereits eine Verarbeitung der Daten durch nicht sicherheitsgerichtete Komponenten stattfindet. Für redundante Signale müssen deshalb zusätzliche Sensoren angebracht werden (DIN-13849 2008), die den Bauraum einschränken und Kosten verursachen.
- Die Kommunikation zwischen Sensoren (z.B. Drehgebern an den Fahrtrieben) und der Sicherheitssteuerung führt zu Verkabelungsaufwand und erfordert zusätzliche Schnittstellen.

¹ Der Sicherheitslaserscanners S300 Professional von SICK ist mit den beschriebenen Funktionen ausgestattet

- Bei zentralen Sicherheitsfunktionen muss sowohl die Performance der Sicherheitssteuerung als auch die maximale Buslast berücksichtigt werden.
- Die Sicherheitssteuerung muss auf die maximalen Sicherheitsanforderungen der im System vorhandenen Sicherheitsfunktion ausgelegt werden (DIN-12100 2011).

🔑 Lösung: Die Integration der Sicherheitsfunktionen erfolgt direkt in den Komponenten, wo Zustände überwacht werden und die Sicherheitsfunktionen wirken.

Durch die Integration der Sicherheitsfunktionen in die Komponenten (Abb. 5.14) kann der Funktionsumfang einer zentralen Sicherheitssteuerung und damit die Anforderung an deren Performance deutlich reduziert werden. Anstatt die zentrale Steuerung auf den maximal erforderlichen Sicherheitslevel auszulegen, können die jeweiligen Komponenten entsprechend der in der Risikobeurteilung ermittelten Anforderungen ausgelegt werden.

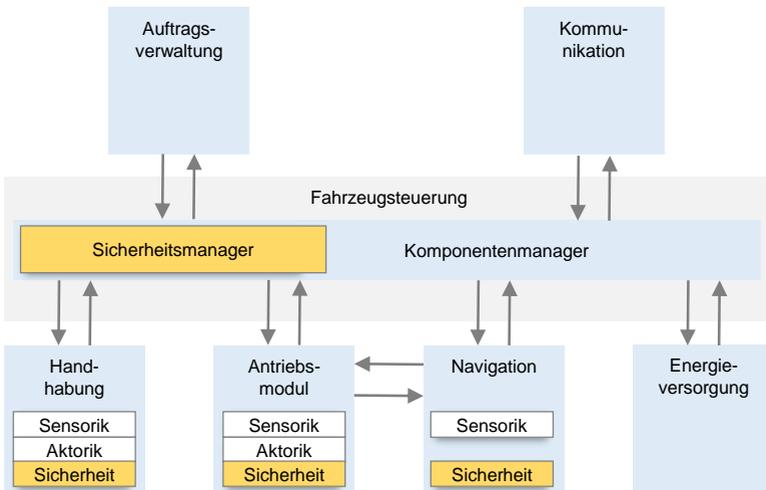


Abbildung 5.14: Sicherheitsfunktionen werden direkt in die Module integriert

Bei der Integration der Sicherheitsfunktionen in die Komponenten muss die gesamte Sicherheitskette berücksichtigt werden: von Signalerzeugung über

Signalverarbeitung zur Ausgabe bzw. Wirkung (DIN-13849 2008). Hierbei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

Ort der Datenerfassung: Durch die Integration am Ort der Datenerfassung, z.B. in der Sensorik, können die Daten bereits sicherheitsgerichtet vorverarbeitet und der Kommunikationsaufwand kann reduziert werden.

Ort der Wirkung: Sicherheitsfunktionen werden nahe am Wirkort integriert, z.B. in den Antriebseinheiten, um sowohl die eigene Funktion zu überwachen als auch auf Signale anderer Sicherheitsfunktionen zu reagieren (Wratil 2007).

Kommunikation: Um in andere Betriebszustände zu wechseln und den Status der Komponenten zu kommunizieren, sind Schnittstellen erforderlich – sowohl zu sicheren als auch zu nicht-sicheren Komponenten. Bei der Spezifikation ist zu berücksichtigen, ob die Daten sicherheitsrelevant sind und ob Maßnahmen zur sicherheitsgerichteten Datenübertragung über ein Bussystem ergriffen werden müssen (Schlingloff et al. 2008).

Folgende Beispiele zeigen, welche Sicherheitsfunktionen in Komponenten integriert werden können:

- Kollisionsvermeidung: Der Sicherheits-Laserscanner erkennt mögliche Kollisionen und kommuniziert dies an die Antriebskomponente, die den sicheren Stopp auslöst (Fürstenberg und Kirsch 2017).
- Handhabung: Sicherheitsfunktionen im Handhabungsmodul garantieren, dass die Ladung nach Übernahme der Last gesichert ist. Falls erforderlich wird durch das Handhabungsmodul das Gewicht der Last ermittelt. Der Zustand wird an den Sicherheitsmanager kommuniziert, der nun die Freigabe für Fahrbewegungen gibt.
- Bewegungsüberwachung: Entsprechend der Kinematik überwachen die Sicherheitsfunktionen der Fahrtriebe selbst, ob die Fahrbewegungen erlaubt sind und greifen im Fehlerfall ein. Hierbei werden verschiedene Betriebszustände berücksichtigt, in denen jeweils unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten erlaubt sind, beispielsweise während der Normalfahrt oder der Feinpositionierung an einer Übergabeposition mit reduzierter Geschwindigkeit.

- ★ **Ergebnis:** Die Integration von Sicherheitsfunktionen in die Komponenten ermöglichen die *Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen* (👍). Außerdem wird die Anzahl der Bauteile und der Integrations- und Verkabelungsaufwand reduziert, da die Auswertung der Daten nahe am Entstehungsort erfolgt.

5.6 Mensch-Maschine-Interaktion

Die Interaktion zwischen Mensch und FTS ist vielfältig: Aufträge werden an Bediengeräten eingegeben, Ladungsträger werden auf dem Fahrzeug abgestellt und das Fahrzeug zeigt mittels Lichtsignalen die geplante Fahrtrichtung an. Welche Grundsätze sind bei der Gestaltung der verschiedenen Systeme zur Interaktion zu berücksichtigen?

Die **Gebrauchstauglichkeit** ist ein zentraler Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion. Sie beschreibt „das Ausmaß, in dem ein System, ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer genutzt werden können, um in einem bestimmten Nutzungskontext bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen“ (ENISO9241-11 2017).

Scholtz (2003) beschreibt folgende fünf **Nutzerrollen** in der Mensch-Roboter-Interaktion: Der Aufseher (supervisor) nimmt Änderungen am Gesamtsystem vor und überwacht und mehrere Roboter. Der Bediener (operator) konfiguriert einzelne Roboter. Der Mechaniker (mechanic) nimmt Änderungen an der Hardware vor. Der Nutzer (peer) gibt dem Roboter Befehle für die nächsten Arbeitsschritte. Unbeteiligte Personen (bystander) begegnen dem Roboter und reagieren bzw. lösen eine Reaktion aus. Auch bei FTF finden sich diese Nutzerrollen wieder: An den Transportprozessen nicht beteiligte Personen (bystander) begegnen dem System, nutzen es jedoch nicht. Für sie ist es wichtig, die Prozesse des Systems zu verstehen, die die eigenen Tätigkeiten beeinträchtigen könnten. Beispielsweise ist für einen Milkrun-Fahrer die Anzeige der Fahrtrichtung relevant, um das Verhalten abschätzen und die eigenen Handlungen darauf abstimmen zu können. An den Transportprozessen beteiligte Personen (peer) arbeiten an direkten Schnittstellen und nutzen das System unmittelbar. Für sie sind zusätzlich Interaktionsformen relevant, die z.B. die Erkennbarkeit des Systemzustandes und Möglichkeiten zur Diagnose ermöglichen. Der Schichtführer (operator) kann Systemfunktionen anpassen,

während der Instandhalter größere Änderungen vornimmt, z.B. eine neue Karte einlernt (supervisor). Ein Instandhalter (mechanic) tauscht z.B. im Rahmen einer Instandsetzung Verschleißteile aus.

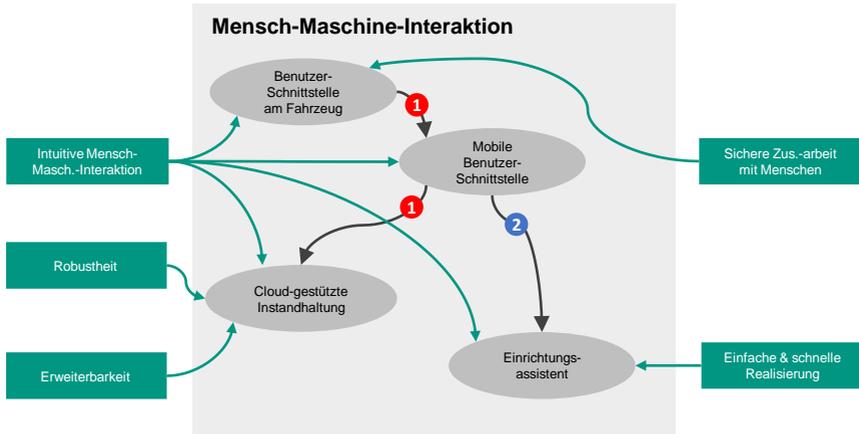


Abbildung 5.15: Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Mensch-Maschine-Interaktion

Die nachfolgenden Entwurfsmuster (siehe Abbildung 5.15) erläutern mögliche Benutzerschnittstellen im jeweiligen Nutzungskontext sowie technische Umsetzungsmöglichkeiten zur Interaktion. Der Mensch interagiert hierbei sowohl mit dem Gesamtsystem als auch mit den einzelnen Fahrzeugen.

5.6.1 Benutzerschnittstelle am Fahrzeug

- ⚙️ **Kontext:** IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN signalisieren Gefährdungen durch die Ausgabe von Warnsignalen. Durch das in REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER beschriebene Verhalten, werden Personen wie Hindernisse behandelt.
- ⊖ **Problem:** Ohne Benutzerschnittstelle am Fahrzeug können Mensch und Fahrzeug nicht direkt interagieren: Menschen erkennen den Gerätezustand nicht und können die unmittelbar bevorstehenden Bewegungen des Fahrzeuges nicht einschätzen. Vom Fahrzeug können menschliche Bewegungen und Eingaben nicht erfasst und verarbeitet werden.

☰ Einflussgrößen

Im Straßenverkehr sind neben Verkehrsregeln auch informelle Regeln, die Kommunikation untereinander und die Verhaltensvorhersage grundlegende Voraussetzungen für den störungsfreien Verkehrsfluss mit unterschiedlichen Akteuren (Färber 2015). Fahrzeugseitig können Verkehrsregeln (siehe REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER) implementiert werden – hier sind neben formellen auch informelle Regeln zu berücksichtigen, die die menschliche Kommunikation beeinflussen.

Die Interaktion dient auch der **Sicherheit**: Die FTS-Norm (DIN-1525 1997) schreibt Warnsysteme vor, die Bewegungen ab einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s signalisieren. Außerdem muss die Richtung angezeigt werden, sobald sich das Fahrzeug in mehr als eine vorhersehbare Richtung bewegen kann.

Einige der in Kapitel 2.2.3 vorgestellten Systeme nutzen ein (**Touch-**) **Display** am Fahrzeug, um den Zustand anzuzeigen und Eingaben vorzunehmen. Beispielsweise wird beim Aethon-TUG das Display zur PIN-Eingabe bei Entnahme von Ladung eingesetzt; bei Adept-Lynx um Fahrziele und Fehlermeldungen anzuzeigen. Lynx nutzt kreisförmig angeordnete **LED-Signale**, um bei Bewegung die Fahrtrichtung und während der Akkuladung den Energiestand anzuzeigen. Ein optionaler „Lichtmast“ signalisiert die Zustände auf Augenhöhe und soll damit verhindern, dass das niedrige Fahrzeug übersehen wird.

Eine natürliche Interaktion (siehe *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍)) erfordert, dass die Interaktionspartner – hier Mensch und Fahrzeug – sich mit möglichst geringem Kommunikationsaufwand verstehen. Damit der Mensch das Fahrzeug verstehen kann, müssen durch die Interaktion folgende Fragen beantwortet werden:

- Geplante Bewegungen: Werden Hub oder Lastaufnahmemittel bewegt? Wird Ladung aufgenommen oder abgegeben? Ist ein Beladungsvorgang abgeschlossen? Was ist die geplante Fahrtrichtung?
- Zustand: Ist das Fahrzeug angeschaltet? Ist mit dem Fahrzeug alles in Ordnung oder liegt eine Störung vor? Sind Schutzbereiche des Laserscanners verletzt? Wie ist der Akkuzustand? Wird der Akku geladen? Muss jemand eingreifen? Hat das Fahrzeug eine Person in der Umgebung wahrgenommen?

Je mehr menschliche Äußerungen das System verstehen kann, desto besser kann es auf die Wünsche der Menschen reagieren. Bestehende technische Lösungen nutzen hierbei Sprache (Podszus und Overmeyer 2014), Gesten (FiFi, Kap. 2.2.3) und Bewegungen (Still 2017).

Da das FTF durch IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN und LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE mit Sensorik zur Umgebungserfassung ausgestattet ist, bietet sich deren Nutzung für die Interaktion an: So kann aus den Daten von Laserscannern, mit denen alle frei navigierenden Systeme ausgestattet sind, der Aufenthaltsort einer Person im Sichtbereich bestimmt werden (Fod et al. 2002). Systeme mit 3D-Sensoren wie der Smart Transport Robot (STR) und FiFi (siehe Kapitel 2.2.3) erlauben die Interpretation der Daten zur Erkennung von Gesten und Tätigkeiten.

Ansätze zur Kartierung (Henry et al. 2010), Lokalisierung (Mur-Artal und Tardos 2017) und Kollisionsvermeidung (Hrabar 2008) mittels 3D-Daten lassen vermuten, dass 3D-Sensorik in Zukunft auch verstärkt bei FTF zum Einsatz kommen wird.

🔧 Lösung: Eindeutige, aber unaufdringliche Signale zeigen Personen im Umfeld den Zustand und die nächsten Aktionen an. Mittels multimodaler Sensorik werden Personen im Kontext erkannt, wodurch das Fahrzeug entsprechend reagieren kann.

Lichtsignale dienen der schnellen und verständlichen Kommunikation mit Personen im Begegnungsverkehr. Durch die Anlehnung an allgemein bekannte Signale, wie z.B. die Richtungsanzeigen bei Personenkraftwagen, werden die Signale auch von Personen verstanden, die das Transportsystem nicht kennen.

Störungen an einem Fahrzeug werden durch Lichtsignale angezeigt. Der Abruf von Details erfolgt durch eine MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE. Hierbei signalisieren auch nicht betroffene Fahrzeuge über Lichtsignale, dass ein anderes Fahrzeug eine Störung hat und eine Abfrage mittels mobiler Benutzerschnittstelle erforderlich ist.

Sofern die Übergabe von Material direkt an einen Mitarbeiter erfolgt, kann eine Bedieneinheit in Form von Tastern oder Displays an ein Wechselmodul angebunden werden (siehe MODULARER FAHRZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Hände bei Entnahme des

Ladungsträgers nicht frei sind, weshalb sich eine Erkennung der Entnahme anbietet z.B. durch einen Lichttaster im Wechselmodul, der den Belegungszustand erfasst.

Die Sensorik für die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE und Verfahren des maschinellen Lernens (siehe Kapitel 2.1.3) können genutzt werden, um Personen zu erkennen. Während Laserscanner beim Einsatz als Schutzeinrichtung lediglich die Erfassung der Unterschenkel ermöglichen, können mittels Kamerabildern oder 3D-Daten auch Gesten und Tätigkeiten erkannt werden (siehe FiFi in Kapitel 2.2).

Bei der Begegnung von Mensch und Fahrzeug wird das Fahrzeugverhalten durch die Navigation beeinflusst (siehe REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER). Mit folgenden Maßnahmen kann das Befinden der Person bei einer Begegnung mit einem fahrenden Fahrzeug verbessert werden:

- Anzeige der Fahrtrichtung mit **frühzeitiger Signalisierung**: Pacchierotti et al. (2005) zeigt, dass die Signale eines entgegenkommenden Fahrzeuges ab 6 m als angenehmer empfunden werden als Signale in 5 m Entfernung.
- Ausreichende **laterale Distanz** beim Vorbeifahren: Bei der Interaktion zwischen Personen werden abhängig vom Kontext verschiedene Distanzen als angebracht empfunden (Hall 1966, S. 119). Experimente von Pacchierotti et al. (2006) belegen, dass dies auch für die Interaktion zwischen Mensch und Fahrzeug gilt: Die Einhaltung eines lateralen Abstandes von 0,4 Metern wahrt die private Zone, wodurch sich die Person sicherer fühlt.
- Angepasste **Fahrgeschwindigkeit**: Shi et al. (2008) zeigen, dass stehende Personen bei hoher Fahrgeschwindigkeit von 4,5 m/s und einer Stopp-Distanz von einem Meter von einer Gefahr ausgehen und dem Fahrzeug ausweichen. Bei einer Geschwindigkeit von 2 m/s bleiben die Probanden stehen und melden zurück, dass sie sich nicht gefährdet fühlen. Die Autoren empfehlen, die Geschwindigkeit ab einem Grenzradius linear bis zum Stopp-Radius zu reduzieren.

- **Natürliche Bewegungen:** Menschlichen Bewegungen nachempfundene, ruckbegrenzte Geschwindigkeitsänderungen und Lenkbewegungen werden als sicher empfunden (Kruse et al. 2013).

★ **Ergebnis:** Personen im direkten Umfeld des Fahrzeuges erkennen durch die verständliche Darstellung den Fahrzeugzustand, wodurch die *Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen* (👍) unterstützt wird. Personen können abschätzen, was das Fahrzeug als nächstes tun wird und ihre Tätigkeiten darauf abstimmen. Durch die Erkennung von Personen, Bewegungen und Gesten kann das Fahrzeug kontextabhängig reagieren (siehe *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍)).

Neben der Interaktion mit einem Fahrzeug ist auch die Interaktion mit dem Gesamtsystem erforderlich. Ein Lösungsansatz wird im Muster MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE behandelt.

5.6.2 Mobile Benutzerschnittstelle

- 🏠 **Kontext:** Mit der BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG findet eine Interaktion mit einem Fahrzeug und einer Person in der Nähe statt. Dieses Muster betrachtet die Interaktion einer Person mit dem gesamten System.
- ⊖ **Problem: Ohne einen Gesamtüberblick über Fahrzeuge und Aufträge ist das Verhalten des Gesamtsystems schwer nachvollziehbar. Für Personen ist z.B. nicht ersichtlich, welches Fahrzeug welchen Auftrag hat oder welches Ziel anfährt. Störungen an Fahrzeugen außerhalb des Sichtbereiches sind werden nicht erkannt.**

☰ Einflussgrößen

Bei der herkömmlichen Materialversorgung mit Milkrun-Zügen werden feste Fahrzyklen abgefahren, die für Mitarbeiter an den Übergabepositionen bekannt und nachvollziehbar sind. Bei FTF, die ihre Pfade eigenständig planen (PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG), wird Material im Direktverkehr transportiert, wodurch Transportwege und Ziele von außen nicht ohne Hilfsmittel ersichtlich sind. Mitarbeitern muss deshalb die Möglichkeit gegeben werden, das System zu verstehen und bei Bedarf eingreifen zu können (vgl. *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍)).

Bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle müssen **Personengruppen** und deren **Aufgaben** (siehe Kapitel 3.2.3) berücksichtigt werden, um das System gegen unberechtigten Zugriff zu schützen.

Generell kann bei der **technischen Realisierung** einer Bedieneroberfläche zwischen nativen und browserbasierten Anwendungen unterschieden werden (Xanthopoulos und Xinogalos 2013):

- Eine native Anwendung in Form einer Desktop-Anwendung oder App für mobile Endgeräte muss individuell für das entsprechende Betriebssystem realisiert werden.
- Eine browserbasierte Applikation in Kombination mit den Prinzipien des Responsive-Designs (Marcotte 2011) ermöglicht die Darstellung und Bedienung auf Endgeräten mit unterschiedlichen Betriebssystemen und Anzeigegrößen.

Browserbasierte Applikation sind **plattformunabhängig**, wodurch die Entwicklung für verschiedene Betriebssysteme und Plattformen entfällt. Es müssen lediglich Browser-spezifische Unterschiede berücksichtigt werden (Xanthopoulos und Xinogalos 2013). Durch die Entkopplung von Bediengerät und Bedieneroberfläche kann das Bediengerät den Anforderungen entsprechend ausgewählt werden – beispielsweise Smartphones, Tablets und Desktoprechner zur Bedienung und/oder TV-Geräte zur Visualisierung des Systemzustandes.

Entscheidend für eine **flüssige Bedienung** einer Nutzerschnittstelle sind Ausführungszeit und Latenz. Native Applikationen sind hinsichtlich der Ausführungszeit performanter als browserbasierten Applikationen (Jobe 2013).

 **Lösung: Ein browserbasiertes Nutzerinterface zeigt den Mitarbeitern entsprechend ihrer Rolle die relevanten Systeminformationen an. Es ermöglicht die Steuerung des Systems sowie einzelner Fahrzeuge und kann auf mobilen Endgeräten genutzt werden.**

Ein **Berechtigungskonzept** mit verschiedenen Nutzerrollen (siehe Tabelle 5.2) stellt sicher, dass entsprechend der Nutzerrolle relevante Informationen angezeigt werden und nur Aktionen durchgeführt werden können, für die der entsprechende Nutzer berechtigt ist. Bediener sind Personen, die direkt mit dem System arbeiten, also Material entnehmen oder bereitstellen. Schichtführer haben zusätzlich überwachende und koordinierende Aufgaben, während

Instandhalter Änderungen vornehmen und Aufgaben der Instandhaltung durchführen.

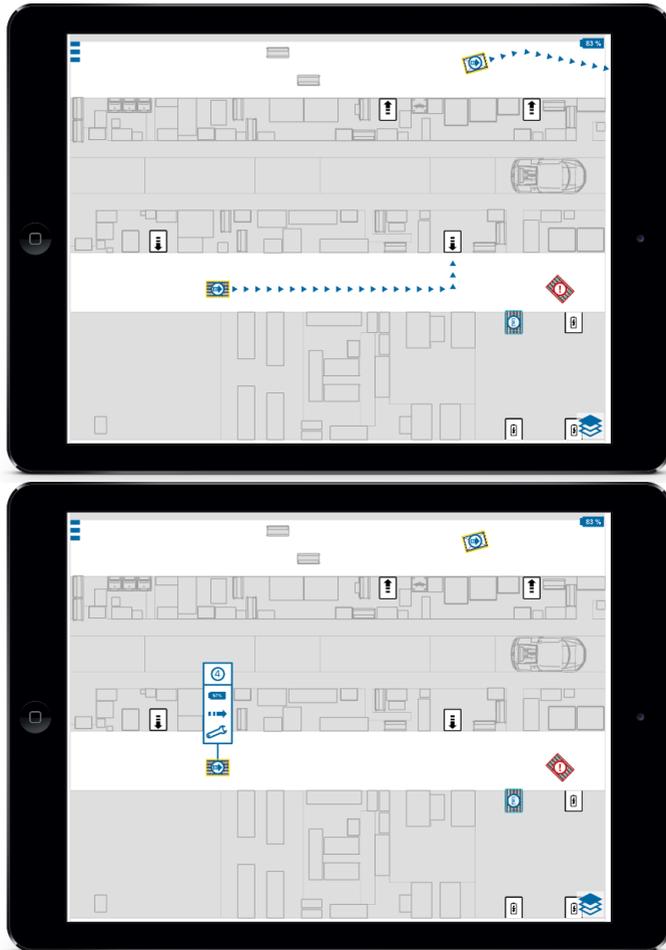


Abbildung 5.16: Kartenbasierte Darstellung von Informationen zu den Fahrzeugpositionen und -zuständen mit Anzeige der geplanten Pfade (oben) und Detailinformationen zu einem Fahrzeug nach Auswahl (unten)

Tabelle 5.2: Nutzerrollen nach (Scholtz 2003) und zugehörige Aufgaben für ein FTS

Nutzerrolle	Auftrag eingeben	Auftragstatus einsehen	Systemübersicht verschaffen	Systemperformance einsehen	Störungsmeldungen abrufen	Übergabepositionen ändern	Nutzer verwalten	Diagnose durchführen	Aufträge manuell ändern	Teach-In durchführen
Bediener (peer)	•	•								
Schichtführer (operator)	•	•	•	•	•	•				
Instandhalter (supervisor, mechanic)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

Die Bereitstellung der Bedieneroberfläche erfolgt über einen **Webserver**, der in einem dezentral gesteuerten System (siehe DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE) auf den Fahrzeugen läuft. Dadurch können Updates direkt über die Fahrzeuge realisiert werden, wodurch ein formeller Updateprozess auf den Bediengeräten entfällt (Jobe 2013). In einem dezentral gesteuerten System sind die für den Nutzer relevanten Informationen möglicherweise nicht an der Stelle verfügbar, mit der das Nutzerinterface verbunden ist. Bei der Bereitstellung mittels Webserver wird der Nutzer per Browser mit einem beliebigen Fahrzeug verbunden. Sollen Informationen über das Gesamtsystem angezeigt werden, fordert das Fahrzeug alle relevanten Informationen, die lokal nicht verfügbar sind, von den anderen Fahrzeugen an. Das Nutzerinterface muss tolerant gegenüber **Verbindungsverlust** zu dem verbundenen Fahrzeug sein, auf dem der Webserver läuft.

Neben der Daten für die Applikation selbst wirken sich der Umfang an kommunizierten Daten und die Art der Protokolle und Datenformate auf die Latenz aus – Charland und Leroux (2011) empfehlen bei der Entwicklung von browserbasierten Applikationen die Fokussierung auf die **performante Datenbereitstellung** und erst im Anschluss das optische Design zu verbessern.

Für einen verständlichen Gesamtüberblick über das System bietet sich die Darstellung in Form einer **Kartenansicht** an. Abbildung 5.16 zeigt das Beispiel einer Ansicht, in der die geplanten Pfade, Positionen und Fahrzeugzustände dargestellt werden (oben), sowie ein Untermenü nach Auswahl eines Fahrzeuges zum Abruf von weiteren Statusinformationen und Konfigurationsmöglichkeiten (unten). Der Informationsumfang kann entsprechend des Nutzers angepasst werden – so ist die Visualisierung von Sensorinformationen für den Instandhalter nützlich, für einen Bediener jedoch nicht relevant.

Für die Darstellung sind Daten erforderlich, die in anderen Mustern generiert werden: Kartendaten (GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN), Fahrzeugposition (LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE) und geplante Pfade (PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG) werden für die Kartendarstellung benötigt. Statusinformationen entstammen den Sicherheitsfunktionen (IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN) und der Auftragsvergabe (DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE UND VERTEILTE AUFTRAGS- UND STELLPLATZVERWALTUNG).

Da es sich bei einem browserbasierten Nutzerinterface um eine nicht-sicherheitsgerichtetete Form der Eingabe handelt, muss gewährleistet werden, dass die Eingaben die Sicherheit nicht beeinträchtigen können. Eine **manuelle Fernsteuerung** eines einzelnen Fahrzeuges für das Teach-In ist nur möglich, wenn die Sicherheitsfunktionen des Fahrzeuges (siehe IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN) aktiv sind (DGUV 2014).

- ★ **Ergebnis:** Die Bedienung des FTS ist für die Mitarbeiter mit verschiedenen Berechtigungsstufen verfügbar. Durch die Nutzung einer browserbasierten Lösung können die Bediengeräte flexibel entsprechend der Anforderungen ausgewählt werden. Eine verständliche, kartenbasierte Darstellung ermöglicht eine *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍).

Eine wichtige Anwendung der Nutzerschnittstelle ist der EINRICHTUNGSASSISSENT, der den Bediener bei der Realisierung unterstützt. Die Bedienung aus der Ferne wird im Muster CLOUD-GESTÜTZTE INSTANDHALTUNG behandelt.

5.6.3 Cloud-gestützte Instandhaltung

- 👤 **Kontext:** Eine MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE eignet sich zur Bedienung des Systems aus dem lokalen Netzwerk. Oftmals sind Experten, die z.B. zur Fehlerdiagnose benötigt werden, nicht durchgängig vor Ort verfügbar.
- ⊖ **Problem:** Die Tätigkeiten im Rahmen der Instandhaltung sind – ob vom Hersteller oder vom Betreiber durchgeführt – lohnintensiv (Leidinger 2017). Störungen, die zum Ausfall führen, sind zeitkritisch, weshalb die Fehlerdiagnose und Instandsetzung möglichst zeitnah erfolgen müssen (DIN-31051 2012).

☰ Einflussgrößen

Die Aufgaben der Instandhaltung (Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung) erfordern viele manuelle Arbeitsschritte (siehe Kapitel 3.2.4). Um diese Aufgaben zu erleichtern, kann die Überwachung und Steuerung per **Fernzugriff** erfolgen (Stefano et al. 1997). Bei FTS wird der Fernzugriff vom Hersteller genutzt, nachdem der Betreiber einen Fehler erkannt hat, den er selbst nicht lösen kann. Eine Diagnose per Fernzugriff ermöglicht – je nach Umfang der verfügbaren Daten – die Eingrenzung des Problems und die Einleitung der zur Instandsetzung notwendigen Schritte wie den Austausch von Komponenten oder die Anpassung von Software.

Von den in Kapitel 2.2 vorgestellten Systemen nutzt TUG von Aethon einen automatisierten Fernzugriff zur ständigen Überwachung der Fahrzeuge. Die Fahrzeuge übermitteln ihren Status an einen Leitrechner im lokalen Netz, der die Informationen per Internet an einen Aethon-Server überträgt. Die Informationen werden analysiert und einem Mitarbeiter dargestellt, der sich dann bei Bedarf mit den einzelnen Fahrzeugen verbinden und weitere Schritte zur Diagnose und Instandsetzung durchführen kann (Wolfe et al. 2014).

Instandhaltungsaufgaben, die Software betreffen, können aus der Ferne realisiert werden, sofern die betreffenden Komponenten hierfür ausgelegt sind: Die **Diagnose- und Updatefähigkeit der Komponenten** muss bereits bei der Entwicklung der Hard- und Softwareschnittstellen der einzelnen Fahrzeugkomponenten berücksichtigt werden (siehe MODULARER FAHRZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN). Heute werden in Komponenten wie Antrieben oder Sensoren zahlreiche Daten – wie z.B. Temperatur und Energieverbrauch –

für die Auswertung innerhalb einer Komponente erfasst, jedoch überwiegend nicht für die externe Diagnose kommuniziert².

Die Instandhaltungszyklen für Hardware können durch Verfahren der Predictive Maintenance (Mobley 2002) vergrößert werden, sofern der Zustand der **einzelnen Komponenten überwacht** und aus den erfassten Daten verlässlich Rückschlüsse über den Zustand der Komponenten gezogen werden. Beispielsweise kann der Verschleiß von Rädern aufgrund veränderter Odometriedaten erkannt werden. Neben aktuellen Status- und Fehlermeldungen sind für eine schnelle Diagnose auch **historische Daten** der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems nützlich.

🔧 **Lösung:** Das FTS übermittelt permanent für die Instandhaltung relevante Daten in eine Cloud. Eine automatische Analyse der Daten erkennt frühzeitig Abweichungen und Fehler.

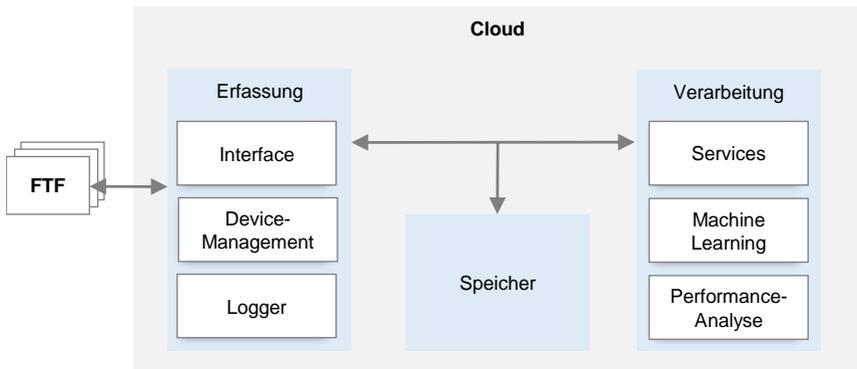


Abbildung 5.17: Anbindung des FTS an ein Cloud-System zur Instandhaltung aus der Ferne

Ziel der Cloud-Lösung ist die frühzeitige, automatisierte Diagnose für eine Vermeidung von Störungen mittels laufend aktualisierten Daten zum Ist-Zustand, um einen effizienten Einsatz der Fahrzeuge zu ermöglichen (*Ressourceneffizienz* (👍)).

² Eine Ausnahme sind beispielsweise die MS2N Antriebe von Bosch Rexroth, die die Daten für externes Condition Monitoring zur Verfügung stellen (Rexroth 2016)

Die Fahrzeuge sind über ein Interface mit einem Cloud-System verbunden (siehe Abbildung 5.17). Das Device-Management verwaltet den Zugang und den Datenaustausch von Fahrzeugen und den darin enthaltenen Komponenten. Der Logger erfasst die relevanten Systemereignisse auf verschiedenen Ebenen des FTS:

- Auf Systemebene werden sämtliche Aufträge (DEZENTRALE AUFTRAGS-VERGABE) mit Status und Zeitstempel sowie Nutzereingaben (MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE) erfasst.
- Fahrzeuge melden regelmäßig ihre Position (LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE), geplante Pfade und die zurückgelegten Strecken (PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG) sowie Ereignisse z.B. Hindernisse im Fahrweg (REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER) oder Schutzfeldverletzungen (IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN).
- Die Komponenten liefern je nach Typ Informationen zu Betriebszustand, Auslastung und Temperatur (z.B. Antriebe, Steuerungen, Sensoren, Energieversorgung).

Die erfassten Werte erlauben auch aus der Ferne eine umfassende Diagnose, da neben der eigentlichen Störung auch die Randbedingungen vor dem Eintritt der Störung analysiert werden können. Hierzu ist eine sinnvolle Visualisierung der Werte erforderlich.

Zur Erkennung von Ausfällen eignen sich Verfahren des maschinellen Lernens (siehe Kapitel 2.1.3). Mit jedem neu auftretenden Fehler lernt das System, wodurch die zukünftige Erkennung von Fehlern im frühen Stadium verbessert wird (Susto et al. 2015). Liefern mehrere Fahrzeugflotten Daten, können Abweichungen schneller erkannt werden wodurch eine bessere Reaktion möglich ist.

★ **Ergebnis:** Das System erkennt Abnutzungen und Fehler frühzeitig und informiert den Betreiber in der Ferne oder den Instandhalter mit umfassenden Informationen über den Fehler.

Die Cloud-gestützte Instandhaltung vereinfacht zahlreiche Aufgaben, die während der Instandhaltung (siehe Kapitel 3.2.4) anfallen:

- **Wartung:** Durch die Nutzung der Daten können die Wartungszyklen optimiert und verlängert werden.

- Inspektion: Die Erfassung und Beurteilung des Zustandes kann zum Teil automatisiert und aus der Ferne erfolgen. Die Inspektion vor Ort wird durch die Bereitstellung ausgewerteter Daten beschleunigt.
- Instandsetzung und Verbesserung: Sofern die Lösung per Softwareupdate möglich ist, kann die Instandsetzung aus der Ferne erfolgen. Die Instandsetzung der Hardware vor Ort kann beschleunigt werden, da bereits im Voraus eine präzisere Diagnose gestellt werden kann.

Software-Erweiterungen (siehe Kapitel 3.2.6) können mit geringem Aufwand aus der Ferne durchgeführt werden (*Erweiterbarkeit um zusätzliche Funktionen* (👍)).

Durch die präventive Instandhaltung werden Ausfälle reduziert, wodurch die *Robustheit* (👍) gesteigert wird, indem das System für die vorgesehenen Aufgaben zur Verfügung steht. Frühzeitig erkannte und aus der Ferne gelöste Störungen vermeiden unnötige Eingriffe (siehe *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍)).

Während bei der Cloud-gestützten Instandhaltung Daten auf der Cloud verarbeitet und Instandhaltern zur Verfügung gestellt werden, wird durch GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN zusätzlich ein Austausch mit anderen Systemen realisiert.

5.6.4 Einrichtungsassistent

 **Kontext:** Die in folgenden Mustern beschriebenen Ansätze erfordern eine initiale Konfiguration: DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE, LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE, GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN, FEINPOSITIONIERUNG AN ÜBERGABEPOSITIONEN, PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG und REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER. Diese Konfiguration soll möglichst einfach durch eine MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE erfolgen.

Bisher wird die Realisierung, Inbetriebnahme und Veränderung überwiegend durch den Hersteller durchgeführt (Ullrich 2014):

- **Problem: Die Realisierung und Inbetriebnahme durch den Hersteller ist wenig automatisiert (siehe Kap. 3.2.2) und deshalb zeit- und kostenintensiv.**

☰ Einflussgrößen

Die **Einrichtung des Systems** soll möglichst ohne Expertenwissen erfolgen. Hierzu gehört die Unterstützung bei den Aufgaben während der Realisierung (siehe Kapitel 3.2.2). Während der Einrichtung des FTS müssen folgende Merkmale erfasst werden:

- Karte: Die Umgebungsinformationen werden erfasst und eine Karte wird erstellt. Die Karte ist Basis für die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE des Fahrzeuges sowie die Festlegung der Übergabe- und Ladepositionen.
- Übergabe- und Ladepositionen: Basierend auf der Karte werden Position und Orientierung erfasst. Bei Übergabeposition wird zusätzlich die Art der Übergabe erfasst, die von dem Transportgut und dem Ladehilfsmittel abhängig ist.
- Transportbeziehungen sind feste Zuordnungen zwischen Quelle und Senke als auch dynamische Zuordnungen, die von Material- oder Stellplatzverfügbarkeit abhängen.
- Anbindung an externe Systeme: Zur Generierung der Transportaufträge wird das Transportsystem an externe Systeme angebunden. Dies umfasst Leitsysteme, Produktionssysteme, aktive Übergabestellen oder Bediener-Schnittstellen.
- Gesonderte Bereiche: Viele Anwendungen beinhalten Bereiche, in denen sich die Transportfahrzeuge eingeschränkt bewegen sollen. Zu den Einschränkungen zählen Verkehrsregeln z.B. Vorfahrtsregeln, Einbahnstraßen oder ortsspezifische Regeln zum Ausweichverhalten.

