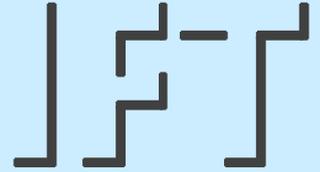


Berichte aus dem

**INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK
UND LOGISTIK**

Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz

UNIVERSITÄT STUTTGART



Markus Schröppel

**Systematische Entwicklung und Prototypenrealisierung
von neuartigen zukünftigen Generationen fahrerloser
Transportfahrzeuge und deren Komponenten für den
innerbetrieblichen Transport**

Juni 2023

Systematische Entwicklung und Prototypenrealisierung von neuartigen zukünftigen Generationen fahrerloser Transportfahrzeuge und deren Komponenten für den innerbetrieblichen Transport

Systematic development and prototype realization of novel future generations of
automated guided vehicles and their components for in-plant transportation

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Markus Schröppel
aus Stuttgart-Bad Cannstatt

Hauptberichter: Univ.-Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl-Heinz Wehking
Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz
Mitberichte: Univ.-Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Willibald Günthner

Tag der mündlichen Prüfung: 13.06.2023

Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart
2023

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik IFT der Universität Stuttgart.

Besonders danken möchte ich meinem Doktorvater, dem ehemaligen Institutsleiter des IFT, Herrn Univ.-Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl-Heinz Wehking für die fachliche Betreuung der Arbeit. Durch sein großes Engagement und das Einwerben entsprechender Fördermittel war es erst möglich, die in der Arbeit beschriebenen Idee weiter zu entwickeln und entsprechende Prototypen umzusetzen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Univ.-Prof. Robert Schulz, dem Institutsleiter des IFT und Herrn Univ.-Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Willibald Günthner, ehemaliger Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der technischen Universität München für die Übernahme des Mitberichts sowie Herrn Univ.-Prof. Hans-Christian Reuss, Inhaber des Lehrstuhls Kraftfahrzeugmechatronik am Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Institut, die mich bei der Durchführung der verschiedenen Projekte und dem Aufbau der Prototypen tatkräftig unterstützt haben und immer mit gutem Rat zur Seite standen.

Stuttgart, 2023

Markus Schröppel

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit berichtet über Forschungen und Entwicklung im Bereich der Fahrerlosen Transportsysteme. Diese sind flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport in innerbetrieblichen Logistik- und Produktionssystemen ist.

Zu Beginn der Arbeit schildert der Verfasser die historische Entwicklung der Fahrerlosen Transportsysteme und beschreibt deren Marktdurchdringung.

Heute haben Fahrerlose Transportfahrzeuge in der Logistik einen besonderen Stellenwert, da sie wesentlich zur Automatisierung in allen Gebieten der innerbetrieblichen Logistik im Bereich der Transport und Handhabungsfunktionen beitragen.

Um weitere Entwicklungen anzustoßen und damit die Marktdurchdringung weiter zu erhöhen beschäftigt sich die Arbeit im Kern mit verschiedenen systematischen Neuentwicklungen und der dafür notwendigen Forschung im Bereich der Fahrzeuge, Komponenten und Systeme von Fahrerlosen Transportfahrzeugen, vor allem um die Kosten der Systeme deutlich zu senken (z.B. Reduzierung der Fahrzeugkosten von 100.000 bis 150.000€ auf 30.000€ für ein Fahrerloses Transportsystem für den Palettentransport und deren Handhabung). Dies wird an einer Reihe von Beispielen, wie dem automatischen Transport von Kleinladungsträgern (Projekt KaTe), dem sogenannten Doppelkufensystem zum Transport und der Handhabung von Paletten, dem Riegel-FTF zum Transport von Regal- und Warenkorbgestellen, dem Groß-FTF der mobilen Montageinsel für zukünftige nicht getaktete Automobilproduktionen und dem FTF-Scooty als modulare Transportplattform dargestellt.

Im Rahmen der Arbeit hat sich gezeigt, dass eine neue Kategorisierung der Fahrzeuge in zukünftig drei Funktionsklassen sinnvoll wäre. Diese drei Funktionsklassen sind:

- Monofunktionale FTF

Konzipiert um eine konkrete einzelne Aufgabe zu erfüllen, verfügen nicht über komplexe variable Lastaufnahmeeinrichtungen, Sensorik und Navigationstechnik ist auf ein Minimum reduziert

- Multifunktionale FTF

Können sich z.B. durch variable Lastaufnahmemittel an verschiedene Aufgaben anpassen, verfügen über komplexe Sensorik, Sicherheitstechnik, Navigationstechnik etc.

- Modulare FTF

Lassen sich in Form eines Baukastensystems individuell gestalten und so an verschiedene Aufgaben anpassen

Mit dieser neuen Kategorisierung könnte die alte Definition von Fahrerlosen Transportsystemen der VDI Richtlinie 2510 ersetzt werden. Durch diese Umstrukturierung können zukünftige Entwicklungen Fahrerloser Transportfahrzeuge und damit Transportsysteme zielgerichteter auf verschiedene Anwendungsbereiche funktional angepasst und somit, wie an Beispielen in dieser Arbeit gezeigt, Kosten gesenkt werden. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte zur Weiterentwicklung der Fahrerlosen Transportsysteme.

Short Summary

This paper reports on research and development in the field of automated guided vehicles. These are floor-based conveyor systems with automatically controlled vehicles whose primary task is the transport of materials in internal logistics and production systems.

At the beginning of the paper, the author describes the historical development of automated guided vehicles and their market penetration.

Today, automated guided vehicles have a special significance in logistics, as they contribute significantly to automation in all areas of in-plant logistics in the field of transport and handling functions.

In order to initiate further developments and thus to further increase the market penetration, the work is mainly concerned with various systematic new developments and the necessary research in the area of vehicles, components and systems of automated guided vehicles, especially in order to significantly reduce the costs of the systems (e.g. reduction of the vehicle costs from 100,000 to 150,000€ towards 30,000€ for an automated guided vehicle system for pallet transport and handling). This is illustrated by a number of examples, such as the automatic transport of small load carriers (KaTe project), the so-called Independent Fork System (LogiMover) for the transport and handling of pallets, the "Riegel" AGV concept for the transport of shelf and shopping basket racks, the large-scale AGV of the mobile assembly island for future non-cyclical automobile production and the FTF-Scooty as a modular transport platform.

In the course of the work, it became apparent that a new categorisation of the vehicles into three functional classes would make sense in the future. These three functional classes are:

- **Monofunctional FTF**
Designed to fulfil a specific individual task, do not have complex variable load handling devices, sensor and navigation technology is reduced to a minimum.
- **Multifunctional AGVs**
Can adapt to different tasks, e.g. through variable load handling devices, have complex sensor technology, safety features and equipment, navigation technology, etc.

- Modular AGVs

Can be individually configured in the form of a modular construction system and thus adapted to different tasks.

This new categorisation could replace the old definition of automated guided vehicles in VDI guideline 2510. Through this restructuring, future developments of automated guided vehicles and thus transport systems can be functionally adapted to different areas of application in a more targeted manner and thus, as shown in examples in this paper, costs can be reduced.

The thesis ends with a summary and an outlook on future research priorities for the further development of automated guided vehicles.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	14
1 Einleitung	16
1.1 Definition Fahrerloses Transportsystem (FTS) und Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF)	16
1.2 Die FTF und deren Entwicklung im Laufe der Zeit	17
1.3 Ziel der Arbeit	21
2 Stand der Technik und Forschung	23
3 Systematische Weiterentwicklung der Systeme	35
4 Vorgehensweise	37
5 Monofunktionale FTF	40
5.1 Monofunktionale Transporteinheiten	40
5.2 Kleine autonome Transporteinheiten	42
5.3 Doppelkufensystem	45
5.3.1 Mechanischer Aufbau des Doppelkufensystems.....	51
5.3.2 Steuerung der beiden Kufen	54
5.3.3 Koordination der Bewegungsabläufe.....	58
5.3.4 Optischer Spurführungssensor.....	62
5.3.5 Weiterentwicklung der Spurführungssensoren	63
5.3.6 Auswertung der Sensordaten	72
5.3.7 Kinematischer Aufbau des Fahrwerks.....	74
5.3.8 Regelstruktur der einzelnen Kufe	76
5.3.9 Bahn- bzw. Pfadplanung	78
5.4 Sensorverfahren für das Doppelkufensystem	87
5.4.1 Sensorik zur Ermittlung der Ausrichtung der Kufen zueinander	88

5.4.2	Sensorik zur Ermittlung der Lage und Ausrichtung der Palette	90
6	Multifunktionale Fahrzeuge	98
6.1	Riegel FTF	99
6.2	Mobile Montageinsel für die Automobilproduktion	107
6.3	Indoor-Navigationssysteme	113
7	Modulare Fahrzeuge / Baukastenfahrzeuge	116
7.1	Komponenten modularer FTF	118
7.2	Konzeptentwicklung modulares FTF	130
7.3	Modulare Fahrzeuge verschiedener Hersteller	138
7.3.1	Beispiel FTF Agile1500 des Herstellers Comau	138
7.3.2	Beispiel FTF VARIO MOVE von ek robotics	140
7.3.3	Beispiel FTF CALL THE DONKEY der Firma imetron	141
8	Zusammenfassen der Ergebnisse über die Forschung und Entwicklung im Bereich Mono- und Multifunktionale sowie Modulare FTF	144
9	Ausblick	148
10	Literaturverzeichnis	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Distributionszentrum mit den Funktionsbereichen der Logistik und einer Produktionsanlage (Quelle [WEH20]).....	18
Abbildung 2-1:	Prototyp des Multishuttle [IML10-1].....	24
Abbildung 2-2:	Frei verfahrbare Variante, das Multishuttle Move [IML10-1].....	26
Abbildung 2-3:	Mögliche Variante eines kompletten Multishuttle Move Systems mit Lagerbereich im Hintergrund und Kommissionierplätzen im vorderen Bereich [IML10-1].....	28
Abbildung 2-4:	Prototyp des KARIS Systems [INT18].....	30
Abbildung 2-5:	Darstellung der verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten [INT18]	30
Abbildung 2-6:	KARIS-Fahrzeuge eingesetzt für Einzeltransporte [INT18]	32
Abbildung 2-7:	Drive Unit des Kiva Systems [AMA22]	33
Abbildung 3-1:	Beispielhafte Darstellung einiger Fahrerloser Transportfahrzeuge [WEH20].....	36
Abbildung 5-1:	erster Prototyp „Kleine automatische Transporteinheit“ (KaTe).....	43
Abbildung 5-2:	optisch Spurgeführte KaTe [GÖT18].....	43
Abbildung 5-3:	Technischer Aufbau von KaTe (Ansicht von unten)	44
Abbildung 5-4:	EUR-Palette [DIN13] (links Ansicht von unten, rechts Seitenansicht)	45
Abbildung 5-5:	Freie Einfahröffnung an einer Europalette.....	46
Abbildung 5-6:	Doppelkufensystem mit Europalette.....	47
Abbildung 5-7:	Drehgestell einer Kufe.....	48
Abbildung 5-8:	Ein Antrieb für Fahren (links) und Heben (rechts)	49
Abbildung 5-9:	Möglichkeiten der Bewegung im Kufenpaar mit Palette	49
Abbildung 5-10:	Farbige Richtungsmarkierungen an der Kufe	50
Abbildung 5-11:	Mechanische Komponenten eines Doppelkufen-Fahrzeugs [IFT11].....	51
Abbildung 5-12:	Detailansicht eines Drehschemels [IFT11]	52
Abbildung 5-13:	Kufenpaar mit Hauptmaßen [COL11].....	53
Abbildung 5-14:	Steuerungshardware des Doppelkufensystems bei einem Testaufbau ..	55

Abbildung 5-17: Signalfluss in der Fahrzeugsteuerung einer einzelnen Kufe [COL11]	56
Abbildung 5-18: Systemübersicht der Lenkungsregelung [COL12]	57
Abbildung 5-19: Ausrichtung der Fahrzeuge im Kufenpaar [COL12].....	60
Abbildung 5-20: Aufbau eines Datenpakets zur Kommunikation [COL13]	61
Abbildung 5-21: Bildschirmfoto der Leitsteuerungs-Software	61
Abbildung 5-22: Optischer Spurführungssensor	62
Abbildung 5-23: Funktionsweise Spurerkennung [COL11]	63
Abbildung 5-24: Variable Sensoraufhängung	64
Abbildung 5-25: Versuchsaufbau für Spursensoren	65
Abbildung 5-26: Ausleuchtung der Spur mit Infrarotlicht	66
Abbildung 5-27: Theoretische Beleuchtungs- und Detektionsbereiche [COL11].....	67
Abbildung 5-28: Beispielhaftes Helligkeitsprofil eines Spursensors [COL11]	68
Abbildung 5-29: Detektierter Helligkeitsverlauf bei Verschiebung über die Spur [COL11]	69
Abbildung 5-30: Normierte Abdunklungskurven [COL11].....	71
Abbildung 5-31: Übertragungsformat für die Sensordiagnose [COL11]	73
Abbildung 5-32: Auswertung der empfangenen Sensordaten [COL11].....	74
Abbildung 5-33: Kinematisches Ersatzmodell eines Fahrzeugs [COL12].....	75
Abbildung 5-34: Regelstruktur eines Einzelfahrzeugs mit Spurführung [COL12]	77
Abbildung 5-35: Funktionsprinzip des Lasertriangulationssensors [LÖF12].....	89
Abbildung 5-36: Leuze Lasertriangulationssensor [LEU13].....	89
Abbildung 5-37: Anordnung der drei Lasertriangulationssensoren am Doppelkufensystem	90
Abbildung 5-38: Lage der Palette zum Doppelkufensystem [GRO13].....	91
Abbildung 5-39: PMD CamBoard nano (links), Versuchsaufbau (rechts) [GRO13].....	92
Abbildung 5-40: Schematische Darstellung Versuchsaufbau Versuch 1 [PES13].....	92
Abbildung 5-41: Messbilder aus Versuch 1 [PES13]	93
Abbildung 5-42: Versuchsaufbau 2 [PES13]	94

Abbildung 5-43: CamBoard nano mit Haltevorrichtung [PES13]	94
Abbildung 5-44: Bilder Versuchsreihe 2 [PES13]	94
Abbildung 5-45: Zusammengefügte Ansicht [PES13].....	95
Abbildung 5-46: Versuchsaufbau zur Durchfahrt einer Palette [GRO13].....	95
Abbildung 6-1: Riegelkonzept des IFT [POP18].....	100
Abbildung 6-2: Beispielansicht Montagestation mit Regalmodulen und Regalbediengerät [HOF22].....	101
Abbildung 6-3: FTF Shelfie beim Transport eines Regalmoduls	103
Abbildung 6-4: FTF Shelfie beim Transport eines Warenkorbgestells.....	104
Abbildung 6-5: Prinzipieller Aufbau des Riegel FTF (Gehäuse transparent dargestellt).....	104
Abbildung 6-6: Schnittbild selbstentwickeltes Lenk- und Fahrmodul	105
Abbildung 6-7: Riegel-FTF dockt das Regalmodul an das Mini-Regalbediengerät an .	106
Abbildung 6-8: erster Entwurf der mobilen Montageinsel	108
Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Absetzen des Fahrzeuges [HOF22]	110
Abbildung 6-10: Prototyp der mobilen Montageinsel in der Arena2036.....	111
Abbildung 6-11: Durch Vermessung eines Fahrzeuges mit SLAM-Algorithmen erstellte Karte [LEJ22].....	113
Abbildung 6-12: Prinzip der UWB-Ortung.....	115
Abbildung 7-1: FTF Baukasten der Firma FlexQube [FLE21].....	118
Abbildung 7-2: FTF Antriebssystem von Gefeg-Neckar in verschiedenen Größen [GEF22].....	119
Abbildung 7-3: Antriebsbaukasten ArgoDrive von ebm-papst für verschiedene Radlasten [EBM22]	120
Abbildung 7-4: FTF mit einfachem LAM (KaTe Firma Götting) [GÖT18] links und FTF mit automatisierter Übergabe [MKT22] rechts	120
Abbildung 7-5: Kontaktbehaftete (links) [VAL20] und berührungslose (rechts) [CON22] Energieübertragung zum Laden der Systeme	121
Abbildung 7-6: Optische Spurführung [GÖT16].....	122

Abbildung 7-7: Durch SLAM Verfahren erzeugte Karte [LEJ22].....	123
Abbildung 7-8: Personensicherer Laserscanner [SIC22].....	124
Abbildung 7-9: Sicherer Ultraschallsensor [PEP22]	125
Abbildung 7-10: ToF-Kamera zur Hinderniserkennung [IFM22]	126
Abbildung 7-11: Regalgang aus Sicht eines Lidar Sensors [TOY22]	127
Abbildung 7-12: Spurführungs- und Positionierungssensorik des FTF Shelfie.....	128
Abbildung 7-13: Vom IFT entwickeltes FTF Scooty.....	131
Abbildung 7-14: Fahr-Lenk Antrieb mit Lenkmotor FTF Scooty.....	132
Abbildung 7-15: Demonstrator Intelligenter Boden der Firma Bosch Rexroth, aufgebaut aus einzelnen Elementen mit integrierter LED-Lichtleiste und Gewichtssensorik in der Arena2036 Versuchshalle	133
Abbildung 7-16: Sekundärspule des Fahrzeugs mit 4 Sensespulen	134
Abbildung 7-17: Akku von Elektrowerkzeugen als Energiespeicher im Fahrzeug	135
Abbildung 7-18: einer der Fahrtenantriebe des FTF Scooty	136
Abbildung 7-19: FTF Agile 1500 des Herstellers Comau [COM21]	139
Abbildung 7-20: Varianten verschiedener LAM [COM21]	140
Abbildung 7-21: Variationsmöglichkeiten des FTF Systems VARIO MOVE [EKR21-1] .	141
Abbildung 7-22: Grundmodul des FTF CALL THE DONKEY [DON21]	142
Abbildung 7-23: Lastmodul für KLT-Trolleys (links) und Paletten (rechts) [DON21].....	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der FTS (monofunktional links vs. Multifunktional Mitte und rechts) ..	41
Tabelle 2: Hauptmaße der Doppelkufen-Fahrzeuge [COL11].....	53
Tabelle 3: Programme im Doppelkufensystem [COL12].....	59
Tabelle 4: Freiheitsgrade im Ebenen [COL12].....	76
Tabelle 5: Messergebnisse bei Versuch 3 mit Aufnahmeabstand 30 cm [PES13].....	96

Abkürzungsverzeichnis

AGV	Automatic Guided Vehicles
Akku	Akkumulator
BLDC	Brushless DC Motor
Bzw.	Beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EE	Einzelelement
EHB	Elektrohängebahn
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Global Positioning System
ID	Identifikator oder Kennung
IEH	Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
IFL	Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
IFT	Institut für Fördertechnik und Logistik
IML	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
IT	Informationstechnik
KARIS	Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistik-System
KaTe	Kleine automatische Transporteinheit
KLT	Kleinladungsträger

LAM	Lastaufnahmemittel
LAN	Local Area Network
LED	light-emitting diode
Lidar	light detection and ranging
m	Meter
MFS	Materialflusssystem
mm	Millimeter
NFC	Near Field Communication
PC	Personal Computer
prim.	primär
RBG	Regalbediengerät
RFID	Radio Frequency Identification
sog.	So genannten
SPS	speicherprogrammierbare Steuerungen
ToF	time-of-flight
UWB	Ultra-Wideband
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vgl.	Vergleiche
WAN	Wide Area Networks
WLAN	Wireless LAN
z. B.	zum Beispiel
ZIM	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand
ZTS	Zellularen Transportsysteme

1 Einleitung

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Automatisierung der Intralogistik mittels Fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) und dem Einsatz in Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) für die innerbetriebliche Logistik von Industrie, Handel, Produktion etc. Die Fahrerlosen Transportfahrzeuge sind erstmals in den 1950er Jahren in den USA zur Automatisierung des Materialflusses für Transport- und Handhabungsaufgaben eingesetzt worden. Sie wurden stetig sowohl im Bereich der Hardware der Fahrzeuge, der Steuerungs- und Regelungstechnik und der Navigation als auch im Bereich der verwendeten Software weiterentwickelt. Diese Entwicklungsstufen werden in Kapitel 1.2 beschrieben.

Die Arbeit befasst sich mit der Neuentwicklung bzw. Weiterentwicklung, der Konstruktion und Prototypenrealisierung sowie dem Test der Prototypen und der methodischen neuen Systematisierung der Fahrerlosen Transportsysteme. Die vom Autor geschilderten Entwicklungen, Ideen und Realisierungen erstrecken sich auf einen Zeitraum von 2007 bis 2022.

1.1 Definition Fahrerloses Transportsystem (FTS) und Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF)

Die beiden Begriffe der Fahrerlosen Transportsysteme und der Fahrerlosen Transportfahrzeuge sind bisher mit der VDI Richtlinie 2510 definiert und festgelegt, vgl. [VDI05]:

Fahrerloses Transportsystem (FTS)

(Englisch: Automated Guided Vehicle Systems (AGVS))

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) sind innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist. Sie werden innerhalb und außerhalb von Gebäuden eingesetzt und bestehen im Wesentlichen aus:

- *einem oder mehreren Fahrerlosen Transportfahrzeugen*
- *einer Leitsteuerung*

- *Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung*
- *Einrichtungen zur Datenübertragung*
- *Infrastruktur und peripheren Einrichtungen*

Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF):

(Englisch: Automated Guided Vehicle (AGV))

Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrantrieb, die automatisch gesteuert und berührungslos geführt werden.

Sie dienen dem Materialtransport, und zwar zum Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln.

Typische Einsatzgebiete sind die Intralogistik bei Stückgut-Herstellern, die Montagelinien in der Serienmontage, die Krankenhauslogistik und die Hafelogistik.

Quelle: VDI-Richtlinie 2510 [VDI05]

Die verschiedenen FTF werden in der Richtlinie in verschiedene Bauformen unterteilt. Unterschieden wird dabei grundsätzlich zwischen lastziehenden und lastragenden FTF. Eine weitere Unterteilung erfolgt dann lediglich nach der konstruktiven Gestaltung der Lastaufnahme.

1.2 Die FTF und deren Entwicklung im Laufe der Zeit

Unter der geschichtlichen und auch heute gültigen Definition der Fördertechnik versteht man die Technik des Fortbewegens von Gütern und Personen in beliebiger Richtung und über begrenzte Entfernungen (vgl. [WEH20]). Die Fördermittel stellen innerhalb der Materialfluss und Logistiksysteme die Arbeitsmittel für den innerbetrieblichen Materialfluss mit den Aufgaben:

- Fördern
- Verteilen
- Sammeln
- Lagern

dar. Die zentrale Bedeutung der Fördertechnik in heutigen Materialfluss- und Logistiksystemen erkennt man aus der folgenden Abbildung 1-1:

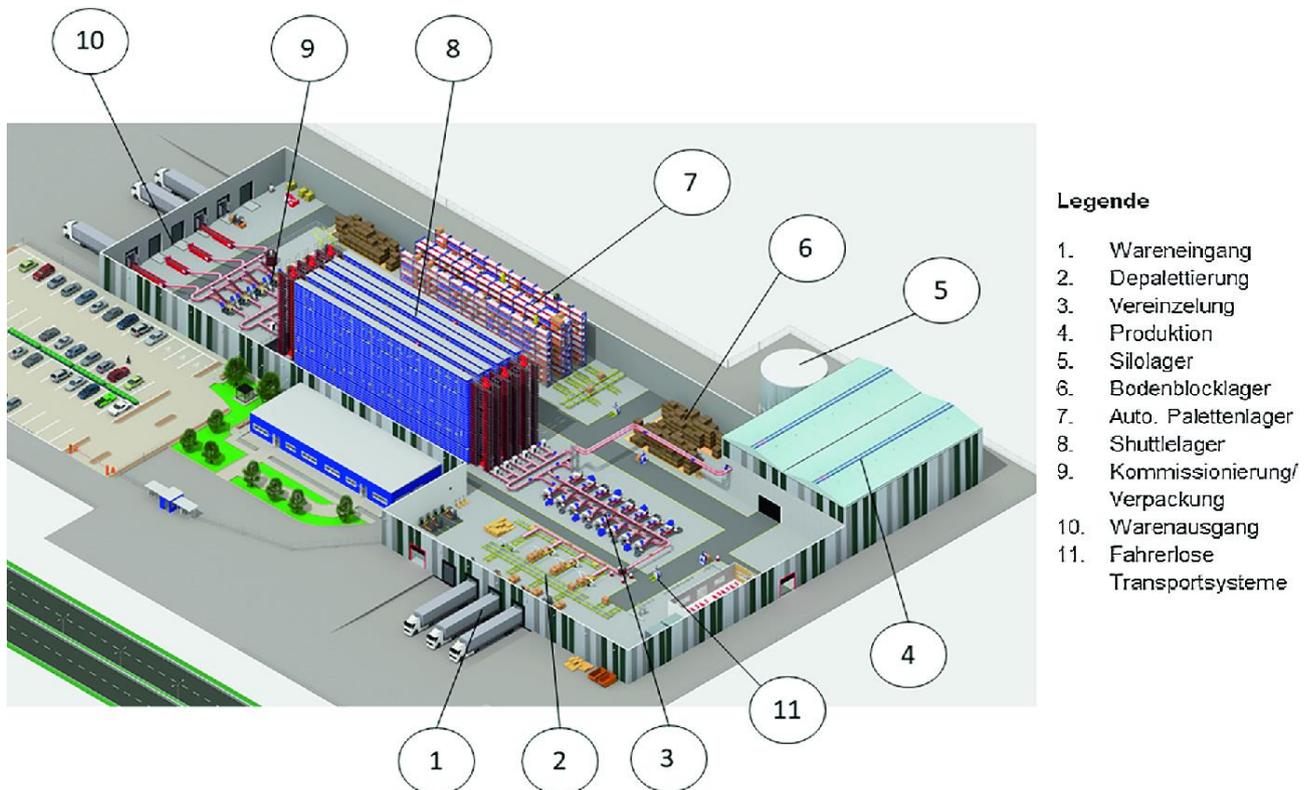


Abbildung 1-1: Distributionszentrum mit den Funktionsbereichen der Logistik und einer Produktionsanlage (Quelle [WEH20])

Die Funktion „Fördern“ unterteilt man in Stetigförderer und Unstetigförderer. Viele der sogenannten Unstetigförderer sind Flurförderfahrzeuge wie Gabelstapler, Fahrerlose Transportsysteme etc. Aus dieser kurzen Beschreibung erkennt man welche herausragende Bedeutung im Sinne der Realisierung von Materialfluss und Logistiksystemen Fahrerlose Transportsysteme schon seit langer Zeit haben.

Im nachfolgenden soll die Erfindung und Entwicklung von FTS zusammenfassend geschildert werden. Es können unterschiedliche Entwicklungsstufen aufgezeigt werden. Fahrerlose Transportsysteme, oder wie im englischen AGV, sind in den Jahren 1954 durch eine amerikanische Firma erstmals in Form eines Fahrerlosen Transportsystems als Schleppzug für mehrere Anhänger über große Strecken realisiert worden. Sie wurden für wiederkehrende Sammeltransporte über Strecken installiert. Die Fahrzeuge folgten einem stromdurchflossenen Leiter, welcher im Boden verlegt war. In England ist im Jahre 1956

ebenfalls ein FTF realisiert worden, welches auf einem Farbstreifen auf dem Boden fuhr, also mit einem optischen Sensor arbeitete (vgl. [ULL14]).

In Deutschland starteten die Firmen Jungheinrich aus Hamburg und Wagner aus Reutlingen in den frühen sechziger Jahren mit der FTF Entwicklung. Sie automatisierten die bisher von ihnen entwickelten und verkauften manuellen Gabelhub- und Plattform-Fahrzeuge. Seit Mitte der 1960er Jahre fanden die ersten Einzeltransportanwendungen im Rahmen der Verkettung von Arbeitsplätzen statt(vgl. [ULL14]).

Die nächste Entwicklungsstufe begann etwa in den 1970er Jahren und endete Anfang der 1990er Jahre. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass einfache Bordrechner und relativ große Schaltschränke für die Blockstreckensteuerung in den Anlagen realisiert wurden. Die Technologie der Fahrzeuge verbesserte sich wesentlich in dieser Entwicklungsstufe. Es wurde erkannt, dass die extrem rasante Entwicklung in der Elektronik und Sensorik in zukünftigen FTS wesentlich neue Märkte erschließen wird. In dieser Entwicklungsstufe war vor allen Dingen die Automobilindustrie ein wesentlicher Anwender von FTS. Hier wurden sehr große Anlagen mit oft mehreren 100 Fahrzeugen realisiert. Ende der achtziger Jahre kündigte sich eine Veränderung an und zwar im Zusammenhang mit den entstehenden Wirtschaftsrestriktionen. Das Geld für Investitionen wurde knapper und die FTS bekamen darüber hinaus das Image zu teuer zu sein und ihre Flexibilität sei nicht ausreichend. Die Verkaufszahlen und die Anzahl der Anbieter von FTS sanken drastisch ab (vgl. [ULL14]).

Die letzte historische Stufe begann Mitte der Neunzigerjahre und ging etwa bis ins Jahr 2010. Hier wurden neue technologische Standards geschaffen und Märkte gefestigt. Als Leitsteuerung fungierten handelsübliche PC. In den Fahrerlosen Transportfahrzeugen waren SPS oder Mikrocontroller installiert. In dieser Phase wurde die Vorherrschaft der Automobilindustrie für FTS Anwender durch eine Fülle von unterschiedlichen, neuen Anwendern aus den Bereichen der Produktion und Intralogistik abgelöst. Die wesentlichen Fortschritte in der Fahrzeug- und Steuerungstechnik lassen sich mit den nachfolgenden Schlagworten definieren:

- Fahrzeuge mit erhöhter Geschwindigkeit beim Fahren
- Automatisiertes Lasthandling
- alternative Energiekonzepte
- neue Navigationsverfahren
- etc.