Neben der initialen Einrichtung müssen auch **nachträgliche Änderungen** von Abhol-, Abgabe- und Ladepositionen schnell und einfach durchführbar sein. Sofern die Änderungen auch Bereiche betreffen, in denen das FTS noch nicht eingelernt wurde, muss der Einrichtungsassistent eine Erweiterung der bestehenden Karten und Positionsinformationen ermöglichen. Werden bestehende Übergabepositionen verändert oder neue hinzugefügt, muss ein Teil der Einrichtung erneut durchlaufen werden. Bei Änderungen müssen dem Bediener jederzeit die Möglichkeiten und deren Konsequenzen bekannt sein.

🔧 Lösung: Das FTS ist mit einem Einrichtungs-Assistenten ausgestattet, der den Bediener durch die Teilschritte der Realisierung leitet.

Der Einrichtungs-Assistent unterstützt den Mitarbeiter in der Realisierungsphase (siehe Tabelle 3.1) bei der Erstellung der Karte und der Konfiguration der Übergabe- und Ladepositionen:

Kartierung: Der Bediener steuert das Fahrzeug durch alle Bereiche, in denen sich die Fahrzeuge im Betrieb bewegen. Währenddessen erstellt das Fahrzeug mit den Sensordaten (Laserscanner) und den Odometriedaten (Fahrantriebe) eine Karte (Thrun 2002). Nach Abschluss der Kartierung kann das Fahrzeug seine eigene Position auf der Karte bestimmen (LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE).

Übergabe- und Ladepositionen: Der Bediener steuert das Fahrzeug an die Übergabepositionen und konfiguriert mittels Bedieneinheit die Art der Übergabestelle. Alternativ kann die Übergabestation auch auf der Karte gesetzt und konfiguriert werden. Durch Verfahren der Mustererkennung und des maschinellen Lernens (siehe Kapitel 2.1.3) kann das System bereits Vorschläge für die erkannten Stationen geben, die der Bediener dann lediglich bestätigt. Das Fahrzeug kann anschließend eigenständig FEINPOSITIONIERUNG AN ÜBERGABEPOSITIONEN durchführen.

Transportbeziehungen: Durch die Transportbeziehungen wird der Materialfluss zwischen den Übergabepositionen festgelegt. Dies können feste Beziehungen zwischen Übergabestationen oder vom Transportgut abhängige Zielpositionen sein.

Verkehrsregeln: Auf der Karte werden Bereiche festgelegt, in denen besondere Verkehrsregeln gelten. Hierzu gehören Einbahnstraßen, Vorfahrtsregeln, Überholverbote und Wartebereiche. Die Regeln werden dann bei der PEADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG und mit den Regeln zur REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER berücksichtigt.

Auslöser für Transporte: Im letzten Schritt werden die Auslöser für Transportaufträge konfiguriert. Dabei kann es sich um Signale von Sensoren an Übergabestationen, Handbediengeräte oder angebundene Förder-technik- oder Produktionssysteme handeln.

Die einzelnen Schritte werden in dem Muster MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE realisiert. Bei der Nutzung eines mobilen Endgerätes kann das Fahrzeug direkt ferngesteuert werden, sofern die Sicherheitsfunktionen aktiv sind (IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN). Da während der Realisierung die erste Interaktion zwischen Mensch und System stattfindet, ist die Gebrauchstauglichkeit der Nutzerschnittstelle entscheidend. Hierfür sind für die Einrichtung folgende Merkmale relevant:

- Einführung und Erklärungen mit Video-Anleitungen: van der Meij und van der Meij (2014) zeigen, dass videobasierte Anleitungen den Lernerfolg gegenüber papierbasierten Anleitungen steigern. Für die Einrichtung von FTS ermöglichen Video-Anleitungen die Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte und die Erläuterung technischer Funktionen, die dem Bediener nicht bekannt sind, z.B. des Sichtbereiches der Laserscanner.
- Intuitive und sichere Steuerung des Fahrzeugs zur Durchführung von Fahrbewegungen: Der Bediener kann bei manueller Steuerung während der Kartierung die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit abschätzen und kontrollieren. Die Sicherheitsfunktionen bleiben aktiv. (DGUV 2014).
- Rückgabe von Feedback (Nielsen 1994) über den Fortschritt der Einrichtung: Fortschrittsanzeige der Einrichtung um zu erfassen, was bereits erledigt ist und welche Schritte noch offen sind
- Anzeige der Ergebnisse der einzelnen Einrichtungsschritte mit Möglichkeit zur Korrektur (Nielsen 1994) von Eingaben und Teilen der Einrichtung
- Option zur Unterstützung aus der Ferne durch CLOUD-GESTÜTZTE INSTANDHALTUNG

Nach Abschluss der Einrichtung werden die eingelernten Informationen an die anderen Fahrzeuge verteilt und das System ist betriebsbereit.

★ **Ergebnis:** Der Einrichtungs-Assistent ermöglicht die *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) durch den Kunden. Der Benutzer wird Schritt für Schritt durch die Realisierung geleitet, wodurch die *Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion* (👍) sichergestellt wird. Bei Veränderungen der Übergabestellen

oder des Einsatzbereiches können Teile der Einrichtung erneut durchgeführt werden.

5.7 Navigation

Die Navigation beinhaltet die Bestimmung der eigenen Position, die Planung des Pfades zur Zielposition, die Durchführung der Fahrbewegung entlang des Pfades sowie die Reaktion auf Hindernisse (Latombe 2012). Die eigenständige Navigation ist eine grundlegende Anforderung an autonome Systeme.

FTS unterscheiden sich untereinander stark durch die eingesetzten Navigationsverfahren (siehe Abbildung 5.18). Spurgeführte Verfahren nutzen induktive, optische oder magnetische Leitlinien. Optische Linien lassen sich zwar einfach entfernen und erneut anbringen, werden jedoch von anderen Fahrzeugen, wie z.B. Gabelstaplern, schnell beschädigt oder entfernt. Magnetische und induktive Systeme müssen fest im Boden verankert werden, wodurch das System unflexibel wird und hohe Installationskosten entstehen. Ein Nachteil spurgeführter Systeme ist, dass sie Hindernissen nicht ausweichen können. Rasterbasierte Systeme nutzen optische, magnetische oder RFID-basierte Markierungen, die in einem festen Raster auf dem Boden ein- bzw. aufgebracht sind. Sie bieten eine höhere Flexibilität als spurgeführte Systeme, da die Fahrwege auf dem Raster verändert werden können. Die Installation ist jedoch ebenfalls aufwendig.

Grundlegend für die Lokalisierung ist eine Repräsentation der Umwelt durch eine **Karte**. Bei spurgeführten Verfahren (Abbildung 5.18 a-c) ist die Karte durch einen Graphen repräsentiert: Knoten stehen für Start-, Ziel- sowie Kreuzungspunkte und Kanten für Pfade. Bei gitterbasierten Verfahren (Abbildung 5.18 f) sind alle Rasterpunkte als Knoten vorhanden, die mittels Kanten mit den Nachbarknoten verbunden sind. Mittels Knoten- und Kantengewichten können die befahrbaren Pfade sowie Übergabepositionen repräsentiert werden. Aufbauend auf den Graphen ermitteln Pfadplanungsalgorithmen die kürzesten Pfade. Beim Einsatz von Triangulations- oder Laserlokalisierung (Abbildung 5.18 d, e) findet eine initiale Kartierung statt, bei der die Reflektoren bzw. die natürlichen Umgebungsmerkmale erfasst und in einer zweidimensionalen, maßstabsgetreuen Karte abgelegt werden.

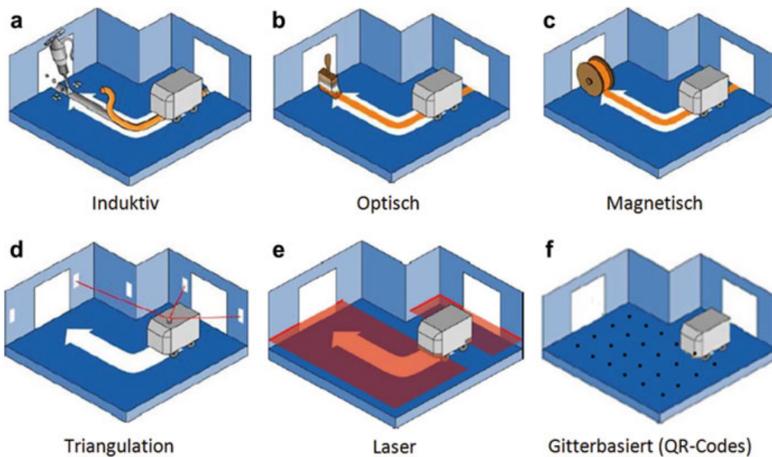


Abbildung 5.18: Verschiedene Navigationsverfahren für FTS aus Wurll (2017) nach Tomatis (2015)

Die Kartendaten bestehen aus Punkten, die entweder frei, belegt oder bei Triangulation mit einem Reflektor versehen sind. Bei allen Verfahren werden während der **Lokalisierung** von der Sensorik erfasste Daten genutzt, um mithilfe der Kartendaten die Position zu bestimmen.

Nach Ermittlung der eigenen Position wird mit der **Pfadplanung** die Strecke zum Ziel geplant. Abhängig vom System oder der Situation wird mit Anhalten oder Ausweichen auf eventuelle **Hindernisse reagiert**. Wird das Material automatisiert übergeben, findet im letzten Schritt der Navigation noch eine **Feinpositionierung** an der Übergabeposition statt.

Eine *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) ist bei Verfahren, die künstliche Landmarken benötigen (Abbildung 5.18 a-d, f) nicht möglich und die *Rekonfigurierbarkeit* (👎) ist eingeschränkt, da der Einsatz in anderen Bereichen mit Umbauaufwand verbunden ist. In den nachfolgenden Entwurfsmustern werden deshalb Navigationsverfahren berücksichtigt, die sich an natürlichen Umgebungsmerkmalen orientieren.

Abbildung 5.19 zeigt die im Folgenden dargestellten Muster zur Navigation mit den gewünschten Eigenschaften.

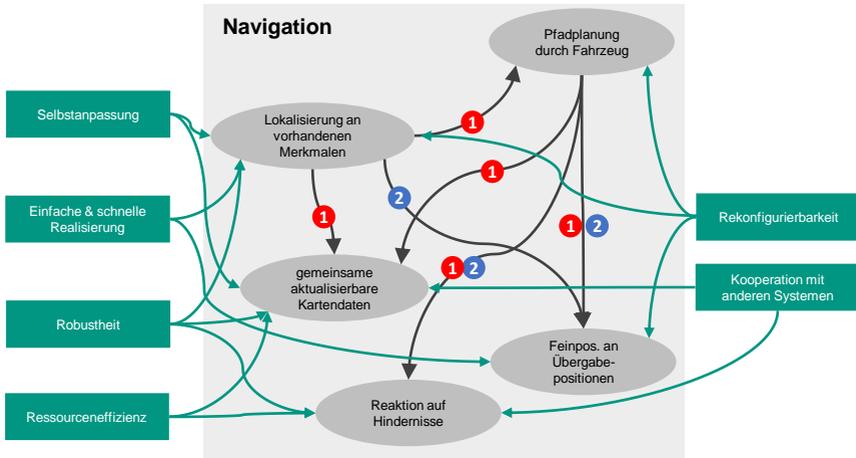


Abbildung 5.19: Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Navigation

5.7.1 Lokalisierung anhand vorhandener Umgebungsmerkmale

- 🏠 **Kontext:** Für induktive, optische, magnetische, triangulations- und gitterbasierte Verfahren ist die Installation von Markern erforderlich (siehe Abb. 5.18).
- ⊖ **Problem:** Je nach Umgebung ist eine Installation nicht möglich, mit hohen Kosten verbunden oder aufgrund der Umgebungsbedingungen nicht robust. Mit Ausnahme der gitter- und triangulationsbasierten Verfahren ist die Umfahrung von Hindernissen nicht möglich.
- ⚙️ **Einflussgrößen**

SLAM-Verfahren nutzen Laserscannerdaten, um auf Basis einer zuvor erstellten Karte die eigene Position zu bestimmen. Dabei wird die Position anhand der aktuellen Laserdaten, der vorherigen Positionen und den Odometriewerten ermittelt (Thrun et al. 2005). Als Alternative zu Laserdaten werden Verfahren untersucht, die Kameradaten (Mur-Artal und Tardos 2017) oder Tiefenbilder (Cole und Newman 2006) nutzen.

In der Praxis ergeben sich bei SLAM-Verfahren folgende Herausforderungen:

- Die Ermittlung der **Initial-Position** nach Anschalten des Fahrzeuges, da die vorherige Position unbekannt ist und die aktuellen Sensordaten je nach Struktur der Umgebung und der aktuellen Sensorsicht keine eindeutige Positionsbestimmung zulassen.
- **Änderungen an der Umgebung** verändern auch die natürlichen Landmarken, wodurch die beim Einlernen erfassten Kartendaten (EINRICHTUNGSASSISTENT) nicht mehr mit dem realen Umfeld übereinstimmen und die Lokalisierung nicht mehr zuverlässig funktioniert.

🔑 **Lösung: Einsatz von Verfahren zur Lokalisierung, die natürliche Landmarken der bestehenden Infrastruktur nutzen und Änderungen in der Umgebung erkennen und in die Kartendaten übernehmen.**

Da für die Vermeidung von Kollisionen Laserscanner zum Einsatz kommen (IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN), bietet sich die Nutzung der Laserdaten in SLAM-Verfahren an.

Zur Verbesserung der initialen Positionsbestimmung eignet sich eine **WLAN-basierte Lokalisierung**. Hierbei wird die bestehende WLAN-Infrastruktur initial kartiert und dann anhand der Signalstärke der einzelnen Access-Points die Position auf wenige Meter genau geschätzt (Biswas und Veloso 2010). Diese grobe Lokalisierung ist ausreichend, um damit den Suchbereich für die laserbasierte Lokalisierung einzuschränken und dann die initiale Position zu bestimmen.

In dynamischen Umgebungen müssen die initial erstellten **Karten aktualisiert** werden, damit Lokalisierung und Navigation robust funktionieren. Hierbei müssen die Fahrzeuge zwischen dynamischen und statischen Objekten unterscheiden und statische Objekte in die Karte übernehmen. Neu erfasste Kartendaten werden unter den Fahrzeugen ausgetauscht (GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN), wodurch die Lokalisierung und die Navigation des Gesamtsystems mit aktuellen Daten arbeiten (Tipaldi et al. 2013; Sun et al. 2016).

★ **Ergebnis:**

Die Lokalisierung nutzt natürliche Landmarken und WLAN-Signale, wodurch die Anbringung von künstlichen Markern entfällt, wodurch eine *Einfache und*

schnelle Realisierung (👍) und *Rekonfigurierbarkeit* (👍) ermöglicht werden. Da das Verfahren Änderungen erkennt und in die Karte einpflegt (*Selbstanpassung* (👍)), ist es auch robust gegenüber Veränderungen (*Robustheit* (👍)). Fahrzeuge können sich durch die Nutzung von WLAN-Signalen für die initiale Positionsbestimmung auch nach manueller Verlagerung im Raum zuverlässig lokalisieren.

Auf Basis der Lokalisierung und der Kartendaten erfolgt die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG. Die initiale Erstellung des Kartenmaterials erfolgt mit dem EINRICHTUNGSASSISTENTEN. Die Kartendaten werden in GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN zusammengeführt.

5.7.2 Pfadplanung durch das Fahrzeug

- 🏠 **Kontext:** Mit dem Muster LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE wird die Ausgangsposition bestimmt und durch die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE die Zielposition. Die Aufgabe der Pfadplanung ist die Ermittlung eines geeigneten Pfades zur Zielposition unter Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen (IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN) und der Größe der Ladung (TRENnung ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN). Da die Pfadplanung auf den bei der Realisierung erfassten Umgebungsdaten basiert, werden spätere Änderungen an der Umgebung und die aktuelle Auslastung von Verkehrswegen nicht berücksichtigt.
- ⊖ **Problem:** Durch die Planung der Pfade auf Basis der initial erfassten Umgebungsdaten werden Änderungen oder Verkehrsstörungen erst beim Abfahren erkannt wodurch die Systemleistung reduziert wird. Bei zentraler Pfadplanung steigt die erforderliche Rechenleistung mit der Anzahl der Fahrzeuge, wodurch die Skalierbarkeit eingeschränkt ist.

🏠 Einflussgrößen

Die Pfadplanung ermittelt den kürzesten Weg zwischen aktueller Position und Zielposition. Grundlage hierfür sind Kartendaten, mit denen eine diskrete Wegekarte (engl. roadmap) bestehend aus Knoten und Verbindungskanten (Latombe 2012) gebildet wird. Auf dieser Wegekarte wird dann z.B. mittels A*-Algorithmus (Hart et al. 1968) der kürzeste Pfad ermittelt. Hierbei können

Verkehrsregeln wie Fahrtrichtungsbeschränkungen, aber auch Engpässe auf schmalen Fahrwegen durch die Gewichtung der Kanten bei der Pfadplanung berücksichtigt werden. Die Pfadplanung wird außerdem für die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE genutzt, um den Fahrweg zum Abholort abzuschätzen, der im Auktionsverfahren berücksichtigt wird.

Ansätze zur **zentralen Pfadplanung** finden zwar die optimale Lösung, sind jedoch für praktische Anwendungen mit vielen Fahrzeugen nicht geeignet, da die Komplexität exponentiell mit der Anzahl der Fahrzeuge wächst. Gegenüber zentralen Ansätzen sind **entkoppelte Planungsverfahren**, bei denen die Fahrzeuge zuerst die eigenen Pfade planen und dann Konflikte auflösen, zwar effizient und echtzeitfähig, allerdings sind sie nicht optimal und nicht vollständig. Sie bergen also das Risiko, keine Lösung zu finden, obwohl ein Pfad existiert (Bennewitz et al. 2002).