Die jetzt letzte und wichtigste Entwicklungsstufe wird im Nachfolgenden mit dieser Dissertation geschildert und dargestellt, wobei nicht nur die Entwicklungen des IFT in Stuttgart, sondern auch ausgewählte parallele Entwicklungen an anderen Instituten und der Industrie beschrieben werden.

1.3 Ziel der Arbeit

Diese Arbeit berichtet über Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte, die vom Verfasser in seiner Zeit erst als Mitarbeiter und dann als Leiter der Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung am Institut für Fördertechnik und Logistik an der Universität Stuttgart durchgeführt wurden. Die Arbeit hat zwei Schwerpunkte und Ziele:

1. Es wird umfassend und systematisch über mehrere Technologien, vor allem im wissenschaftlichen Grundlagenbereich, für den Einsatz von Fahrerlosen Transportfahrzeugen in entsprechenden Fahrerlosen Transportsystemen und deren zielgerichteter und systematischer Entwicklung berichtet. Wesentliches Ziel dabei ist, die Kosten für FTF deutlich zu senken. Wie im Kapitel 3 dargestellt wird, lagen die Kosten für ein FTF für die Aufnahme einer Palette inklusive Software, Sicherheitstechnik etc. im Bereich von 100.000 bis 150.000 Euro.
2. Während dem Zeitraum der 15 Jahre der Neuentwicklungen ergab sich die Notwendigkeit, die große Vielfalt der Fahrzeuge, die bisher alle unter die Bezeichnung FTF fallen, neu zu systematisieren um damit die verschiedenen Systeme und unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten zu kategorisieren und für die Zukunft eindeutig, im Vergleich zur heutigen Definition, festzulegen. Eine der bisher üblichen Definitionen (vgl. VDI-Richtlinie 2510 [VDI05]) siehe Kapitel 1.1 lautet: Durch ein FTF wird ein flurgebundenes Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb beschrieben, das automatisch gesteuert und berührungslos geführt wird. Im Gegensatz zu dieser Definition werden zukünftig die Summe aller Fahrerlosen Transportfahrzeuge in drei unterschiedliche Funktionsklassen:
 - Monofunktionale FTF
 - Multifunktionale FTF
 - Modulare FTF

eingeteilt.

Aus diesen beiden Schwerpunkten, die im Rahmen der Arbeit betrachtet werden, lassen sich zwei Forschungsfragen ableiten, die durch diese Arbeit beantwortet werden können:

1. Ist es im Rahmen der durchgeführten Neuentwicklungen, unter Einbeziehung modernster Technologie, möglich die Kosten für maschinenbauliche Konstruktion, Navigation, Sicherheitstechnik, Steuerungstechnik sowie für die Softwareanteile wie

- oben gefordert deutlich zu senken?
2. Können die verschiedenen FTF durch die Unterteilung in Monofunktionale-, Multifunktionale- und Modulare Fahrzeuge heute, aber auch für die zukünftige Entwicklung, neu gegliedert werden?

2 Stand der Technik und Forschung

Der Stand der Technik im Bereich der Fahrerlosen Transportsysteme ist sehr umfangreich, wenn man auch die am Markt kaufbaren/erhältlichen unterschiedlichen Fahrzeuge verschiedener Hersteller berücksichtigen möchte. Dies würde den Umfang der Arbeit bei weitem überschreiten. Aus diesem Grund werden für den Stand der Technik dieser Arbeit Entwicklungen von deutschen Forschungsinstituten und ein Beispiel aus der Industrie exemplarisch herangezogen.

Nachdem im Rahmen dieser Arbeit der Begriff FTF neu systematisiert wurde (siehe dazu Kapitel 4), wird in den Kapiteln 5, 6 und 7 zusätzlich auch auf am Markt bestehende Systeme eingegangen.

Als am IFT mit der Entwicklung erster Fahrerloser Transportsysteme begonnen wurde gab es auch an anderen Instituten parallele Entwicklungen verschiedener System. Dabei wurden allerdings andere Ansätze wie am IFT verfolgt. Meist sollten durch diese neuen Entwicklungen komplexe Systeme entstehen, die in der Lage sind möglichst viele verschiedene Funktionen abzubilden. Am IFT dagegen wurde der im Kapitel 1.3 beschriebene Ansatz für monofunktionale, multifunktionale und modulare FTF verfolgt, möglichst auf ihre Aufgabe spezialisierte und dadurch einfache und kostengünstige Systeme zu entwickeln.

Im Folgenden werden drei verschiedene Entwicklungen aus anderen Hochschulinstituten und der Industrie dargestellt, welche die oben beschriebenen Ansätze widerspiegeln.

Multishuttle Move

Am Fraunhoferinstitut für Materialfluss und Logistik IML an der Universität Dortmund wurde, in Zusammenarbeit mit der Firma Dematic, das Multishuttle Move System entwickelt als Weiterentwicklung des Multishuttle Systems [IML10-2]. Hinter der Entwicklung des Vorgängersystems Multishuttle steckt die Idee ein Behältertransportsystem zu entwickeln, welches sich sowohl auf Schienen innerhalb des Lagers bewegen kann, aber auch auf Schienen das Lagersystem verlassen kann, um damit die Ware direkt in die Produktion zu transportieren. Diese schienengebundenen Fahrzeuge sollten dabei so kostengünstig sein, dass sie mit konventioneller Behälter-Fördertechnik (wie z.B. Gurt- oder Rollenförderer) verglichen werden können. Durch ein entsprechendes Lastaufnahmemittel (LAM) sind die

Fahrzeuge selbstständig in der Lage im Lager Ein- und Auslagerungsvorgänge durchzuführen. Durch diese Vorgehensweise sollten zeitaufwendige Umlagerungsvorgänge und Übergabesituationen entfallen (vergleiche [IML10-2]).

Diese erste Entwicklung des Multishuttles stellte ein System dar, welches für den Transport innerhalb eines Schienensystems optimiert war. Dieses System wurde durch den Entwicklungspartner Dematic unter dem Produktnamen Multishuttle® vertrieben. Das System war in zwei verschiedenen Varianten verfügbar. In der Variante „Captive“ wurde jede Regalebene von einem eigenen Fahrzeug bedient. Damit sind Ein-/ Auslagerleistungen von bis zu 600 Behälter/h möglich. In der anderen Variante „Roaming“ konnten die Fahrzeuge sich in unterschiedlichen Ebenen bewegen, indem ein Vertikalumsetzer eingesetzt wurde. Die Leistung dieses Systems konnte durch die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge skaliert werden. Die Idee war durch diesen Ansatz ein integrales kostengünstiges Lager- und Transportsystem zu realisieren, welches gegenüber üblicher Rollen-Fördertechnik höhere Fördergeschwindigkeiten erreicht. Die Leistung des Systems kann im Vergleich zu starrer Fördertechnik allerdings durch den Einsatz verschieden vieler Fahrzeuge variiert und angepasst werden (vergleiche [IML10-1]). Zudem war ein flurfreier Einsatz durch Überkopfmontage des Schienensystems möglich.

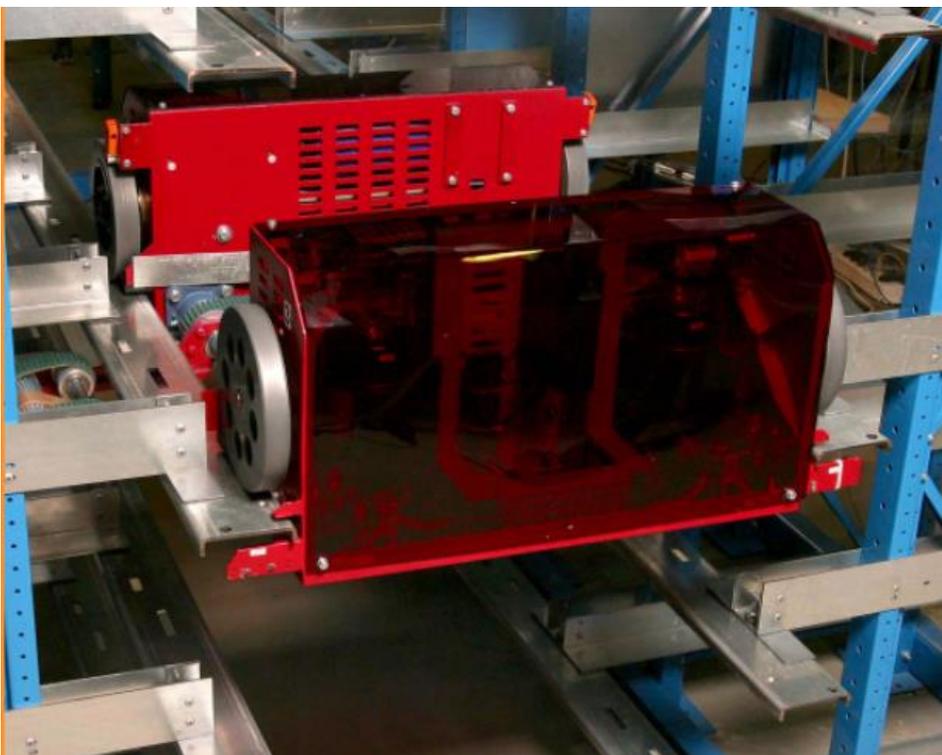


Abbildung 2-1: Prototyp des Multishuttle [IML10-1]

Sind in der Anwendung allerdings größere Distanzen zwischen dem Lager und dem Bedarfsort (Kommissionierzone mit manuellen Arbeitsplätzen, Montagestation etc.) zu überwinden, wird der Aufwand für das System durch die benötigten Schienen sehr groß. In der Praxis wurden deshalb die KLT vom Multishuttle auf bisherige Stetigfördertechnik übergeben, die den Transport zwischen Lager und Bedarfsort übernimmt. Dadurch geht allerdings der Vorteil der direkten Anbindung verloren und es entsteht ein komplexes Fördersystem mit vielen unterschiedlichen Komponenten.

Um dies Problem zu lösen, entstand die Idee der Weiterentwicklung des Systems unter dem Namen Multishuttle Move. Dabei handelt es sich um ein System, welches kompatibel zum schienengeführten Standard-Multishuttle ist, aber durch ein zusätzliches Flur-Fahrwerk direkt auf dem Hallenboden fahren kann. Dadurch konnte das aufwendige Schienensystem zwischen Lager und Bedarfsort entfallen. Das Flurfahrwerk bestand aus zwei angetriebenen Rädern und einer passiven Lenkrolle. Die Lenkung im Flur-Betrieb erfolgte durch Drehzahl-Differenz der beiden Fahrtriebe. Dieses weiterentwickelte Multishuttle-Move-System stellt somit außerhalb des Lagers ein FTF dar, welches frei verfahren kann.

Durch das Fahren des Multishuttle Move Systems auf dem Boden ist es möglich, von allen Quellen aus alle Senken auf dem direkten Weg (ohne Umsetzen oder Lastübergabe) zu erreichen. Durch dieses freie Verfahren ist somit auch eine Pufferung oder Sequenzierung der Ladungsträger möglich. Das IML bezeichnet die Multishuttle Move Systeme auch als Zellulare Transportsysteme (ZTS) (vgl. [IML10-2]). Bei diesen Zellularen Transportsystemen transportiert eine große Anzahl kleiner und baugleicher autonomer Transportfahrzeuge die Kleinladungsträger. Dies soll klassische Stetigfördertechnik dort ersetzen, wo ein hohes Maß an Flexibilität und Wandelbarkeit gefragt ist. Vorteile bei Anwendung dieser Technologie ergeben sich, wenn die Verknüpfung von Transportquellen und -senken flexibel gestaltet werden soll, die Transportleistung an stark schwankende Bedarfe angepasst werden muss oder wenn die Fläche zwischen Lager und Bedarfsort nicht dauerhaft durch Stetigfördertechnik verbaut werden soll. Typische Anwendungsgebiete sollen kleine und mittlere Distributionszentren oder Produktionsbetriebe sein (vgl. [IML10-1]).



Abbildung 2-2: Frei verfahrbare Variante, das Multishuttle Move [IML10-1]

Die Abbildung 2-2 zeigt das Multishuttle Move. An der Fahrzeugseite sind die Antriebsräder und Führungsrollen für den Schienenbetrieb im Lager erkennbar. Das Flur-Fahrwerk befindet sich im Boden des Fahrzeugs und ist in der Abbildung nicht zu sehen. Zur Absicherung des Fahrzeuges im freien Betrieb z.B. in einer Halle sind vorne und hinten je ein personensicherer Laserscanner verbaut. Über die Messdaten dieser Laserscanner wird im Flurbetrieb auch die Navigation der Fahrzeuge realisiert. Die Energieversorgung erfolgt im Flurbetrieb durch mitgeführten Akkus, im Schienenbetrieb mittels Schleifleitungen, über die die Akkus auch geladen werden. Das Lastaufnahmemittel kann zu beiden Seiten des Fahrzeuges Behälter aufnehmen und abgeben und wurde aus dem Vorgängersystem Multishuttle übernommen.

Da in der Anwendung sehr viele Fahrzeuge eingesetzt werden sollen eignet sich für die Steuerung dieser Zellularen Transportsysteme kein zentrales Steuerungskonzept (Leitsteuerung) aufgrund seiner fehlenden Flexibilität. Daher wurde die Steuerung der Fahrzeuge dezentral nach dem Prinzip des „Internet der Dinge“ durch den Einsatz von Multi-

Agenten-Software umgesetzt. Diese Selbststeuerung soll die Zellularen Transportsysteme wandelbar machen, da die Gesamtleistung des Systems durch einfaches Hinzufügen oder Weglassen von autonom agierenden Fahrzeugen frei skalierbar ist (vgl. [IML10-1]). Durch diesen dezentralen Ansatz entsteht eine Schwarmintelligenz, bei der das Wissen aller Fahrzeuge genutzt wird. Dadurch ist eine Optimierung der Fahrwege und somit des Gesamt-Transportdurchsatzes möglich. Zur Navigation der Fahrzeuge wurde ein hybrides Sensorkonzept entwickelt, bestehend aus Koppelnavigation, Funkortung, Abstands- und Inertialsensoren. Durch diese Navigationstechnik können sich die Fahrzeuge ohne Leitlinien frei auf der Fläche bewegen. Das Fahrzeug kann auftauchende Hindernisse (Paletten, Schachteln, aber auch andere Fahrzeuge etc.) erkennen und diese umfahren. Durch die leitlinienlose Navigation (und somit flexiblen Fahrwege) können die Fahrzeuge sich jeweils die optimalste Route zum Ziel suchen (optimaler Durchsatz). Die Kommunikation der Fahrzeuge miteinander wird durch eine WLAN- Funkverbindung realisiert. Darüber stimmen sich die Fahrzeuge zur Routenfindung untereinander ab und vergeben die jeweiligen Transportaufträge (vgl. [KIR12]; [IML10-2] und [IML10-1]).

Mit dem Multishuttle Move System können Lager gebaut werden, die ohne stationäre Fördertechnik in der Lagervorzone auskommen und somit deutlich flexibler sind. Die Fahrzeuge können in die Lagerbereiche direkt in der untersten Regalebene ein- und ausfahren (siehe Abbildung 2-3). Bei mehrgassigen Lagern kann auf der untersten Regalebene die Querverteilung durch Öffnungen in den jeweiligen Regalen erfolgen. Übergabestationen an Kommissionierplätzen oder Montagestationen können beliebig angeordnet werden. Es müssen allerdings ausreichend Fahrwegbereiche vorgesehen werden, in denen sich die Fahrzeuge auch überholen können.

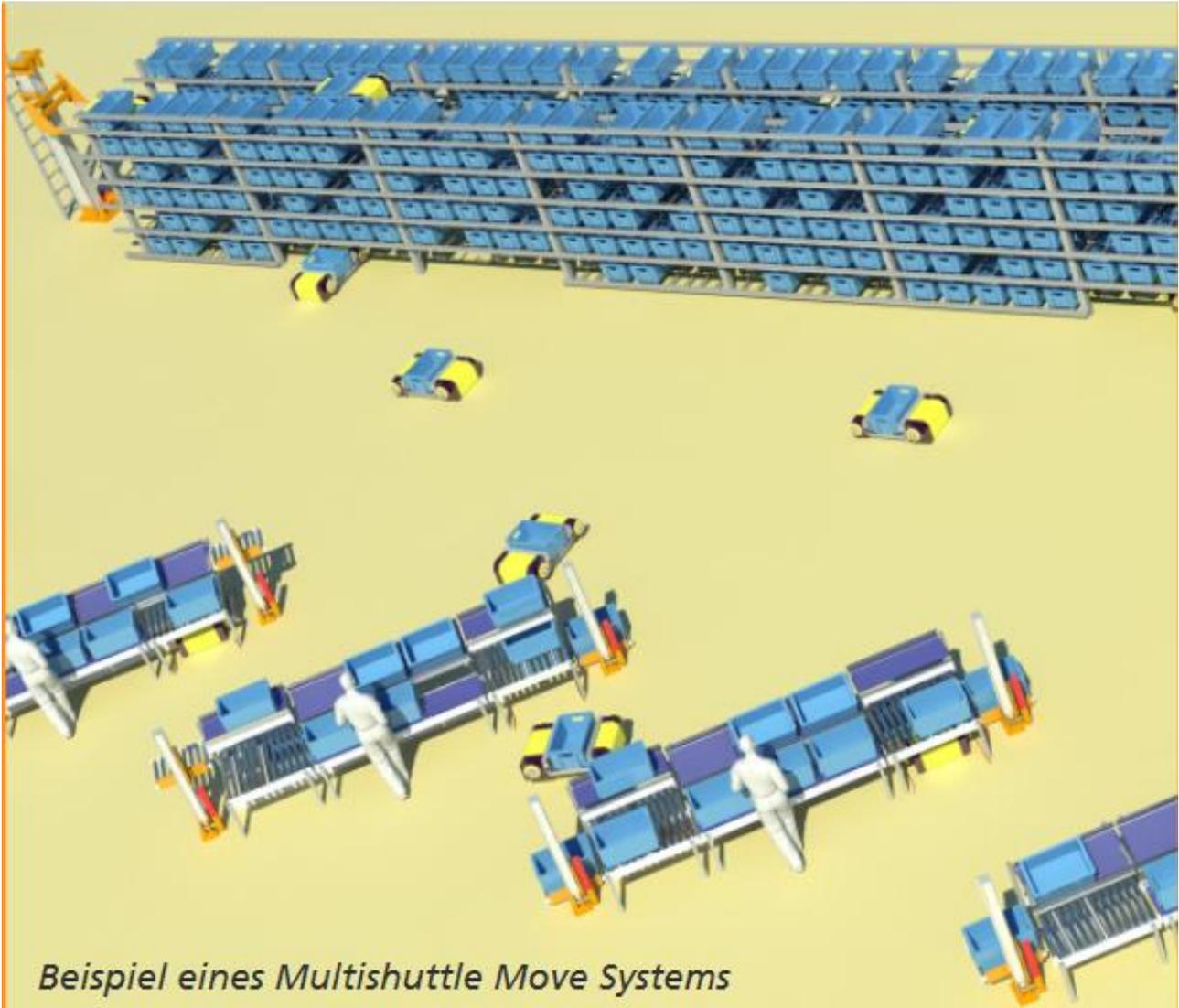


Abbildung 2-3: Mögliche Variante eines kompletten Multishuttle Move Systems mit Lagerbereich im Hintergrund und Kommissionierplätzen im vorderen Bereich [IML10-1]

Das Multishuttle Move stellt aufgrund der flexiblen Fahrzeuge (Fahrt im Regal und Flur-Fahrwerk, freie Navigationstechnik, dezentrale Steuerung etc.) ein sehr komplexes System dar und ist damit mit hohen Kosten verbunden.

KARIS

Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe wurde das System KARIS entwickelt (vgl. [KAR18]). Dahinter steckt die Idee eines FTF, welches sowohl als einfaches Transportfahrzeug eingesetzt werden kann, als auch sich gruppieren kann, um eine Stetigfördertechnik zu realisieren (siehe Abbildung 2-5). Um dies zu ermöglichen sind die Fahrzeuge an der Oberseite mit Stetigfördertechnik ausgestattet, welche einen Transport von Behältern in zwei Richtungen ermöglicht. Zur Absicherung sind an den Fahrzeugen jeweils an diagonal gegenüberliegenden Ecken zwei personensichere Laserscanner angebracht. Diese werden auch zur Navigation (freie Navigation) verwendet. Durch die dafür notwendige Technik ergibt sich ein sehr aufwendiges und teures Fahrzeug für den Transport von KLT 600 x 400mm mit 30kg Gewicht. Damit die Fahrzeuge aneinander andocken können wird zur entsprechenden Positionierung ein flächenbewegliches Fahrwerk benötigt, was durch den Einsatz von Mecanum-Räder realisiert wurde.

Im Rahmen der Entwicklung wurden verschiedene Prototypen realisiert. In der Praxis wurde bisher die Kombination aus Stetig- und Unstetigförderer nicht umgesetzt, da zu komplex und zu teuer.

Das Konzept für diese Fahrzeuge entstammt, wie beim Multishuttle Move, aus der Überlegung flexible und wandlungsfähige Systeme zu realisieren. Stetigförderer, wie Rollenbahnen oder Gurtförderer, sind starr und unflexibel und erfordern einen erheblichen Aufwand für die Integration in die bestehende Infrastruktur. Spätere Anpassungen sind nur mit großem Aufwand möglich. Fahrerlose Transportsysteme hingegen erreichen meist nicht die erforderliche Durchsatzleistung. Die Idee des KARIS Systems liegt darin, diese beiden Varianten zu kombinieren und die jeweiligen Vorteile zu nutzen.

Das KARIS-System besteht aus Fahrzeugen mit einer Abmessung von 500mm x 500mm x 400mm, welche an der Oberseite mit einem Förderantrieb in zwei Richtungen und an der Unterseite mit einem flächenbeweglichen Fahrtrieb ausgestattet sind. Die Fahrzeuge sind dezentral gesteuert, es gibt keine zentrale Leitsteuerung.

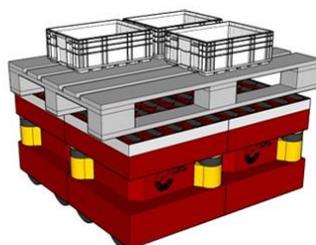


Abbildung 2-4: Prototyp des KARIS Systems [INT18]

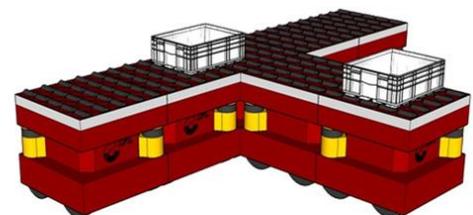
Im Fahrzeug (siehe Abbildung 2-4) sind die Funktionen Fortbewegung, Navigation, Energieversorgung, Auftragsverwaltung und Kommunikation untergebracht. Dabei sind alle Fahrzeuge identisch aufgebaut und können alle Funktionen übernehmen. Somit können Aufgaben redundant von anderen Fahrzeugen übernommen werden. Dadurch ist stets eine hohe Systemverfügbarkeit gewährleisten. Die Fahrzeuge sind dabei so kombinierbar, dass ein einzelnes Fahrzeug (Einzelement EE) einen Kleinladungsträger aufnehmen, transportieren und abgeben kann. Es können sich aber auch mehrere Einzelemente zu einem Cluster zusammenfinden und die Transportaufgaben auf alternative Art realisieren.



Einzelement



Unstetigcluster



Stetigcluster

Abbildung 2-5: Darstellung der verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten [INT18]

Dabei gibt es zwei Möglichkeiten Cluster zu bilden:

- Unstetig-Cluster
- Stetig-Cluster

Beim Unstetig-Cluster schließen sich mehrere EE zusammen und bilden ein zusammengesetztes Fahrzeug, um somit gemeinsam größere Ladeeinheiten aufnehmen und transportieren zu können. Der dynamisch aufgebaute Unstetig-Cluster kann somit eine (oder ggf. auch mehrere Fördereinheiten) analog einem FTS transportieren. Beim Stetig-Cluster schließen sich ebenfalls mehrere EE zusammen. Dabei ordnen sich die EE so an, dass sie eine Transportlinie bilden und über die an der Oberseite angebrachte Fördertechnik Ladeeinheiten befördern können. Sie bilden somit einen Stetigförderer, der einen hohen Durchsatz an Ladeeinheiten ermöglicht. Der Stetigförderer kann, durch Anordnung der einzelnen EE, mit Verzweigungen und Zusammenführungen aufgebaut werden. Nach Abschluss eines Auftrags kann sich der Funktionscluster wieder auflösen und die EE stehen wieder für weitere Aufgaben zur Verfügung. Der komplette Materialfluss eines Intralogistik-Systems kann somit durch EE oder Funktionscluster abgebildet werden (vgl. [HIP09]). Im Rahmen des Projektes wurden kleine omnidirektionale Fahrtriebe entwickelt, die in den Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Dadurch wird ein flächenbewegliches Fahren des Fahrzeuges ermöglicht. Für den Zusammenschluss mehrerer EE zu einem Cluster ist eine Kopplung notwendig, die neben der mechanischen Verbindung die Übertragung von Daten und ggf. Energie ermöglicht. Aufgrund des eingesetzten Mecanum-Fahrwerks und dessen unpräzisen Fahrverhaltens konnte die Kopplung jedoch im Projekt nicht umgesetzt werden. Die Clusterbildung konnte somit nicht untersucht und getestet werden. Zur Bildung der Cluster, vor allem des Stetig-Clusters, muss das Fahrzeug auch über eine ausreichend große Energieversorgung (Akku) verfügen. Einen weiteren wichtigen Punkt stellt die dezentrale Steuerung des Systems dar. Besonders anspruchsvoll ist hierbei die Entwicklung von Algorithmen zur Objektunterscheidung oder zur dezentralen Aufgabenverwaltung (vgl. [KAR18] und [COL16]).



Abbildung 2-6: KARIS-Fahrzeuge eingesetzt für Einzeltransporte [INT18]

Das Karis System hat durch seinen Ansatz Cluster und damit auch ein Stetigfördersystem abbilden zu können, einen sehr komplexen Aufbau. Dadurch ergeben sich für ein System zum Transport von KLT sehr hohe Fahrzeugkosten.

Kiva System

Bei diesem System eines amerikanischen Herstellers handelt es sich um ein FTF, welches quadratische Regalgestelle unterfährt und diese anheben und transportieren kann. Die Fahrzeuge bewegen sich in einem quadratischen Muster (immer rechtwinklig zueinander), orientiert über Bodenmarken. Mit dem System wird das Prinzip der Ware-zum-Mann Kommissionierung umgesetzt. Das Fahrzeug verfügt über einen Drehschemel mit jeweils zwei unabhängig angetriebenen Rädern. Dadurch wird das Fahrzeug gelenkt und es bewegt sich in einem rechteckigen Bewegungsmuster. Beim Lenkvorgang des Fahrzeuges wird das Lastaufnahmemittel, auf welchem das Regal sitzt, aktiv dagegen gedreht. Somit bleibt bei

einer Lenkbewegung des Fahrzeuges das Regal immer in der gleichen Orientierung (vgl. [AMA22]).

Das System wird in Distributionszentren des Händlers Amazon zur Kommissionierung eingesetzt. Große Schwärme (bis zu mehreren tausend) dieser Fahrzeuge transportieren bewegliche Regale aus Blocklagerbereichen zu den Kommissionierplätzen. Zum Transport der Regale fährt das Fahrzeug unter das Regal, aus welchem ein Artikel kommissioniert werden soll und hebt dieses an. Das Fahrzeug fährt dann mit dem Regal aus dem Lagerbereich in den Kommissionierbereich. Dort angekommen reihen sich alle Fahrzeuge mit den Regalen in eine Schlange ein und führen die Regale richtig ausgerichtet (das Regal hat auf allen vier Seiten Lagerfächer) dem Kommissionierer vor. Er greift den entsprechenden Artikel aus dem Regal und scannt das Regalfach sowie den Artikel. Anschließend stellt das Fahrzeug das Regal an einem freien Platz ab und wartet auf den nächsten Auftrag (vgl. [MEM18]).

Durch dieses System entfallen die Wege der Mitarbeiter durch die Regalgänge während des Kommissioniervorgangs. Es wird dem Kommissionierer im Schnitt alle sechs Sekunden ein neues Regal vorgeführt.



Abbildung 2-7: Drive Unit des Kiva Systems [AMA22]

Die Fahrzeuge oder auch mobile Robotereinheiten (Drive Units) genannt (siehe Abbildung 2-7) transportieren die Regale mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1,3m/s. Die beiden

Antriebsräder des Drehschemels des Fahrzeuges werden über zwei Brushless-DC Motoren mit Encodern angetrieben. Das Fahrzeug verfügt über einen durch einen Spindeltrieb realisierten Hubmechanismus, mit dem die Regale um 50mm angehoben werden. Die Regale können dabei bis zu 600kg wiegen. Zur Navigation ist im Fahrzeug eine Kamera auf den Boden gerichtet. Diese liest Barcodes, die in einem Raster auf dem Boden angebracht sind. Eine weitere Kamera schaut nach oben und liest Barcodes an der Unterseite der Regale. Dadurch richtet sich das Fahrzeug unter den Regalen aus und identifiziert das jeweilige Regal. Das Fahrzeug verfügt über keine personensichere Hindernissensorik und kann somit nur in einem abgesperrten Bereich fahren. Mechanische Drucksensoren und Infrarotsensoren können Hindernisse erkennen und das Fahrzeug stoppen. In größeren Warenhäusern kommen derzeit bis zu 3000 solcher Fahrzeuge zum Einsatz. Die Fahrzeuge sind mit einem Akku ausgestattet, welcher automatisch an Ladestationen geladen werden kann. Durch intelligente Regelungsalgorithmen werden etwaige Hardwarefehler (z.B. Abrollumfang des Rades durch Verschleiß) und daraus resultierende Positionsfehler ausgeglichen. Messungen der Roboter werden untereinander abgeglichen, um so z.B. Kamerafehlstellungen im laufenden Betrieb heraus zu rechnen (vgl. [AMA22] und [MEM18]).