Bei Ansätzen zur **priorisierten Planung** wird jedem Fahrzeug eine Priorität zugewiesen. Die Pfade werden dann nach absteigender Priorität geplant, wobei bei jedem Planungsschritt die Pfade der höher priorisierten Fahrzeuge berücksichtigt werden, um Kollisionen zu vermeiden. Hierfür gibt es zahlreiche Ansätze: Bennewitz et al. (2002) optimieren die Prioritätsvergabe, Berg und Overmars (2005) nutzen heuristische Verfahren, indem die Prioritäten z.B. anhand der Pfadlänge vergeben werden und Regele und Levi (2006) passen die Prioritäten bei Konflikten während der Pfadplanung an. Velagapudi et al. (2010) zeigen ein dezentralisiertes Verfahren der priorisierten Planung, das von Čáp et al. (2015) erweitert und in Experimenten mit realer Umgebung getestet wird. Ein generelles Problem bei der Vorausplanung aller Pfade ergibt sich durch Verzögerungen, die dazu führen, dass die Fahrzeuge nicht innerhalb der geplanten Zeitfenster ankommen und Wartezeiten entstehen.

Findet die Pfadplanung auf dem Fahrzeug statt, müssen die Kartendaten verfügbar sein (siehe GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN). Zusätzlich muss bei der Pfadplanung die aktuelle Fahrzeugkonfiguration berücksichtigt werden. Hierzu gehören z.B. die Größe des Fahrzeuges mit Berücksichtigung der Ladung (siehe TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN) und die durch Sicherheitsschutzfelder bedingte Bewegungsmöglichkeiten (siehe IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN). Sofern alle Fahrzeuge im System oder sogar über das System

hinaus die Pfade zentral planen lassen, kann ein zentraler Navigationsdienst auch die geplanten Wege der anderen Fahrzeuge berücksichtigen.

✚ **Lösung: Das Fahrzeug plant seinen Pfad eigenständig auf der Grundlage von aktuellen Kartendaten und Verkehrsinformationen.**

Aufgrund der eigenständigen Planung der Pfade können die Fahrzeuge autark – auch ohne Kommunikation mit einem zentralen System – planen und fahren. Die Aktualisierung der Kartendaten und Verkehrsinformationen erfolgt über GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN. Neben der Nutzung von aktuellen Planungsdaten sind Aufzeichnungen aus der Vergangenheit hilfreich, um die mögliche Fahrgeschwindigkeit auf den verfügbaren Fahrstrecken abschätzen zu können. Ist die Kommunikation vorübergehend gestört, können die Fahrzeuge ihre Pfade weiterhin eigenständig planen – das Fehlen der aktuellsten Verkehrs- und Kartendaten führt lediglich zu einer vorübergehend geringeren Planungsgüte.

Für die Qualität der entkoppelten Pfadplanung ist die **Einbeziehung aktueller Daten** entscheidend:

- Besonders in dynamischen Umgebungen ist die **Aktualisierung der Karten** (Sun et al. 2016) erforderlich, um Umwege oder Störungen aufgrund von Planung auf Grundlage von veralteten Kartendaten zu vermeiden. Die Veränderungen werden von allen Fahrzeugen erfasst und an die anderen Fahrzeuge kommuniziert.
- Informationen zur **Verkehrslage** von anderen Fahrzeugen oder aus historischen Daten beziehen Hindernisse wie Personen (Bennewitz et al. 2005), andere Fahrzeuge oder Verkehrsstörungen z.B. an Ladezonen oder Kreuzungen in die Pfadplanung mit ein und verhindern dadurch Engpässe.

Trotz freier Navigation ist die Nutzung von virtuellen Fahrspuren sowohl für den Durchsatz als auch für die Wirkung auf andere Verkehrsteilnehmer sinnvoll. Hierfür müssen Wegekarten generiert und bei Veränderungen angepasst werden. Kleiner et al. (2011) beschreibt ein Verfahren, das bei Änderungen in der Umgebung auch die Wegekarte an die neuen Umgebungsbedingungen anpasst, wodurch ein manueller Eingriff entfällt.

★ **Ergebnis:** Ein Leitrechner für die zentrale Pfadplanung entfällt. Durch die eigenständige Planung kann ein FTF ohne Kommunikation mit einem Leit-

rechner den Pfad planen. Durch die lokale Pfadplanung erhöht sich die Rechnerkapazität entsprechend der Fahrzeuganzahl, wodurch die Skalierbarkeit (*Rekonfigurierbarkeit* (👍)) gegeben ist.

Treten entlang des geplanten Pfades Hindernisse auf, findet eine REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER statt. Nachdem das Ziel entlang des geplanten Pfades erreicht wurde, ist eine FEINPOSITIONIERUNG AN ÜBERGABEPOSITIONEN erforderlich.

5.7.3 Reaktion auf Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer

- 👤 **Kontext:** Die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG plant die Fahrwege mit Berücksichtigung der Verkehrslage, berücksichtigt jedoch nicht die Reaktion auf Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer bei direkter Begegnung.
- ⊖ **Problem:** Werden Hindernisse nicht umfahren entstehen Wartezeiten. Bei der Umfahrung von bewegten Hindernissen wie z.B. Personen oder Flurförderzeugen können gegenseitige Behinderungen entstehen. Beim Einsatz einer größeren Fahrzeugflotte stören oder blockieren sich die Fahrzeuge gegenseitig, da sie als Hindernisse wahrgenommen werden.

📏 Einflussgrößen

Während der PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG wird mit den Kartendaten der Pfad zum Ziel geplant. Treten dann während der Fahrt entlang des geplanten Pfades Hindernisse auf, muss unter Einsatz der aktuellen Sensordaten neu geplant werden.

Bei **reaktiven Verfahren** werden Konflikte erst dann gelöst, wenn sie auftreten und durch Sensorik erfasst werden. Zuvor planen die einzelnen Fahrzeuge die Pfade ohne Berücksichtigung der anderen Fahrzeuggpfade (siehe PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG). Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) ist ein sehr effizientes und in Echtzeit nutzbares Verfahren, das mittels Sensorik die Position und Beschleunigung der anderen Fahrzeuge erfasst. Bei dem kommunikationsfreien Verfahren wird vorausgesetzt, dass alle Fahrzeuge die gleiche Strategie nutzen und Kurs und Beschleunigung anpassen (van den Berg et al. 2011). Der Ansatz von Sun et al. (2014) nutzt Verhaltensweisen und Verkehrsregeln, um Konflikte zu vermeiden oder

aufzulösen. Es ist im Vergleich zur priorisierten Planung (Berg und Overmars 2005) performanter und ermöglicht durch die lokale Lösung von Konflikten eine einfache Skalierung.

Insbesondere an **hoch frequentierten Positionen** wie Kreuzungen, Übergabestellen oder Ladestationen ist eine Beschränkung des Verkehrsaufkommens sinnvoll, da sich die Fahrzeuge ansonsten gegenseitig hemmen oder gar blockieren.

Das **Ausweichverhalten** bei Begegnung mit Personen ist eine Form der Mensch-Maschine-Interaktion: Dies betrifft die Fahrgeschwindigkeiten und Abstände zu Personen, die – neben dem Muster IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN – das Sicherheitsgefühl bei einer Begegnung berücksichtigen (Kruse et al. 2013).

 **Lösung: Die Fahrzeuge reagieren abhängig von der Art der Hindernisse und beachten Verkehrsregeln, um gegenseitige Störungen zu vermeiden. An kritischen Positionen wie Ladestationen oder Übergabepositionen werden die Verkehrsregeln um Warteregeln und Mechanismen zur Deadlock-Erkennung erweitert, um Blockierungen zu verhindern oder aufzulösen.**

Es werden Verhaltensweisen und Verkehrsregeln festgelegt, die das Fahrverhalten der Fahrzeuge bestimmen, sofern die von der PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG geplanten Wege nicht frei sind. Erfasst die Sensorik ein Hindernis im Fahrweg, wird geprüft, ob es sich um ein anderes Fahrzeug des Systems handelt. Trifft dies zu, wird mittels Kommunikation geprüft, welches Fahrmanöver das Fahrzeug durchführt um, darauf aufbauend das eigene Verhalten zu bestimmen (Sun et al. 2014).

Damit ein Fahrzeug entscheiden kann, ob eine Hindernisumfahrung möglich ist, muss der freie Platz erfasst und die eigene Fahrzeuggröße berücksichtigt werden, die je nach Beladungszustand und Konfiguration variieren kann (siehe TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN).

Je nach Art des Hindernisses wird das Verhalten angepasst: Nicht bewegte Hindernisse werden umfahren und in GEMEINSAME AKTUALISIERBARE KARTENDATEN übernommen. Mittels Sensordaten von Laserscanner, Video- oder Tiefenbildkameras kann bei bewegten Hindernissen zwischen anderen Systemen und Personen unterschieden werden. Ist das Hindernis eine Person,

reagiert das Fahrzeug entsprechend der in BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG beschriebenen Lösung.

In Kombination mit der dezentralen PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG wird auch das Ausweichverhalten bei Begegnung mit Hindernissen oder anderen Verkehrsteilnehmern lokal durch die Fahrzeuge koordiniert. Hierbei kommen reaktive Verfahren zum Einsatz, die regelbasiert unter Nutzung der erfassten Sensordaten reagieren. Sun et al. (2014) beschreiben Verkehrsregeln für den Einsatz von mehreren Fahrzeugen:

- Hindernisse werden umfahren. Nach der Umfahrung wird der nächste Wegpunkt angefahren (*Avoid*).
- Bei frontaler Begegnung mit anderen Fahrzeugen weichen sich die Fahrzeuge gegenseitig aus und fahren aneinander vorbei (*Exchange*).
- Bei einer seitlichen Begegnung fährt das Fahrzeug weiter (*GoThrough*), während das andere Fahrzeug wartet oder ausweicht, bis die Durchfahrt abgeschlossen ist (*WaitForGoThrough*).
- Den Fahrzeugen mit geringerer Distanz zum Ziel wird eine höhere Priorität zugewiesen. Bei geringerer Priorität (*lowOrder*) lässt ein Fahrzeug dem höher priorisierten Fahrzeug den Vorrang. Bei gleicher Distanz zum Ziel wird die Nummer (ID) des Fahrzeuges zur Priorisierung genutzt.
- Ein Fahrzeug, das gerade eine Handhabung durchführt (*Dock*) hat Vorrang vor einem weiteren Fahrzeug, das die selbe Übergabeposition nutzen möchte. Das weitere Fahrzeug wartet mit ausreichendem Abstand, bis das Vorgängerfahrzeug die Übergabe abgeschlossen und die Position verlassen hat (*WaitForDocking*).

Um Deadlocks zu erkennen, wird überwacht, ob die Verhaltensregeln in einer festgelegten Zeit abgearbeitet werden können. Ist beispielsweise das gegenseitige Ausweichen (*Exchange*) nicht möglich, plant das Fahrzeug mit der niedrigeren ID den Pfad neu, während das mit der höheren ID wartet, bis die Durchfahrt abgeschlossen ist (Sun et al. 2014). Zusätzlich informieren sich Fahrzeuge gegenseitig, wenn sie auf die Durchfahrt warten, um mittels Edge-Chasing-Algorithmus (Chandy et al. 1983) zirkuläres Warten zu erkennen.

- ★ **Ergebnis:** Durch die Reaktion auf Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer wird die Transportleistung und die *Ressourceneffizienz* (👍), die *Kooperation mit anderen Systemen* (👍) und die *Robustheit* (👍) des Systems gesteigert. Indem die Fahrzeuge eigenständig auf Hindernisse reagieren, kann auf eine zentrale Planung verzichtet werden.

In einigen Bereichen ist eine Einschränkung des reaktiven Verhaltens sinnvoll. Hierzu zählen Entladebereiche von Milkrun-Zügen, wo Überholmanöver den Entladevorgang behindern würden. Eingeschränkte Bereiche werden initial durch den EINRICHTUNGSASSISTENTEN definiert.

Die Begegnung mit Personen stellt ein Sonderfall im Umgang mit Hindernissen dar, der gesondert im Muster BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG behandelt wird.

5.7.4 Gemeinsame aktualisierbare Kartendaten

- 🏠 **Kontext:** Im Muster CLOUD-GESTÜTZTE INSTANDHALTUNG werden Daten Personen in der Ferne zur Verfügung gestellt. Im folgenden Muster werden die Daten auch von anderen Systemen genutzt.

Änderungen in der Umgebung beeinträchtigen die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE und die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG:

- ⊖ **Problem:** Die Lokalisierung mit veralteten Kartendaten ist weniger robust, da die kartierten Merkmale nicht mehr mit der Realität übereinstimmen (Sun et al. 2016). Die Pfadplanung kennt neue Fahrwege oder Hindernisse nicht, wodurch die geplanten Pfade Umwege beinhalten oder beim Abfahren wegen Hindernissen neu geplant werden müssen.

🏠 Einflussgrößen

Kartendaten werden bei frei navigierenden Systemen (siehe Kapitel 2.2.3) initial erstellt und innerhalb eines Systems für die Lokalisierung und Pfadplanung genutzt. Eine LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE erfordert aktuelle Kartendaten, weshalb Änderungen an der Umgebung im Kartenmaterial nachgezogen werden müssen.

Bei Lynx von Adept werden die Kartendaten initial auf einem zentralen Leitrechner abgelegt und allen Fahrzeugen im System zur Verfügung gestellt (Adept 2014). Bei KARIS PRO werden Veränderungen von den Fahrzeugen erkannt, in die lokale Karte der Fahrzeuge eingetragen und an die anderen Fahrzeuge im System kommuniziert. Bei der Aktualisierung der Kartendaten stellt sich die Frage, ab wann eine Veränderung als dauerhaft gilt und in die Karte übernommen wird: Werden Hindernisse zu schnell in die Karte übernommen, werden auch temporäre Hindernisse (z.B. kurzzeitig abgestellte Paletten) in der Karte verzeichnet. Werden sie zu spät eingetragen, werden möglicherweise viele Pfade geplant, die nicht befahren werden können (Sun et al. 2016).

Wo liegt das Potential und der Nutzen von der Nutzung einer Cloud für mobile Systeme? Die Studie zu Cloud Robotics von Kehoe et al. (2015) erläutert die Anwendungsfelder für die Verlagerung von Rechen- und Speicherkapazität von den Robotern in eine Cloud. Die Autoren gliedern die über 150 Referenzen in fünf besondere Cloud-Themen mit großem Potential für Anwendungen in der Robotik:

1. Big Data zur Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen
2. Cloud Computing zur Parallelisierung von Rechenvorgängen
3. OpenSource / Open-Access zum Austausch von Daten, Algorithmen und Designs
4. Kollektives Lernen zur Verbesserung der Systeme durch Nutzung der Ergebnisse anderer
5. „Human Computation“ zum Einsatz von Menschen in Situationen, in denen das technische System eine Aufgabe nicht eigenständig lösen kann

Neben der Ablage der Kartendaten eignet sich eine Cloud besonders zur Verarbeitung von Kartendaten nach der initialen Erfassung. Arumugam et al. (2010) zeigt eine Implementierung von SLAM zur Erstellung der Karte auf einem Rechner-Cluster. In einem Ansatz zur Cloud-Navigation wird die rechenintensive kooperative Pfadplanung in eine Cloud verlagert (Abbenseth et al. 2017): Fahrzeuge übermitteln ihre Position und ihr Ziel und erhalten aus der Cloud den geplanten Pfad, der auch die Pfade anderer Fahrzeuge berück-

sichtigt. Neben Sensor- und Planungsdaten einzelner Fahrzeuge werden auch Daten stationärer Sensoren in die Planung berücksichtigt.

Ergebnis des Forschungsprojektes RoboEarth (Waibel et al. 2011) ist eine Infrastruktur für Cloud Robotics. Es umfasst eine Wissensdatenbank, die Softwarekomponenten, Karten zur Navigation, Aufgabenwissen und Modelle zur Objekterkennung beinhaltet. Die zugehörige Cloud-Computing-Plattform „Rayputa“ (Hunziker et al. 2013) erlaubt die Ausführung von rechenintensiven Aufgaben in der Cloud.

Herausforderungen beim Einsatz von Cloud Systemen sind die Informationssicherheit, der Datenschutz, die hohe Latenz und die Abhängigkeit von der Verbindungsqualität Kehoe et al. (2015).

Lösung: Synchronisierung der lokalen Kartendaten auf den Fahrzeugen mit Hilfe einer Cloud zur gemeinsamen Verwendung mit anderen Systemen.

Die lokal auf dem Fahrzeug gespeicherten **Kartendaten** werden in der Cloud gespeichert und verarbeitet. Von den Fahrzeugen werden die Kartendaten zur Lokalisierung und Pfadplanung genutzt. Kartenänderungen werden mit dem Cloud-Dienst synchronisiert und stehen somit anderen Fahrzeugen und Systemen zur Verfügung. Durch die Synchronisierung ist das System auch bei Verbindungsverlusten und hohen Latenzen funktionsfähig. Neben den Karteninformationen werden auch aktuelle **Verkehrsinformationen** an den Cloud-Dienst übermittelt. Hierdurch werden Verkehrsinformationen bei der Pfadplanung berücksichtigt und Analysen zur Prognose des Verkehrsflusses durchgeführt.

Die Aktualisierung der Kartendaten (siehe REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER) muss von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängig konfigurierbar sein, da die Änderungsrate von dauerhaften und temporären Hindernissen in verschiedenen Umgebungen variiert.

Bedingt durch Latenzen bei der Verbindung mit einer Cloud und der dabei bestehenden Abhängigkeit von der Verbindungsqualität wird die Lokalisierung und Pfadplanung auf den Fahrzeugen durchgeführt (siehe LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE UND PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG).

Durch die gemeinsame Nutzung und Aktualisierung der Kartendaten von verschiedenen Systemen sind die Karten- und die Verkehrsinformationen aktueller, wodurch die Pfadplanung verbessert wird.

- ★ **Ergebnis:** Die *Ressourceneffizienz* (👍) und *Selbstanpassung* (👍) wird durch die Planung auf aktuellen Kartendaten und die Analyse der Verkehrsinformationen gesteigert. Durch geteilte Verkehrsinformationen ist die *Kooperation mit anderen Systemen* (👍) möglich. Durch aktuelle Kartendaten ist auch eine langfristig stabile Lokalisierung möglich, die zur *Robustheit* (👍) des Systems beiträgt.

Während der Einrichtung des Systems müssen die initialen Kartendaten der Umgebung mit dem EINRICHTUNGSASSISTENTEN erfasst werden.

5.7.5 Feinpositionierung an Übergabepositionen

- 🏠 **Kontext:** Dieses Muster erweitert LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE und PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG um präzises Navigationsverhalten an den Übergabepositionen. Übergabepositionen sollen möglichst schnell verändert werden können.

- ⊖ **Problem:** Zusätzliche Sensorik zur Feinpositionierung oder vordefinierte Konturen bzw. Markierungen schränken die Flexibilität ein.

☰ Einflussgrößen

Die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE nutzt Kartendaten und Sensorinformationen, um die Position zu bestimmen. Die Genauigkeit einer laserbasierten Lokalisierung liegt in der Größenordnung von mehreren Zentimetern. Diese Genauigkeit genügt zur Navigation entlang der Pfade, ist jedoch für die exakte Feinpositionierung an den Übergabepositionen nicht ausreichend. Deshalb werden für die Warenübergabe von verschiedenen Herstellern folgende Ansätze genutzt:

- Lastübergabe durch Person, wodurch Feinpositionierung und Handhabung durch das System entfallen (z.B. bei Varianten von Aethon TUG)
- Zusätzliche Sensorik am Fahrzeug und Markierungen an der Umgebung (z.B. Magnetsensoren und Magnetbänder als Erweiterung für Adept Lnyx)

- Zusätzliche Merkmale mit charakteristischer Kontur, die eine Erkennung aus den Laserscannerdaten ermöglichen (z.B. Adept Lynx an Ladestationen)

Diese Ansätze schränken die in TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN beschriebene Flexibilität bezüglich verschiedener Ladung ein, beispielsweise beim Transport von Wagen, wo sich das FTF unter dem Wagen positionieren und andocken muss: Eine Markierung am Boden erfordert die exakte Positionierung des Wagens durch einen Mitarbeiter. Die Anbringung einer charakteristischen Kontur am Wagen ist nicht möglich, da sie das Sichtfeld des Laserscanners beim Fahren bzw. die Unterfahrung selbst einschränken würde.

Bei der Feinpositionierung gilt: Je präziser die Sensorik und Aktorik, desto geringer muss die Toleranz der mechanischen Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Fördergut dimensioniert werden. Da die Handhabung erst beginnen kann, wenn die Feinpositionierung abgeschlossen ist, ist die Dauer der Feinpositionierung ein Merkmal, das die Systemleistung beeinflusst.

🔧 Lösung: Die Erkennung von Übergabestellen nutzt Referenzdaten, die aus natürlichen Merkmalen der Übergabepositionen bzw. des Übergabegutes bestehen. Zum Einlernen und Erkennen der Merkmale wird die zur Lokalisierung verwendete Sensorik genutzt.

Um unabhängig von einer fest vordefinierten Kontur feinpositionieren zu können, eignen sich Template-Matching-Verfahren aus der digitalen Bildverarbeitung: Hierbei wird versucht ein Muster in einem Bild wiederzufinden. Das in Olson (2015) vorgestellte Verfahren legt die Referenzdaten in verschieden stark reduzierten Auflösungen ab. Da es bei gleicher Qualität deutlich schneller als konventionelle Verfahren ist, eignet es sich für die Feinpositionierung in Echtzeit (Olson 2015).

Wie im Muster EINRICHTUNGSASSISTENT beschrieben, werden während der Realisierung die Übergabepositionen eingelernt, die die Zielpositionen für die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG darstellen. Ist diese Position erreicht, beginnt die Feinpositionierung anhand der Konturen an der Übergabeposition. Ist die Kontur an jeder Übergabeposition individuell, müssen die Konturen jeder Übergabeposition individuell eingelernt werden. Findet die Positionierung an Übergabestationen oder Transportgestellen mit jeweils identischen

Konturen statt, genügt das einmalige Einlernen und die Zuordnung zum jeweiligen Wechselmodul (siehe TRENnung zwISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN).

Bei der Gestaltung der als Kontur genutzten Übergabepositionen – ob Transportgestelle oder Übergabestellen – müssen folgende Materialeigenschaften berücksichtigt werden:

- Stabilität des Materials: Es muss sichergestellt sein, dass die Kontur des Materials beständig ist und den Umgebungsbedingungen standhält.
- Reflexionsgrad des Materials: Um Messfehler des Laserscanners durch Reflexionen zu vermeiden, muss auf stark spiegelndes Material verzichtet werden, da diese Bereiche zur Ausblendung der Kontur führen können (SICK 2016, 59).

Durch die Nutzung von natürlichen Merkmalen für die Feinpositionierung entfällt die Anbringung von künstlichen Markern und das Verfahren ist robust gegenüber Lokalisierungsfehlern und geringfügigen Veränderungen der Übergabepositionen.

★ **Ergebnis:** FTF können sich ohne die Anbringung von künstlichen Markern an verschiedenen Objekten exakt positionieren, wodurch die *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) und *Rekonfigurierbarkeit* (👍) ermöglicht werden.

Die Feinpositionierung muss während der Realisierung mittels EINRICHTUNGSASSISTENT konfiguriert werden.

5.8 Dezentrale Steuerung

Im Kontext der Organisationslehre definieren Thanheiser et al. (2008) die Dezentralisierung als „Verlagerung von Entscheidungskompetenz innerhalb von Hierarchien – weg von zentralen Entscheidungsknoten hin zu einzelnen, lokal agierenden Handlungssubjekten“ mit der Voraussetzung, „dass die einzelnen lokalen Handlungsobjekte auch zur Übernahme von Entscheidungskompetenz bzw. zu einer gewissen Selbstorganisation fähig sind.“

Aus Sicht der Informatik bezeichnen Pokahr et al. (2005) die dezentrale Steuerung als „Aufteilung des Gesamtproblems in autonome, miteinander

interagierende Einheiten“, die „mangels globaler Sicht oft allein auf Basis lokaler Informationen handeln müssen.“

Aus technischer Sicht wirken sich die folgenden Merkmale auf verschiedene Grade der Dezentralität aus (Schmitz 2013):

- Ort der Datenhaltung: Die Daten sind an einem zentralen Ort (z.B. auf einem Leitrechner) abgelegt oder dezentral auf die einzelnen Elemente verteilt.
- Ort der Datenverarbeitung: Die Verarbeitung kann zentral (z.B. in der Cloud) auf einem Multi-Agentensystem an einem Ort oder in jedem Element stattfinden.
- Kommunikationsart: Eine zentrale Einheit kommuniziert mit den Einheiten bzw. wird zur Ablage der Daten genutzt (Blackboard) oder die Einheiten kommunizieren untereinander.
- Entscheidungsfindung: Die Entscheidung wird von einer zentralen Einheit getroffen, von einer temporär als Entscheider bestimmten Einheit oder gemeinsam.

Die in Kapitel 2.2 vorgestellten Systeme – mit Ausnahme von LEO Locative und KARIS PRO – beinhalten einen zentralen Leitrechner, der die Aufträge, Fahrzeuge und Bestände an den Übergabepositionen verwaltet. Kiva und die zellularen Transportsysteme nutzen Softwareagenten zur dezentralen Entscheidungsfindung auf einem zentralen Rechner.

Abbildung 5.20 zeigt die Entwurfsmuster und die zugehörigen gewünschten Eigenschaften.

5.8.1 Dezentrale Auftragsvergabe

- ⚙️ **Kontext:** Die Aufträge von einem übergeordneten System müssen den Fahrzeugen zugeordnet werden.
- ⊖ **Problem:** Bei einer zentralen Auftragsvergabe ist das System von der Funktion des Leitrechners abhängig. Die Installation und Konfiguration des Leitrechners während der Realisierung und bei Erweiterungen erfordert einen Abgleich der Umgebung und der Systemkomponenten mit dem zentralen Konfiguration des Leitrechners.

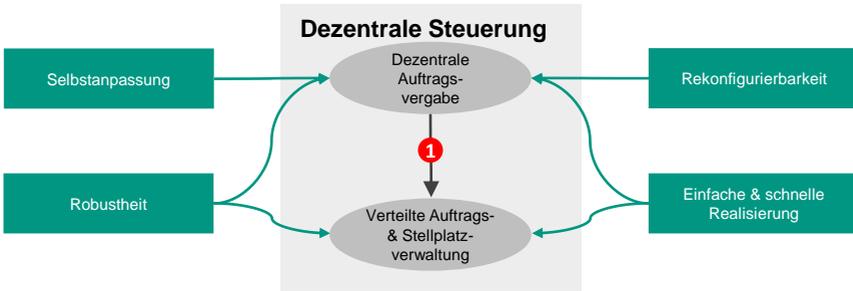


Abbildung 5.20: Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur dezentralen Steuerung

≡ Einflussgrößen

Bezogen auf den Grad der Dezentralität (Schmitz 2013) ist für die Auftragsvergabe der Ort der Datenverarbeitung, die Entscheidungsfindung und die Kommunikationsart relevant.

Bei **zentralen Systemen** zur Auftragsvergabe finden folgende Funktionen zentral statt: Per Leitrechner werden die Aufträge gehalten, verarbeitet und es wird entschieden, welches Fahrzeug den Auftrag erhält, bevor die Entscheidung an das Fahrzeug kommuniziert wird (VDI-4451-7 2005).

Bei **agentenbasierten Systemen** werden die Fahrzeuge und Transportaufträge als Agenten modelliert. Weyns (2010) beschreibt ein System, bei dem die Transportagenten auf einem zentralen Rechner laufen und sich Fahrzeugen zuweisen. Hierbei werden die Aufträge zentral gehalten, die Datenverarbeitung findet zentral statt, die Entscheidung wird jedoch dezentral von den Transportagenten getroffen und dann an die betroffene Einheit kommuniziert.

Bei den Zellularen Transportsystemen (Kirks et al. 2012) werden die Fahrzeuge als Agenten modelliert. Die Auftragsvergabe findet per Auktionsverfahren zwischen den Agenten statt. Der Ort der Datenverarbeitung ist ein zentraler Leitrechner, die Entscheidung wird dort durch die Agenten dezentral getroffen und die Kommunikation nach Generierung des Auftrages erfolgt von der zentralen Einheit zu den Fahrzeugen.

🔑 Lösung: Die Fahrzeuge koordinieren Entscheidungen in Abstimmung mit anderen Fahrzeugen per Auktion eigenständig und unmittelbar unterein-

ander. Neu hinzugefügte Fahrzeuge melden sich eigenständig im System an und werden anschließend in die Auktionen mit einbezogen.

Bei der dezentralen Auftragsvergabe gibt jedes Fahrzeug ein **Gebot** ab. Das Gebot ist ein Kostenmaß, auf dessen Basis entschieden wird, welches Fahrzeug für den Auftrag am besten geeignet ist. Voraussetzung für die Abgabe eines Gebotes ist die passende Handhabungstechnik (siehe TRENnung zwISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN) und ausreichend Energie. In das Gebot einbezogen werden die geplanten Zeiten für die Fahrt zum Abholort (siehe PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG) und für den ggfs. noch abzuarbeitenden Auftrag. Durch die Auktionierung der Aufträge passt sich das System auch an veränderte Auftragseingänge an, beispielsweise wenn in einem Bereich des Systems besonderes viele Transporte erledigt werden müssen: Fahrzeuge, die sich zuerst aufgrund langer Fahrstrecken zum Abholort nicht eignen, übernehmen den Auftrag, nachdem die zuvor besser geeigneten Fahrzeuge bereits mit Transporten ausgelastet sind (Colling et al. 2016).

Damit möglichst viele Fahrzeuge an der Verhandlung teilnehmen, muss die **Kommunikation** untereinander möglich sein. Die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen erfolgt über eine WLAN-Infrastruktur. Mit 5G wird zukünftig auch die direkte Kommunikation (Device to device, D2D) zwischen den Fahrzeugen ermöglicht (Osseiran et al. 2014). In Umgebungen mit eingeschränkten Kommunikationsmöglichkeiten durch unvollständige WLAN-Abdeckung besteht die Gefahr, dass das am besten geeignete Fahrzeug bei der Verhandlung nicht erreichbar ist und der Auftrag deshalb von einem weniger geeigneten Fahrzeug übernommen wird. Neben der möglichst umfassenden WLAN-Abdeckung, können in Anwendungen mit eingeschränkten Kommunikationsmöglichkeiten auch Prognosen für die voraussichtliche Ankunft am Ziel im Auktionsprozess berücksichtigt werden – vorausgesetzt, dass an jeder Übergabeposition die Kommunikation möglich ist. Dabei kommuniziert jedes Fahrzeug bei Annahme eines Auftrages eine zeitliche Prognose, wann es den Auftrag an welchem Ort abgeschossen haben wird. Sofern ein Fahrzeug bei einer Auktion nicht teilnimmt, wird der Prognosewert berücksichtigt und – sofern sich hieraus das beste Gebot ergibt – für das Fahrzeug reserviert.

Fahrzeuge melden sich initial per Broadcast an und teilen sich regelmäßig gegenseitig ihren Status mit. Hierdurch ist die **Erkennung von Ausfällen**

einzelner Fahrzeuge möglich: Meldet ein Fahrzeug seinen Status für eine bestimmte Zeit nicht, wird eine Warnmeldung über die MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE oder über die BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG ausgegeben.

- ★ **Ergebnis:** Eine zentrale Instanz zur Auftragsvergabe ist nicht mehr nötig, wodurch auch die Einrichtung eines Leitrechners entfällt und eine *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) begünstigt wird. Außerdem entfällt mit dem Leitrechner ein kritischer Ausfallpunkt, von dem die Systemfunktion abhängig ist, womit die dezentrale Auftragsverwaltung zur *Robustheit* (👍) beiträgt. Die dezentrale Auftragsvergabe ist Grundlage für die Skalierbarkeit des Systems (siehe *Rekonfigurierbarkeit* (👍)): Neue Fahrzeuge melden sich im System an und nehmen an Auktionen teil. Fahrzeuge, die aus dem System herausgenommen werden, nehmen nicht mehr an den Auktionen teil, ohne die Funktion der verbleibenden Fahrzeuge zu beeinträchtigen. Durch das Auktionsverfahren kann sich das System bei veränderter Auftragslage anpassen (*Selbstanpassung* (👍)).

Bezüglich der einleitend beschriebenen Grade der Dezentralität (Schmitz 2013) lässt sich dieses Muster wie folgt einordnen:

- Ort der Datenverarbeitung: Die Fahrzeuge verarbeiten die Aufträge jeweils dezentral im Austausch miteinander.
- Kommunikationsart: Die Fahrzeuge kommunizieren ohne zentralen Leitrechner untereinander. Die genutzte Kommunikationsinfrastruktur zur Übermittlung der Daten bleibt eine Schwachstelle (Single Point of Failure).
- Entscheidungsfindung: Die Entscheidung wird dezentral mittels Auktion getroffen.

Für die Auftragsvergabe müssen während der Realisierung die Transportbeziehungen und Übergabepositionen mittels EINRICHTUNGSASSISTENT konfiguriert werden.

Der Ort der Datenhaltung wird in dem nachfolgenden Muster VERTEILTE AUFTRAGS- UND STELLPLATZVERWALTUNG betrachtet. Die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG ermöglicht die von einem zentralen Leitrechner unabhängige Planung der Pfade.

5.8.2 Verteilte Auftrags- und Stellplatzverwaltung

-  **Kontext:** Statt durch einen Leitreechner werden die Aufträge den Fahrzeugen durch die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE zugewiesen. Eingehende Aufträge und der Belegungszustand von Stellplätzen, Übergabe- und Ladestationen müssen allen Fahrzeugen bekannt sein, um die *Robustheit* (👍) des Systems sicherzustellen.
-  **Problem:** In einem dezentral gesteuerten System muss sichergestellt sein, dass alle Fahrzeuge aktuelle Daten nutzen. Hierzu gehören noch abzuarbeitende Aufträge sowie Belegungszustände der Stellplätze.

Einflussgrößen

Informationen über die Belegungszustände der Stellplätze müssen für alle Fahrzeuge verfügbar sein. Die Konsistenz der **Stellplatzdaten** ist erforderlich, um eine Beeinträchtigung der Funktion des Systems zu vermeiden: Wird ein Belegungszustand nach einer Anlieferung nicht aktualisiert, versucht ein anderes Fahrzeug am gleichen Stellplatz Material abzuliefern. Wird ein Stellplatz nach Abholung nicht aktualisiert, ist der freie Platz nicht nutzbar oder es findet ein Abholversuch statt, obwohl das Material bereits abgeholt wurde.

Die Verfügbarkeit der **Auftragsdaten** ist notwendig, um Wartezeiten zu vermeiden: Werden Auftragsdaten zu spät synchronisiert, dauert die Verhandlung der Aufträge lange oder potentiell geeignete Fahrzeuge erhalten den Auftrag nicht.

Es muss berücksichtigt werden, dass bei Fahrzeugen die Kommunikationsverbindung vorübergehend abbrechen kann. Das von Brewer (2000) formulierte CAP-Theorem besagt, dass es in einem verteilten System nicht möglich ist, mehr als zwei der drei Kriterien gleichzeitig zu garantieren:

- Konsistenz (consistency): Ein verteilt gespeichertes Datum ist nach einem Schreibzugriff an jedem Ort gleich. Jeder Lesevorgang gibt ein aktuelles Datum oder einen Fehler zurück.
- Verfügbarkeit (availability): Alle Anfragen werden in akzeptabler Zeit beantwortet – ohne die Garantie, dass es sich um das aktuellste Datum handelt.

- Partitionstoleranz (partition tolerance): Das System bleibt funktionsfähig, obwohl das Netzwerk partitioniert ist und Nachrichten nicht bzw. verspätet ankommen.

Deutsch (1994) erklärt, dass bei verteilten Systemen nicht von einer zuverlässigen Netzwerkverbindung ausgegangen werden kann – somit ist die Partitionstoleranz grundsätzlich erforderlich. Für die Praxis folgt daraus, dass zwischen Konsistenz und Verfügbarkeit abgewogen werden muss (Brewer 2012).

Für ein FTS, bei dem Daten zu Aufträgen und Stellplätzen verteilt auf den Fahrzeugen gespeichert werden, hat eine **Verletzung der Kriterien** des CAP-Theorems folgende Auswirkungen:

- Verletzung der Konsistenz (consistency): Die Abgabe eines Ladungsträgers ist nicht möglich, weil der Stellplatz belegt ist bzw. die Aufnahme ist nicht möglich, weil das Material bereits abgeholt wurde. Aufträge werden von mehreren Fahrzeugen gleichzeitig angenommen und bearbeitet.
- Verletzung Verfügbarkeit (availability): Die Rückmeldung zu verfügbaren Stellplätzen oder Aufträgen erfolgt verzögert oder bleibt aus. Hierdurch können Wartezeiten oder eine nicht-optimale Abarbeitungsreihenfolge der Aufträge entstehen.
- Verletzung der Partitionstoleranz (partition tolerance): Bei Partitionierung zerfällt das System in mehrere Teile. Diese bearbeiten entweder weiter Aufträge und verlieren die Konsistenz oder die Partitionierung wird erkannt und der Zugriff auf Daten wird verhindert. Damit wird die Bedienung von Stellplätzen und Abarbeitung von Aufträgen gestoppt.

Da die Verletzung der Verfügbarkeit geringere Auswirkungen hat, als die Verletzung der Konsistenz, wird die Konsistenz priorisiert.