Es wurden eine Vielzahl verschiedener FTF an verschiedenen Forschungsinstituten und im industriellen Umfeld entwickelt. Wie jedoch bereits eingangs beschrieben unterscheiden sich alle diese Lösungen erheblich vom hier beschriebenen Ansatz. Es handelt sich meist um sehr komplexe Systeme, die viele Funktionen/Aufgaben übernehmen können, was jedoch die Kosten für die Fahrzeuge erheblich in die Höhe treibt.

Die hier dargestellten Überlegungen hingegen sollen zu möglichst einfachen Fahrzeugen führen, die genau eine Aufgabe erfüllen. Dadurch wird die benötigte Technik auf ein Minimum reduziert und die Kosten der Fahrzeuge erheblich gesenkt.

3 Systematische Weiterentwicklung der Systeme

Durch die in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen des Standes der Technik und den darin beschriebenen Systemen zeigt sich, dass sich viele neuartige Lösungsansätze ergeben, die in die bestehenden FTS-Strukturen nicht eingeordnet werden können. Daraus lässt sich die Notwendigkeit einer neuen systematischen Einteilung der Systeme, wie sie in dieser Arbeit (beschrieben im Kapitel 4) vorgenommen wird, ableiten. Durch die neue Einteilung sollen die Systeme klar kategorisiert werden und somit eine Einordnung hinsichtlich verschiedener Aufgaben und eine Vergleichbarkeit der Systeme ermöglicht werden.

Die Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel 4 beschrieben.

Betrachtet man die historische Entwicklung der FTF, die dafür nötigen Voraussetzungen, die hohen Investitionen und die im Stand der Technik beschriebene Weiterentwicklung, lässt sich klar ableiten, dass um die Systeme weiter am Markt zu etablieren spezielle Forschungen zur Weiterentwicklung der Systeme notwendig sind.

Bei der Weiterentwicklung der Systeme geht es im Wesentlichen darum zwei Ziele zu erreichen:

1. Technologische Weiterentwicklung mit den Kernzielen:
 - a) Hohe Flexibilität und Wandelbarkeit an Produktionssystemen (durch den Einsatz von FTS) von heute und der Zukunft zu erzielen und
 - b) erhebliche preisliche Kostensenkungen der Systeme (Systeme wie in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt) von bisher 100.000-150.000€¹ auf ein Niveau von 30.000€ für ein System für den Pallettentransport (konkretisiert in Kapitel 5.3) mit einer Tonne Last und 3.000 bis 5.000€ für FTF zum Transport für Kleinladungsträger KLT (konkretisiert in Kapitel 5.2) zu erreichen.
2. Modernste Technologien zu verwenden z.B. für Navigation/Spurführung, Sensorik, Sicherheitstechnik, Antriebe, etc., um die FTF flexibel und einfach einsetzen zu können und die unter dem ersten Punkt angesprochenen Ziele der erheblichen Kostensenkung zu erreichen.

¹ Kosten für ein FTF für Pallettentransport mit 1,5 Tonnen Last und automatischer Aufnahme und Abgabe der Last

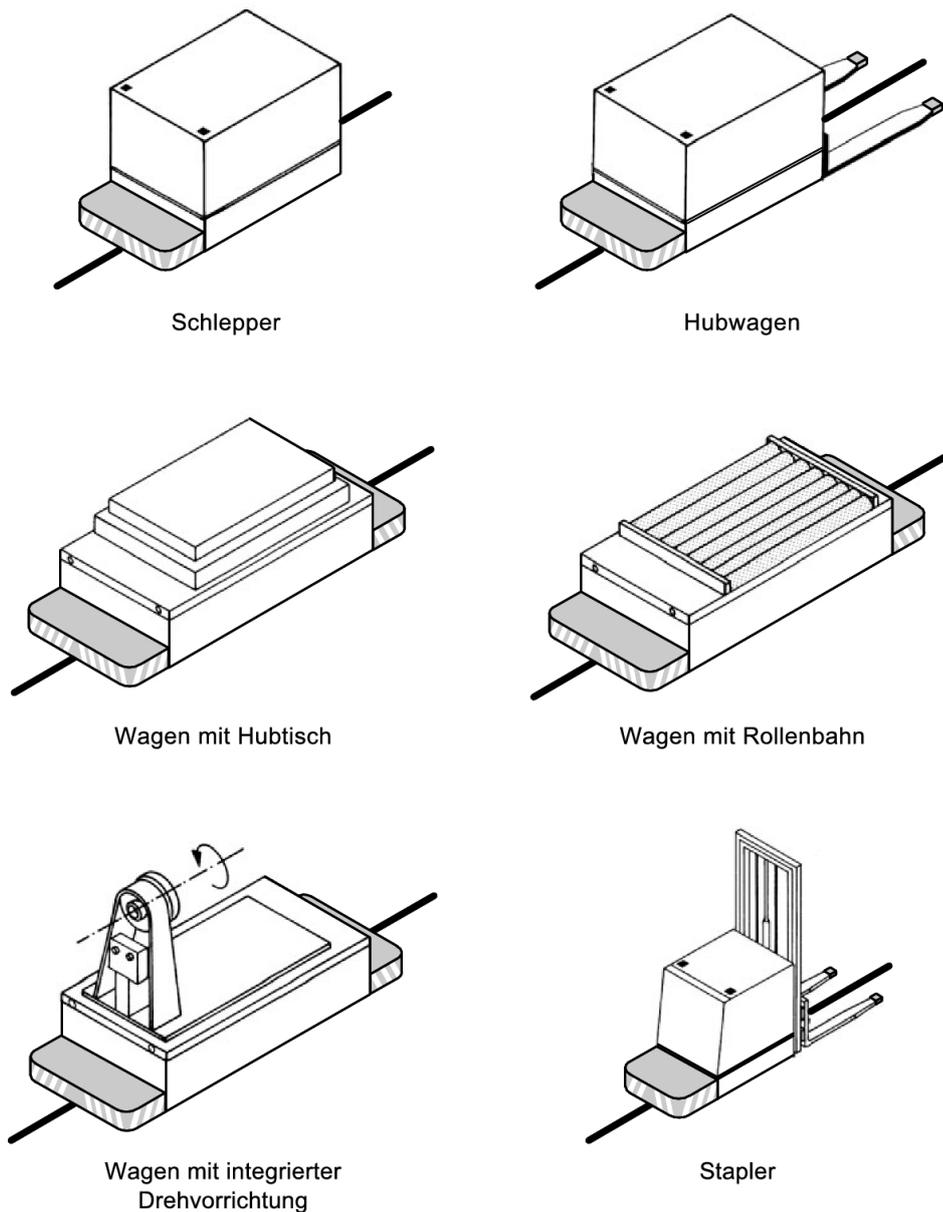


Abbildung 3-1: Beispielhafte Darstellung einiger Fahrerloser Transportfahrzeuge [WEH20]

In der Abbildung 3-1 werden in der Vergangenheit entwickelte und verwendete FTF für den Transport von Paletten oder vergleichbaren Lasten dargestellt. Solche Fahrzeuge kosteten in der Regel zwischen 100.000 und 150.000€ und mehr.

4 Vorgehensweise

Eine umfangreiche Literaturrecherche zeigt, dass es bei heutigen am Markt angebotenen FTF eine große Anzahl an verschiedenen Typen, Ausführungen und Herstellern gibt. Aus der vom Verfasser vergebenen und betreuten Studienarbeit von Herrn Mickey Hoffman [HOF21] kann entnommen werden, dass eine systematische Marktanalyse eine Anzahl mehrerer hundert unterschiedlicher FTF Fahrzeuge ergeben hat. In der Studienarbeit wird auf die Webseite www.lotsofbots.com der Firma Waku-Robotics verwiesen, auf der über 200 Fahrzeuge (Stand 03.07.2021) aufgelistet sind, und die somit einen guten und vielseitigen Überblick über einen Großteil der verfügbaren FTF bietet.

Sowohl für die Einteilung der FTF als auch vor allen Dingen für die zielgerichtete Weiterentwicklung und Optimierung erscheint es daher erforderlich, eine neuartige, zuverlässige (auch zukunftsichere) Klassifizierung und Einordnung von Fahrerlosen Transportsystemen vorzunehmen. Aufgrund der vielfältigen Aktivitäten des Verfassers im Bereich der FTF und seiner Forschungsergebnisse wird im Rahmen dieser Arbeit eine Dreifacheinteilung entwickelt und im Weiteren als neue Einteilung der verschiedenen Fahrzeugsysteme vorgeschlagen:

Monofunktionale FTF

Sie sind so konzipiert und aufgebaut konkrete einzelne Aufgaben zu erfüllen. Solche monofunktionalen Systeme verfügen nicht über komplexe variable Lastaufnahmeeinrichtungen. Die Sensorik und Navigationstechnik etc. ist auf ein Minimum reduziert.

Multifunktionale FTF

Diese können sich an verschiedene Aufgaben anpassen, zum Beispiel durch variable Lastaufnahmemittel. Sie verfügen in der Regel über komplexe Sensorik, Sicherheitstechnik, Navigationstechnik etc.

Modulare FTF

Diese lassen sich in Form eines Baukastensystems individuell gestalten und können somit schwer in eine der beiden vorherigen Kategorien eingeordnet werden, da beispielsweise ein Lastmodul entweder in Form von einem passiven oder aktiven Lastaufnahmemittel angebracht werden kann. Somit können sich ebenso mono als auch multifunktionale FTF, je nach Lösungskombination, ergeben. Daher werden solche FTF in eine dritte Kategorie eingeteilt.

Die Einführung von zukünftigen Modularen-/Baukasten- FTS dient der Individualisierung, die bereits heute von verschiedenen Herstellern angeboten wird. Die Individualisierung bezieht sich auf einzelne Komponenten, wie etwa Energieübertragung und -speicherung, den Antrieb, die Navigationstechnik oder die Lastaufnahmemittel.

Bei der zukünftigen Klassifizierung und Einteilung von FTF ist es notwendig alle Komponenten zu Berücksichtigen. Diese kann man in zwei Hauptgruppen einteilen:

1. Maschinenbaulicher Teil der FTF

Hier sind zu nennen:

- Chassis
- Fahrwerk
- Antrieb
- Lastaufnahmemittel aktiv bzw. passiv
- Ladungssicherung
- Akku und Ladetechnik

2. Sensorik, Aktorik, Steuerungs-/Regelungstechnik

Hier sind zu nennen:

- Navigation/Spurführung
- Hinderniserkennung
- Sicherheitstechnik
- Sensorik

- Steuerung und Regelung der Fahrzeuge
- Leitsteuerung
- Layouterfassung und Bahnplanung

In den nachfolgenden Kapiteln werden unter Kapitel 5 die monofunktionalen FTF, unter Kapitel 6 die multifunktionalen FTF und unter Kapitel 7 die modularen FTF im Detail vorgestellt.

In diesen Kapiteln werden nochmals die jeweiligen ausführlichen Definitionen von Mono-, Multifunktionalen und Modularen FTF erläutert. Danach folgen die Arbeiten und Forschungsaktivitäten (Grundlagen) des Verfassers zu den jeweiligen Gruppen und eine kurze Übersicht von Fahrzeugen dieser Gruppen aus dem Industriebereich.

5 Monofunktionale FTF

Der Einsatz von monofunktionalen FTF stellt die einfachste Form der Automatisierung von Transportprozessen durch FTF in der Logistik dar. Im Vergleich zu anderen FTS kann durch den Einsatz der monofunktionalen Systeme eine erhebliche Kostenreduzierung bei verschiedenen Transportprozessen innerhalb der Logistik erzielt werden. Solche monofunktionalen FTF sind unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass durch ihr passives LAM einfache Transportaufgaben ohne automatische Übergabe der Waren realisiert werden können. Sie eignen sich daher beispielsweise für den einfachen Transport von einer automatisierten Übergabestelle zu einer anderen, wobei es keiner eigenständigen Aufnahme oder Abgabe der Ware durch das FTF bedarf. Lösungen für solche Systeme können in ebenfalls passiven Übergabestationen liegen, welche durch unkomplizierte Umsetzungen eine Auf- oder Abnahme der Ladung ermöglichen. Solche Fahrzeuge sind Bestandteile dieses Kapitels und werden durch im Folgenden dargestellten Beispiele vorgestellt.

5.1 Monofunktionale Transporteinheiten

Das vom Verfasser als Doppelkufensystem bezeichnete FTF dient dem Transport von Europaletten von A nach B. Es kann Paletten mit einer Tonne Last direkt vom Boden aufnehmen und diese omnidirektional verfahren. Dazu fahren zwei mechanisch nicht verbundene Kufen in die Öffnungen der Palette ein, heben diese an und verfahren die Palette. Das Doppelkufensystem ersetzt somit andere FTF für den Palettentransport. Die Grundidee und die daraus resultierende Erfindungsmeldung stammt vom damaligen Assistentenkollegen Manuel Weber [WEB09]. Das System wurde weiterentwickelt und erste Prototypen aufgebaut, mit denen Tests durchgeführt wurden.

Ein weiteres monofunktionales FTF stellt das KaTe-System dar, welches im folgenden Kapitel 5.2 detailliert beschrieben wird. Dieses System hat nur die Aufgabe einen KLT von A nach B zu befördern. Die Lastaufnahme muss an externen Lastübergabestationen oder von Hand erfolgen. Durch den Verzicht auf eine aktive Lastaufnahmevorrichtung kann das Fahrzeug technisch einfacher und somit kostengünstiger gebaut werden.

Andere Institute haben sehr komplexe Systeme entwickelt, die jedoch unter anderem durch

die notwendige Sensorik und Rechenpower extrem teuer werden (siehe Tabelle 1 Vergleich KaTe, KARIS und Multishuttle Move). Das im Stand der Technik beschriebene FTF KARIS kann sich mit Hilfe zweier 3D-Laserscanner und einem Mecanum-Antrieb in der Fläche bewegen und selbst Lasten beispielsweise von einer Förderanlage übernehmen (vergleiche [COL16]). Ein weiteres Beispiel ist das ebenfalls im Stand der Technik beschriebene Multishuttle Move System. Es ist die Weiterentwicklung eines Shuttlefahrzeuges, wie es in automatischen Kleinteilelagern zum Einsatz kommt. Das Multishuttle Move kann jedoch eigenständig das Lager verlassen und mittels eines zusätzlichen Flurantriebs einen Behälter an einen externen Übergabepunkt bringen (Vergleiche Kapitel 2).

Im Gegensatz zu anderen Forschungsinstituten verfolgt der Verfasser mit dem Doppelkufensystem und dem System „kleine automatische Transporteinheiten“ (KaTe) den Ansatz kostengünstige FTF zu entwickeln, die auf einen bestimmten Anwendungszweck zugeschnitten sind.

In der folgenden Tabelle werden die drei beschriebenen Systeme gegenübergestellt:

	monofunktional	multifunktional	multifunktional
			
	KaTe	KARIS [INT18]	Multishuttle Move [IML10-1]
Kosten: ²	2000€ - 5000€	Geschätzt >40000€	Geschätzt >60000€
Funktionen:	Transport KLT Spurgeführte Navigation	Transport KLT Freie Navigation Lastaufnahme	Transport KLT Ein-/Auslagerung KLT Freie Navigation Lastaufnahme

Tabelle 1: Vergleich der FTS (monofunktional links vs. multifunktional Mitte und rechts)

² Die Kosten für ein KARIS-Fahrzeug und ein Multishuttle Move konnten nur geschätzt werden, da dem Autor keine öffentlich zugänglichen Informationen zu den Kosten vorlagen

Das Konzept der monofunktionalen Transporteinheiten ist durch seine kostengünstigen Fahrzeuge insbesondere dann im Vorteil, wenn es um einfache Transportaufgaben ohne Spezialfunktionen, wie Einlagern in ein automatisiertes Kleinteilelager etc., geht. Auch das später vorgestellte Doppelkufensystem wird zu den monofunktionalen Transporteinheiten gezählt, da es gezielt für den Transport von Paletten gebaut ist und beispielsweise keine Paletten stapeln kann.

5.2 Kleine autonome Transporteinheiten

Die vom Autor entwickelten kleinen automatischen Transporteinheiten (KaTe) sollen einen kostengünstigen Transport von Kleinladungsträgern, sogenannte KLTs, in der innerbetrieblichen Logistik ermöglichen. Dies kann z.B. die Strecke zwischen einem Lager und einem manuellen Kommissionierplatz (Ware zum Mann) sein oder auch die Nachschubversorgung von Produktionsanlagen. Die Entwicklung der KaTe entstand gemeinsam mit der Firma Götting, zunächst in einem geförderten Projekt im Programm Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundeswirtschaftsministeriums und anschließender direkt durch von Götting beauftragte Entwicklungsprojekte.

Gemäß der VDA4500 [VDA18] müssen alle KLT-Systeme „auf dem Flächenmodul 600mm x 400mm aufgebaut“ und mit Euro- und ISO-Paletten kompatibel sein. Das Füllgewicht darf 20kg beim Säulenstapelsystem und 50kg beim Verbundstapelsystem nicht überschreiten. Der Prototyp der KaTe (siehe Abbildung 5-1) nimmt daher einen KLT mit 600mm x 400mm oder mehrere kleinere auf. Die momentane ausgelegte Belastbarkeit der umgesetzten Prototypen liegt bei 30kg. Eine Erhöhung der Belastbarkeit ist bei einer entsprechenden konstruktiven Anpassung durch eine stärkere Motorisierung jedoch möglich.



Abbildung 5-1: erster Prototyp „Kleine automatische Transporteinheit“ (KaTe)

Eine KaTe orientiert sich anhand einer auf den Boden aufgeklebten, etwa 2cm breiten schwarzen Spur, auf der Barcodes aufgebracht sein können, um die Position des Fahrzeuges entlang der Spur zu ermitteln. Alternativ wäre durch eine Anpassung der Sensorik und der Software auch eine Navigation mittels Leitdraht oder in den Boden eingebrachter RFID-Marken möglich. Abbildung 5-2 zeigt einen späteren Prototypen der KaTe mit optischer Spurführung.



Abbildung 5-2: optisch Spurgeführte KaTe [GÖT18]

Das Fahrzeug besitzt vorne einen Drehschemel mit Differentialantrieb. Zur Realisierung des Differentialantriebs sind beide Räder des Drehschemels über je einen Elektromotor

angetrieben, der individuell angesteuert wird. Die hinteren Räder sind als Bockrollen feststehend gelagert und nicht angetrieben. Die Energieversorgung erfolgt beim Prototyp durch Bleiakku. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 5-3 der Aufbau von KaTe zu sehen. Zur Steuerung des Fahrzeuges wurde eine eigene auf Mikrocontroller basierte Steuerung entwickelt. Dies war zum einen der Tatsache geschuldet, dass damalige SPS-Steuerungen einen für das Fahrzeug viel zu großen Bauraum benötigten und zum anderen diese SPS-Steuerungen für den Einsatz im Fahrzeug viel zu teuer waren. Die Eigenentwicklung wurde von der parallel gestarteten Entwicklung der Steuerung des Doppelkufensystems (siehe Kapitel 5.3 mit Darstellung von Aufbau und Funktion einer Mikrocontroller-Steuerung) abgeleitet und auf die Anforderung im Einsatz des KaTe Fahrzeugs angepasst.

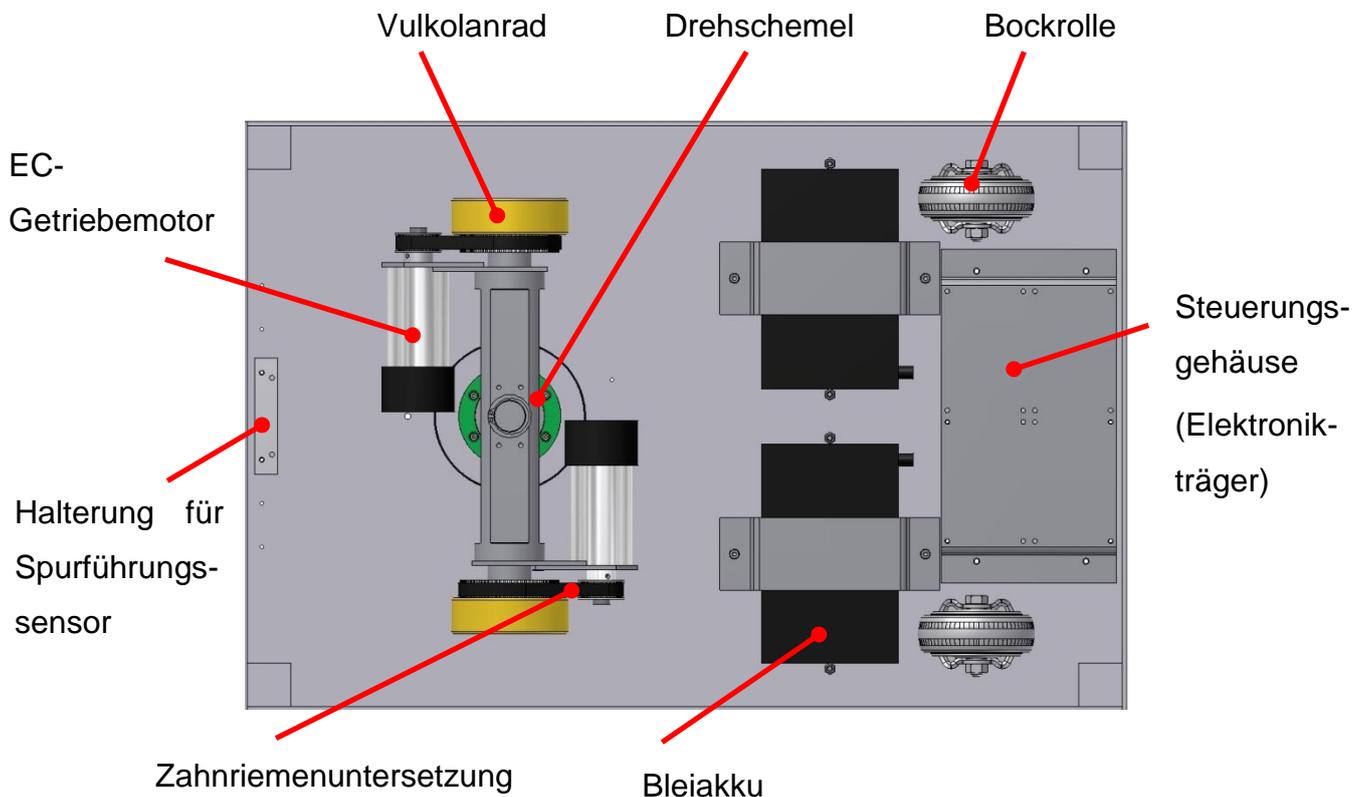


Abbildung 5-3: Technischer Aufbau von KaTe (Ansicht von unten)

Um das Fahrzeug selbst so kostengünstig wie möglich auszuliegen, wurde auf eine aktive Lastaufnahmeverrichtung verzichtet. Stattdessen fahren die Fahrzeuge an spezielle Übergabeterminals, beispielsweise am Ende eines Förderbands, und werden dort beladen.

5.3 Doppelkufensystem

Das Doppelkufensystem ist dafür konzipiert Europaletten mit einem Gewicht von bis zu einer Tonne vom Boden aufzunehmen und dann omnidirektional verfahrbar zu transportieren. Es kann in der innerbetrieblichen Logistik eingesetzt werden und soll dort Handgabelhubwagen und in Teilbereichen Gabelstapler sowie andere FTF ersetzen. Der Aufbau und die Größe der Doppelkufen wird im Wesentlichen durch die Dimensionen der Europalette vorgegeben. Die Europalette ist in der Norm DIN EN ISO 445 [DIN13] genau definiert. Sie kommt europaweit in allen Bereichen der Logistik und der Produktionsversorgung zum Einsatz. Der Aufbau einer solchen Palette ist in Abbildung 5-4 dargestellt.

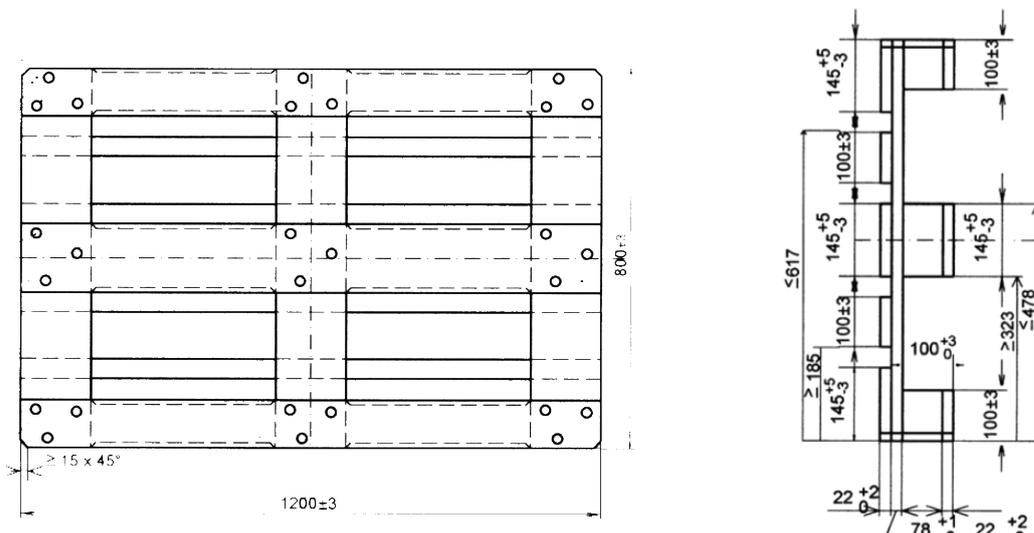


Abbildung 5-4: EUR-Palette [DIN13] (links Ansicht von unten, rechts Seitenansicht)

Betrachtet man die Systematik der Fördermittel nach DIN30781-2 [DIN89] gehört das Doppelkufensystem in die Kategorie nicht stapelnder Hubwagen und ist charakterisiert als Fahrerloses Elektroflurförderzeug. Neu ist jedoch, dass es sich hierbei nicht um ein Fahrzeug, sondern um zwei Fahrzeuge handelt, die im Verbund agieren müssen um gemeinsam eine Palette zu transportieren. Die Fahrzeuge sind nicht mit einem Lastaufnahmemittel ausgestattet, sondern benutzen die flache Oberseite als Auflagefläche. Die Auslegung des Systems sieht eine maximale Nutzlast von 1.000 kg je Kufenpaar bei einer Höchstgeschwindigkeit von etwa 1 m / s vor.

Die Entwicklung des Doppelkufensystems am IFT fand im Zeitraum von 2008 bis 2013 im Rahmen durch das Institut eigenfinanzierter Projekte statt. Dann wurden die Entwicklungen

und Lizenzen für die Patente an die Firma Eisenmann in Böblingen verkauft. Die weitere Entwicklung wurde, finanziert durch Eisenmann, gemeinsam fortgeführt.

Das Doppelkufensystem ist so konzipiert, dass es vollständig unter einer Palette verschwinden kann. Da in der Palette (siehe Abbildung 5-5) zwei Einfahröffnungen bestehen, sind zwei einzelne Fahrzeuge, die sogenannten Kufen, nötig, welche im Verbund agieren müssen. Die Kufen müssen entsprechend so kompakt konstruiert sein, dass sie in die Einfahröffnungen unter die Palette fahren, dort die Palette eigenständig aufnehmen können und sie anschließend omnidirektional (in jede Richtung) im Raum verfahren.

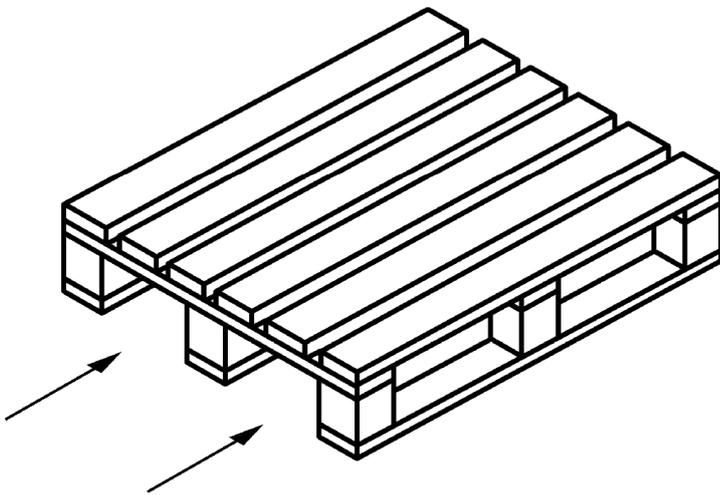


Abbildung 5-5: Freie Einfahröffnung an einer Europalette [DIN13]

Dadurch, dass die Doppelkufen nicht mechanisch verbunden sind, können sie vollständig die Palette unterfahren, siehe Abbildung 5-6. Darüber hinaus können sie die Paletten komplett durchfahren und diese auf der anderen Seite wieder verlassen. Dies bietet die Möglichkeit, dass z.B. in einem Blocklager mehrere in Reihe stehende Paletten unterfahren werden können, bis die Doppelkufen an der richtigen Palette angekommen sind. Daraufhin kann diese angehoben und seitlich wegtransportiert werden (vergleichbar einem Schiebepuzzle). Damit lassen sich z.B. sehr kompakte Blocklager realisieren.