 **Lösung: Aufträge und Bestände werden verteilt auf den Fahrzeugen gespeichert. Bei den Mechanismen zur Synchronisierung der Daten muss sichergestellt werden, dass die Daten konsistent sind und Partitionen erkannt und behandelt werden.**

Cattell (2011) stellt verschiedene Datenbanksysteme gegenüber und bewertet Sie hinsichtlich der horizontalen Skalierbarkeit, also der Verteilung der Daten und Datenbankoperationen auf viele Server. Replikationsverfahren, die in verteilten Systemen zum Einsatz kommen, stellen sicher, dass die Daten konsistent sind (Hecht und Jablonski 2011). Für den Umgang mit Partitionierung empfiehlt Brewer (2012) drei Schritte: Erkennung der Partition (Detect), den Wechsel in einen Partitionsmodus (Partition Mode) und die Wiederherstellung (Recover). Für auf Fahrzeuge verteilte Aufträge ergibt sich hieraus folgender Lösungsansatz für FTS:

1. Detect: Die Erkennung von Partitionen kann durch regelmäßige Statusmeldungen der Fahrzeuge untereinander erfolgen. Bleiben die Statusmeldungen aus, kann eine Partitionierung erkannt werden. Neben der Erkennung der Partition ist die Partitionsgröße relevant. Damit kann ein Fahrzeug ermitteln, ob es Teil einer großen Partition ist, die weiter alle Operationen durchführen kann oder nicht.
2. Partion Mode: Hier sind für Fahrzeuge in kleinen Partitionen nur eingeschränkte Leseoperationen möglich, die keinen Einfluss auf die Konsistenz haben. In einer großen Partition können weiterhin Operationen und Transporte durchgeführt werden. Das System ist in diesem Modus um die kleine Partition dezimiert.
3. Recover: Bei Auflösung der Partition muss der Zustand der Fahrzeuge, die einer kleineren und eingeschränkten Partition zugehörten, wiederhergestellt werden. Dies erfolgt durch die Aktualisierung der Daten von einem der Fahrzeuge aus der großen Partition. Nach Abschluss der Wiederherstellung ist die Konsistenz wieder gegeben.

Um eine ausreichende Verfügbarkeit zu gewährleisten, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Verfügbarkeit der Kommunikationsinfrastruktur: Kommunikation sollte möglichst über den gesamten Arbeitsbereich gewährleistet sein. Sie ist zwingend an Positionen erforderlich, wo Daten verändert werden wie z.B. an Übergabepositionen, Ladepositionen und Wartepositionen.
- An- und Abmeldung von Fahrzeugen um die Partitionierung des Systems zu erkennen: Wenn ein oder mehrere Fahrzeuge ohne Abmeldung keine Statusinformationen senden, ist eine Partitionierung eingetreten.

- Signalisierung per Nutzerinterface: Durch die Anzeige von Partitionierung als Fehlerfall kann die reduzierte Systemleistung erkannt werden (siehe MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE).
- Schwellwert für Partitionsgröße: Eine große Partition, die Schreiboperationen durchführt, darf im System nur einmal existieren. Um das sicherzustellen, muss eine große Partition mindestens größer als die Hälfte aller im System angemeldeten Fahrzeuge sein.
- Aktionen bei erkannter Partitionierung: Als Teil einer kleinen Partition können Aktionen zur Wiederherstellung notwendig sein, beispielsweise die Fahrt zu einem Bereich, an dem die Kommunikationsinfrastruktur verfügbar ist.

★ **Ergebnis:** Das System verwaltet Aufträge und Stellplätze zuverlässig auch ohne zentrale Datenbank. Hierdurch entfällt die Einrichtung eines zentralen Leitrechners, wodurch die *Einfache und schnelle Realisierung* (👍) ermöglicht wird. Durch die Erkennung von Verbindungsverlusten und Partitionierung sowie Mechanismen zur Vermeidung von Schreibzugriffen während der Partitionierung wird die *Robustheit* (👍) des Systems sichergestellt.

5.9 Fazit aus den Entwurfsmustern

In den vorgestellten Entwurfsmustern wurden die gewünschten Eigenschaften und der Stand der Technik der verschiedenen Themenbereiche berücksichtigt. In den Mustern wurden Probleme, Einflussfaktoren und Lösungsvorschläge innerhalb der Themen Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion Navigation und dezentrale Steuerung aufgezeigt. Die Verbindung der Muster über die Themenbereiche hinweg deutet an, dass die betreffenden Probleme bei der Entwicklung nicht losgelöst sondern gemeinsam betrachtet werden müssen.

6 Analyse der Entwurfsmuster

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln Aufgaben und Funktionen analysiert, gewünschte Eigenschaften beschrieben und Entwurfsmuster entwickelt wurden, werden im Folgenden die Wechselwirkungen aufeinander betrachtet und interpretiert. Welche Aufgaben werden vereinfacht oder automatisiert? Welche gewünschten Eigenschaften können durch Anwendung der Entwurfsmuster umgesetzt werden? Welche Schlüsse können aus der Verknüpfung der Entwurfsmuster untereinander gezogen werden?

6.1 Einfluss auf Aufgaben und Funktionen

Durch die Nutzung der Entwurfsmuster während der Entwicklung können einige der in Kapitel 3 beschriebenen *Aufgaben* vereinfacht oder automatisiert werden. Dies betrifft die folgenden Phasen des Produktlebenszyklus (siehe Abbildung 6.1):



Abbildung 6.1: Produktlebenszyklus für FTS mit von Entwurfsmustern betroffenen Phasen (grün) Westkämper (2013), Feldhusen und Gebhardt (2008), VDI-2710 (2010) und Lüder (2017)

Fertigung: Ein MODULARER FAHRZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN ermöglicht eine schnellere Fertigung mit bereits vor dem Einbau getesteten

Komponenten. Durch die TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN können die Basisfahrzeuge in höheren Stückzahlen hergestellt werden.

Systemausplanung: Bei der *Planung der Infrastruktur und Peripherie* entfallen durch die LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE Anpassungen an der Infrastruktur für die Navigation, beispielsweise das Anbringen von Leitspuren oder künstlichen Markern. Durch DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE und VERTEILTE AUFTRAGS- UND STELLPLATZVERWALTUNG übernehmen Fahrzeuge die Funktionen eines Leitrechners, der bei der Planung nicht berücksichtigt werden muss. Die Installation von *stationären Sicherheitseinrichtungen* wird deutlich reduziert, da die Installation von Lichtschranken oder Schutz Türen entfällt, indem durch IN FAHRZEUGEN INTEGRIERTE SICHERHEITSFUNKTIONEN der überwiegende Teil der Schutzmaßnahmen im Fahrzeug integriert ist und nicht stationär abgedeckt werden muss.

Realisierung: Die in der Systemausplanung entfallenen Aufgaben entfallen auch bei der Realisierung: Künstliche Marker, Leitrechner und Sicherheitseinrichtungen müssen auch nicht realisiert werden. Der EINRICHTUNGSASSISTENT vereinfacht außerdem die *Kartierung* und die Konfiguration der *Übergabe- und Ladepositionen* und *Transportbeziehungen*, indem der Nutzer per Webinterface Schritt für Schritt durch den Installationsprozess geführt wird. Da die PFADPLANUNG DURCH DAS FAHRZEUG stattfindet, müssen die Fahrwege nicht explizit vom Nutzer vorgegeben werden. Lediglich bei Sonderfällen, z.B. an Kreuzungen mit besonderen Verkehrsregeln oder in Bereichen, die nur in einer Richtung oder gar nicht befahren werden dürfen, müssen *Fahrwege und Verkehrsregeln* konfiguriert werden.

Betrieb: Durch die im Muster LOKALISIERUNG ANHAND VORHANDENER UMGEBUNGSMERKMALE beschriebene eigenständige Aktualisierung der Karten entfällt die manuelle *Aktualisierung der Karte* bei Veränderungen der Umgebungsmerkmale in der Arbeitsumgebung und die *Bestimmung der Position* funktioniert weiterhin zuverlässig. Dank der REAKTION AUF HINDERNISSE UND ANDERE VERKEHRSTEILNEHMER reagieren die Fahrzeuge angepasst auf Menschen, statische oder bewegte *Hindernisse*.

Der *Systemstatus* wird durch die BENUTZERSCHNITTSTELLE AM FAHRZEUG und die MOBILE BENUTZERSCHNITTSTELLE dargestellt. So können Personen im direkten Umfeld eines Fahrzeuges durch optische Signale die nächsten Aktionen abschätzen und per Webinterface Informationen zum Gesamtsystem erhalten.

Instandhaltung: Durch die CLOUD-GESTÜTZTE INSTANDHALTUNG können Teile der *Inspektion* automatisiert werden, indem die Daten zum Zustand einzelner Komponenten überwacht werden. Die *Wartung*, *Instandsetzung* und *Verbesserung* kann durch die erfassten Daten erleichtert werden. Beispielsweise liefern historische Daten der Akkulaufzeit vieler Fahrzeuge Aufschluss über einen notwendigen Austausch der Akkus. Durch die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE werden die Aufträge des Fahrzeuges in Wartung von den anderen Fahrzeugen mit abgearbeitet.

Änderung: Die *Änderung der Fahrzeuganzahl* wird durch die DEZENTRALE AUFTRAGSVERGABE und die VERTEILTE AUFTRAGS- UND STELLPLATZVERWALTUNG automatisiert, da neue Fahrzeuge sich eigenständig im System anmelden und direkt in die Auftragsvergabe miteinbezogen werden. Die *Änderung des Einsatzortes* oder die Anpassung von Übergabe- und Ladepositionen erfolgt wie die Realisierung mittels EINRICHTUNGSASSISTENT.

Funktionserweiterung: Durch die TRENNUNG ZWISCHEN BASISFAHRZEUG UND WECHSELMODULEN können die Wechselmodule der Fahrzeuge getauscht werden. Hierbei können in die Wechselmodule Funktionen integriert werden, die den Transport von anderen Ladungsträgern oder die Übergabe an andere Übergabepunkte ermöglichen. So kann z.B. ein Wechselmodul mit einem Bandförderer zur Aufnahme von Paketen durch ein Wechselmodul mit Hubeinheit und Rollenförderer zur Aufnahme von KLT in unterschiedlichen Übergabehöhen ersetzt werden. Die Umsetzung neuer Software-Funktionen durch den Hersteller ist durch die CLOUD-GESTÜTZTE INSTANDHALTUNG möglich. Neue Hardware-Funktionen erfordern den Austausch von Komponenten, was durch den modularen Aufbau (MODULARER FAHRZEUGAUFBAU AUS KOMPONENTEN) vereinfacht wird.

Die Vereinfachung der Realisierung ist von besonderer Bedeutung: Indem der Kunde das System selbst in Betrieb nehmen kann, entfallen die Kosten für die Realisierung durch den Hersteller. Außerdem sind neue Geschäftsmodelle wie Miet- oder Leasingmodelle möglich, da die Gesamtkosten stärker vom Betrieb und weniger von der Realisierung abhängen. Die Möglichkeiten zur Funktionserweiterung stellen sicher, dass das System nachträglich an neue Anforderungen angepasst werden kann.

6.2 Einfluss auf die gewünschten Eigenschaften

Tabelle 6.1 zeigt, in welchen Entwurfsmustern Lösungsansätze behandelt wurden, um die gewünschten Eigenschaften zu erreichen.

Einfache und schnelle Realisierung: In den zugehörigen Entwurfsmustern wird die Unabhängigkeit von Installationen in der Umgebung während der Realisierung deutlich: Die Lokalisierung und Feinpositionierung erfolgt ohne künstliche Marker. Mit dem Einrichtungsassistenten wird die Lokalisierung genutzt, um den Nutzer bei der Kartierung, der Einrichtung von Übergabepositionen und der Festlegung von Transportbeziehungen anzuleiten. Die in den Fahrzeuge integrierten Sicherheitsfunktionen ermöglichen den Einsatz ohne Einbau von Schutzeinrichtungen an der Infrastruktur. Mit der dezentralen Auftragsvergabe und der auf die Fahrzeuge verteilten Auftrags- und Stellplatzverwaltung entfällt die Installation eines zentralen Leitrechners.

Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion: Die beschriebenen Entwurfsmuster erläutern drei verschiedene Möglichkeiten der Interaktion: direkt am Fahrzeug durch die integrierten Benutzerschnittstellen, in der Nähe des Systems mithilfe eines Webinterfaces oder aus der Ferne mit dem Interface zur Cloud-Instandhaltung. Durch die Schnittstellen am Fahrzeug wird die Interaktion mit Personen verbessert, die dem Fahrzeug direkt begegnen, beispielsweise auf einer gemeinsam genutzten Wegstrecke. Durch das angepasste Fahrverhalten und die Signalisierung der Fahrtrichtung können Ausweichmanöver und Sicherheitsstopps reduziert werden. Das Webinterface dient der schnellen Einrichtung und Anpassung des Systems und sowie der Diagnose durch die Anzeige des

Systemzustandes. Die Cloud-Instandhaltung ermöglicht die Interaktion mit dem System aus der Ferne wodurch Störungen aus der Ferne diagnostiziert und ggf. behoben werden können.

Tabelle 6.1: Entwurfsmuster und darin berücksichtigte gewünschte Eigenschaften

	Einfache und schnelle Realisierung	Intuitive Mensch-Maschine-Interaktion	Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen	Kooperation mit anderen Systemen	Ressourceneffizienz	Robustheit	Selbstanpassung	Rekonfigurierbarkeit	Erweiterbarkeit
Modularer Systemaufbau mit baugleichen Fahrzeugen					•	•		•	
Trennung zwischen Basisfahrzeug und Wechselmodulen					•			•	•
Modularer Fahrzeugaufbau					•				•
In Fahrzeugen integrierte Sicherheitsfunktionen	•		•					•	
In Komponenten integrierte Sicherheitsfunktionen			•						
Mobile Benutzerschnittstelle		•							
Cloud-gestützte Instandhaltung		•				•			•
Benutzerschnittstelle am Fahrzeug		•	•						
Einrichtungsassistent	•	•							
Lokalisierung an vorhandenen Umgebungsmerkmalen	•					•	•	•	
Pfadplanung durch das Fahrzeug								•	
Reaktion auf Hindernisse & andere Verkehrsteilnehmer				•	•	•			
Gemeinsame aktualisierbare Kartendaten				•	•	•	•		
Feinpositionierung an Übergabepositionen	•							•	
Dezentrale Auftragsvergabe	•					•	•	•	
Verteilte Auftrags- und Stellplatzverwaltung	•					•			

Sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen: Die Integration der Sicherheitsfunktionen in die Fahrzeuge ist Voraussetzung für die schnelle Realisierung. Sie ermöglicht die Rekonfigurierbarkeit des Systems, da keine Änderungen an der Umgebung notwendig sind. Die direkte Integration in die Komponenten erlaubt den effizienten Einsatz der Sicherheitstechnik, da die zentrale Sicherheitssteuerung nur noch koordinierende Aufgaben übernimmt und weniger leistungsfähig sein muss. Durch die Auslagerung von Sicherheitsfunktionen in die Wechselmodule können die dort untergebrachten Sicherheitsfunktionen den jeweiligen Anforderungen angepasst werden: Während ein Wechselmodul mit einfachem Rollenförderer lediglich eine sichere Abschaltung erfordert, sind bei einem Wechselmodul mit Roboterarm optische Schutzeinrichtungen erforderlich, die im Wechselmodul untergebracht werden und die Sicherheitstechnik im Fahrzeug nicht beeinflussen. Neben den Sicherheitsfunktionen, die im Gefahrenfall eingreifen, tragen die Warneinrichtungen am Fahrzeug dazu bei, dass Personen das Fahrzeugverhalten abschätzen können, wodurch sich Risiken reduzieren lassen.

Kooperation mit anderen Systemen: Durch die angepasste Reaktion auf Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmer in Kombination mit gemeinsamen Verkehrsregeln können gegenseitige Blockierungen vermieden werden. Wenn andere FTS Karten- und Verkehrsinformationen teilen, kann die Pfadplanung diese Fahrzeuge und erfasste Störungen bereits in die Planung miteinbeziehen, wodurch weitere Störungen vermieden werden.

Ressourceneffizienz: Die Transportleistung wird durch die Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer und durch die geteilten Kartendaten verbessert, da Blockierungen vermieden werden und die Pfadplanung auf aktuellen Kartendaten erfolgt, wodurch Neuplanungen reduziert werden. Fahrzeuge können durch Skaleneffekte günstiger hergestellt werden, indem eine möglichst hohe Anzahl an baugleichen Fahrzeugen bzw. Komponenten hergestellt wird. Um trotzdem viele Anwendungen bedienen zu können, kommen Wechselmodule zum Einsatz, mit denen Varianten und individuelle Anpassungen realisiert werden können.

Robustheit: Mittels Cloud-gestützter Instandhaltung können durch die frühzeitige Erkennung von Veränderungen Instandhaltungsarbeiten gesteuert und Ausfälle reduziert werden. Durch den Einsatz von baugleichen Fahrzeugen können Ausfälle entweder von anderen Fahrzeugen im System oder durch ein Austauschfahrzeug kompensiert werden: Die dezentrale Steuerung und die auf den Fahrzeugen verteilte Verwaltung von Aufträgen und Stellplätzen erlaubt den einfachen Austausch von Fahrzeugen und eliminiert Störungen, die durch Ausfälle einer zentralen Leitsteuerung auftreten können. Da die Navigation Kartendaten aktualisiert und auf andere Verkehrsteilnehmer reagiert, ist sie robust gegenüber Veränderungen in der Umgebung und Störungen durch andere Verkehrsteilnehmer.

Rekonfigurierbarkeit: Baugleiche Fahrzeuge ermöglichen eine einfache Skalierung des Systems durch das Hinzufügen neuer Fahrzeuge. Die auf den Fahrzeugen stattfindende Pfadplanung erlaubt die Skalierung des Systems, da alle nötigen Ressourcen zur Berechnung der Pfade jeweils lokal verfügbar sind. Durch die dezentrale Auftragsvergabe werden neu hinzugefügte Fahrzeuge automatisch eingebunden. Auch die Anzahl der Übergabestellen kann durch die Erkennung von Übergabepositionen mittels Feinpositionierung angepasst werden. Durch den Austausch von Wechselmodulen und deren Handhabungseinheiten können andere Ladungsträger gehandhabt bzw. andere Übergabepunkte bedient werden. In den Fahrzeugen integrierte Sicherheitstechnik und die Lokalisierung anhand vorhandener Umgebungsmerkmale ermöglichen den Einsatz an einem anderen Einsatzort, ohne stationäre Technik umbauen zu müssen.

Erweiterbarkeit: Neben der Erweiterung der Software durch Upgrades mittels Cloud-gestützter Instandhaltung kann die Hardware durch den Austausch von Wechselmodulen oder Komponenten erweitert werden. So kann ein Wechselmodul ein System z.B. um Handhabungs- oder Identifikationslösungen erweitern.

Selbstanpassung: Verändert sich die Umgebung, wird das Kartenmaterial aktualisiert, wodurch die Lokalisierung robust bleibt und die Pfadplanung den neuen Umgebungsverhältnissen angepasst wird. Die

dezentrale Auftragsvergabe stellt sicher, dass die jeweils am besten geeigneten Fahrzeuge die Aufträge annehmen.

6.3 Analyse der Mustersprache

Die Entwurfsmuster sind in fünf Themen angeordnet: Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und Dezentrale Steuerung. Die Verbindungen mit Vorgänger- und Nachfolgemustern sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Verknüpfung „Führt zu neuem Problem“ zeigt, dass ein Folgemuster ein durch die Lösung entstandenes Problem löst. Die Verknüpfung „Führt zu Spezialisierung“ führt zu Nachfolgemustern, die das Vorgängermuster um eine spezifische Anwendung erweitern. Ziel der Analyse der Muster ist es, die Auswirkungen der Verknüpfungen auf die möglichen Schnittstellen bei der Entwicklung abzuschätzen.

Die Muster zur Modularität und Sicherheit sind nach dem Top-Down-Prinzip angeordnet und führen vom System über das Fahrzeug zu den Komponenten. Die Muster beeinflussen die Hard- und Softwarearchitektur des FTS. Durch die Integration der Sicherheitsfunktionen in die Komponenten müssen die Sicherheitsfunktionen bereits zu Beginn der Entwicklung berücksichtigt werden.

Die Muster zur Mensch-Maschine-Interaktion ergänzen sich gegenseitig. Sie decken die direkte Interaktion mit dem Fahrzeug, die Überwachung des Systems und die Instandhaltung aus der Ferne ab. Die Anordnung ergibt sich aus der mit dem Fahrzeug beginnenden Erarbeitung der Muster. Die zahlreichen Verknüpfungen zwischen Einrichtungsassistent und Navigationsmustern zeigen, dass deren Entwicklung von besonderer Bedeutung ist.

Die Navigationsmuster sind stark miteinander verknüpft. Die Qualität der Lokalisierung und Pfadplanung wird unter anderem von der Aktualität der Kartendaten bestimmt. Feinpositionierung und Reaktion auf Hindernisse sind Spezialfälle der Pfadplanung. Da die Pfadplanung auf den Fahrzeugen stattfindet, kann sie neben der Navigation auch der dezentralen Steuerung zugeordnet werden.

Die Verbindungen zwischen den Mustern der Mensch-Maschine-Interaktion und Navigation zeigen die enge Verknüpfung der Themen: Während der Realisierung liefert der Einrichtungsassistent die für die Navigation benötigten Konfigurationsdaten. Im Betrieb ist die Reaktion auf Hindernisse direkt verbunden mit der Benutzerschnittstelle am Fahrzeug, da aus der Reaktion auf ein menschliches Hindernis eine Interaktion entsteht.

Bei der dezentralen Steuerung folgt aus der dezentralen Auftragsvergabe die verteilte Auftrags- und Stellplatzverwaltung sowie die Pfadplanung durch das Fahrzeug: Das gelöste Problem der Entscheidung über die dezentrale Abarbeitung der Aufträge wirft die Frage auf, ob die Datenhaltung und die Pfadplanung zentral oder dezentral erfolgen. Der geringe Zahl an Verbindungen zeigt, dass die dezentrale Steuerung relativ unabhängig von anderen Komponenten funktioniert. Die Schnittstellen bei der Entwicklung sind übergeordnete ERP-Systeme und die untergeordnete Pfadplanung.

6.4 Fazit

Die Entwurfsmuster zeigen deutlichen Einfluss in der Realisierungsphase von FTS und bei Erweiterungen. Die Realisierung wird stark vereinfacht, so dass sie vom Kunden durchgeführt werden kann und eine wirtschaftliche Erweiterung ermöglicht wird.

Die Gegenüberstellung der Entwurfsmuster mit den gewünschten Eigenschaften zeigt, dass die Entwurfsmuster dazu beitragen, die gewünschten Eigenschaften in verschiedenen Umfängen zu erreichen. Für die Kooperation mit anderen Systemen stellt beispielsweise die Nutzung gemeinsamer Kartendaten einen wichtigen ersten Ansatz dar, während die einfache Realisierung und die Rekonfigurierbarkeit in zahlreichen Mustern umfassend berücksichtigt wird.

Die Mustersprache lässt Rückschlüsse auf die Vorgehensweise bei der Erarbeitung der Entwurfsmuster und Beziehungen der Muster und Themen zu. Bei den vorgestellten Entwurfsmustern werden die Abhängigkeiten zwischen den Funktionen der Mensch-Maschine-Interaktion und der Navigation deutlich sowie der enge Bezug zwischen Modularität und der Integration von Sicherheitsfunktionen.

7 Zusammenfassung

Angetrieben durch individuelle und flexible Ansätze zur Gestaltung von Produktionssystemen im Rahmen von Industrie 4.0 gewinnen FTS in der Intralogistik an Bedeutung. Gleichzeitig steigen auch die Anforderungen, z.B. an Flexibilität, einfache Bedienung und schnelle Realisierung. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Entwicklung von FTS, die diese Anforderungen erfüllen, indem Herausforderungen und Einflüsse analysiert sowie Lösungen in Form von Entwurfsmustern erarbeitet werden.

7.1 Zusammenfassung der Arbeit

Kapitel 2 zeigt das Potential von Technik-Entwicklungen und gibt einen Einblick in die Möglichkeiten, die sich mit FTS ergeben. Entwicklungen im Rahmen von Industrie 4.0, dem Internet der Dinge und Verfahren des maschinellen Lernens sind heute erst in Ansätzen in FTS erkennbar. Die vorgestellten Systeme zeigen, dass der Markt eine große Bandbreite an Systemen bietet. Es werden verschiedene technische Lösungsansätze genutzt und die FTS bedienen unterschiedliche Transportaufgaben. Einfache Systeme können bereits vom Kunden in Betrieb genommen werden – bei komplexen Systemen übernimmt der Hersteller die zeit- und kostenintensive Realisierung: FTS sind heute ein Projektgeschäft. Bei der Entwicklung von FTS besteht die Herausforderung in der Auswahl und Kombination der richtigen Lösungsansätze.

Im dritten Kapitel wird dargestellt, welche Aufgaben und Funktionen in den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklusses von FTS anfallen. Es wird unterschieden zwischen technisch einfachen und komplexen Systemen. Das Kapitel zeigt, dass bei Planung, Realisierung und Änderungen der Anteil an Aufgaben hoch ist, die vom Menschen durchgeführt werden

müssen. Hierdurch entstehen Kosten und die Flexibilität der Systeme wird eingeschränkt. Diese Aufgaben stellen ein Hemmnis für die Realisierung von FTS im Rahmen von Produktgeschäften dar. Werden sie vereinfacht oder automatisiert, wird der Realisierungsaufwand reduziert und die Flexibilität gesteigert: Bisher nur vom Hersteller durchführbare Aufgaben können nun vom Kunden selbst durchgeführt werden.

Kapitel 4 erläutert die gewünschten Eigenschaften und zeigt die Anforderungen der Kunden an FTS. Einige Anforderungen – z.B. an die Sicherheitsfunktionen – werden bereits bei heutigen Systemen erfüllt, während es bei anderen, wie z.B. der intuitiven Mensch-Maschine-Interaktion, der Kooperation mit anderen Systemen oder der Selbstanpassung noch Nachholbedarf gibt.

In Kapitel 5 werden die Probleme und Einflüsse erläutert, die bei der Entwicklung von FTS mit den gewünschten Eigenschaften relevant sind. Ergebnis sind die jeweiligen Lösungsansätze der Entwurfsmuster. Sie sind bei der Entwicklung von FTS hilfreich, da sie das komplexe Entwicklungsproblem in Teilaufgaben gliedern, Lösungen aufzeigen und durch die Verweise untereinander auch die wechselseitigen Einflüsse herausstellen.

Das sechste Kapitel zeigt den Einfluss der Entwurfsmuster auf die Aufgaben und Funktionen, erläutert die Vernetzung der Entwurfsmuster untereinander und zeigt, dass die erarbeiteten Entwurfsmuster einen Beitrag zur Erreichung der gewünschten Eigenschaften leisten. Die starke Vernetzung der Entwurfsmuster zu den Themen Sicherheit und Modularität sowie Mensch-Maschine-Interaktion und Navigation verdeutlicht den Einfluss der Lösungen aufeinander, der bei der Entwicklung berücksichtigt werden muss.

7.2 Ausblick

Für den erfolgreichen Einsatz von FTS in vernetzten und dynamischen Produktionssystemen im Sinne der vierten industriellen Revolution ist die Kooperation der Systemanbieter und Anwender nötig. **Standardisierte Schnittstellen** auf hohem logischen Niveau und der Schutz von Informationen über Systeme hinweg sind zwingend erforderlich.

Sofern FTS flexibel und ohne großen Realisierungsaufwand eingesetzt werden können, ist der Wandel vom Projekt- zum Produktgeschäft möglich. Darin besteht auch großes Potential für **neue Geschäftsmodelle**: Statt ein ganzes System zu kaufen, können einzelne Fahrzeuge gemietet werden oder die Transportdienstleistung selbst wird erworben. Hierdurch werden hohe Investitionen reduziert und der Einsatz von FTF als automatisierte Zeitarbeiter möglich.

Entwurfsmuster basieren auf dem aktuellen Stand der Technik und den Erfahrungen im Rahmen des Forschungsprojektes KARIS PRO. Sie sind damit nicht vollständig und müssen mit **zukünftigen technischen Entwicklungen** sowie Erfahrungen aus der Anwendung der Entwurfsmuster erweitert werden. Werden einheitliche Identifikationslösungen zum Einsatz kommen? Werden in Zukunft mehr Funktionen der Transportfahrzeuge in die Cloud verlagert? Werden sich Standards für Kartendaten und Routeninformationen etablieren, die herstellerunabhängig genutzt werden? Neue technische Entwicklungen verändern sowohl die gewünschten Eigenschaften als auch die in den Entwurfsmustern beschriebenen Lösungsansätze.

Die Entwicklungen in anderen Feldern, wie z.B. der Robotik oder dem autonomen Fahren, lassen vermuten, dass auch das Innovationspotential für Fahrerlose Transportsysteme steigt und für Forschung und Entwicklung weiterhin spannende Fragestellungen zu lösen sind.

Abkürzungsverzeichnis

FTS	Fahrerlose Transportsysteme
FTF	Fahrerlose Transportfahrzeuge
CPS	cyber-physische Systeme
KLT	Kleinladungsträger
RFID	Radio Frequency Identification
ORCA	Optimal Reciprocal Collision Avoidance
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping

Literatur

- Abbenseth, J., F. G. Lopez, C. Henkel und S. Dörr (2017). Cloud-based Cooperative Navigation for Mobile Service Robots in Dynamic Industrial Environments. In: *Proceedings of the Symposium on Applied Computing, SAC '17*, New York, NY, USA, p. 283–288. ACM.
- Adept (2013). Adept Motivity User's Guide. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-03).
- Adept (2014). Adept Lynx Plattform Betriebsanleitung. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-02-27).
- Aethon (2017). How the TUG Automomous Mobile Robot Works. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-05).
- Alexander, C. (1979). *The Timeless Way of Building*. Oxford University Press. Google-Books-ID: H6CE9h1bO8sC.
- Alexander, C., S. Ishikawa und M. Silverstein (1977). *A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction*. OUP USA. Google-Books-ID: hwAHmkt-pk5IC.
- Alpaydın, E. (2008). *Maschinelles Lernen*. Oldenbourg. Google-Books-ID: zsShZ68qJ2AC.
- Andelfinger, V. P. und T. Hähnisch (eds.) (2015). *Internet der Dinge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Arumugam, R., V. R. Enti, L. Bingbing, W. Xiaojun, K. Baskaran, F. F. Kong, A. S. Kumar, K. D. Meng und G. W. Kit (2010, Mai). DAViNCi: A cloud computing framework for service robots. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 3084–3089.
- Baldwin, C. und K. Clark (2006). Modularity in the Design of Complex Engineering Systems. In: *Complex Engineered Systems*, p. 175–205. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Beattie, S., S. Arnold, C. Cowan, P. Wagle, C. Wright und A. Shostack (2002). Timing the Application of Security Patches for Optimal Uptime. In: *LISA*, Volume 2, p. 233–242.
- Beck, K. und W. Cunningham (1987). Using Pattern Languages for Object-Oriented Programs. Technical report.
- Bennewitz, M., W. Burgard, G. Cielniak und S. Thrun (2005, Januar). Learning Motion Patterns of People for Compliant Robot Motion. *The International Journal of Robotics Research* 24(1), p. 31–48.
- Bennewitz, M., W. Burgard und S. Thrun (2002, November). Finding and optimizing solvable priority schemes for decoupled path planning techniques for teams of mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems* 41(2), p. 89–99.
- Berg, J. P. v. d. und M. H. Overmars (2005, August). Prioritized motion planning for multiple robots. In: *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 430–435.
- Biswas, J. und M. Veloso (2010, Mai). WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 4379–4384.
- Bito (2017, Januar). LEO Locative. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-06).
- Borchers, J. O. (2001, Dezember). A pattern approach to interaction design. *AI & SOCIETY* 15(4), p. 359–376.
- Brewer, E. (2012, Februar). CAP twelve years later: How the rules"have changed. *Computer* 45(2), p. 23–29.
- Brewer, E. A. (2000). Towards robust distributed systems.
- Burkert, A. (2014, Oktober). Ökologische Hochautomatisierung für die Fertigung des VW Passat. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116(10), p. 62–67.
- Cattell, R. (2011, Mai). Scalable SQL and NoSQL Data Stores. *SIGMOD Rec.* 39(4), p. 12–27.
- Chandy, K. M., J. Misra und L. M. Haas (1983, Mai). Distributed Deadlock Detection. *ACM Trans. Comput. Syst.* 1(2), p. 144–156.

- Charland, A. und B. Leroux (2011, Mai). Mobile Application Development: Web vs. Native. *Commun. ACM* 54(5), p. 49–53.
- Christensen, L. R. und W. H. Greene (1976, August). Economies of Scale in U.S. Electric Power Generation. *Journal of Political Economy* 84(4, Part 1), p. 655–676.
- Cole, D. M. und P. M. Newman (2006, Mai). Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments. In: *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, p. 1556–1563.
- Colling, D., S. Ibrahimasic, A. Trenkle und K. Furmans (2016, Oktober). Dezentrale Auftragsvergabe und -vergabe für FTF. *Logistics Journal : Proceedings 2016*(10).
- Cunningham, W. (2006). Portland Pattern Repository - Pattern Language. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-06-12).
- Degenhard, W. (2017, November). FM-Trendumfrage zur ‚Automatischen Fördertechnik‘ bei renommierten Anbietern. *FM DAS LOGISTIK-MAGAZIN*.
- Deutsch, P. (1994). The eight fallacies of distributed computing. URL: <http://today.java.net/jag/Fallacies.html>.
- DGUV (2014). DGUV HL FAQ: Dürfen zur manuellen Steuerung (für Notfälle und zur Instandhaltung) an fahrerlosen Flurförderzeugen Smartphones oder Tablet-PC's verwendet werden? [Webseite] (Zugegriffen am 2018-02-18).
- DIN-12100 (2011). DIN EN ISO 12100 - Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Rikikobeurteilung und Risikominderung.
- DIN-13849 (2008). DIN EN ISO 13849-1 Sicherheit von Maschinen–Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen–Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze.
- DIN-14120 (2016). DIN EN ISO 14120 - Sicherheit von Maschinen - Trennende Schutzeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen.
- DIN-1525 (1997). DIN EN 1525 - Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme.
- DIN-31051 (2012, September). DIN 31051 - Grundlagen der Instandhaltung.

- Eisenmann (2015). Bedien- und leistungsoptimierter LogiMover - Eisenmann SE. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-06).
- ENISO9241-11 (2017). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO/DIS 9241-11.2:2016).
- Enright, J. und P. R. Wurman (2011). Optimization and Coordinated Autonomy in Mobile Fulfillment Systems. In: *Automated action planning for autonomous mobile robots*, p. 33–38.
- Feldhusen, J. und B. Gebhardt (2008). *Product Lifecycle Management für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-540-34009-6.
- Finkenzeller, K. (2015, August). *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG. Google-Books-ID: WjZHCgAAQBAJ.
- Fod, A., A. Howard und M. A. J. Mataric (2002). A laser-based people tracker. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, Volume 3, p. 3024–3029.
- Färber, B. (2015). Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern. In: M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, und H. Winner (eds.), *Autonomes Fahren*, p. 127–146. Springer Berlin Heidelberg.
- Fürstenberg, K. und C. Kirsch (2017). Intelligente Sensorik als Grundbaustein für cyber-physische Systeme in der Logistik. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. t. Hompel (eds.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3*, Springer Reference Technik, p. 271–297. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-53251-5_83.
- Furmans, K., F. Schönung und K. R. Gue (2010). Plug-and-work material handling systems. *Progress in material handling research*, p. 132–142.
- Furmans, K., Z. Seibold, A. Trenkle und T. Stoll (2014). Future requirements for small-scaled autonomous transportation systems. In: *Production environments proceedings of the 7th international scientific symposium on logistics, Logistics Journal*.
- Gies, S. und C. Brendes (2012, November). Modularität als Prinzip. *ATZextra 17(6)*, p. 56–63.

- Goodrich, M. A. und A. C. Schultz (2007). Human-robot interaction: a survey. *Foundations and trends in human-computer interaction* 1(3), p. 203–275.
- Goodyear, P. (2005, March). Educational design and networked learning: Patterns, pattern languages and design practice. *Australasian Journal of Educational Technology* 21(1).
- Gubbi, J., R. Buyya, S. Marusic und M. Palaniswami (2013, September). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems* 29(7), p. 1645–1660.
- Hall, E. T. (1966). The hidden dimension.
- Hart, P. E., N. J. Nilsson und B. Raphael (1968, Juli). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4(2), p. 100–107.
- Hecht, R. und S. Jablonski (2011, Dezember). NoSQL evaluation: A use case oriented survey. In: *2011 International Conference on Cloud and Service Computing*, p. 336–341.
- Henry, P., M. Krainin, E. Herbst, X. Ren und D. Fox (2010). RGB-D Mapping: Using depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. In: *In the 12th International Symposium on Experimental Robotics (ISER)*.
- Hrabar, S. (2008, September). 3D path planning and stereo-based obstacle avoidance for rotorcraft UAVs. In: *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 807–814.
- Hunziker, D., M. Gajamohan, M. Waibel und R. D’Andrea (2013, Mai). Rapyuta: The RoboEarth Cloud Engine. In: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 438–444.
- IML, F. (2015). LOCATIVE. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-06).
- IML, F. (2016). Pressemitteilung: Smart Transport Robot – FTS im Kofferformat - Fraunhofer IML. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-01).
- Jobe, W. (2013, Oktober). Native Apps Vs. Mobile Web Apps. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijIM)* 7(4), p. 27–32.
- Jodlbauer, H. (2008). *Produktionsoptimierung*. Springer, Vienna.
- Kagermann, H., W. Wahlster und J. Helbig (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*.