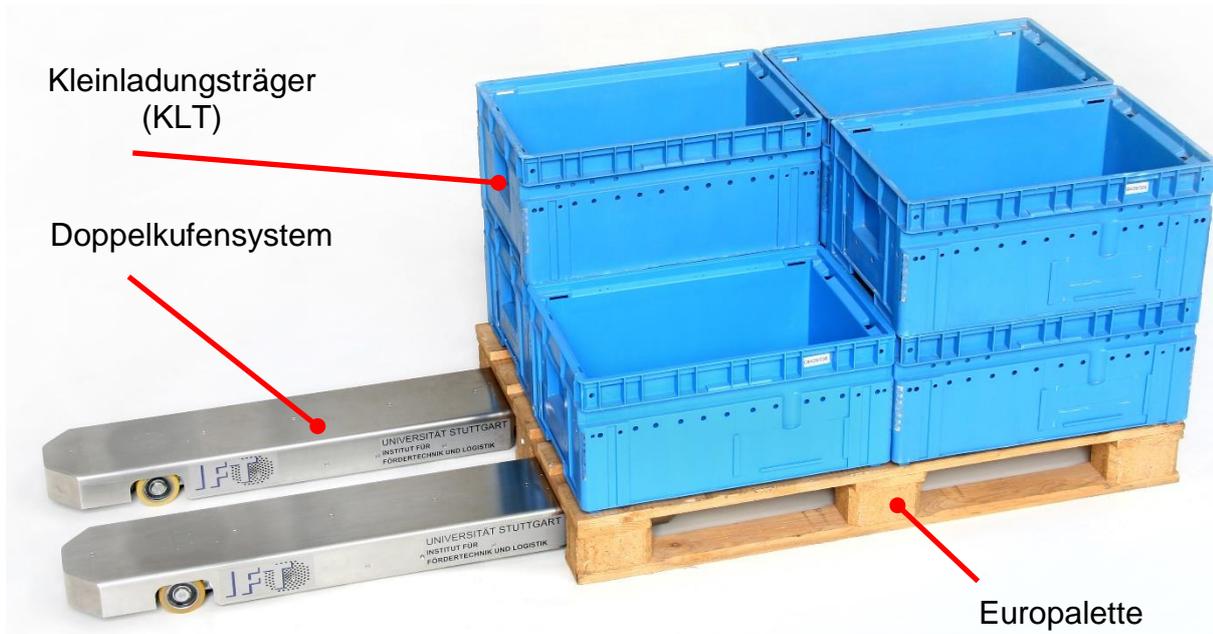


Abbildung 5-6: Doppelkufensystem mit Europalette

Die Kufen des Doppelkufensystems sind mechanisch so aufgebaut, dass an beiden Enden einer Kufe jeweils ein Drehschemel angeordnet ist. Die Drehschemel sind jeweils mit zwei unabhängig angetriebenen Rädern versehen und drehen sich in der Drehschemelmitte um jeweils eine der beiden Spindeln. Dadurch, dass sich die Drehschemel über mehrere Umdrehungen verdrehen und dort die Motoren angebracht sind, muss die Leistungs- und Datenverbindung über einen Drehübertrager erfolgen. Der erste Prototyp war zur Energiespeicherung mit zwei großen Bleibatterien bestückt, welche zur Spannungsversorgung in Reihe geschaltet wurden. Später wurden die Bleibatterien durch eine moderne Lithium-Ionen Batterie ersetzt.

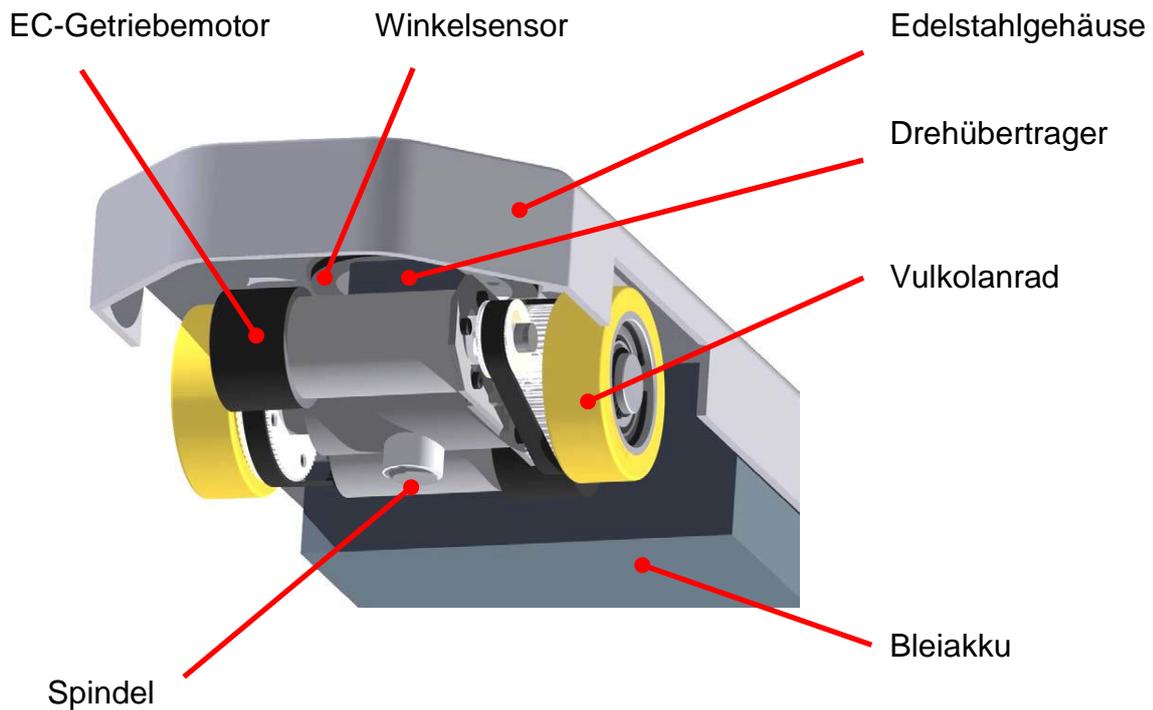


Abbildung 5-7: Drehgestell einer Kufe

Die Abbildung 5-7 zeigt einen Drehschemel der Kufe mit den beiden durch separate BLDC-Motoren angetriebenen Räder. Durch diesen differenziellen Antrieb kann der Drehschemel bei gleichzeitigem Antrieb beider Räder mit gleicher Drehzahl geradeaus fahren.

Bei differierenden Drehzahlen oder entgegengesetzten Drehrichtungen rotiert der Drehschemel und es kann so eine Lenkbewegung realisiert werden.

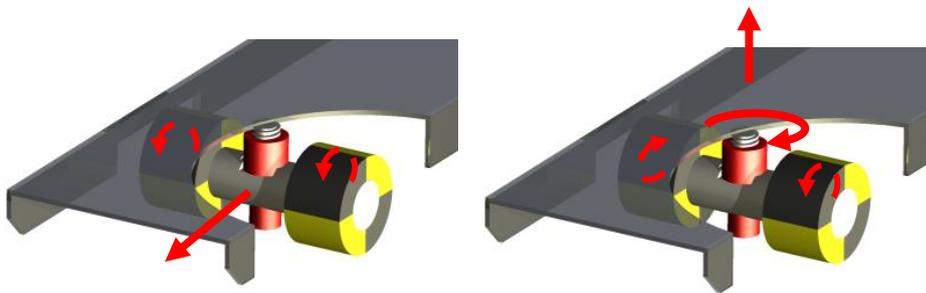


Abbildung 5-8: Ein Antrieb für Fahren (links) und Heben (rechts)

Das Doppelkufensystem kombiniert somit Fahr- und Lenkantrieb durch eine Allrad-Differenziallenkung. Die beiden Achsen eines Fahrzeugs können beliebige voneinander unabhängige Lenkwinkel einschlagen. Dadurch ergeben sich unter anderem die in Abbildung 5-9 skizzierten Bewegungsmöglichkeiten des Doppelkufensystems mit einer Palette.

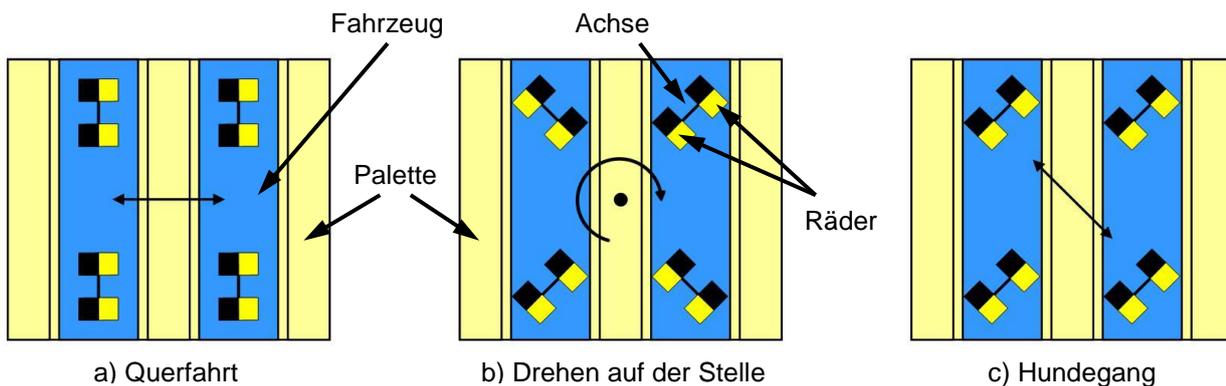


Abbildung 5-9: Möglichkeiten der Bewegung im Kufenpaar mit Palette

Bei gleicher Stellung der Lenkwinkel aller Achsen kann das Kufenpaar omnidirektional (in beliebige Richtung von längs bis quer) verfahren. Das parallel versetzte Fahren der vorderen und hinteren Achse wird auch als Hundegang bezeichnet. Zusätzlich ermöglicht eine aufeinander abgestimmte Einstellung der Lenkwinkel eine Drehbewegung mit beliebigem Mittelpunkt. Der einfachste und nützlichste Anwendungsfall hierfür ist das Drehen der Palette auf der Stelle ohne gleichzeitige Änderung der Position, wie in Abbildung 5-9 unter b) skizziert [COL11].

Der mechanische Aufbau des Systems ergibt ein geringes Eigengewicht einer einzelnen Kufe von ca. 60kg, inklusive Batterien. Somit kann ein Doppelkufensystem mit einem Eigengewicht von 120kg eine Palette mit 1000kg transportieren. Dies stellt ein sehr gutes

Eigengewicht-zu-Nutzlast-Verhältnis dar, was sehr energieeffiziente Transporte ermöglicht. Abgesehen von den jeweils paarweise betriebenen Fahrzeugen umfasst das Doppelkufensystem die zentrale Leitsteuerung sowie gegebenenfalls eine oder mehrere Handsteuerungen zum manuellen Verfahren eines Kufenpaars.

Die Abbildung 5-10 zeigt die erste Prototypengeneration des Doppelkufensystems. Diese Fahrzeuge hatten keine Sicherheits- und Warneinrichtungen und auch keine Bedienelemente.

Die Kufen sind absolut symmetrisch aufgebaut. Dadurch lässt sich keine Orientierung erkennen. Somit ist keine Bedienung der Kufen per Handsteuerung möglich, da der Bediener die Orientierung nicht erkennen kann. Um dieses Problem zu lösen wurden analog zur Markierung eines Hallenkrans farbige Markierungen wie in Abbildung 5-10 angebracht.

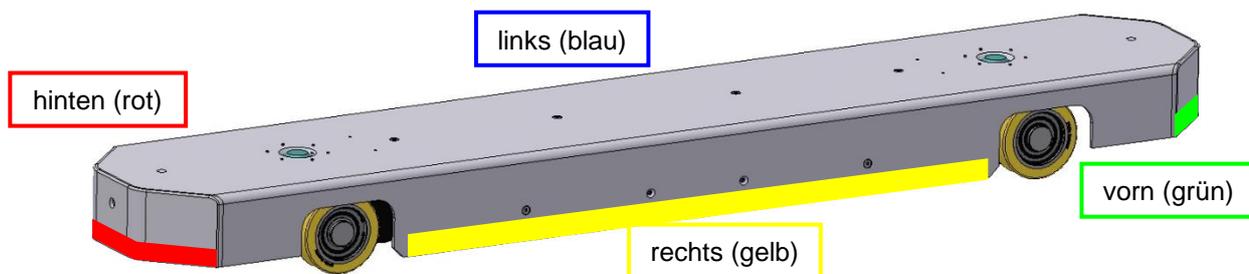


Abbildung 5-10: Farbige Richtungsmarkierungen an der Kufe

In der zweiten Prototypen Generation wurden diese farbigen Markierungen durch Farbige LEDs ersetzt. Dadurch war eine Markierung der einzelnen Kufen durch entsprechende Softwareansteuerung möglich. Dadurch wiederum konnten zum Beispiel die beiden Kufen eines Paares beliebig vertauscht und durch die Leuchtmarkierung wieder richtig zugeordnet werden [COL11].

In der späteren gemeinsamen Weiterentwicklung mit der Firma Eisenmann wurde eine Handsteuerung entwickelt, mit der das Doppelkufensystem bedient werden konnte. In diesem Anwendungsfall benötigt der Bediener zwingend eine Definition der Richtung relativ zum Fahrzeug, um die Steuerkommandos auf die aktuelle Lage der Fahrzeuge abzustimmen.

5.3.1 Mechanischer Aufbau des Doppelkufensystems

Durch den stark eingeschränkten Bauraum, welcher aufgrund der Geometrie der Paletten vorgegeben wird, musste für den mechanischen Aufbau eine möglichst kompakte Lösung gefunden werden. In diesen beschränkten Bauraum mussten alle Antriebe, das Fahrwerk, die Hubfunktion, der Akku sowie die Steuerung untergebracht werden. Dies gelang erst durch die Idee der Drehschemelantriebe in Kombination mit der Hubspindel. Durch diese Anordnung war es möglich alle Fahrfunktionen, das Fahren, das Lenken und den Hub, durch die selben Antriebe umzusetzen, siehe Abbildung 5-11.

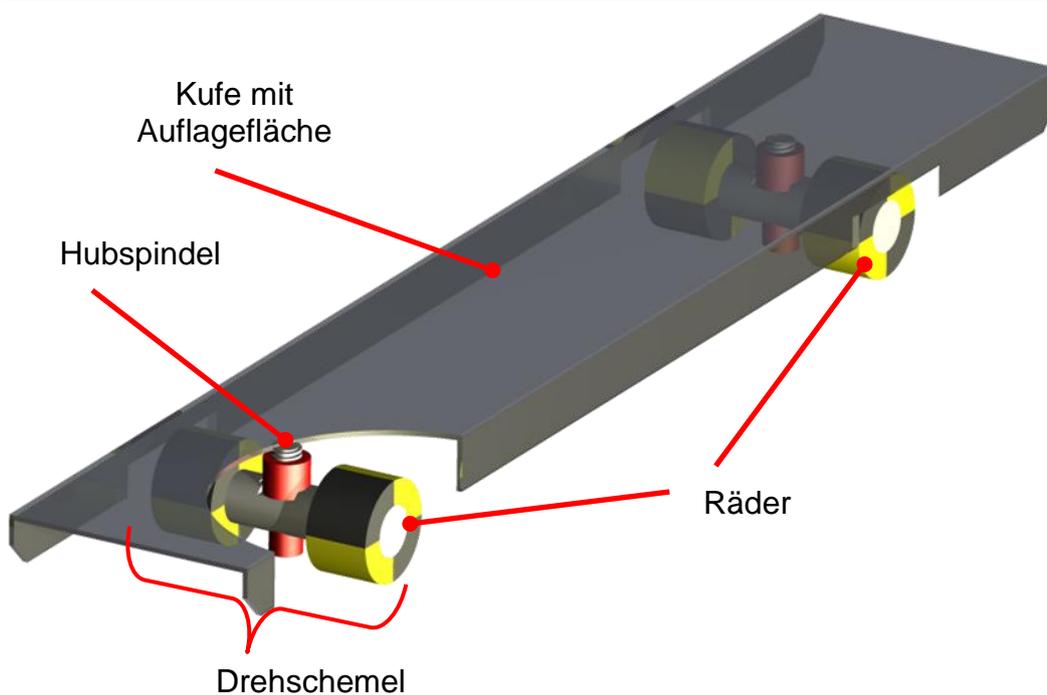


Abbildung 5-11: Mechanische Komponenten eines Doppelkufen-Fahrzeugs [IFT11]

Der Drehschemel (dargestellt in Abbildung 5-12) besteht aus dem Achskörper in den die Spindelmutter integriert ist. Am Achskörper sind parallel die Antriebsmotoren mit Getriebe angeordnet. Die Kraftübertragung auf die Räder wird mit einem Zahnriemen realisiert. Die eigentliche Spindel ist fest am Kufengehäuse montiert. In Abbildung 5-12 wurde die vordere Antriebseinheit zur besseren Übersicht ausgeblendet.

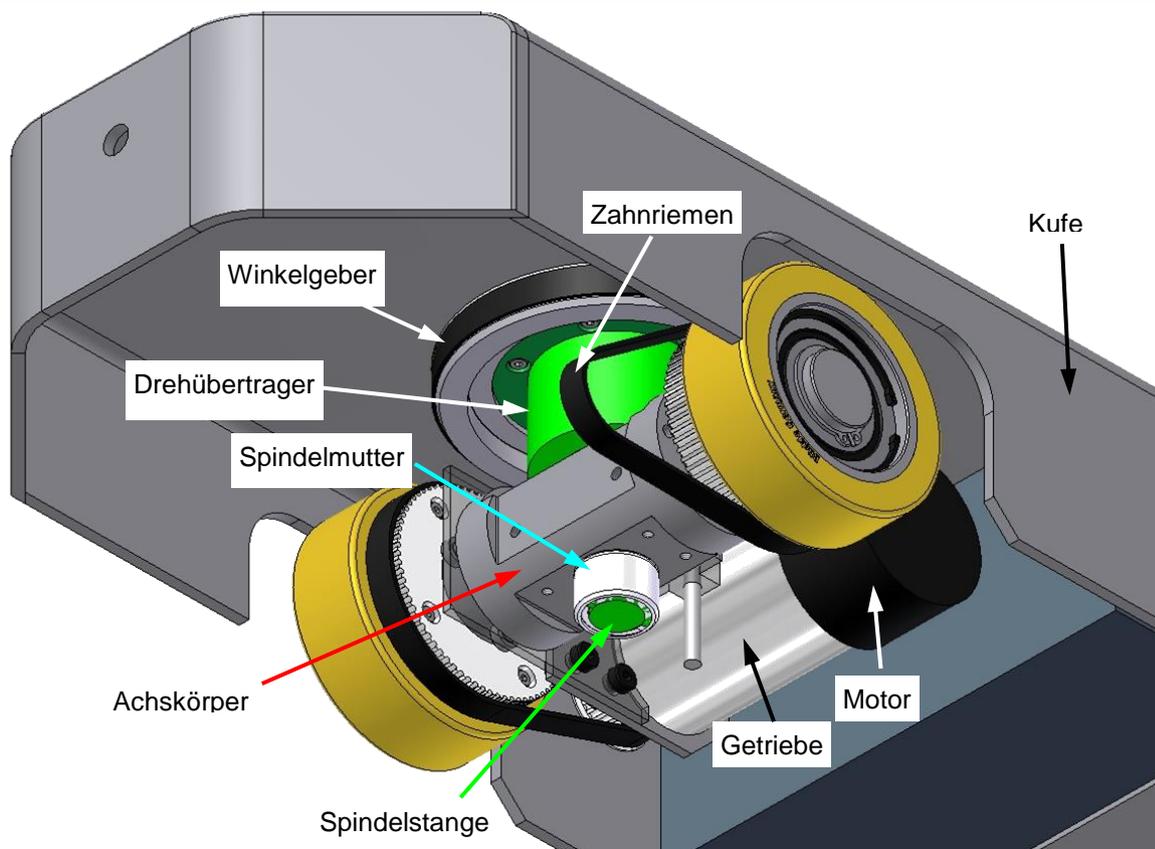


Abbildung 5-12: Detailansicht eines Drehschemels [IFT11]

Ein Drehübertrager ist koaxial um die Spindelstange angeordnet. Dieser überträgt die Energie und Steuersignale von der zentralen Steuerung an die Motoren. Außerhalb dreht sich ein Magnetbandring als Winkelgeber mit dem Drehübertrager. Durch diesen Magnetbandring wird der Lenkwinkel des Drehschemels erfasst.

Werden die beiden Räder einer Achse gegensinnig angetrieben beginnt der gesamte Drehschemel um die Hubspindel zu rotieren. Dabei erzeugt die Hubspindel eine gleichzeitige axiale Hubbewegung mit einer Steigung von vier Millimeter je Umdrehung. Dabei ist zu beachten, dass bei jeder Drehbewegung des Drehschemels eine Hubbewegung erfolgt. Bei Lenkbewegungen in einem Lenkwinkelbereich von $\pm 90^\circ$ beträgt die Höhenänderung etwa ± 1 mm.

Die Hauptmaße des Prototyps sind in Tabelle 2 zusammengefasst und in Abbildung 5-13 dargestellt.

Länge	1.150 mm
Breite	200 mm
Fahrzeughöhe	97 mm
Hubhöhe	< 40 mm

Radstand	750 mm
Spurweite	155 mm
Sensorabstand	135 mm
Paarabstand	372,5 mm

Tabelle 2: Hauptmaße der Doppelkufen-Fahrzeuge [COL11]

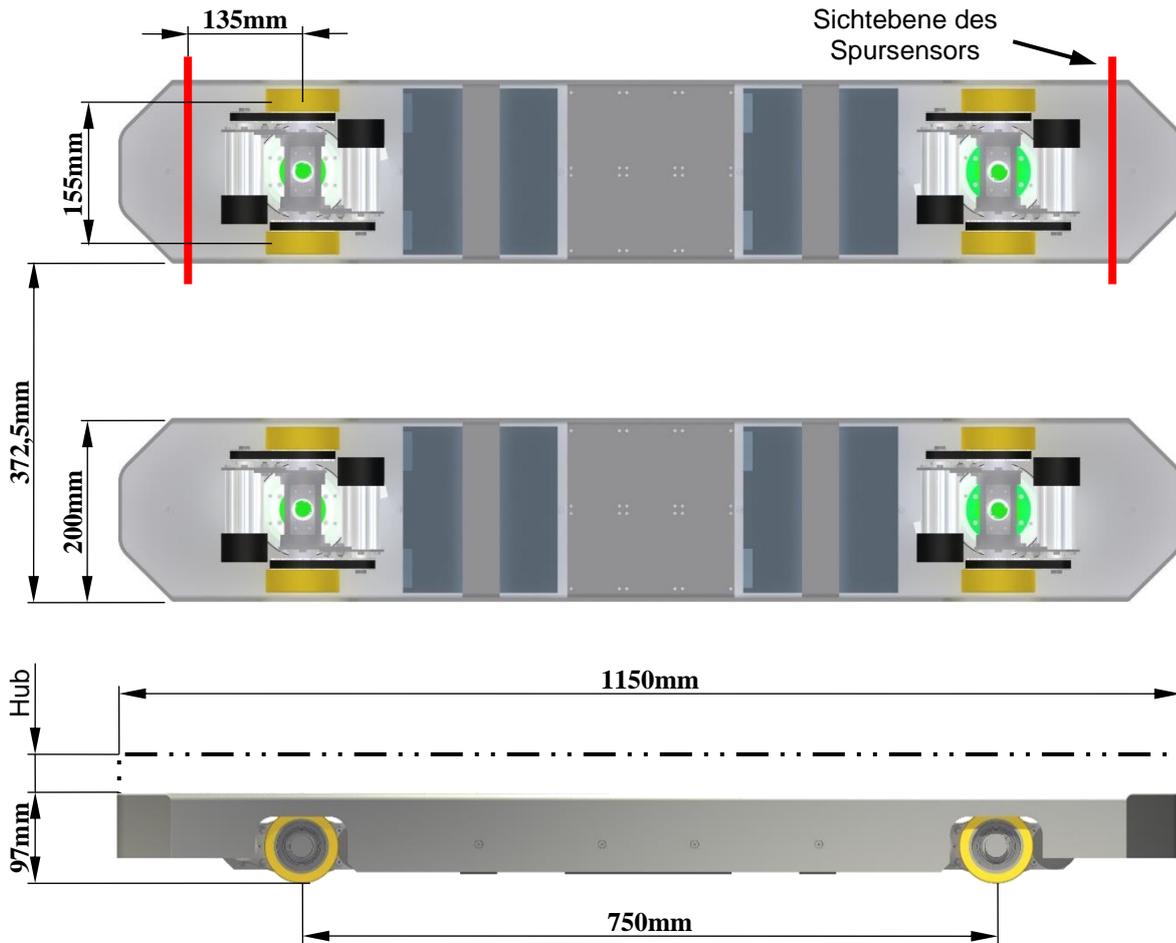


Abbildung 5-13: Kufenpaar mit Hauptmaßen [COL11]

Die in die Abbildung 5-13 eingezeichneten „Sichtebenen des Spursensors“ zeigen die Position der beiden eingebauten Spurführungssensoren am vorderen und hinteren Ende des Fahrzeugs.

5.3.2 Steuerung der beiden Kufen

Basierend auf den geforderten Grundfunktionen mussten die beiden voneinander unabhängigen Kufen (keine mechanische und elektrische Verbindung) die Anforderungen Aufnahme einer Palette, orthogonale Fahrfunktion, Abgabe einer Palette (inklusive Hubfunktion von 40mm bei einer Last von 1000kg) als Fahrzeug (bestehend aus zwei Komponenten) realisieren. Die Platzverhältnisse der beiden Kufen sind, durch die Notwendigkeit eine Europalette zu unter und –durchfahren, extrem begrenzt. Die Unterbringung der Hub-/Senkfunktion, sowie des Fahrzeugantriebes, seiner Steuerung und Regelung, der Sicherheitstechnik, Navigation etc. benötigt viel Bauraum innerhalb der Kufen. Somit stand für die Steuerung nur ein minimaler Bauraum zur Verfügung. Die zu diesem Zeitpunkt bisher am FTF häufig eingesetzten SPS oder PC basierten Steuerungen waren demzufolge aus Platzgründen nicht realisierungsfähig. Es war zwingend notwendig eine eigene mikroprozessorbasierte Steuerung, basierend auf dem Mikroprozessortyp ATXMEGA der Firma Microchip als Hardware, zu realisieren und mit entsprechender Software umzusetzen. Die Steuerungshardware wurde dabei modular aufgebaut und auf insgesamt 12 Platinen verteilt. Durch diesen Modularen Aufbau war eine einfache Anpassung der Steuerungshardware auf neue oder ergänzende Anforderungen möglich. In der Abbildung 5-14 ist die Steuerungshardware bei einem Testaufbau dargestellt. Beim späteren Einsatz im Doppelkufensystem wurden die Platinen noch stärker ineinander verschachtelt, um den Bauraum weiter zu minimieren. In der eingebauten Version sind die Platinen durch den Fahrzeugrahmen verdeckt und können nicht mehr dargestellt werden.

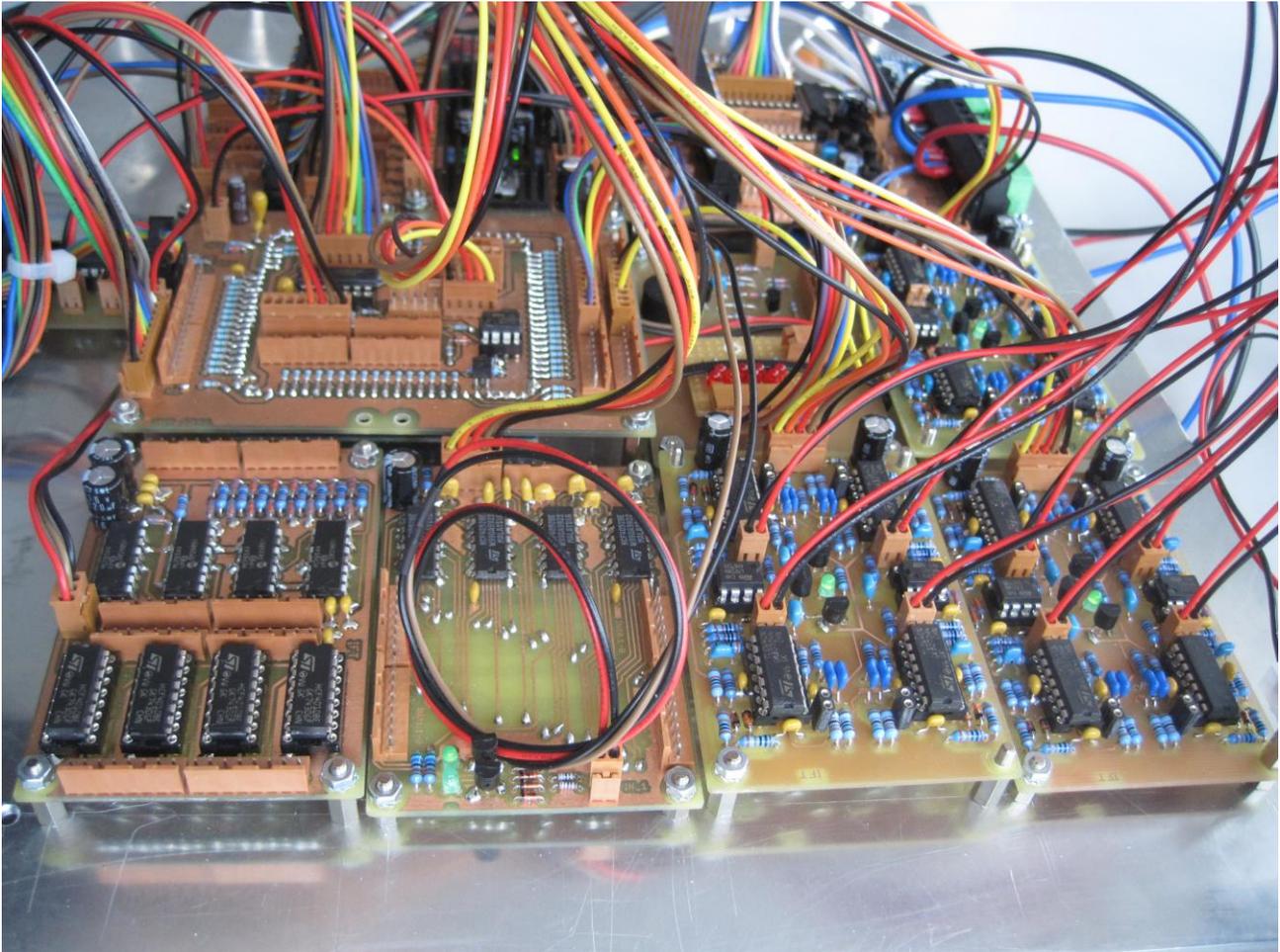


Abbildung 5-14: Steuerungshardware des Doppelkufensystems bei einem Testaufbau

Die komplette Steuerungshardware, also alle Platinen, wurden entwickelt und in entsprechende Routings³ umgesetzt. Anschließend wurden die Platinen aus Platinen-Rohmaterial durch einen photochemischen Ätzprozess hergestellt, gebohrt und anschließend mit den Elektronikbauteilen bestückt und verlötet. Diese Arbeitsschritte wurden vollständig am IFT durchgeführt. Die Herstellungskosten der Prototypen der Mikrocontroller Steuerung liegen bei etwa 500€. Eine entsprechende SPS, die aber nicht in den Bauraum integrierbar gewesen wäre, liegt bei etwa 2000- 3000€.