- Kahrstedt, J., H.-J. Engler, R. Dorenkamp und S. Jauns-Seyfried (2012, Dezember). Der Modulare Dieselmotoren-Baukasten von Volkswagen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* 73(12), p. 954–963.
- Kamagaew, A., J. Stenzel, A. Nettsträter und M. t. Hompel (2011, Dezember). Concept of Cellular Transport Systems in facility logistics. In: *The 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications*, p. 40–45.
- Kehoe, B., S. Patil, P. Abbeel und K. Goldberg (2015, April). A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 12(2), p. 398–409.
- Kersten, W., M. Seiter, B. von See, N. Hackius und T. Maurer (2017). *Trends und Strategien in Supply Chain Management und Logistik – Chancen der digitalen Transformation*. Hamburg: DVV Media Group.
- Khakurel, J., S. Pöysä und J. Porras (2016, November). The Use of Wearable Devices in the Workplace - A Systematic Literature Review. In: *Smart Objects and Technologies for Social Good*, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, p. 284–294. Springer, Cham.
- Kirks, T., J. Stenzel, A. Kamagaew und M. ten Hompel (2012). Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme. *Logistics Journal* 2192(9084), p. 1.
- Kleiner, A., D. Sun und D. Meyer-Delius (2011, September). ARMO: Adaptive road map optimization for large robot teams. In: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 3276–3282.
- Kohls, C. (2012). The Path to Patterns: Introducing the Path Metaphor. In: *Proceedings of the 17th European Conference on Pattern Languages of Programs*, EuroPLoP '12, New York, NY, USA, p. 9:1–9:16. ACM.
- Krishna, G. (2015, Februar). *The Best Interface Is No Interface: The simple path to brilliant technology* (01 ed.). Berkeley, California: New Riders.
- Kruse, T., A. K. Pandey, R. Alami und A. Kirsch (2013, Dezember). Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems* 61(12), p. 1726–1743.

- Latombe, J.-C. (2012). *Robot motion planning*, Volume 124. Springer Science & Business Media.
- Lüder, A. (2017). Integration des Menschen in Szenarien der Industrie 4.0. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. t. Hompel (eds.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2*, Springer Reference Technik, p. 559–573. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-53248-5_77.
- Lee, E. A. (2008, Mai). Cyber Physical Systems: Design Challenges. In: *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, p. 363–369.
- Leidinger, B. (2017). *Wertorientierte Instandhaltung: Kosten senken, Verfügbarkeit erhalten*. Springer-Verlag.
- Leonhard, J.-F. (1999, Januar). *Medienwissenschaft: ein Handbuch zur Entwicklung der Medien und Kommunikationsformen*. Walter de Gruyter.
- Marcotte, E. (2011). *Responsive web design: A book apart no 4*. Editions Eyrolles.
- Mertens, P. und D. Barbian (2016, August). Digitalisierung und Industrie 4.0 – Trend mit modischer Überhöhung? *Informatik-Spektrum* 39(4), p. 301–309.
- Meszaros, G. und J. Doble (1997). A pattern language for pattern writing. In: *Proceedings of International Conference on Pattern languages of program design (1997)*, Volume 131, p. 164.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann.
- Mur-Artal, R. und J. D. Tardos (2017). ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics PP(99)*, p. 1–8.
- Nielsen, J. (1994). Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '94, New York, NY, USA, p. 152–158. ACM.
- Nyhuis, P. (2010). *Wandlungsfähige Produktionssysteme*. GITO mbH Verlag. Google-Books-ID: mkmnIsRUVqWc.
- Olson, E. (2015, Mai). M3RSM: Many-to-many multi-resolution scan matching. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 5815–5821.

- Osseiran, A., F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus und M. Fallgren (2014, Mai). Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project. *IEEE Communications Magazine* 52(5), p. 26–35.
- Čáp, M., P. Novák, A. Kleiner und M. Selecký (2015, Juli). Prioritized Planning Algorithms for Trajectory Coordination of Multiple Mobile Robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 12(3), p. 835–849.
- Pacchierotti, E., H. I. Christensen und P. Jensfelt (2005, August). Human-robot embodied interaction in hallway settings: a pilot user study. In: *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005.*, p. 164–171.
- Pacchierotti, E., H. I. Christensen und P. Jensfelt (2006, September). Evaluation of Passing Distance for Social Robots. In: *ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, p. 315–320.
- Podszus, F. und L. Overmeyer (2014). Situative Verhaltenssteuerung für interaktive, fahrerlose Transportfahrzeuge. *Hebezeuge Fördermittel, Forschungskatalog Flurförderzeuge 2014*.
- Pokahr, A., L. Braubach und W. Lamersdorf (2005). Dezentrale Steuerung verteilter Anwendungen mit rationalen Agenten. In: *Kommunikation in Verteilten Systemen (KiVS)*, Informatik aktuell, p. 65–76. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/3-540-27301-8_6.
- Preim, B. und R. Dachselt (2015). Natürliche und gestische Interaktion. In: *Interaktive Systeme*, eXamen.press, p. 461–543. Springer Berlin Heidelberg.
- Rebovich, G. und J. K. DeRosa (2013, April). Patterns of success in systems engineering. In: *2013 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, p. 43–50.
- Redmon, J., S. Divvala, R. Girshick und A. Farhadi (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. p. 779–788.
- Regele, R. und P. Levi (2006, Oktober). Cooperative Multi-Robot Path Planning by Heuristic Priority Adjustment. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 5954–5959.

- Rexroth (2016). Neue Synchronmotoren von Rexroth: Kompakte Bauform für höhere Werkstückqualität - Bosch Rexroth Deutschland. [Webseite] (Zugegriffen am 2018-02-23).
- SafeLog (2017). SafeLog – Safe human-robot interaction in logistic applications for highly flexible warehouses. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-02-27).
- Sanchez, R. (2002, Dezember). Using modularity to manage the interactions of technical and industrial design. *Academic Review* 2(1), p. 8–19.
- Schebek, L., E. Abele, A. Campitelli, B. Becker und M. Joshi (2016). *Praxisleitfaden: Ressourceneffizienz in der Produktion - Zerspanungsprozesse*. Hessen Trade & Invest GmbH. Google-Books-ID: En9SnQAACAAJ.
- Schäfer, S. (2016). Fahrerloses Transportsystem im Lager: WEASEL® - SSI SCHÄFER. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-06).
- Schiedermeier, G. (2013). Serviceroboter - Chancen und Grenzen.
- Schlingloff, H., M. Friske und H. Barthel (2008). Verifikation und Test des PROFIsafe-Sicherheitsprofils. *Softwaretechnik-Trends* 28(1).
- Schmitz, A. (2013). Synthese und Definition des Begriffes "Dezentralität".
- Scholtz, J. (2003). Theory and evaluation of human robot interactions. In: *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. 2011*, © Copyright by authors, Published under agreement with IARIA - www.iaria.org *Journal on Advances in Intelligent Systems, vol 4 no 3 & 4, year 2011*, <http://www.iaria.org>.
- Schroer, W. D.-I. (2010, Mai). Vorrichtung zum Aufnehmen und Abgeben von Stückgut an ein fahrerloses Transportfahrzeug. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-03-06). International Classification B65G47/54; Cooperative Classification B65G47/54, B65G65/00; European Classification B65G47/54.
- Schröppel, M., M. Weber und K.-H. Wehking (2011, August). Monofunktionale autonome Transporteinheiten. *Logistics Journal: Proceedings* 07(1).
- Seemann, A. (2017, August). FM-Trendbericht: Flurförderzeuge. *FM DAS LOGISTIK-MAGAZIN*.
- Shed, S. (2017, Januar). Amazon now has 45,000 robots in its warehouses. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-09-25).

- Shi, D., E. G. C. Jr, B. Goldiez, A. Donate, X. Liu und D. Dunlap (2008, Mai). Human-aware robot motion planning with velocity constraints. In: *2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems*, p. 490–497.
- SICK (2016, Februar). S300 Sicherheits-Laserscanner (Betriebsanleitung). [Webseite] (Zugegriffen am 2018-02-18).
- Stefano, A. D., L. L. Bello und O. Mirabella (1997, September). Virtual Plant: a distributed environment for distance monitoring and control of industrial plants. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems*, p. 445–449.
- Still (2017). iGo neo CX 20. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-08-27).
- Strassner, M. und E. Fleisch (2005, Februar). Innovationspotenzial von RFID für das Supply-Chain-Management. *Wirtschaftsinformatik* 47(1), p. 45–54.
- Sun, D., F. Geißer und B. Nebel (2016, Oktober). Towards effective localization in dynamic environments. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, p. 4517–4523.
- Sun, D., A. Kleiner und B. Nebel (2014, Mai). Behavior-based multi-robot collision avoidance. In: *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, p. 1668–1673.
- Susto, G. A., A. Schirru, S. Pampuri, S. McLoone und A. Beghi (2015, Juni). Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 11(3), p. 812–820.
- Tanneberger, V. und M. Paetz (2012). Information directly accessible. *ATZextra worldwide* 17(6), p. 72–75.
- Thanheiser, S., L. Liu und H. Schmeck (2008). Selbstorganisation durch Dezentralität–Dezentralität durch Selbstorganisation: Auf dem Weg zu einem ‚organischen‘ Management von Unternehmens-IT.
- Thrun, S. (2002). *Robotic Mapping: A Survey*.
- Thrun, S., W. Burgard und D. Fox (2005). *Probabilistic robotics*. MIT press.
- Tipaldi, G. D., D. Meyer-Delius und W. Burgard (2013, Dezember). Lifelong localization in changing environments. *The International Journal of Robotics Research* 32(14), p. 1662–1678.

- Tomatis, N. (2011). Bluebotics: Navigation for the clever robot [Entrepreneur]. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 18(2), p. 14–16.
- Tomatis, N. (2015, Juli). Localization, Planning, Control, Missioning and Traffic Management.
- Trenkle, A., Z. Seibold und T. Stoll (2013, Oktober). Safety requirements and safety functions for decentralized controlled autonomous systems. In: *2013 XXIV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, p. 1–6.
- Trenkle, A., Z. Seibold, T. Stoll und K. Furmans (2013, Oktober). FiFi – Steuerung eines FTF durch Gesten- und Personenerkennung. *Logistics Journal* 2013(10).
- Ullrich, G. (2014). *Fahrerlose Transportsysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Ulrich, K. (1995, Mai). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy* 24(3), p. 419–440.
- van den Berg, J., S. J. Guy, M. Lin und D. Manocha (2011). Reciprocal n-body Collision Avoidance. *Robotics Research*.
- van der Meij, H. und J. van der Meij (2014, September). A comparison of paper-based and video tutorials for software learning. *Computers & Education* 78, p. 150–159.
- VDI-2510 (2005). Fahrerlose Transportsysteme (FTS).
- VDI-2510-1 (2009). Infrastruktur und periphere Einrichtungen für Fahrerlose Transportsysteme (FTS).
- VDI-2710 (2010). Ganzheitliche Planung von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS).
- VDI-2710-3 (2014). Einsatzgebiete der Simulation für Fahrerlose Transportsysteme (FTS).
- VDI-4451-7 (2005). Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) - Leitsteuerung für FTS.
- Velagapudi, P., K. Sycara und P. Scerri (2010, Oktober). Decentralized prioritized planning in large multirobot teams. In: *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 4603–4609.

- Waibel, M., M. Beetz, J. Civera, R. D'Andrea, J. Elfring, D. Gálvez-López, K. Häussermann, R. Janssen, J. M. M. Montiel, A. Perzylo, B. Schießle, M. Tenorth, O. Zweigle und R. V. D. Molengraft (2011, Juni). RoboEarth. *IEEE Robotics Automation Magazine* 18(2), p. 69–82.
- Westkämper, E. (2013). Zukunftsperspektiven der digitalen Produktion. In: E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu, und J. Lentjes (eds.), *Digitale Produktion*, p. 309–327. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9_24.
- Weyns, D. (2010). Architectural Design of Multi-Agent Systems. In: *Architecture-Based Design of Multi-Agent Systems*, p. 55–92. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-01064-4_4.
- Wittenstein (2017). WITTENSTEIN iTAS® - Flexibles und voll skalierbares Servoantriebssystem für FTS von WITTENSTEIN cyber motor - WITTENSTEIN cyber motor GmbH. [Webseite] (Zugegriffen am 2017-08-28).
- Wolfe, D. G., G. F. Lucas und M. Swaney (2014, November). *Monitoring, diagnostic and tracking tool for autonomous mobile robots*. Google Patents.
- Wrtil, P. (2007, Juni). Technology of safe Drives. In: *2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Volume 1, p. 155–161.
- Wurll, C. (2017). Das bewegliche Lager auf Basis eines Cyber-physischen Systems. In: B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, und M. t. Hompel (eds.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3*, Springer Reference Technik, p. 151–177. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-53251-5_12.
- Wurman, P. R., R. D'Andrea und M. Mountz (2008, March). Coordinating Hundreds of Cooperative, Autonomous Vehicles in Warehouses. *AI Magazine* 29(1), p. 9.
- Xanthopoulos, S. und S. Xinogalos (2013). A Comparative Analysis of Cross-platform Development Approaches for Mobile Applications. In: *Proceedings of the 6th Balkan Conference in Informatics*, BCI '13, New York, NY, USA, p. 213–220. ACM.
- Zanella, A., N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista und M. Zorzi (2014, Februar). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal* 1(1), p. 22–32.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Technologiekonzepte und Relevanz für FTS	3
1.2	Fragestellungen der vorliegenden Arbeit	5
2.1	LEO Locative von Bito: Abstreifen von KLTs an einer Übergabestation (links), Bodenmarker mit Stationsinformation (Mitte) und Transportfahrzeug (rechts)	12
2.2	Weasel von SSI Schäfer (links) bei der Aufnahme eines Ladungsträgers während der Fahrt (rechts)	13
2.3	Das Doppelkufensystem (links) und der von Eisenmann industrialisierte LogiMover (rechts)	14
2.4	Ware-zur-Person Kommissioniersystem von Amazon Robotics (früher Kiva Systems)	15
2.5	Smart Transportation Robot im Einsatz bei BMW in Wackersdorf . .	16
2.6	Adept-Lynx Plattform mit verschiedenen Handhabungsmodulen (Quelle: Omron Adept)	17
2.7	Verschiedene Konfigurationen des Aethon TUG mit Differentialantrieb	18
2.8	Zellulares Transportsystem frei navigierend im FTS-Betrieb (links) und im Shuttlebetrieb auf Regalschienen (rechts)	19
2.9	Betriebsarten und Funktionen von FiFi	20
2.10	Die Vision des Forschungsprojektes KARIS PRO	21
2.11	Pilotanwendungen von KARIS PRO bei Bosch (links) und Audi Sport (rechts)	22
2.12	Grundaufbau und Sicherheitsfunktionen eines KARIS PRO Fahrzeuges	22

3.1	Produktlebenszyklus für konventionelle FTS nach Westkämper (2013), Feldhusen und Gebhardt (2008), VDI-2710 (2010) und Lüder (2017)	28
4.1	Gewünschte Eigenschaften für Fördertechnik (grau) und Ergänzungen für Fahrerlose Transportsysteme (grün)	45
5.1	Struktur der Entwurfsmuster in Alexander et al. (1977, S. 289)	54
5.2	Beziehungs-Netzwerk der Entwurfsmuster in Alexander (1979)	55
5.3	Übersicht der Entwurfsmuster	58
5.4	Integrale Architektur und modulare Architekturen (Slot, Bus und Sectional) am Beispiel eines Anhängers (Ulrich 1995)	61
5.5	Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zu Modularität	62
5.6	Nach integralen Ansätzen für die kundenindividuelle Anwendung hergestelltes Transportsystem (Bild: SEW eurodrive)	63
5.7	Modularität auf Systemebene durch baugleiche Fahrzeuge für verschiedene Anwendungen, hier beim Transport von Kleinladungsträgern (links) und Warenkörben (rechts)	65
5.8	Integriertes Fahrzeug ohne Möglichkeit zum Austausch von Handhabungseinheiten (Bild: Grenzebach)	67
5.9	Die Grundfunktionen sind in der Lynx-Plattform integriert und die Handhabungseinheiten für verschiedene Ladungsträger in den Wechselmodulen (Bild: Omron Adept).	68
5.10	FTS-Interne Steuerung nach integralem Ansatz (Quelle: VDI 2510)	70
5.11	Modulare Architektur mit in Komponenten integrierten Funktionen	72
5.12	Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Sicherheit	75
5.13	Schutzzäune und Lichtgitter trennen den Arbeitsbereich zwischen Mensch und FTS (Bild: Audi AG)	76
5.14	Sicherheitsfunktionen werden direkt in die Module integriert	80
5.15	Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Mensch-Maschine-Interaktion	83
5.16	Kartenbasierte Darstellung von Informationen zu den Fahrzeugpositionen und -zuständen mit Anzeige der geplanten Pfade (oben) und Detailinformationen zu einem Fahrzeug nach Auswahl (unten)	89

5.17	Anbindung des FTS an ein Cloud-System zur Instandhaltung aus der Ferne	93
5.18	Verschiedene Navigationsverfahren für FTS aus Wurll (2017) nach Tomatis (2015)	100
5.19	Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur Navigation	101
5.20	Entwurfsmuster und gewünschte Eigenschaften zur dezentralen Steuerung	116
6.1	Produktlebenszyklus für FTS mit von Entwurfsmustern betroffenen Phasen (grün) Westkämper (2013), Feldhusen und Gebhardt (2008), VDI-2710 (2010) und Lüder (2017)	123

Tabellenverzeichnis

2.1	Merkmale der vorgestellten Transportsysteme	24
3.1	Aufgaben der Planungs- und Realisierungsphase für Low-Cost und High-Performance Systeme	34
3.2	Aufgaben und Funktionen während des Betriebs	39
3.3	Aufgaben bei Instandhaltung, Änderung und Erweiterung	42
5.1	Gegenüberstellung von Sicherheitsfunktionen in Infrastruktur und im Fahrzeug	77
5.2	Nutzerrollen nach (Scholtz 2003) und zugehörige Aufgaben für ein FTS	90
6.1	Entwurfsmuster und darin berücksichtigte gewünschte Eigenschaften	127

Neben Robustheit ist Flexibilität eine grundlegende Anforderung an Materialflusssysteme. Hier bieten sich Fahrerlose Transportsysteme (FTS) als flexible Alternative zu starrer Fördertechnik an. Deren vielfältige Einsatzbereiche reichen von der Lagerung und Kommissionierung bis zur Produktionsverkettung und Materialversorgung am Band.

Am Markt sind Systeme mit unterschiedlichem Funktionsumfang verfügbar: von spurgeführten „Low-Cost“-Systemen bis hin zu leistungsfähigen, frei navigierenden Systemen. Die vom Kunden gewünschten Eigenschaften werden von den am Markt verfügbaren Systemen nicht umfassend erfüllt. Beispielsweise ist bei einigen Systemen die Realisierung durch den Kunden möglich, allerdings fehlt die Sicherheitstechnik für den Transport von schweren Ladungsträgern, während andere mit Sicherheitstechnik ausgestattet sind, jedoch eine Inbetriebnahme durch den Hersteller erfordern.

In dieser Arbeit werden Probleme und Lösungsansätze in Form von Entwurfsmustern aufgezeigt. Die Muster basieren auf dem Stand der Technik, aktuellen technischen Entwicklungen und von Kunden gewünschten Eigenschaften. Sie betrachten die Themen Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und dezentrale Steuerung. Die Entwurfsmuster dienen einerseits der Strukturierung von Lösungsansätzen und sind andererseits ein Hilfsmittel zur Entwicklung Fahrerloser Transportsysteme.