Die Erstellung der Software erfolgte in C Programmcode. Die Programmierung der Software wurde von einer internen Arbeitsgruppe in der Abteilung Maschinenentwicklung und Materialflussautomatisierung unter Leitung des Verfassers und Mitarbeit von Herrn André

³ Unter Routings versteht man die Umsetzung des Schaltplanes als Leiterbahnen und Anordnung der Bauteile auf der Platine

Colomb und 2 wissenschaftlichen Hilfskräften vollständig am IFT umgesetzt.

Wie oben beschrieben war diese Entwicklung absolut notwendig, da es zum damaligen Zeitpunkt keine kaufbare alternative gegeben hat, welche in den Bauraum integriert hätte werden können.

Die oben beschriebene mikrocontrollerbasierte Steuerungselektronik generiert basierend auf den Sensorsignalen die entsprechenden Motordrehzahlen der jeweils 4 Antriebsmotoren je Kufe. Über die eingebaute Funkschnittstelle Können kommandos übertragen und somit die Kufen gesteuert werden, wie in Abbildung 5-17 gezeigt.

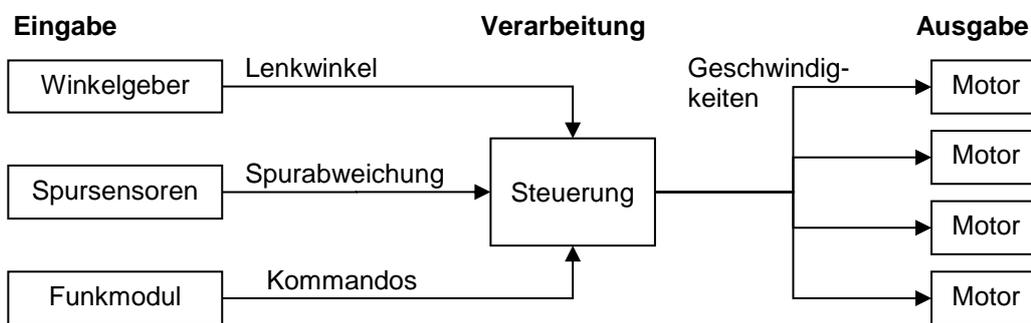


Abbildung 5-17: Signalfluss in der Fahrzeugsteuerung einer einzelnen Kufe [COL11]

Durch die inkrementellen Winkelsensoren an den beiden Drehschemeln in Verbindung mit einem zusätzlichen Referenzpunkt werden durch die Steuerung die beiden aktuellen Lenkwinkel der beiden Drehschemel erfasst. Um den aktuellen Lenkwinkel ermitteln zu können wird bei jedem Neustart der Kufe eine Initialisierungsroutine ausgeführt. Dazu senkt sich die Kufe zunächst vollständig bis zum mechanischen Anschlag ab. Anschließend wird beim langsamen Anheben durch den Referenzpunkt die Nulllage der Winkelmessung ermittelt. Somit sind die aktuelle Höhe und der Lenkwinkel absolut bestimmt. Beide Lenkwinkel zeigen in der Grundstellung 0°. In dieser Grundstellung sind die Drehschemel rechtwinklig zur Fahrzeug-Längsachse ausgerichtet. Beide Drehschemel können bis zum unteren Lenkansschlag eine Lenkbewegung von mindestens $\pm 90^\circ$ durchführen.

Die Steuerung regelt durch eine Rückkopplung auf die gewünschten Soll-Lenkwinkel und legt in einer vorbestimmten Zeit die vorgegebene Strecke zurück. Durch das Messen der Lenkwinkel kann somit per Odometrie das Doppelkufensystem navigiert werden. Die Genauigkeit der Navigation hängt allerdings von den folgenden Fehlern ab:

- Abweichung der Motordrehzahl vom Vorgabewert
- Abweichung des Lenkwinkels, bis die Regelung diesen korrigiert hat
- Schlupf der Räder auf dem Boden, von der Steuerung nicht messbar

Diese Fehler summieren sich insbesondere über längere Fahrstrecken auf. Um dennoch mit dem Doppelkufensystem präzise navigieren zu können wird eine Orientierung der Kufen über eine externe absolute Referenz benötigt. In diesem Fall wird eine optische Spurführung genutzt. Dazu sind die Kufen an ihren Enden mit jeweils einem Spurführungssensor ausgestattet. Diese ermitteln die relative Position zu einer Führungslinie. Dazu liegt die Sichtebene der Spursensoren quer zur Fahrzeuglängsrichtung. Wie bereits in Abbildung 5-13 dargestellt sind sie zwischen dem Drehschemel und dem jeweiligen Fahrzeugende angeordnet. Der Sensorabstand in Abbildung 5-13 gibt die Entfernung des Spursensors vom Mittelpunkt der zugehörigen Achse an.

Die durch die Spurführungssensoren messbare Spurabweichung ermöglicht eine weitere Rückkopplung, durch die das Fahrzeug beim Erkennen einer Spur die Soll-Lenkwinkel regeln und die Spurabweichung minimieren kann. Diese beiden Regelkreise, also die Lenkwinkelregelung und die Spurfolge-regelung, bilden zusammen eine Kaskadenregelung. Dies wird in der Abbildung 5-18 schematisch dargestellt.

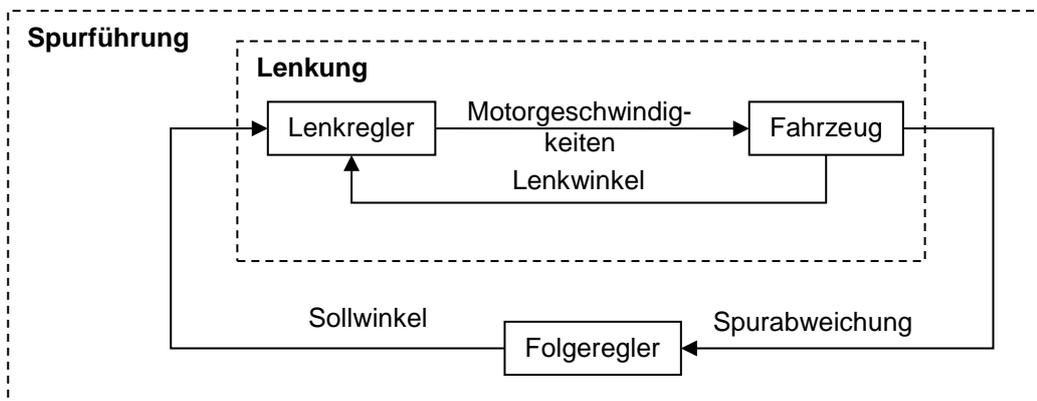


Abbildung 5-18: Systemübersicht der Lenkungsregelung [COL12]

Die geregelte Kufe erhält entsprechend dem Schema die Vorgabe-Motorgeschwindigkeiten als Stellgröße vom Lenkregler und liefert als Regelgröße die Lenkwinkel zurück. Dieser gesamte Regelkreis für die Lenkung erhält als Führungsgrößen die Sollwinkel, welche

entweder konstant bleiben oder vom Folgeregler⁴ stammen. Die Spursensoren messen dessen Regelgröße, die Spurabweichung (entsprechend [COL11]).

Damit solch eine Kaskadenregelung stabil funktioniert muss der innere Regelkreis deutlich schneller arbeiten als der Äußere. Um dies zu realisieren erfolgt die Spurerkennung getaktet. Die beiden Spursensoren geben abwechselnd in festen Zeitintervallen vorn und hinten einen neuen Sollwinkel vor. Der Lenkregler berechnet dazwischen in einer Endlosschleife neue Motorsollwerte aus den aktuellen Mess- und Stellgrößen. An dieser Stelle begrenzt somit nur die Rechenleistung des Prozessors die Regelgeschwindigkeit.

Im ersten umgesetzten Prototyp erfolgt die Regelung unabhängig zwischen vorderem und hinterem Drehschemel / Spursensor und auch unabhängig zwischen den beiden Kufen in einem Doppelkufensystem. Dadurch wird für jede der beiden Kufen eine eigene parallel im richtigen Abstand angebrachte Leitlinie benötigt. In der Theorie kann so das Doppelkufensystem beliebig geführten Spuren folgen. Allerdings lassen sich die Parallelen Spuren in Kurven nur sehr schwer markieren und die jeweils kurvenäußere Kufe müsste die Geschwindigkeit erhöhen (oder die kurveninnere Kufe die Geschwindigkeit verringern) um die unterschiedlichen Kurvenradien auszugleichen. Diese Koordinierung wäre nur durch weitere Sensorik (Messung des Längsversatzes) zwischen den beiden Kufen möglich. Im ersten Prototyp wurden daher nur gerade Fahrspuren und Drehungen auf der Stelle verwendet. Durch entsprechende Kombination lassen sich allerdings auch so alle Zielpunkte erreichen.

5.3.3 Koordination der Bewegungsabläufe

Im Prototypen kann eine einzelne Kufe als eigenständiges Fahrzeug auf einer Einzelspur betrieben werden. Zwei Kufen zusammen können auf parallel angebrachten Spuren zusammenfahren. Um gemeinsame Paletten-Transporte zu realisieren wird in beiden Kufen ein fester Programmablauf hinterlegt, der möglichst synchron abgearbeitet wird. Dieser Programmablauf besteht aus einer Folge nacheinander ausgeführter, parametrierter Programme. Jedes Programm zeichnet sich durch einen Programmtyp und maximal zwei Parameter aus, wie in Tabelle 3 aufgelistet (vgl. [COL11]).

⁴ Der Folgeregler generiert bei Spurabweichungen neue Sollwerte für den Lenkregler

Programmtyp	Parameter 1	Parameter 2
000 Warten	Unterbrechung erlauben	Dauer
001 Vorwärts fahren	Lenkwinkel vorn bzw. Spurführung	Dauer
002 Rückwärts fahren	Lenkwinkel hinten bzw. Spurführung	Dauer
003 Heben	-	-
004 Senken	-	-
005 Palette drehen	Geschwindigkeit und Richtung	Dauer
006 Hundegang vorwärts	Lenkwinkel vorn und hinten	Dauer
007 Hundegang rückwärts	Lenkwinkel vorn und hinten	Dauer
253 Sprung	-	Index
254 Ende	-	-
255 Schleife	-	-

Tabelle 3: Programme im Doppelkufensystem [COL12]

Der jeweilige Programmablauf wird durch die Leitsteuerung an die beiden Kufensteuerungen gesendet. Nach dem Einschalten der beiden Kufen führen diese den Programmablauf aus dem Speicher direkt aus, bis eine "Ende"-Anweisung vorliegt. Die Anweisung "Schleife" springt im Programmablauf zurück zum Anfang, "Sprung" zu einem beliebigen Schritt, durch eine fortlaufende Indexnummer spezifiziert (entsprechend [COL11]).

Innerhalb eines Doppelkufensystems wird eine Kufe als Master, die andere Kufe als Slave konfiguriert, siehe Abbildung 5-19. Also Master und Slave bilden gemeinsam ein Kufenpaar und sollen sich nur möglichst synchron bewegen. Um diese Synchronisierung zu realisieren sendet die Master-Kufe das jeweils aktuelle Programm über die Funkschnittstelle an die Slave-Kufe, welche nach der Initialisierung auf Anweisungen der Masterkufe wartet. Wird der Startbefehl gesendet von der Master-Kufe durch die Slave-Kufe empfangen, sendet diese eine Empfangsbestätigung an die Master-Kufe zurück. Anschließend beginnen beide Kufen mit der Ausführung des Programms. Aufgrund der identischen Programmierung und Regelung bewegen sie sich dabei parallel.

Der Fahrzeugtyp "Single" bezeichnet den Einzelbetrieb und entspricht im Wesentlichen dem "Master", jedoch ohne Funkkommunikation (vgl. [COL11]).

Alle Kufen sind völlig identisch aufgebaut. Sie unterscheiden sich in Master- und Slave-Kufe nur durch eine entsprechende Softwarekonfiguration. Soll in späteren Prototypen Sensorik zwischen den beiden einzelnen Kufen eingesetzt werden, muss eine der beiden Kufen (die Slave-Kufe) um 180° gedreht parallel im richtigen Abstand zur Masterkufe aufgestellt

werden. Dadurch bleibt der Aufbau der beiden einzelnen Kufen nach wie vor identisch und die Sensorik ist dennoch zwischen den beiden Kufen orientiert (siehe Abbildung 5-19).

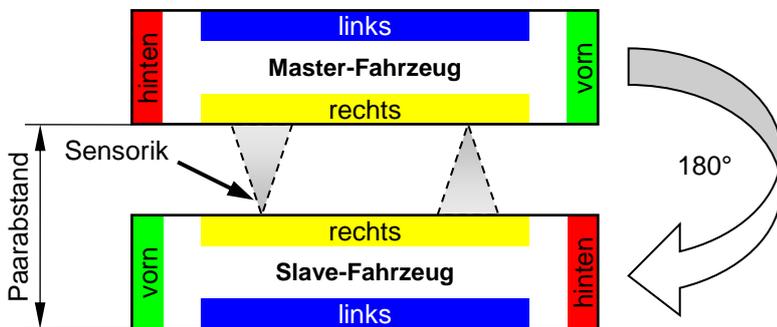


Abbildung 5-19: Ausrichtung der Fahrzeuge im Kufenpaar [COL12]

Diese um 180° gedrehte Anordnung bietet weiterhin den Vorteil, dass beim Programm "Palette drehen" der Mittelpunkt der Drehung relativ zu beiden Fahrzeugen identisch liegt. Für andere Fahrbewegungen hingegen muss die Slave-Kufe seine Fahrtrichtung umkehren damit sich beide Kufen in die gleiche Fahrtrichtung bewegen. Wie bereits oben beschrieben wird bei der Anordnung der beiden Kufen im Master und Slave Betrieb auch die Farbmarkierung der einzelnen Kufen so angepasst, dass das Doppelkufensystem durch die Farben eine einheitliche Richtungsangabe für den Benutzer ermöglicht.

Zur Funkkommunikation zwischen der Leitsteuerung und den einzelnen Kufen, sowie zwischen den beiden Kufen, wird der ZigBee-Standard verwendet. Dabei wird zwischen allen Teilnehmern ausschließlich im transparenten Broadcast-Modus gefunkt, bei dem jeder Teilnehmer die Nachrichten aller anderen Module empfängt.

Zur Übertragung der Inhalte wurde ein eigenes Datenprotokoll definiert, welches Empfänger- und Absenderadresse sowie den Funkvorgang samt Parameter, wie in Abbildung 5-20 gezeigt, kodiert. Jedes Datenpaket besteht darin aus fest definierten Bytes als Start- und Endmarkierung und den dazwischen eingebetteten Nutzdaten. Fahrzeugadressen werden im Vorfeld aus einem Bereich von 1 - 254 vergeben, wobei der Empfänger 0 alle Fahrzeuge bedeutet und 255 als Adresse der Leitsteuerung dient (entsprechend [COL11]).

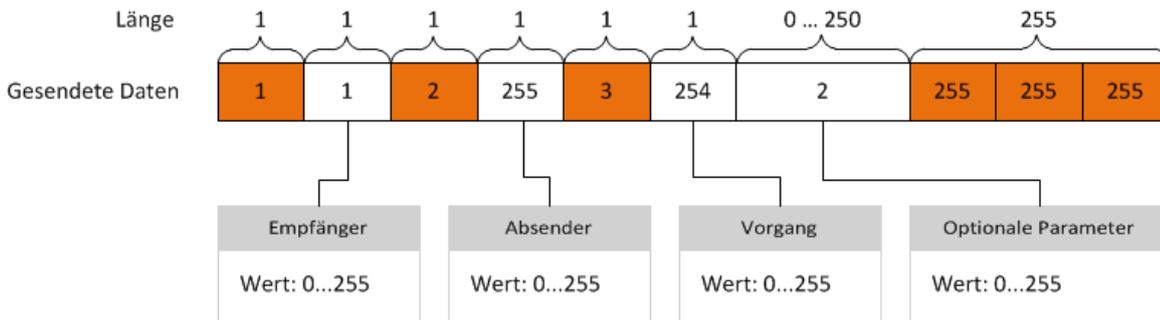


Abbildung 5-20: Aufbau eines Datenpakets zur Kommunikation [COL13]

Innerhalb des Datenprotokolls definiert das Feld "Vorgang" die Bedeutung des Datenpakets sowie die notwendige Anzahl an optionalen Parametern. Mögliche Vorgänge kontrollieren beispielsweise die Fahrfreigabe bzw. Notstopp, die Konfigurationsparameter sowie Diagnose- und Kalibrierfunktionen und können den laufenden Programmablauf beeinflussen oder einen neuen zur Speicherung übermitteln ([COL11]).

Die Abbildung 5-21 zeigt eine Ansicht der Bedienoberfläche der zentralen Leitsteuerung. Durch diese Bedienoberfläche können die einzelnen Kufen manuell gesteuert werden oder es wird ein definierter Programmablauf über entsprechende Knöpfe an das Doppelkufensystem gesendet und gestartet.

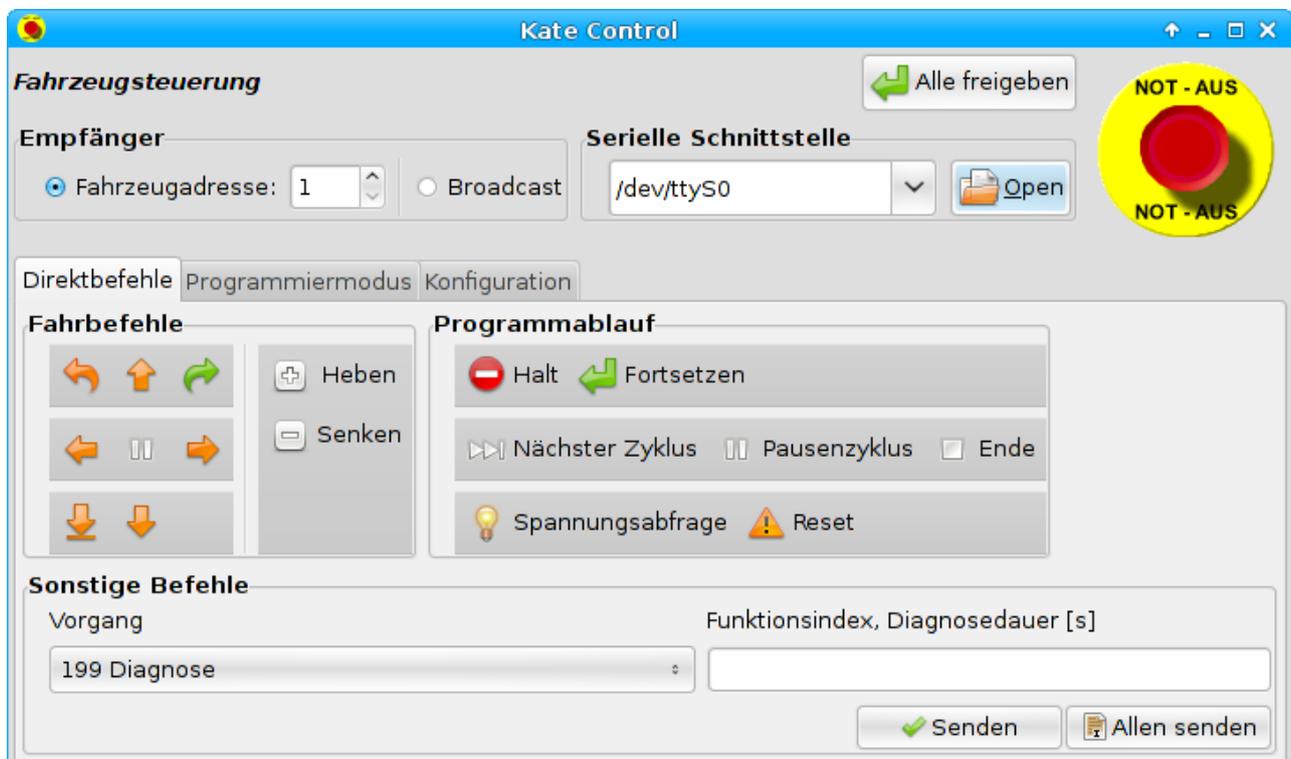


Abbildung 5-21: Bildschirmfoto der Leitsteuerungs-Software

5.3.4 Optischer Spurführungssensor

Der Spurführungssensor dient zur Detektion einer schwarzen Spur auf weißem Grund zur Fahrtrichtungsbestimmung. Ebenso erkennt er Markierungen, schwarze Querstriche, die von der Software gesondert verarbeitet werden können. Dadurch können zum Beispiel Stoppsignale generiert werden, um das Doppelkufensystem gezielt an einer Stelle anhalten lassen zu können. Der optische Spurführungssensor ist eine vollständige Eigenentwicklung. Die Entscheidung einer Neuentwicklung wurde damals aus dem Grund getroffen, dass kaufbare Systeme einen deutlich größeren Bauraumbedarf aufwiesen und auch im Verhältnis zum eigenentwickelten System deutlich teurer waren (Bis zu Faktor 10)[COL11]. Der entwickelte Spurführungssensor besteht aus acht Fotodioden, die in einer Reihe auf einer Platine aufgebracht sind und zwei mittig gelegenen IR-Sendedioden. Die Platine ist in Abbildung 5-22 abgebildet.



Abbildung 5-22: Optischer Spurführungssensor

Der Sensor wird gepulst betrieben, um eine Fremdlichteinstrahlung, beispielsweise durch Sonnenlicht, zu vermeiden. Durch die Reflexion des Lichts durch den Boden und der teilweisen Absorption an der schwarzen Spur ergibt sich eine Helligkeitsänderung an den Fotodioden. Diese Änderung wird anschließend vom Mikrocontroller ausgewertet und zu einer Spurposition und einer Markierungserkennung verarbeitet. Aus Abbildung 5-23 wird die Funktionsweise noch genauer ersichtlich. Die Sendedioden mit ihrem Strahlenverlauf sind rot dargestellt. Die Fotodioden, welche das reflektierte IR-Licht empfangen, sind mit ihrem Erfassungsbereich blau dargestellt⁵.

⁵ Die 2 Sendedioden senden IR-Licht auf den Boden, das reflektiert wird. Im Bereich der Spur (dunkel) ist die Reflexion deutlich schwächer → Erkennung der optischen Spur

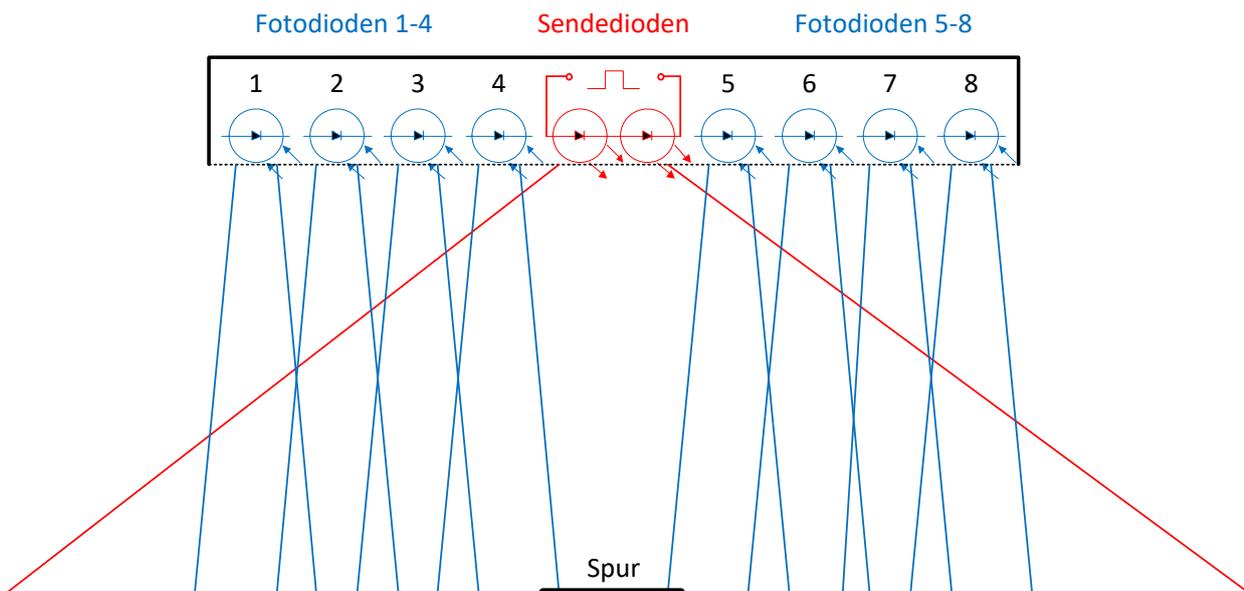


Abbildung 5-23: Funktionsweise Spurerkennung [COL11]

Die Sendepulsfrequenz von 10 KHz wird durch eine Oszillatorschaltung auf dem Basisboard erzeugt. Empfangsseitig läuft das Signal durch einen analogen Bandpassfilter, der nur den gewünschten Frequenzbereich des Senders durchlässt. Zuletzt wird das Signal an den Messbereich des analogen Eingangs des Mikrocontrollers angepasst und dort ausgewertet [COL11].

Da für die Funktionalität der Doppelkufen die Genauigkeit der Spurführung extrem wichtig war (siehe Kapitel 5.3.5), ist der bisherige Spurführungssensor (siehe Abbildung 5-23) durch eine andere Anordnung der Sende- und Fotodioden überarbeitet worden.

5.3.5 Weiterentwicklung der Spurführungssensoren

Wie bereits beschrieben waren die sich um 2012 auf dem Markt befindlichen optischen Spurführungssysteme sehr groß und sehr teuer und somit für das System nicht geeignet. Dementsprechend wurde unter dem Gesichtspunkt „high Tech und low price“ die beschriebenen neuen Entwicklungen angestoßen. Zuerst wurde wie oben beschrieben die Entwicklung eines eigenen Spurführungssensors auf Basis von Phototransistoren vorangetrieben. In weiteren Schritten wurden dann Systeme auf Basis von preisgünstigen Zeilenkameras entwickelt.

Bei späteren multifunktionalen Systemen (wie zum Beispiel das FTF Shelfie, siehe Kapitel

6.1) wurden alternative Navigationslösungen hin bis zum UWB System betrachtet und integriert.

Für eine stabil spurgeführte Fahrt des Doppelkufensystems wird unbedingt eine stabile und genaue Spurführung benötigt. Dabei ist für ein stabiles Fahrverhalten ein möglichst breiter Spurführungssensor von Vorteil. Zur Optimierung wurde zunächst der vorherige Sensor in einem Testaufbau auf dem Labortisch genau vermessen.

Der Laboraufbau besteht aus denselben Komponenten wie im Fahrzeug, allerdings können etwaige Störeinflüsse, wie sie im Fahrzeug ggf. auftreten, im Laboraufbau eliminiert werden. Die Abbildung 5-24 zeigt den Versuchsaufbau. Dabei wurde der Spurführungssensor in einer Kunststoffkiste montiert, um so eine Abschirmung gegen Umgebungslicht zu erhalten. Die Sensorplatine kann flexibel höhenverstellt oder ausgetauscht werden. Die Beleuchtungsleuchtdioden können variabel montiert werden, um so verschiedene Beleuchtungsarten zu testen.

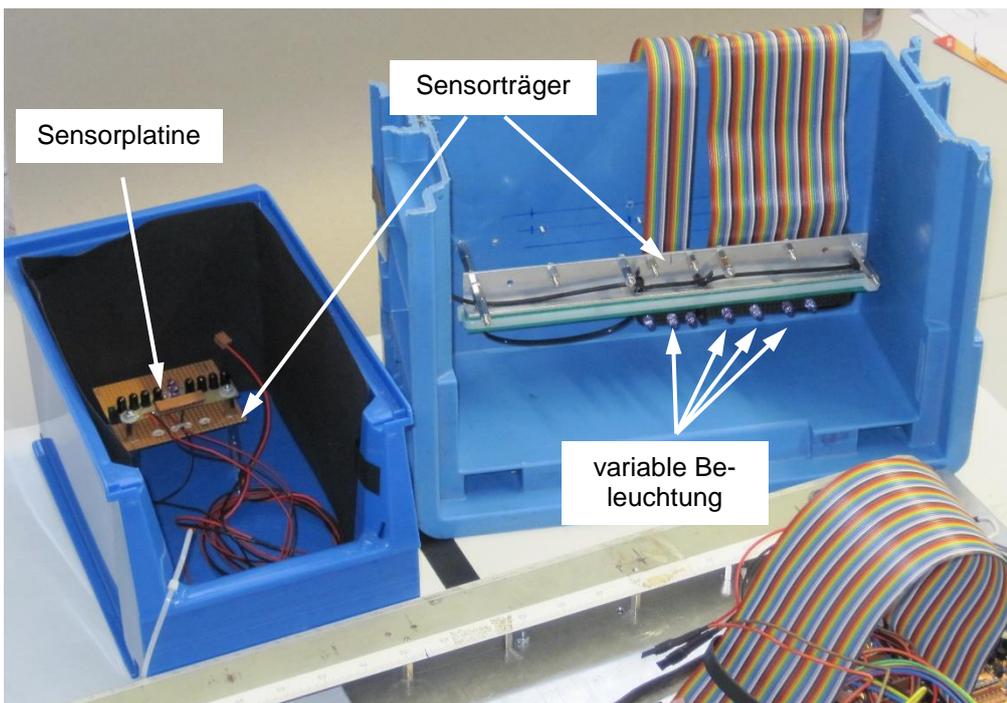


Abbildung 5-24: Variable Sensoraufhängung [COL11]

Die Steuerungselektronik besteht aus den in Abbildung 5-25 dargestellten Platinen auf einem Versuchsträger. Es können verschiedene Bodenbeläge im Versuchsaufbau getestet werden. Zum Einstellen der Leuchtdioden wurde zudem eine Messskala montiert. Das Gehäuse mit dem Spursensor grenzt an eine Längenskala, welche ebenso wie der zu

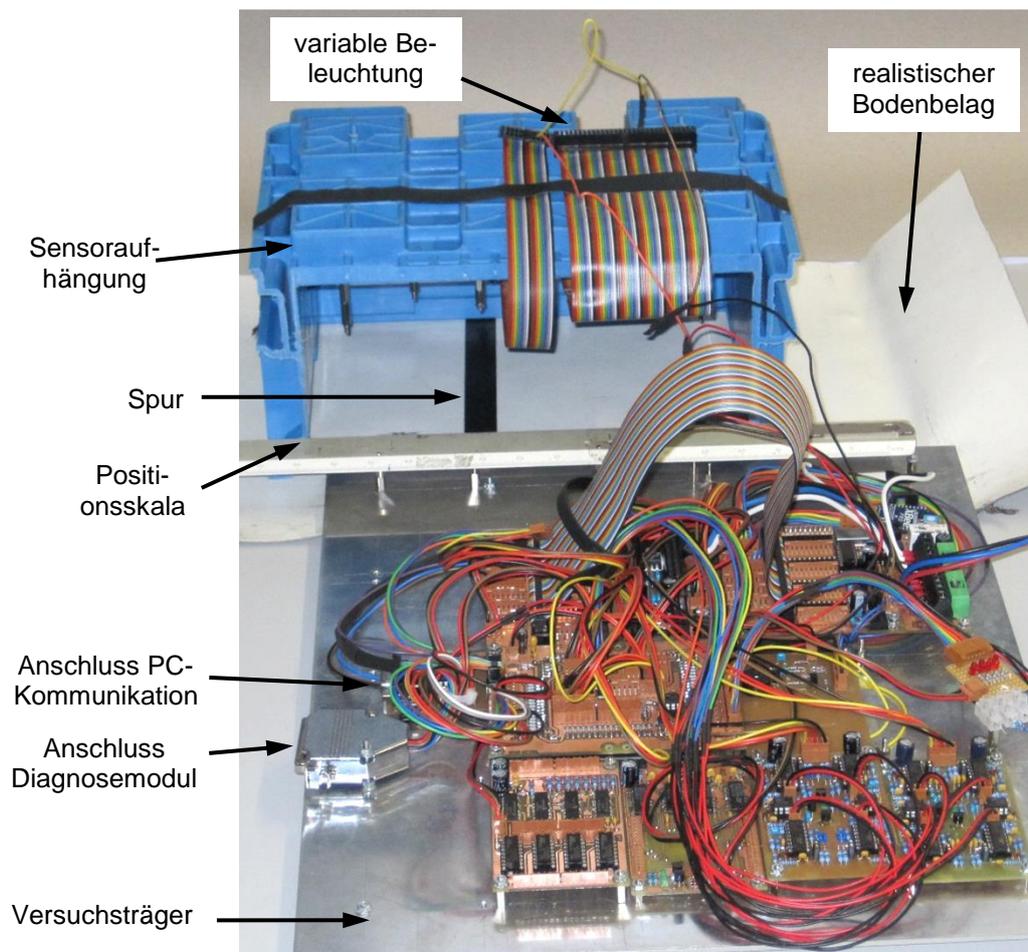


Abbildung 5-25: Versuchsaufbau für Spursensoren [COL11]

Die an den Fotodioden gemessenen Helligkeiten werden von der Messplatine über die selbe Schnittstelle, welche im Fahrzeug der Funkkommunikation dient, an einen angeschlossenen PC übertragen. Parallel zeigt ein angeschlossenes Diagnose-Modul in Echtzeit die Messwerte zur Kontrolle während den Testmessungen an. Eine Auswertung und Visualisierung der an den PC übertragenen Messwerte erfolgt in Excel

Zur Überprüfung der Beleuchtungsverhältnisse eignet sich eine Digitalkamera mit CCD-Sensor. Damit kann das infrarote Licht visualisiert und die Ausleuchtung des Sensors durch die Leuchtdioden überprüft werden (siehe Abbildung 5-26). Dadurch ist eine erste qualitative Bewertung der Ausleuchtung sowie des relativen Abstands zur Spur möglich.



Abbildung 5-26: Ausleuchtung der Spur mit Infrarotlicht

Die durch die Fotodiode erfasste Helligkeit hängt maßgeblich von der Reflexion des Lichtes auf dem Untergrund ab. Dabei reflektiert die dunkle Spur das Licht weniger als der restliche Untergrund (dies gilt für die meisten Untergründe, allerdings zeigten sich bei manchen Fahrbahnbelägen auch andere Verhältnisse). Je mehr reflektierende Fläche zwischen der Infrarot- und der Fotodiode die Spur verdeckt, desto niedriger liegt der detektierte Wert. Daraus ergibt sich, dass die minimal detektierte Helligkeit (bzw. maximale Abdunkelung) genau dann auftritt, wenn die Spur genau mittig zwischen Infrarotsender und -empfänger liegt.

Theoretisch genügt bei ideal gleichmäßiger Beleuchtung die Betrachtung des Messsignals einer einzigen Fotodiode abhängig von der Spurabweichung. Die Ergebnisse der anderen Fotodioden ergeben sich durch Superposition entsprechend dem Abstand zur gemessenen Fotodiode. In der Realität erzeugt (in Abbildung 5-26 erkennbar) die Beleuchtung jedoch ein nahezu kreisrundes Profil mit nach außen hin abnehmender Helligkeit. Somit ergibt sich eine Grundverteilung der Messwerte umgekehrt proportional zum Abstand zur Beleuchtungsquelle. Die theoretischen Grenzen der Beleuchtungskegel und Detektionsbereiche wird in Abbildung 5-26 dargestellt. In der Abbildung kann man erkennen, dass der Kegel der Fotodioden (grüne Linien) im Vergleich der zu detektierenden Spur relativ klein ist. Daher wurde die Anordnung Fotodioden optimiert (siehe Abbildung 5-27). Die eingezeichneten Kegel wurden aus den Bauteildatenblättern der Fotodioden entnommen. Darin gibt dieser Kegel den Bereich an, bei dem die Leuchtintensität bzw. Aufnahmeempfindlichkeit noch ca. 40 Prozent beträgt (vgl. [COL11]).

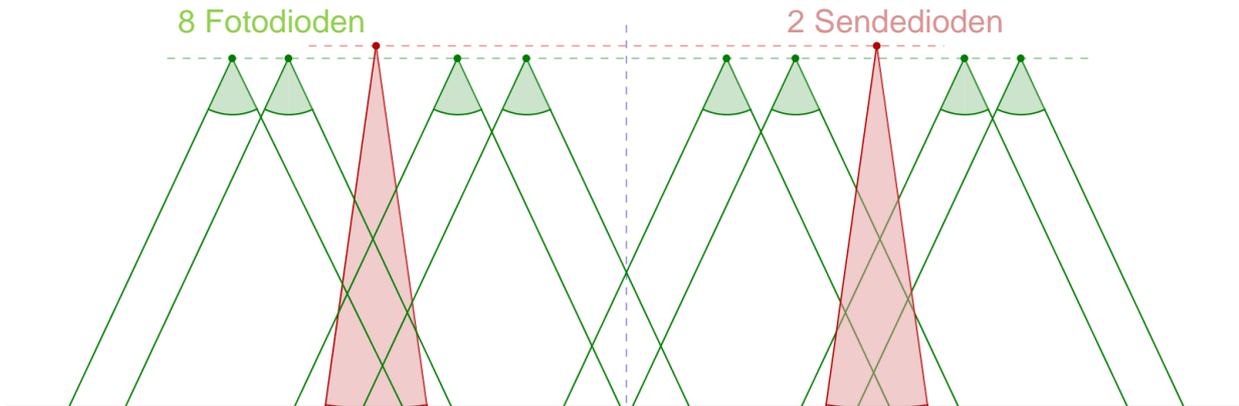


Abbildung 5-27: Theoretische Beleuchtungs- und Detektionsbereiche [COL11]

Bei den theoretischen Überlegungen entsprechend Abbildung 5-27 wird die kreisförmige Ausdehnung der Bereiche vernachlässigt. Es kann durch diese Überlegungen dennoch eine qualitative Abschätzung der von jeder Fotodiode detektierten Helligkeit in Abhängigkeit der Spurabweichung getroffen werden. In der Realität detektieren die Fotodioden auch Signale außerhalb des dargestellten Kegelbereiches. Gleiches gilt analog für die Leuchtdioden, welche unter anderem durch Streuung und Überlappung einen größeren Bereich ausleuchten (vgl. [COL11]).

Die Messwerte werden zunächst für eine Position des Sensors relativ zur Spur ausgewertet. Die gemessenen Helligkeitswerte des Sensors sind in Abbildung 5-28 als Profil über der Position der einzelnen Fotodioden dargestellt. Die Skala verläuft nach rechts positiv mit dem Nullpunkt an der Sensormitte. Die Spurmittle liegt für diese Messung bei 54 mm (vgl. [COL11]).

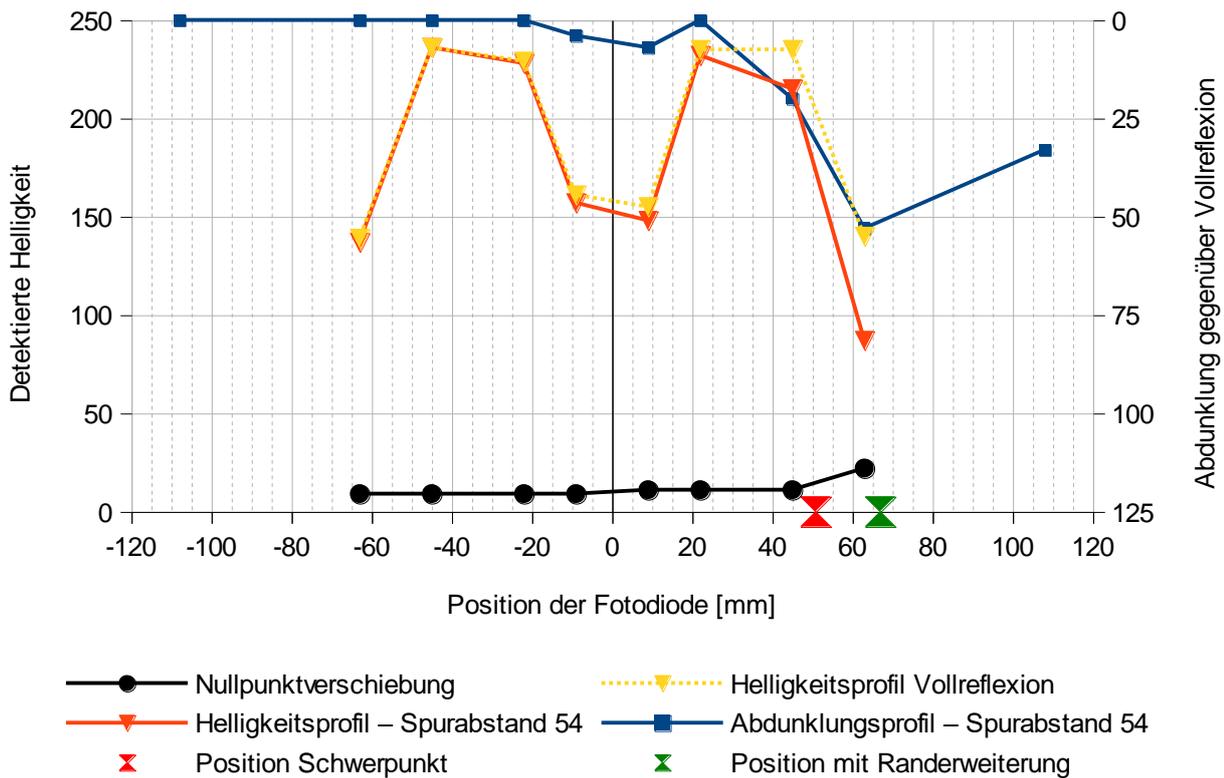


Abbildung 5-28: Beispielhaftes Helligkeitsprofil eines Spursensors [COL11]

Die Nullpunktverschiebung zeigt die durch die Auswerteelektronik gemessenen Helligkeitswerten bei vollständiger Dunkelheit bzw. ohne angeschlossenen Sensor. Dies stellt somit eine Art Nullpunktkalibrierung der detektierten Helligkeit dar. Die im folgenden gezeigten Messwerte zeigen bei jeder Fotodiode jeweils die Differenz zu dieser Kalibrierung. Die Kurve bei Vollreflexion entspricht der Fahrsituation wenn sich keine Spur im Sichtbereich befindet. Die rechte Ordinatenskala zeigt die Abdunklung, also die Differenz des Messwerts zum kalibrierten Wert bei Vollreflexion (vgl. [COL11]).

In der Abbildung 5-28 kann an beiden rechten Messpunkten der Abdunklungseffekt der Spur erkannt werden. Zur Berechnung der Spurabweichung wird mittels einer Schwerpunktsformel die Fläche unterhalb der Abdunklungskurve ermittelt. Dabei wird jeder Abdunklungswert mit der zugehörigen Sensorposition gewichtet, aufsummiert und durch die Gesamtabdunklung geteilt. Dabei tritt jedoch das Problem auf, dass wenn die Spurabweichung größer als die äußerste Sensorposition wird, die errechneten Werte niemals größer werden. Um dies zu verhindern wurden zwei zusätzliche "virtuelle" Fotodioden eingeführt. Wenn die Abdunklung nach außen hin ansteigt, liegt die Spur wahrscheinlich außerhalb des Sensors und der virtuelle Messpunkt erhält einen Wert proportional zur Differenz der beiden äußeren

Sensormesswerte. Die genauen Regeln und Gewichtungsfaktoren für diese Strategie der Randerweiterung ermöglichen eine feine Abstimmung der Sensorempfindlichkeit im Randbereich (entsprechend [COL11]).

Wird die Position der Spur entlang der Messskale durch verschieben des Sensors variiert, ergeben sich die in Abbildung 5-29 dargestellten Verläufe der Messwerte. Die Helligkeitswerte der von links nach rechts nummerierten Fotodioden sind bereits um die Nullpunktverschiebung korrigiert. Betrachtet man alle Messkurven, kann man eine gleichmäßige Empfindlichkeit über den gesamten verwertbaren Messbereich. Somit sind die Positionen der Fotodioden so gewählt, dass die Maxima der Abdunklung jeweils leicht verschoben auftreten.

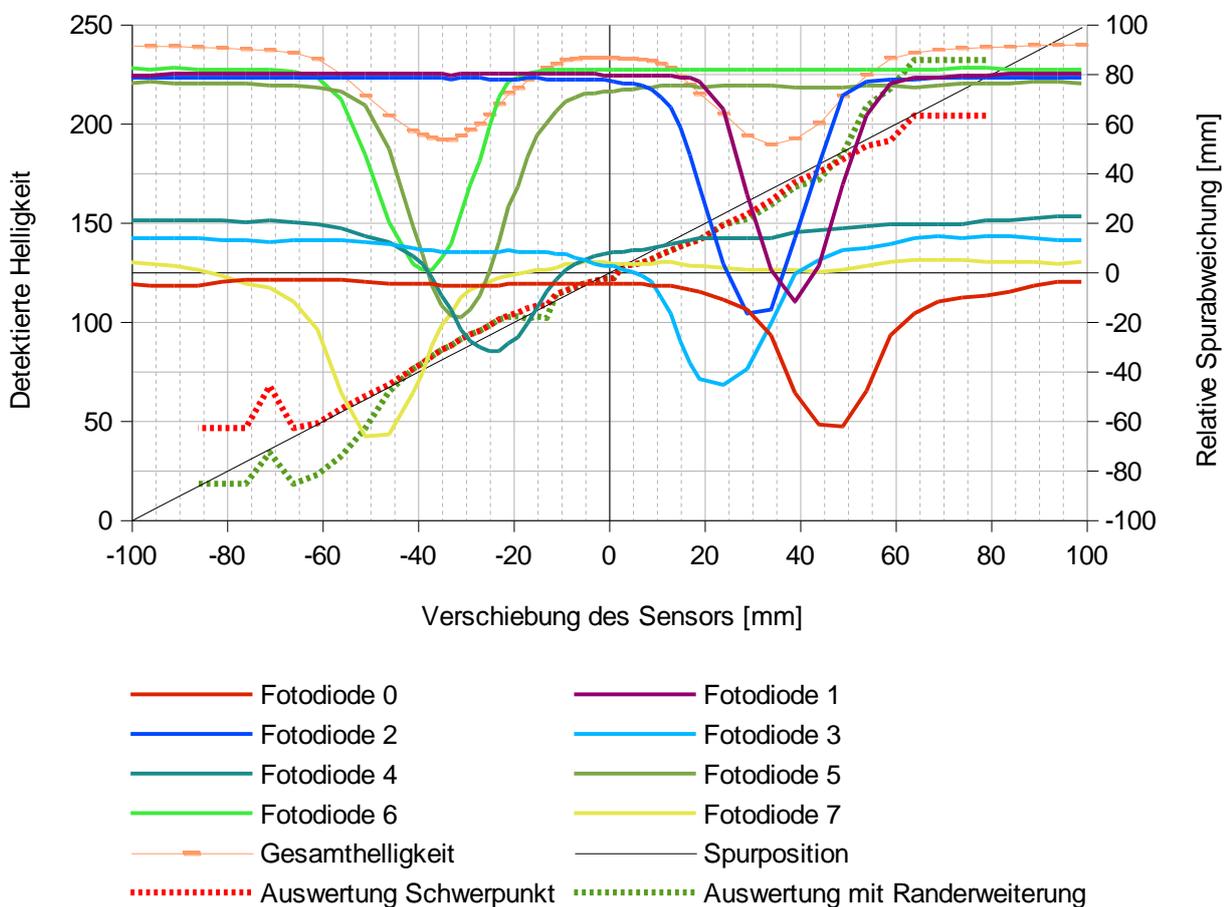


Abbildung 5-29: Detektierter Helligkeitsverlauf bei Verschiebung über die Spur [COL11]

Die Summe der einzelnen Messwerte zeigt die in den Diagrammbereich skalierte mit "Gesamthelligkeit" bezeichnete Kurve an. Idealerweise sollte diese Kurve über den Messbereich konstant verlaufen. Im Bereich um Null zeigen alle Fotodioden nur geringe Ausschläge, was kein Problem darstellt, da die Spurregelung kleine Abweichungen um die

Ruhelage zulässt. Durch diese Sensoranordnung wird aber ein breiter Messbereich abgedeckt.

Die gestrichelten Kurven in Abbildung 5-29 geben die errechnete Spurabweichung anhand der Auswerteformeln an. Diese stimmt über einen großen Bereich nahezu mit dem an der Skala eingestellten Wert überein. Die Einflussmöglichkeit der zuvor erläuterten Rand-erweiterung zeigt sich in den äußeren Bereichen durch eine Verschiebung der Kurve hin zur Linearität (entsprechend [COL11]).

Zur Validierung des Rechenmodells lassen sich die Helligkeitswerte mit einigen Annahmen so transformieren, dass sie für jede Fotodiode annähernd den gleichen Verlauf ergeben (vgl. [COL11]):

- Die Betrachtung der Abdunklung anstatt der Helligkeit bewirkt zunächst eine Verschiebung entlang der Ordinatenachse auf einen gemeinsamen Nullpunkt für alle Kurven.
- Der maximale Ausschlag einer Fotodiode korreliert in etwa mit deren Helligkeitswert bei Vollreflexion, weil die Empfindlichkeit mit gezielter Beleuchtung steigt. Division durch den jeweiligen Kalibrierungswert eliminiert diese Unterschiede.
- Der letzte Normierungsschritt basiert auf der vorigen Überlegung zum Superpositionsprinzip. Jede Kurve wird entlang der Abszisse verschoben um den Abstand zwischen Sensormitte und dem jeweiligen Punkt der maximalen Reflexion, also der Mitte zwischen Fotodiode und der nächstgelegenen Leuchtdiode.

Die so normierten Verläufe zeigt Abbildung 5-30 für die Messdaten aus obigem Beispiel.

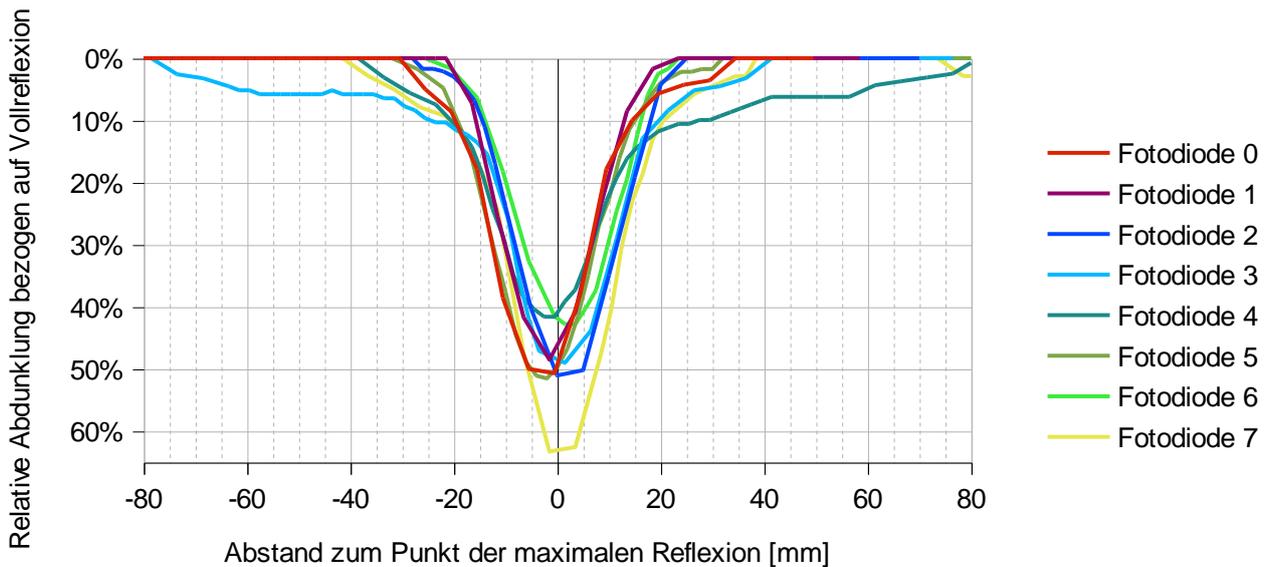


Abbildung 5-30: Normierte Abdunklungskurven [COL11]

Bei allen Messkurven (Ausnahme Fotodiode 7 wegen größerer Nullpunktverschiebung) liegen alle Maxima zwischen 40 und 55 Prozent für das untersuchte Spurklebeband. Die beiden mittleren Fotodioden 3 und 4 zeigen ein nahezu konstantes Plateau im Randbereich. Dieses ergibt sich durch Lichtstreuung der weiter entfernten Beleuchtungsdioden. Liegen die Beleuchtungsquellen zu nahe beieinander, erzeugt dieser Effekt mehrere Spitzen in der Abdunklungskurve, so dass der Messwert mehrdeutig wird und damit keine monotone Auswertung mittels Schwerpunktsformel mehr möglich ist (vgl. [COL11]).

Anhand der beschriebenen Einflüsse lassen sich mit dem variablen Versuchsaufbau gewünschte Eigenschaften des Spursensors reproduzierbar einstellen und optimieren. Die bisher identifizierten technischen Einflussparameter umfassen (vgl. [COL11]):

- Anzahl, Abstand und Abstrahlwinkel der Leuchtdioden.
- Schräge Ausrichtung der Beleuchtung, um den Beleuchtungskegel in eine Richtung zu strecken.
- Höhe der Leucht- und Fotodioden vom Boden gemessen.
- Abstand und Einstrahlwinkel der Fotodioden.
- Gegebenenfalls je Fotodiode angepasster Messwiderstand zur Kontrasteinstellung.
- Gewichtungsfaktoren für den Auswertalgorithmus.
- Glättung der Messwerte im Zeitverlauf oder über das Sensorprofil.

Durch die Versuche konnte nachgewiesen werden, dass der bisherige Spursensor durch

starke Überlappung der Messbereiche eine hohe Auflösung bei kleinem Sichtbereich erreicht. Somit lässt sich durch mehr Beleuchtungsquellen und eine größere Gesamtbreite entsprechend der Abbildung 5-27 ein größerer Sichtbereich realisieren, wobei Probleme durch überlappende Beleuchtung in der Mitte weitgehend vermieden werden.

Nach Auswahl einer festen Konfiguration für den Sensor kann mit dem Messaufbau auch der empirische Faktor zur Umrechnung vom errechneten Positionswert zur tatsächlichen Spurabweichung in Millimeter bestimmt werden. Die Untersuchungen von Kapitel 5.3.4 optischer Spurführungssensor und dessen Optimierung in Kapitel 5.3.5 sind mit denen vom Verfasser entwickelten Sensoren im Rahmen umfangreicher Labortests von wissenschaftlichen Hilfskräften und Studienarbeitern durchgeführt worden (vgl. [COL11]).

5.3.6 Auswertung der Sensordaten

Im Rahmen des Laboraufbaus werden keine zeitlichen Einflüsse sowie im Fahrzeug auftretenden Schwankungen während der Fahrt berücksichtigt. Für stabile Messwerte des Spurführungssensors müssen die Schwellwerte gut auf die verwendete Spur abgestimmt sein. Diese Schwellwerte lassen sich bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten realistisch nur experimentell ermitteln.

Eine Beurteilung anhand des von außen beobachtbaren Fahrverhaltens liefert jedoch nur sehr vage Hinweise auf die nötigen Anpassungen. Zudem hängen die tatsächlichen Messwerte maßgeblich davon ab, wie gut der Spursensor auf das Reflexionsverhalten des Untergrunds kalibriert ist. Um diese Einflussfaktoren systematisch zu untersuchen erhält die Steuerung eine neue Funktion, welche die Messwerte der einzelnen Fotodioden als Rohdaten in Echtzeit über die serielle Funkschnittstelle überträgt (entsprechend [COL11]).

Ein Kommando über die Funkschnittstelle aktiviert die Diagnosefunktion für eine vorgegebene Zeitdauer. Daraufhin sendet die Fahrzeugsteuerung unmittelbar nach jeder Messung der Spursensoren die detektierten Helligkeitswerte als hexadezimal kodierte Zahlen. Die Abtastung erfolgt in festen Intervallen mit etwa 20 Hz alternierend zwischen vorderem und hinterem Sensor. Das Übertragungsformat entspricht Abbildung 5-31 (vgl. [COL11]).

Sensoridentifikation		Fotodioden							
S	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	⇒ Kopfzeile Kalibrierung
F	82	e5	c1	8e	8a	da	db	7b	} Kalibrierungswerte
R	84	d6	cb	8c	a0	df	e0	75	
S	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	⇒ Kopfzeile Messdaten
F	7f	e0	b6	7f	78	cc	d6	75	} Messdaten
R	7d	94	7e	3a	91	d2	d6	73	
R	7f	9c	85	3d	90	d2	d6	73	
F	80	e1	b8	81	76	ca	d6	76	
R	7f	b3	9e	59	90	d4	d6	74	
F	81	e1	b7	81	75	c9	d6	76	
R	81	c6	b4	76	90	d2	d7	76	
F	81	e2	b8	82	72	c7	d8	76	
R	82	cb	c0	82	8f	ce	d6	75	

Abbildung 5-31: Übertragungsformat für die Sensordiagnose [COL11]

Die Spalte Sensoridentifikation enthält ein "F" für den vorderen bzw. ein "R" für den hinteren Sensor, sowie ein "S" für Kopfdaten (siehe Kopfzeile Kalibrierung und Kopfzeile Messdaten in Abbildung 5-31). Zu Beginn der Messung überträgt das Fahrzeug einmalig die Bezeichnung der Spalten sowie die gültigen Kalibrierungswerte beider Sensoren. Ein Tabellenkalkulationsprogramm wertet die aufgezeichneten Daten aus und beinhaltet zudem eine Implementierung des Algorithmus zur Spurerkennung sowie Positionsberechnung, analog zur Fahrzeugsteuerung (vgl. [COL11]).

In der Abbildung 5-32 sind die Messdaten des vorderen Spursensors bei einer Testfahrt dargestellt. In der Diagrammmitte fährt der Sensor über eine Markierung (Querstrich) und kehrt kurz darauf die Fahrtrichtung um. In der oberen Hälfte liegen die Abdunklungswerte der einzelnen Fotodioden kumuliert, so dass die gesamte Abdunklung sowie die Verteilung leicht erkennbar wird. Die Kurven in der unteren Hälfte spiegeln die vom Algorithmus berechneten Werte wider (vgl. [COL11]).

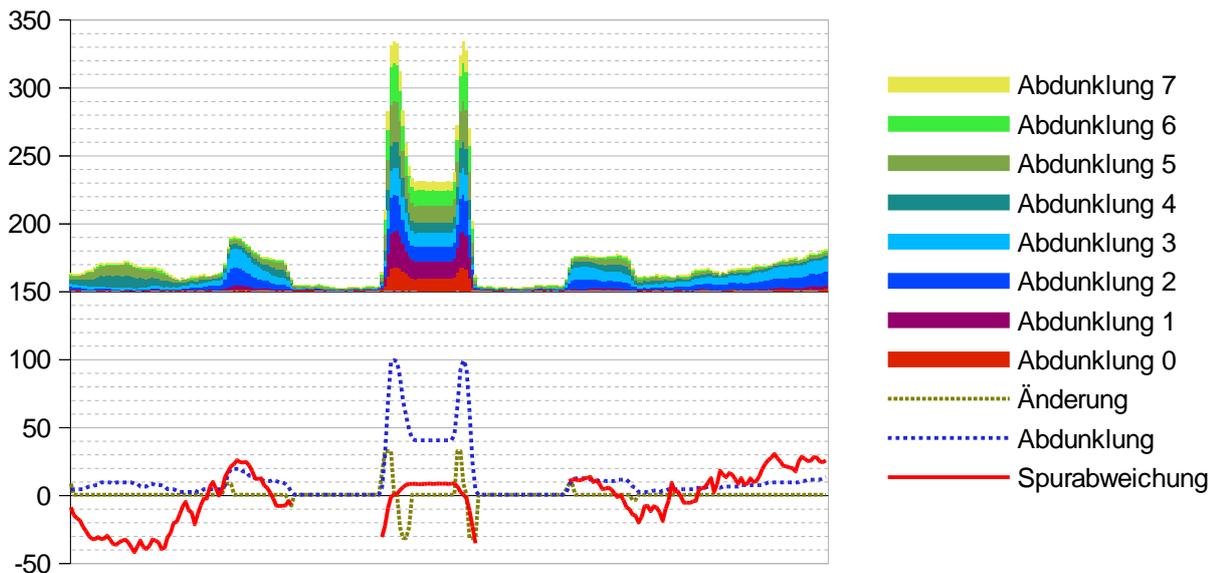


Abbildung 5-32: Auswertung der empfangenen Sensordaten [COL11]

Die Abdunklungskurve wird aus den einzelnen Helligkeiten im Vergleich zur jeweiligen Kalibrierung durch eine Bewertung ermittelt. Die Änderungskurve zeigt auf, wie viele Fotodioden einen signifikanten Sprung im Messwert seit der vorigen Messung aufweisen. Diese Information hilft besonders bei der Erkennung von Markierungen, da hier nahezu gleichzeitig alle Messwerte ansteigen. Entscheidet der Algorithmus, dass eine Spur erkannt wurde, ergibt sich die Spurabweichung aus der Verteilung der Abdunklung. Schwellwerte und Unterscheidungskriterien für die Spurerkennung lassen sich nun am Diagramm einfach als horizontale Grenzen beurteilen.

5.3.7 Kinematischer Aufbau des Fahrwerks

Dieses Thema ist auch ergänzend im Rahmen einer Diplomarbeit von 2012 mit dem Titel „Algorithmen zur Parallellenkung zweier autonomer Fahrzeuge im Verbund“ von André Colomb untersucht worden (Themenstellung und Betreuung durch den Verfasser). Diese Diplomarbeit beeinflusst durch die Untersuchungen des kinematischen Aufbaus auch die nachfolgenden Kapitel nach Kapitel 5.3.7 und wurde daher vom Verfasser bei der Beurteilung von Bahnregelung, Ausgleich der Achsen etc. berücksichtigt. Vorab musste die Kinematik einer einzelnen Kufe, welche ein Fahrzeug bildet, untersucht werden und teilweise Rückschlüsse auf ein korrektes Verhalten des gesamten Kufenpaares gezogen werden. Dabei wurde ein kinematisches Ersatzmodell einer einzelnen Kufe erstellt. Dies ist Grundlage für die folgenden Betrachtungen (siehe Abbildung 5-33). Die Kufe wird darin als

zwei Achskörper mit der Dimension b (Spurweite) dargestellt, welche durch den Kufenkörper K mit der Dimension a (entspricht dem Radstand) verbunden werden. Der Kufenkörper wird durch den Bewegungszustand (v, ω) beschrieben, der aus dem translatorischen Anteil v (vektoriell) und der Rotation ω besteht. Die Achsen R_1 (vorn) und R_2 (hinten) haben die Bewegungszustände (u_1, θ_1) bzw. (u_2, θ_2) .

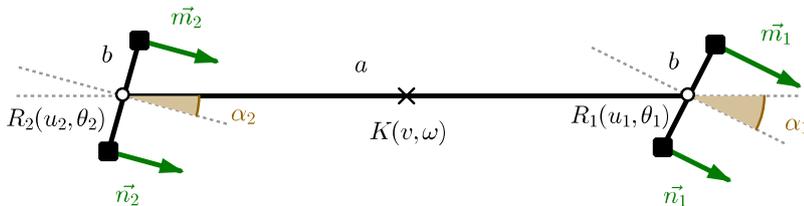


Abbildung 5-33: Kinematisches Ersatzmodell eines Fahrzeugs [COL12]

Die Bezeichnungen K , R_1 , R_2 beschreiben dabei auch die Mittelpunkte der kinematischen Ersatzkörper. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Räder verlaufen jeweils senkrecht zu den Radachsen und werden durch die Vektoren m_1 , n_1 , m_2 und n_2 bezeichnet. Die beiden Lenkwinkel der Achsen werden als α_1 und α_2 bezeichnet. Alle Winkel und Winkelgeschwindigkeiten werden dabei immer in Uhrzeigerichtung positiv angenommen.

Im reinen Fahrbetrieb des Doppelkufensystems wird der Schwenkbereich der beiden Radachsen auf $\pm 90^\circ$ begrenzt. Dies dient dazu den Einfluss der Hubhöhenänderung gering zu halten. Die Hubhöhenänderung entsteht dadurch, dass die Radachsen jeweils in einer Hupspindel gelagert sind. Entsprechend hat jede Drehung der Radachse immer eine Hubveränderung zur Folge. Durch Umkehr der Drehrichtung der Räder lässt sich auch der reale Lenkbereich vergrößern.

Durch die gelenkigen Bindungen der Körper sowie die Abrollbedingungen der Räder reduzieren sich die Freiheitsgrade des Mehrkörpersystems. Die Räder bewegen sich entsprechend der Annahme immer ideal senkrecht zur Achse und bilden damit eine nicht-holonome⁶ Bindung vom Grad eins zum Boden. Diese nicht-holonomen Bindungen sind bei Betrachtung einer Radachse linear abhängig und können somit auf eine einzige Bindung je Achse reduziert werden. Dadurch stehen der Geschwindigkeitsvektor einer Achse und deren Orientierung in einer festen Beziehung (vgl. [COL12]).

⁶ Nicht-holonome Bindungen beschränken nur die Geschwindigkeit, nicht aber die Lage eines mechanischen Systems

Der Freiheitsgrad, welcher durch den Hub der Spindeln besteht, wird hier nicht betrachtet. Die Darstellung wird in eine Ebene projiziert. Die Lagerstellen der Achsen besitzen jeweils die Lagerwertigkeit zwei und verhindern translatorische Bewegungen zwischen den Achsen und dem Kufenkörper. In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Freiheitsgrade und Bindungen des Ersatzmodells der Einzelkufe bei Betrachtung in der Ebene dargestellt.

Körper	Freiheitsgrade
Kufenkörper	= 3
Vorderachse	= 3
Vorderachse	= 3
Summe	= 9
Bindung	Lagerwertigkeit
Abrollbedingung vorn	= 1
Abrollbedingung hinten	= 1
Drehgelenk vorn	= 2
Drehgelenk hinten	= 2
Summe	$\Sigma = 6$
Mehrkörpersystem	Freiheitsgrade
Summe	$\Sigma - \Sigma = 3$

Tabelle 4: Freiheitsgrade im Ebenen [COL12]

Für das Gesamtsystem ergeben sich drei Freiheitsgrade. Zum einen die beiden Verdrehungen der Drehschemel in Bezug zum Kufenkörper (Lenkwinkeländerung). Zum anderen kann das Fahrzeug gegenüber dem Boden immer in eine Richtung bewegt werden, wobei eine Kopplung aus Translation und Rotation vorliegt. Dieser Freiheitsgrad unterliegt einer nicht-holonomen Beschränkung. Die Lenkwinkel definieren die momentane Bewegungsart. Dies kann aber über die Zeit durch Änderung der ersten beiden Freiheitsgrade variieren. Die Kufe erreicht somit jeden Punkt der Ebene in jeder beliebig gewünschten Orientierung, was der vollständigen Flächenbeweglichkeit entspricht. Die Trajektorie zum Erreichen einer bestimmten Pose (bestehend aus Position und Orientierung) muss passend zur nicht-holonomen Beschränkung gewählt werden.

5.3.8 Regelstruktur der einzelnen Kufe

Die Regelung der Kufe wird in einer Kaskadenregelung realisiert. In die Kaskadenregelung fließen mehrere Messgrößen ein, welche durch Sensoren erfasst werden. An beiden Radachsen sind Drehgeber verbaut, die kontinuierlich die aktuellen Lenkwinkel α_1 und α_2

erfassen. Der seitliche Versatz der Fahrzeuglängsachse zur Spurmarkierung wird durch zwei jeweils am Ende der Kufe angebrachte Spursensoren ermittelt. Eine Herleitung der erforderlichen Spurregelung für ein Fahrzeug findet sich in [COL11] und kann als eine mögliche Quelle von Pfadvorgaben herangezogen werden.

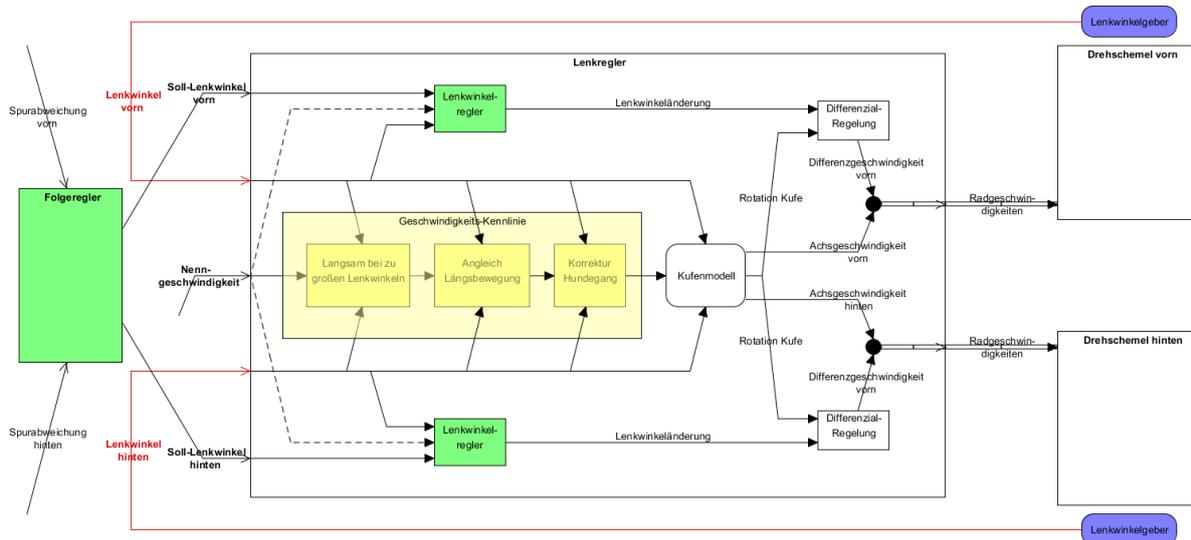


Abbildung 5-34: Regelstruktur eines Einzelfahrzeugs mit Spurführung [COL12]

Zentrales Element des Regelkreises ist der so genannten Lenkregler entsprechend Abbildung 5-34. Eingangsgrößen für den Regelkreis sind die beiden gemessenen Lenkwinkel α_1 und α_2 , eine extern vorgegebene Nenngeschwindigkeit v_n und die beiden Soll-Lenkwinkel α_{1s} sowie α_{2s} . Letztere stellen die Schnittstelle zum übergeordneten Regelkreis des Folgereglers dar, welcher seine Ausgangsgrößen aus den gemessenen Spurbewegungen vorn und hinten als Eingänge bestimmt.

Zunächst wird im Lenkregler basierend auf der aktuellen Lenkwinkelkonfiguration die Nenngeschwindigkeit v_n über verschiedene Faktoren angepasst. Daraus wiederum können die beiden Achsgeschwindigkeiten u_1 und u_2 , sowie der rotatorische Anteil ω der Gesamtbewegung im Kufenmodell bestimmt werden. Aus dem Vergleich zwischen Soll- und Ist-Lenkwielen werden die Lenkwinkeländerungsraten $\dot{\alpha}_1$ und $\dot{\alpha}_2$ ermittelt. Zusammengefasst mit den translatorischen Achsgeschwindigkeiten ergeben sich die einzelnen Radgeschwindigkeiten m_1, n_1, m_2 und n_2 als Ausgangsgrößen. Über die beiden Drehschemel mit Lenkwinkelgeber schließt sich der Regelkreis [COL12].

5.3.9 Bahn- bzw. Pfadplanung

Es gibt unterschiedliche Ansätze wie ein automatisch fahrendes FTF in seiner Umgebung vom Ausgangspunkt zum Ziel geführt werden kann. Notwendig ist dabei immer eine Lokalisierung des Fahrzeuges. Dazu werden verschiedene Systeme zur Lokalisierung eingesetzt, wobei meist eine Kartierung der Umgebung anhand der Sensordaten vorgenommen wird.

Die darauf aufbauenden Planungsschritte lassen sich in drei Klassen unterteilen: die globale Bahnplanung, die lokale Bahnplanung und die Bewegungssteuerung [GRA08]. Das Doppelkufensystems wird über eine optische Spure lokalisiert, welche auf dem Boden angebracht ist. Um dabei die Position entlang der Spur bestimmen zu können werden Wegmarken in Form von Barcodes eingesetzt. Somit lässt sich zumindest an diesen Stellen die Position des Doppelkufensystems genau bestimmen. Eine Bahnplanung in diesem Sinne findet nicht statt. Die Position wird aus der aktuellen Lage zur Spur und den Steuerungskommandos abgeleitet.

Die verbreitetsten Verfahren zur Pfadplanung stammen größtenteils aus dem Gebiet der Robotik. Eine gute Übersicht bieten [LAT91] und [LAV06]. Es existieren aber neben diesen Algorithmen, welche hier kurz vorgestellt werden, noch viele weitere Ansätze. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll jedoch nur eine grobe Übersicht sowie die Möglichkeit zur Einordnung der nachfolgend entwickelten Methoden gegeben werden.

Für das Doppelkufensystem ist sowohl eine globale als auch eine lokale Bahnplanung nötig. Die globale Bahnplanung beschreibt dabei den Weg von einem Ort A zu einem Ort B. Die lokale Bahnplanung hingegen beschreibt das Verfahren um das Doppelkufensystem auf der Spur zu halten.

Es muss auf die globale Bahnplanung und die Regelung im Verbund besonders eingegangen werden, da das Doppelkufensystem aus zwei Fahrzeugen besteht, aber wie ein Fahrzeug agieren muss. Dieses Thema war und ist ein Grundlagenthema. Dazu hat das IFT eine interne Arbeitsgruppe unter Leitung des Verfassers mit dem Assistenten André Colomb und zwei wissenschaftlichen Hilfskräften gebildet.

Globale Bahnplanung

Die globale Bahnplanung erstellt eine Trajektorie⁷ vom Ausgangs- zum Zielpunkt und kann dabei z.B. Hindernisse kollisionsfrei umfahren sowie einen möglichst effizienten Weg nach vorgegebenen Optimierungskriterien (z.B. Fahrzeit, Wegstrecke) auswählen. Dazu wird eine bekannte Umgebungskarte benötigt. Dabei ergeben sich jedoch in der Regel beliebig viele Wege.

Die Algorithmen zur Berechnung der Trajektorie reduzieren das Fahrzeug zu einem Punkt, der durch seine ebene Position und Orientierung beschrieben wird. Um nicht mit Hindernissen zu kollidieren werden diese entsprechend vergrößert, um die Außen-dimensionen des realen Fahrzeuges zu berücksichtigen. Abhängig von dessen Orientierung ergeben sich unterschiedliche Radien, um welche die Hindernisse erweitert werden müssen. Dies führt zur Modellierung eines dreidimensionalen Konfigurationsraums, bestehend aus allen möglichen Posen⁸ [GRA08].

Der Konfigurationsraum wird mit möglichen Teilstücken eines Wegs durchzogen. Durch so genannte Straßenkartenverfahren können im Folgenden dann nach bestimmten Regeln untereinander verbundene Wegsegmente erzeugt werden, die mathematisch als Graph mit Knoten und Kanten beschrieben werden. Im Graph sind die geraden Verbindungslinien aller Eckpunkte von Hindernissen enthalten. Im Voronoi-Diagramm⁹ entstehen die Kanten als Menge der Punkte, die von jeweils vorgegebenen Zentren gleich weit entfernt sind. Innerhalb des so gewonnenen Graphen können dann diverse Standardalgorithmen eine Folge von Kanten als kürzesten Weg zwischen Start- und Zielpunkt finden (vgl. [COL12]).

Eine weitere Möglichkeit stellen Zellzerlegungsverfahren dar. Dabei wird der Raum zunächst eher willkürlich in einzelne Zellen segmentieren, beispielsweise durch zerteilen an vertikalen und horizontalen Schnittlinien. Diese Zellen können dann als frei oder belegt (durch Teil eines Hindernisses) klassifiziert werden und bilden durch ihre gemeinsamen Kanten wiederum einen vernetzten Graphen. Eine Verbindung der Mittelpunkte der beteiligten Zellen ergeben einen Lösungsweg.

⁷ Kurve entlang der sich ein Fahrzeug bewegt

⁸ Unter Pose versteht man die Kombination aus Position und Orientierung eines Objekts

⁹ Zerlegung des Raumes in Segmente, die durch eine vorgegebene Menge an Punkten des Raumes bestimmt werden

Bei den Potenzialfeldmethoden wird im Raum ein kontinuierliches, differenzierbares Vektorfeld gebildet. Darin wirken der Startpunkt sowie die Hindernisse als Punkte mit abstoßendem Potenzial, dem Zielpunkt wird ein anziehendes Potenzial zugeordnet. Der Gradient der Potentialfeldverteilung zeigt dann an jedem beliebigen Ort den Weg in Richtung Ziel. Lokale Minima im Potenzialfeld sowie enge Durchfahrten zwischen Hindernissen stellen bei dieser Methode die größten Herausforderungen dar.

Es gibt auch zufallsbasierten Planungsalgorithmen wie z.B die Rapidly Exploring Random Trees¹⁰. Mit diesen lässt sich erfahrungsgemäß häufig sehr schnell eine Lösung finden, welche jedoch nicht sicher ist und ggf. weit vom Optimum entfernt liegt.

Lokale Bahnplanung

Stehen nur begrenzte Informationen aus der direkten Umgebung des Fahrzeugs zur Verfügung, kommen die Algorithmen der lokalen Bahnplanung zum Einsatz. Sie dienen auch zur Verfeinerung der Ergebnisse aus der globalen Bahnplanung [GRA08].

Zur Umfahrung von Hindernissen werden potenzialbasierte Verfahren eingesetzt, die den sichtbaren Hindernissen abstoßende Potenziale zuordnen. Bei der Vektorfeld-Histogramm-Methode wird ein Histogramm erstellt, indem Hinderniswahrscheinlichkeiten für verschiedene Fahrtrichtungsbereiche angegeben werden. Daraus ist eine Annäherung möglich um einen möglichst optimalen Weg zu finden. Die Tangent Bug-Methode wiederum lenkt das Fahrzeug stur in eine Richtung bis ein Hindernis auftaucht. Dort folgt sie der Hinderniskontur, bis die Zielrichtung nach der Umfahrung wieder frei ist.

Wird durch die globalen Bahnplanung ein Weg ermittelt, kann dieser meist noch nicht mit der Fahrzeugkinematik durchfahren werden. Um den Weg zu optimieren und zu glätten, so dass das Fahrzeug ihm folgen kann, wird die Methode elastischer Bänder eingesetzt [QUI93]. Dabei wird ein virtuelles, elastisches Band entlang des globalen Pfads modelliert. Darin eingepreßt werden interne Kräfte, welche das Band glattziehen, sowie externe Kräfte, die das Band dehnen und so Hindernisse vermeiden. Durch dieses Vorgehen entsteht eine glatte, kontinuierliche Bahn, welche die globale Pfadvorgabe annähert und währenddessen Hindernissen ausweicht.

Bei nicht-holonomen Fahrwerken ergeben sich andere Anforderungen und entsprechend

¹⁰ Suchalgorithmus der hochdimensionale Suchräume zufällig nach möglichen Pfaden absucht

andere Verfahren, die dort eingesetzt werden. Dabei werden die diskreten Wegpunkte eines vorgegebenen Pfades durch kontinuierliche Kurven verbunden, welche ausreichend glatt verlaufen, so dass die Zustandsgrößen der Bahnregelung keine unerlaubt großen Werte oder Sprünge aufweisen.

Eine Möglichkeit solcher verbindenden Kurven stellen die Klothoiden dar. Diese werden z.B. im Straßen- oder Gleisbau zur Erzeugung glatter Übergänge genutzt. Die Klothoide hat eine kontinuierlich mit der zurückgelegten Kurvenlänge wachsende Krümmung. Daraus lassen sich Kurvenzüge als Kombination mit Geradenstücken und Kreisbogensegmenten zusammensetzen, um Stützpunkte eines Pfades mit diskret vorgegebener Richtung und Krümmung zu verbinden[MEE92].

Verwandt mit den numerisch nur näherungsweise handhabbaren Klothoiden sind die kubischen Spiralen, welche [LIA05] als Grundlage für den Übergang zwischen Kurvensegmenten unterschiedlicher Richtung und Krümmung benutzt. Dabei werden Kurvenzüge generiert, die aus maximal fünf Segmenten bestehen: höchstens zwei kubischen Spiralsegmenten mit maximaler Krümmung, verbunden mit bis zu drei Geradenstücken.

Es gibt auch Verfahren bei denen ein Polygonzug als Steuerungselement eingesetzt wird [WAL05]. Die Kontrollpunkte werden dabei nur angenähert, nicht zwangsweise passiert. Die Zusammensetzung mit Kreisbogensegmenten ermöglicht zusätzlich eine Beschränkung des minimalen Kurvenradius, der bei manchen Fahrwerkskinematiken nötig wird. Einen ähnlichen Ansatz greift [HEN08] auf, indem ein Kontrollpolygon zwischen den Punkten der Trajektorie aufgespannt wird, an denen die Krümmung jeweils Null wird – also an Geradenstücken und in Wendepunkten. Zusätzliche Kontrollpunkte liegen auf der Kurve an der Stelle, wo diese parallel zum jeweiligen Abschnitt des Kontrollpolygons verläuft. Weitere Betrachtungen über die Existenz einer optimalen Lösung mit Klothoiden liefert [DEG98].

Auch Polynome können zur Bildung der Trajektorien eingesetzt werden. Dies wird z.B bei [TAK89] für Polynomkurven fünften Grades und bei [PIA00] für Splinekurven fünfter Ordnung beschrieben. Es wird jeweils ein Satz von Stützpunkten durch krümmungsstetige Kurvenzüge modelliert. [LEP03] erweitert diesen Ansatz durch eine Optimierung der Fahrzeit unter Berücksichtigung der physikalischen Begrenzung der möglichen Beschleunigung in Radial- und Tangentialrichtung.

Den Anforderungen des Doppelkufenystems am nächsten kommt die Methodik von [JOL09], welche eine kubische Bézierkurve unter Berücksichtigung der Fahrtrichtung im

Start- und Zielpunkt generiert. Diese Kurve wird dann mit einer variablen Geschwindigkeit durchfahren, um die maximale Geschwindigkeit und Beschleunigung einzuhalten.

Bahnregelung und Bewegungssteuerung

Damit das Doppelkufensystem mit seinen beiden einzelnen Kufen geplanten Bahnen folgen kann müssen für jeden Antrieb passende Bewegungsabläufe berechnet werden. Dabei müssen sowohl die Differenz der aktuell gemessenen Zustandsgrößen zu den theoretisch vorbestimmten Werten aus der von der Bahnplanung vorgegebenen Trajektorie und die Regelabweichung berücksichtigt werden, als auch die Vorsteuerung, welche die real zu erwartenden Bewegungen des Antriebs möglichst genau dem theoretischen Verlauf folgen lässt.

Die Herleitungen der Formeln sprengen den Umfang der Arbeit, darum werden im Folgenden nur die Zusammenhänge beschrieben. Die Umsetzung der Berechnungen erfolgt dann in der Software in der Mikroprozessorsteuerung (siehe 5.3.2).

Da die Steuerung den Programmablauf zyklisch abarbeitet werden die Messgrößen immer nur zu bestimmten Zeiten abgetastet und die neuen Steuergrößen generiert. Um zwischen den Zyklen möglichst keine Regelabweichung zu erhalten wirkt die Vorsteuerung. Gibt es keine Vorsteuerung, kann der Regler jeweils erst dann reagieren, wenn er schon von der vorgegebenen Trajektorie abweicht. Die so entstehenden Fehler würden sich entlang der Bahn aufaddieren, so dass immer größere Korrekturen nötig würden und das System nicht mehr folgen könnte. Um die Regelabweichung möglichst minimal zu halten kann auf zwei Arten Gegengesteuert werden:

- Der Positionsregler setzt entsprechende Geschwindigkeiten für eine translatorische sowie rotatorische Komponente der Korrekturbewegung.
- Der Bahnregler ermittelt die Abweichung von der theoretisch geplanten Bahn und führt eine zusätzliche Rotationsbewegung aus, um allmählich wieder auf die Bahn zurückzukehren.

Der Bahnregler benötigt dementsprechend auch eine Vorsteuerung, genauso wie der Trajektorienregler. Letzterer generiert komplette Verläufe der Zustandsgrößen, so dass der reale Verlauf gegen die vorgegebene Bahn konvergiert[GRA08]

Bei allen Reglerarten wird ein möglichst exaktes Modell benötigt, welches eine genaue Beziehung zwischen der Bewegung der Antriebe und der Änderung der Fahrzeugpose

herstellt.

Damit eine koordinierte Gesamtbewegung beider Kufen und somit des Doppelkufensystems entsteht, müssen die Pfade aller zur Regelung des Fahrzeugs nötigen Punkte generiert werden. Dazu wird die affine Invarianz der B-Spline-Kurven genutzt.

Durch z.B. Verschiebung, Drehung, Streckung, Scherung, oder Spiegelung bzw. Kombinationen daraus kann aus einer affinen Abbildung¹¹ aller Punkte eine modifizierte Kurve generiert werden. In dieser Anwendung sind besonders die elementaren Transformationen Drehung und Verschiebung, die bei der Betrachtung verschiedener Punkte auf einem Starrkörper auftauchen, interessant. Die affine Invarianz besagt nun, dass statt einer Abbildung der gesamten Kurve eine äquivalente Kurve durch Abbildung der Kontrollpunkte erzeugt wird.

Diese affine Abbildung kann vektoriell beschrieben werden. Dies wird durch eine Multiplikation mit der Matrix \underline{A} und der Addition mit dem Vektor \vec{y} (Verschiebungsvektor) erreicht. Die abgebildete B-Spline-Kurve kann nach einsetzen dieser wie folgt zerlegt werden.

$$\underline{A} \cdot \vec{S}(t) + \vec{y} = \sum_{i=1}^{n-k} (\underline{A} \cdot \vec{P}_i + \vec{y}) \cdot B_{i,k}(t) - \vec{y} \cdot \sum_{i=1}^{n-k} B_{i,k}(t) + \vec{y} \quad (5.1)$$

Dabei heben sich die beiden letzten Summanden in der Gleichung (5.1) auf. Dies ergibt sich aufgrund der B-Spline-Basispolynome (Partition der Eins). Dies gilt auch für die Bézierkurven, welche sich als B-Spline-Kurven darstellen lassen und auch dann, wenn \underline{A} und \vec{y} zeitvariant, also abhängig vom Zeitparameter t sind [COL12].

Im Folgenden werden mehrere Transformationsschritte beschrieben, die zur Abbildung der Bahnkurve auf andere Punkte des Verbundfahrzeugs benötigt werden.

Dabei soll die Bahnkurve des Doppelkufensystems im definierten Bezugsmittelpunkt Z eingehalten werden. Dazu wiederum müssen die jeweils zwei Drehschemel passend abgeleiteten Bahnkurven folgen, welche sich zunächst durch eine reine, zeitkonstante Verschiebung um die Vektoren r_1 bis r_4 ergeben. Somit kann für jeden Drehschemel aus

¹¹ Eine affine Abbildung ist eine Abbildung zwischen zwei affinen Räumen, bei der Kollinearität, Parallelität und Teilverhältnisse bewahrt bleiben oder gegenstandslos werden

den bekannten Bahnvorgabeparametern und den relativen Versatzgrößen eine Reihe von Kontrollpunkten berechnet werden. Durch diese Kontrollpunkte wiederum kann die Bahn des jeweiligen Drehschemels als B-Spline-Kurve ermittelt werden.

Die Berechnung wird in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt. Zuerst werden die Kufenmittelpunkte K_1 und K_2 berechnet und dann diese jeweils auf die beiden Achsmittelpunkte R_1 und R_2 bzw. R_3 und R_4 transformiert [COL12].

Da es sich bei dem Doppelkufensystem um ein omnidirektionales Fahrzeug handelt muss neben der Fahrtrichtung, die durch den Geschwindigkeitsvektor v beschrieben wird, auch der Schwimmwinkel β betrachtet werden. Dieser Schwimmwinkel beschreibt den Winkelversatz zwischen Fahrtrichtung und einer fahrzeugfesten Referenzachse. Bei konstantem Schwimmwinkel $\beta = 0^\circ$ entspricht das Fahrzeugverhalten z.B. einem Fahrwerk mit Differenzialantrieb, wo der Referenzpunkt mittig zwischen den zwei Antriebsrädern liegt, so wie bei den einzelnen Drehschemeln.

Beim Doppelkufensystem soll der Schwimmwinkel minimiert werden. Der Schwimmwinkel β ergibt sich als Differenz der Orientierung ψ zum Fahrtrichtungswinkel φ . Diese werden jeweils in globalen Koordinaten angegeben. Die Abbildung der Bahnkurve zu einer vorgegebenen Orientierung bedeutet für die Vektoren im relativen Koordinatensystem eine reine Drehung. Diese wird durch die in Gleichung (5.2) dargestellte Matrix erreicht.

$$\underline{\underline{A}}(t) = \begin{bmatrix} \cos \psi(t) & -\sin \psi(t) \\ \sin \psi(t) & \cos \psi(t) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Mittels dieser Matrix müssen die Verschiebungsvektoren r_1 bis r_4 transformiert werden, so dass die Bahnkurven für die Achsmittelpunkte zunächst in globalen Koordinaten vorliegen. Nach der Transformation können die Steuerkommandos für die jeweiligen Drehschemel daraus direkt bestimmt werden.

Ändert sich der Schwimmwinkel des Doppelkufensystems im Vergleich zur translatorischen Geschwindigkeit sehr schnell kann es zu einer Rotation des Systems kommen. In diesem Fall können einzelne Punkte entlang ihrer Trajektorie zu einem momentanen Stillstand kommen. Die resultierende Bahnkurve für einen solchen Punkt als Verkettung der B-Spline-Kurve und der Transformation ist dann in Summe nicht mehr regulär, da der Geschwindigkeitsvektor in diesem Punkt verschwindet. Es sollte allerdings möglichst eine Stetigkeit Bahnkurven gegeben sein, da eine sich bewegendes Fahrzeug nur einer stetigen Kurve

folgen kann. Auch in den Start- und Endpunkten sollte ein stetiger Übergang höherer Ordnung zum Verlauf außerhalb des betrachteten Parameterintervalls herrschen, so dass die Gesamtfunktion wieder ausreichende Stetigkeit aufweist.

Ausgleich des relativen Versatzes

Analog zur überlagerten Regelung der Orientierung ψ kann bei der Transformation der Bahnkurven auch die Korrektur des relativen Versatzes berücksichtigt werden. Beim Dopplekufensystem soll der Versatz reduziert werden ($z = 1$). Dazu bietet sich ein linearer Verlauf zur Überführung in die ideale Rechteckanordnung an. Aufgrund der Definition des Parameterintervalls lässt sich dieser trivial formulieren.

$$z(t) = 1 - t \quad (5.3)$$

Die entsprechenden Versatzgrößen D , ΔP und δ ergeben sich dann zeitabhängig, was sich wiederum in den Verschiebungsvektoren r_1 bis r_4 widerspiegelt. Hierbei muss insbesondere die Kettenregel beim Ableiten berücksichtigt werden [COL12].

Da ein Doppelkufensystem aus zwei identischen Kufen besteht werden die Berechnungen der Regelungsprozesse auf beide Fahrzeuge und deren Controller verteilt. Dies bietet den Vorteil, dass beim Ausfall einer Kufe die andere Kufe noch unabhängig agieren kann.

Um auf beiden Kufensteuerungen die Regelungsprozesse berechnen zu können müssen vorab die Eingangsgrößen abgleichen werden. Dies gilt besonders für die Größen die jeweils nur auf einem Fahrzeug erfasst werden. Zunächst muss dann jede Kufe die Lage zur anderen Kufe ermitteln sowie die aktuell festgestellte Abweichung der Ist- und Sollgrößen der Regelung und die direkt messbaren internen Zustände wie z.B. die Lenkwinkel. Sollte bei einer der Kufen dabei ein Grenzwert überschritten werden muss die maximal zulässige Geschwindigkeit reduziert werden. Folgenden Daten müssen jeweils der anderen Kufe übermittelt werden:

- Möglichst noch nicht weiter verarbeitete Messwerte.
- Die Regelabweichungen bzw. reduzierte Maximalgeschwindigkeit.
- Eine Repräsentation des Fahrzeugstatus.
- Ideal findet dabei auch gleich eine Zeitsynchronisation statt, so dass beide beteiligten Steuerungen auf derselben Zeitskala agieren und nicht voneinander wegdriften.

Sind die Daten übermittelt können die folgenden Schritte unabhängig auf beiden

Steuerungen durchgeführt werden. Zunächst bestimmt jede Kufe das Minimum aus ihrer eigenen und der von der Partnerkufe übermittelten erlaubten Maximalgeschwindigkeit. Im nächsten Schritt können aus allen Lenkwinkeln der vier Achsen des Doppelkufensystems die jeweiligen Momentanpole berechnet werden. Ist die Abweichung zu groß, wird die erlaubte Geschwindigkeit reduziert damit die Abweichung schnellstmöglich korrigiert werden kann. Aus allen bekannten Lagemesswerten kann parallel der aktuelle relative Versatz bestimmt werden.

Im Folgenden vergleicht der Profilgenerator seine aktuelle Geschwindigkeit mit der erlaubten gemeinsamen Geschwindigkeit. Bei Abweichungen wird diese ggf. angepasst. Die Kontrollpunkte der vorausgeplanten Bahnkurve werden anhand der aktuellen Lage- und Versatzgrößen auf die zur Regelung nötigen Achsmittelpunkte transformiert.

Nimmt die Regelabweichung zu hohe Werte an muss die Bahnkurve neu geplant werden. Dazu wird die durch Messung festgestellte tatsächliche Position als neuer Ausgangspunkt verwendet. Die Zielparameter bleiben dabei gleich oder werden, durch ebenfalls neu abgetastete Werte, ersetzt. Für den nächsten Zyklus sollten dementsprechend neue Kontrollpunkte der Trajektorie für das Verbundfahrzeug bereitstehen.

Die bis zum nächsten Abtastzyklus gültigen Zustandsgrößen inkl. höherer Ableitungen verwenden die einzelnen Antriebe, um der geforderten Trajektorie möglichst nahe zu folgen (vgl. [COL12]).

5.4 Sensorverfahren für das Doppelkufensystem

Das Doppelkufensystem besteht wie in Kapitel 5.3 beschrieben aus zwei unabhängigen einzelnen Kufen, die mechanisch nicht miteinander verbunden sind. Es müssen beide Kufen gemeinsam agieren, um eine Palette aufnehmen und transportieren zu können. Dazu ist es notwendig durch eine geeignete Sensorik die Lage der beiden einzelnen Kufen zueinander zu erfassen. Dabei muss sowohl der Abstand der beiden Kufen und der Winkel zueinander erfasst werden als auch der Längsversatz. Erst durch eine entsprechende Sensorik können die Antriebe der einzelnen Kufen so geregelt werden, dass sie wie ein Fahrzeugverbund agieren. Durch die Sensorik zwischen den Kufen lässt sich das System so aufbauen, dass nur eine der Kufen spurgeführt werden muss. Sie fungiert dann als Masterkufe und kann z.B. durch ein optisches Spurführungssystem oder eine SLAM-Navigation geführt werden oder durch eine manuelle Bedienung gesteuert werden. Die zweite Kufe wird zur Slave-Kufe, welche der Master-Kufe im Richtigen Abstand, mit der richtigen Geschwindigkeit und Ausrichtung zueinander folgt.

Neben der Sensorik zwischen den Kufen ist für den Einsatz des Doppelkufensystems eine Sensorik zur Erkennung der Ausrichtung der Paletten notwendig. Durch solch eine Sensorik kann sichergestellt werden, dass sich die beiden Kufen optimal unter der Palette positionieren können und es beim Einfahren in die Palette nicht zu Kollisionen zwischen den Kufen und der Palette und dadurch, vor allem bei leeren Paletten, zum Verschieben dieser kommt. In diesem Fall wäre eine Aufnahme der Palette, so dass sie weiter transportiert werden kann, nicht mehr möglich. Die Sensorik zur Erkennung der Ausrichtung der Palette dient dazu Paletten, die sich nicht genau auf einer definierten Übergabeposition befinden, mit dem System aufnehmen und transportieren zu können. Vor allem bei vorangegangenen manuellen Prozessen, wie zum Beispiel dem Transport der Palette mit einem Gabelstapler, kann ein definiertes positionieren an einer Übergabestelle nicht gewährleistet werden.

Die Entwicklung der Sensorlösungen für die Ermittlung der Lage der beiden Kufen zueinander und zur Ausrichtung der Paletten erfolgte durch zwei Studienarbeiten (vgl. [GRO13] und [PES13]). Die Themenstellung und die Betreuung der beiden Studienarbeiten erfolgten durch den Verfasser der Arbeit.

5.4.1 Sensorik zur Ermittlung der Ausrichtung der Kufen zueinander

Zur Erfassung der Ausrichtung der beiden Kufen zueinander muss der Längsversatz der beiden Kufen, der Abstand zwischen den Kufen und der Winkel der Kufen zueinander ermittelt werden. Sind diese drei Werte bekannt, ist die genaue Lage der Kufen zueinander bestimmt und die Regelungs- und Steuerungsparameter können berechnet werden, um die acht Fahrtriebe der beiden Kufen entsprechend ansteuern zu können. Die Bauform der Europalette ermöglicht es, dass sich zwischen den drei mittleren Klötzen jeweils ein Sichtfenster ergibt, indem jeweils eine optische Sichtachse zwischen den beiden Kufen besteht. Dies lässt sich anhand der Abbildung 5-4 im Kapitel 5.3 nachvollziehen. Diese Sichtfenster können dazu genutzt werden, um dort eine abstandmessende Sensorik einzusetzen.

Um diese Abstände zu messen wurden verschiedene Sensorprinzipien getestet. Dabei hat sich der Lasertriangulationssensor als das bestgeeignete System erwiesen. Lasertriangulationssensoren arbeiten nach folgendem Prinzip. Mittels einer Laserdiode wird ein paralleler Strahl erzeugt, der einen kleinen punktförmigen Fleck auf der Oberfläche eines zu messenden Objekts abbildet. Das Licht wird an der Oberfläche des Objekts reflektiert und im Sensor durch eine Linse gebrochen. Dadurch wird der reflektierte Lichtstrahl unter einem definierten Winkel auf dem Detektor abgebildet. Je nach Abstand zwischen Sensor und Oberfläche des Objekts, verändert sich die Geometrie des Dreiecks aus Laserdiode, Oberfläche und Detektor (vgl. Abbildung 5-35).

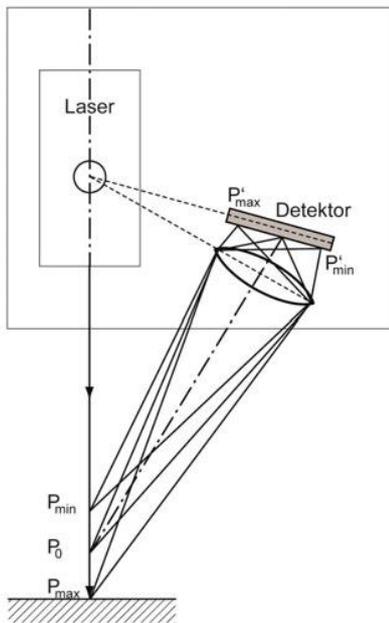


Abbildung 5-35: Funktionsprinzip des Lasertriangulationssensors [LÖF12]

Durch diesen Zusammenhang verschiebt sich der reflektierte Lichtstrahl auf dem Detektor. Aus der Verschiebung wiederum kann der Abstand zum Objekt errechnet werden (vgl. [PES13]). Die Abbildung 5-36 zeigt den Sensor, welcher für die Versuche mit dem Doppelkufensystem eingesetzt wurde.



Abbildung 5-36: Leuze Lasertriangulationssensor [LEU13]

Durch den Einsatz je einer dieser Sensoren vorne und hinten am Doppelkufensystem kann

der Abstand zwischen den Beiden Kufen und der Winkelversatz ermittelt werden (siehe Abbildung 5-37).

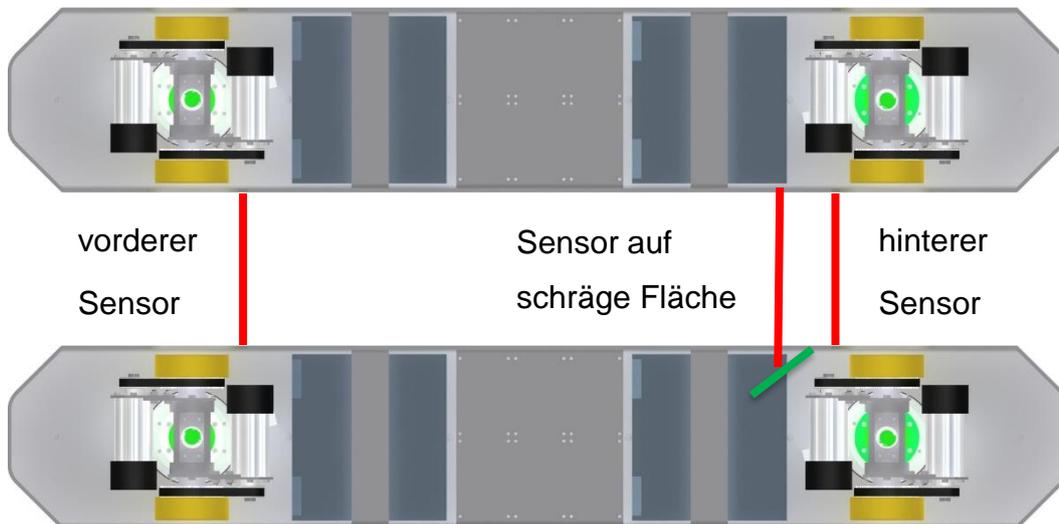


Abbildung 5-37: Anordnung der drei Lasertriangulationssensoren am Doppelkufensystem

Zur Erfassung des Längsversatzes zwischen den beiden Kufen wird ein dritter Lasertriangulationssensor eingesetzt. Er misst gegen eine mit einem Winkel zur Seitenwand in der Kufe integrierte Messfläche. Verschieben sich die beiden Kufen in Längsrichtung zueinander variiert, durch die Messung auf die schiefe Messfläche, der mit diesem dritten Sensor gemessene Abstand. Wird dieser Abstand mit den beiden anderen gemessenen Abständen in Bezug gebracht, lässt sich der Längsversatz berechnen.

Durch diese Anordnung der drei Lasertriangulationssensoren kann der Abstand, Winkelversatz und Längsversatz zwischen den beiden Kufen permanent gemessen werden.

5.4.2 Sensorik zur Ermittlung der Lage und Ausrichtung der Palette

Damit das Doppelkufensystem in eine Palette einfahren kann, muss deren Lage genau detektiert werden. Erfolgt dies nicht, können die Kufen mit der Palette kollidieren und sich dadurch ggf. die Palette verschieben. Im Rahmen der Entwicklung des Doppelkufensystems wurden verschiedene Sensorsystem zur Ermittlung der Lage der Palette getestet.

Dabei muss nicht nur die genaue Lage der Einfahröffnungen der Palette detektiert werden, sondern auch die Ausrichtung (Winkel und Abstand) der Palette zum Doppelkufensystem.

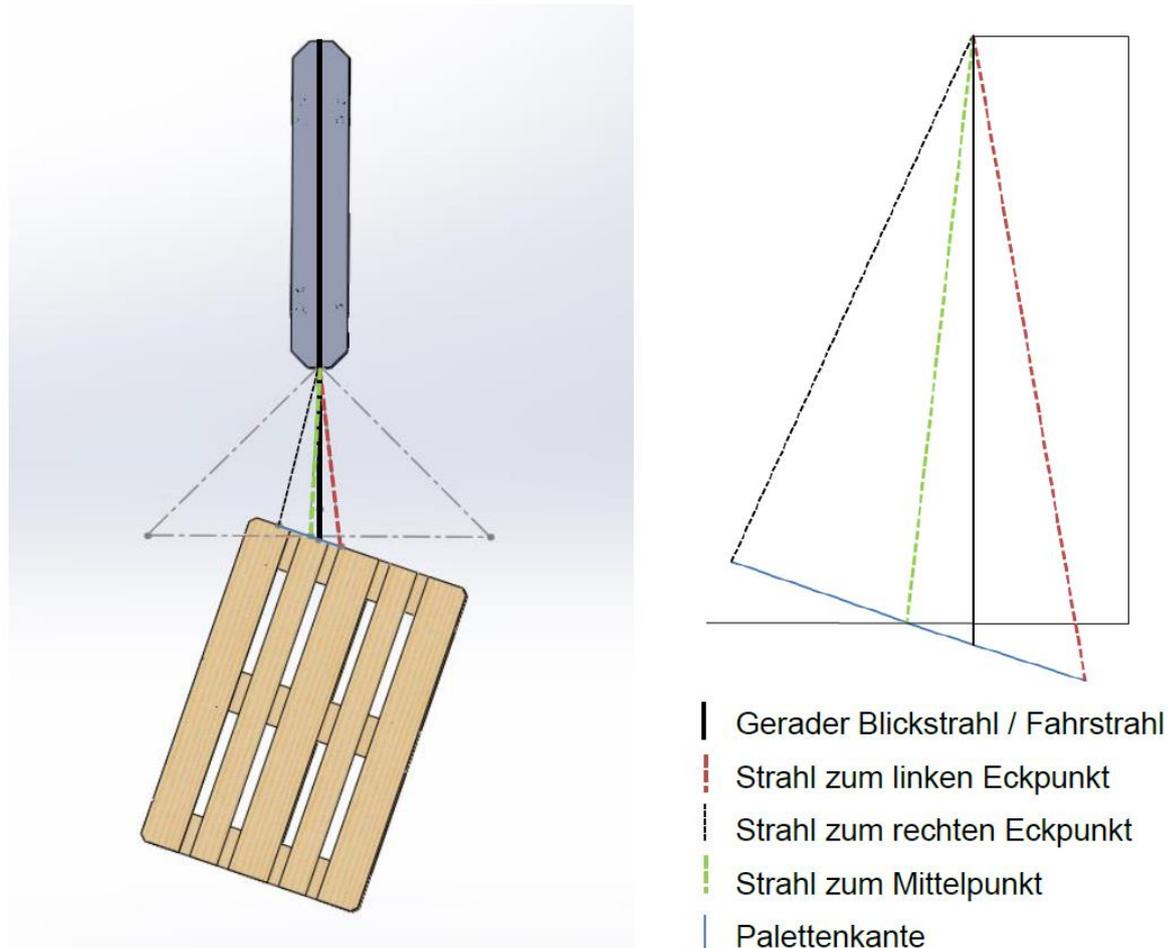


Abbildung 5-38: Lage der Palette zum Doppelkufensystem [GRO13]

Die Abbildung 5-38 zeigt schematisch die mögliche Abweichung der Lage einer Palette. Zur Erfassung dieser Abweichungen wurden verschiedene 3D- Kamerasysteme untersucht.

Dabei gibt es verschieden Typen von 3D-Kamerasystemen (vgl.[PES13]):

- Stereokameras
- Triangulationssysteme
- TOF-Kameras (TOF = time-of-flight) und
- Interferometriesysteme.

Bei der Entwicklung des Doppelkufensystem haben sich TOF- Kameras als besonders vielversprechende Lösungen gezeigt. Diese bieten neben der robusten Messtechnik den Vorteil eines sehr geringen Bauraumbedarfs. Dies ist für den Einsatz im Doppelkufensystem, welches wenig Platz zur Integration von Sensorik bietet, von großem

Vorteil. Für Versuche wurde das TOF- Kamerasystem CamBoard nano der Firma PMD Technologies verwendet.

Es wurden verschiedene Grundlagen-Versuchsreihen durchgeführt, um systematisch die Möglichkeiten des Kamerasystems zu untersuchen. In einer ersten Versuchsreihe wurde überprüft in welchem Abstand zur Palette die 3D-Kamera die genauen Umrisse einer Palettenöffnung erkennt und verwertbare Bilder liefert.

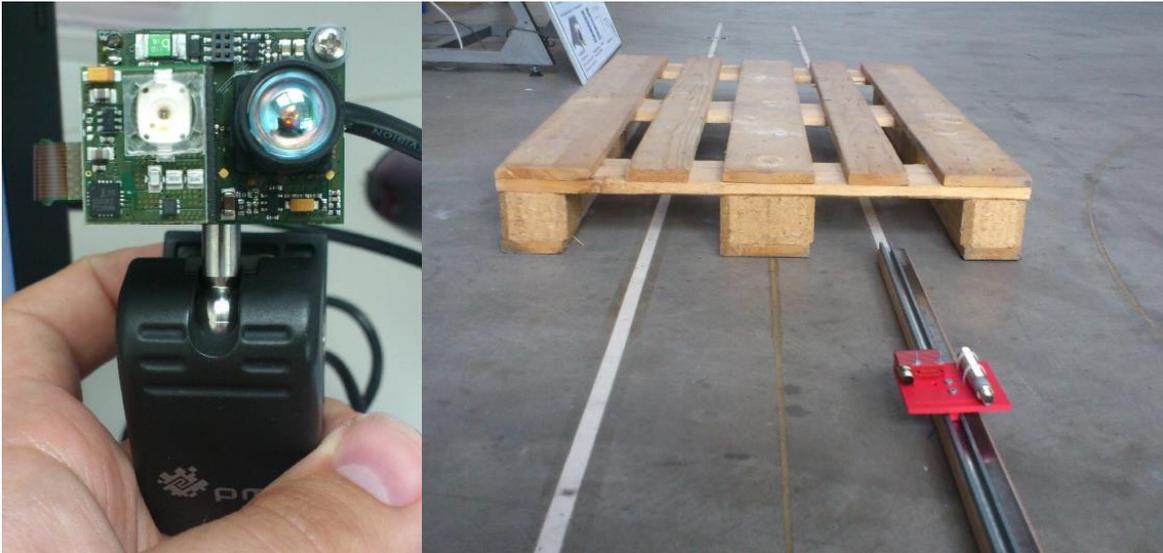


Abbildung 5-39: PMD CamBoard nano (links), Versuchsaufbau (rechts) [GRO13]

Die Kamera ist links in der Abbildung 5-39 dargestellt. Sie saß beim Versuchsaufbau auf einem beweglichen Schlitten und wurde auf die Palette zu bewegt. Der Versuchsaufbau (Abbildung 5-39, rechts) besteht aus einer Führungsschiene, mittels derer die Kamera präzise in der richtigen Höhe auf die Palette zubewegt werden konnte.

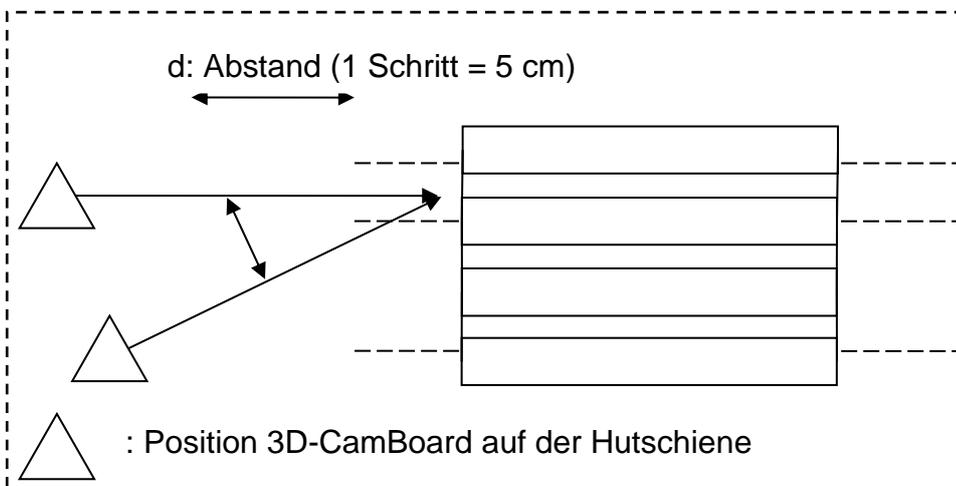


Abbildung 5-40: Schematische Darstellung Versuchsaufbau Versuch 1 [GES13]

Die Abbildung 5-40 zeigt den Anstellwinkel α , mit dem verschiedene Blickrichtungen der Kamera auf die Palette definiert werden. Zur Versuchsdurchführung wurde die Prüfstandsvorrichtung senkrecht, in einem Anstellwinkel von 0° mittig vor der Palettenöffnung, platziert. Durch verschieben der Kamera auf der Linearführung konnten verschiedene Abstände zwischen Kamera und Palette eingestellt werden. Der erste Messpunkt befindet sich in einem Abstand von $d = 75$ cm. Dieser Abstand wurde im Verlauf des Versuchs immer um 5 cm verringert, bis ein Abstand von $d = 10$ cm erreicht wurde. Insgesamt wurde dieser Vorgang dreimal wiederholt, wobei der Anstellwinkel α (0° , 10° , 20°) der Schienenvorrichtung verstellt wurden. Pro Messpunkt wurde jeweils ein Bild aufgenommen.

Durch die drei Messreihen mit verschiedenen Anstellwinkeln $\alpha = 0^\circ$, 10° und 20° wurden verschiedene Tiefenbilder der Kamera erzeugt.

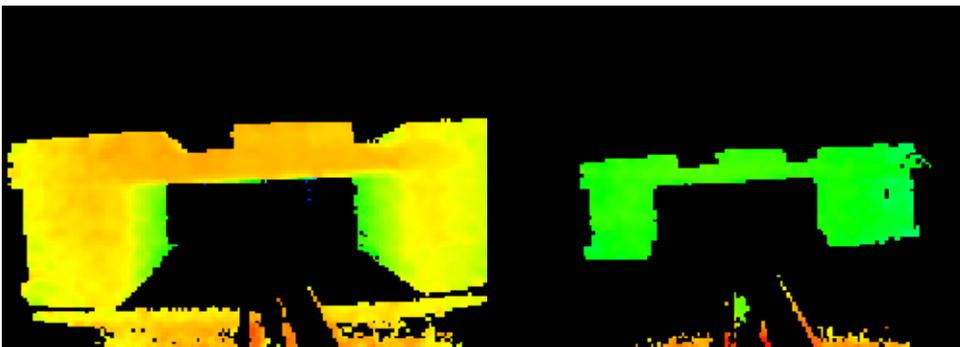


Abbildung 5-41: Messbilder aus Versuch 1 [PES13]

Die Abbildung 5-41 zeigt, dass bei verschiedenen Entfernungen (links kleine Entfernung, daher gelb; rechts größere Entfernung, daher Palette grün dargestellt) und einem variierten Anstellwinkel die Palettenöffnung erkannt wurde.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde getestet, ab wann eine Palettenöffnung von beiden parallel fahrenden Kufen zu erkennen ist und bis zu welchen Winkeln sowie Abständen noch Korrekturen bezüglich der Fahrspur vorgenommen werden können. Für den Versuchsaufbau wurde ein Messraster erstellt und vor der Palette angebracht. Auf ihm sind verschiedene Sichtperspektiven auf eine Palette durch sieben Messpunktepaare auf einem Abstandsradius realisiert. Dieser Abstandsradius variiert in 10 cm-Abständen von 20 cm bis 60 cm. Durch eine Haltevorrichtung für die Kamera wurde eine realistische Einbauhöhe in einer Kufe von 5,5 cm gewährleistet. Es entstanden praxisnahe Bilder, die mit in die spätere Beurteilung eingeflossen sind.

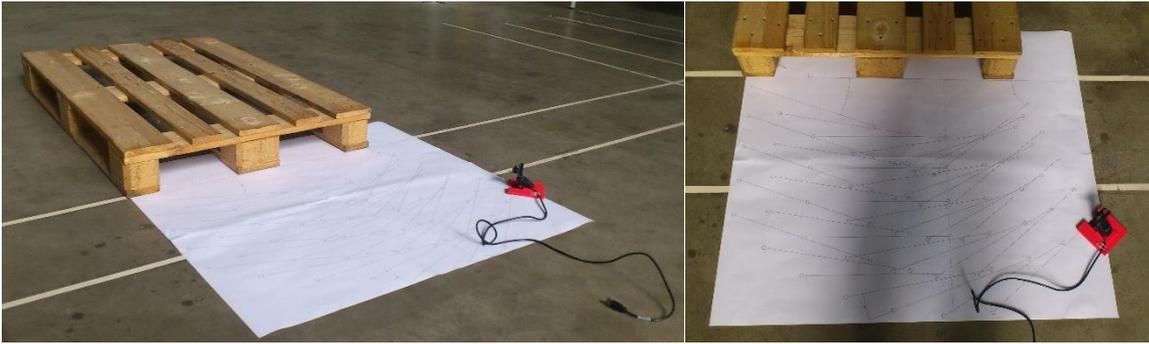


Abbildung 5-42: Versuchsaufbau 2 [PES13]

Abbildung 5-42 zeigt den Versuchsaufbau. Das virtuell erstellte Messraster wurde vor einer Europoolpalette mit Palettenöffnungen platziert. In Abbildung 5-43 ist das pmd CamBoard nano zu sehen, das über den Klippmechanismus und Kabelbinder an der Haltevorrichtung arretiert ist (vgl. [PES13]).

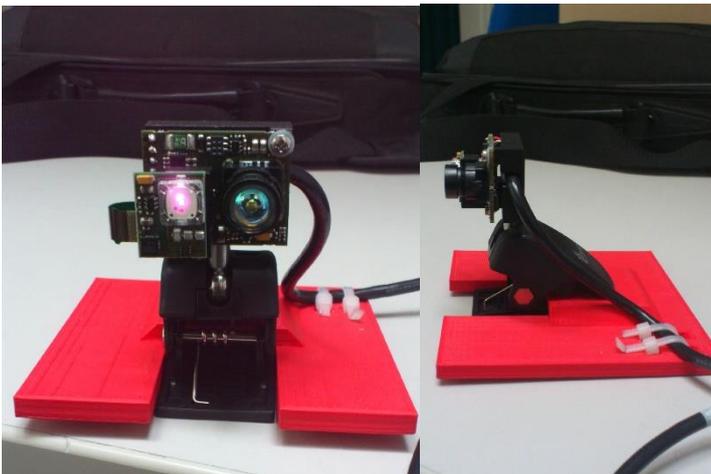


Abbildung 5-43: CamBoard nano mit Haltevorrichtung [PES13]

Bei der Versuchsdurchführung wurden die einzelnen Punkte des Messrasters durch die Kamera angefahren und jeweils eine Aufnahme gemacht.

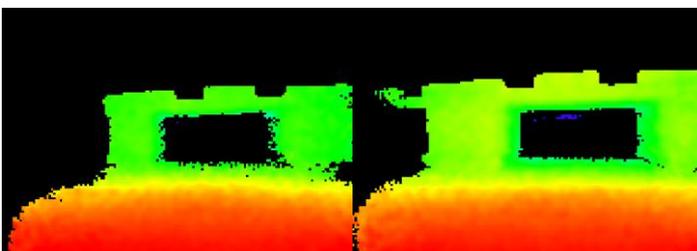


Abbildung 5-44: Bilder Versuchsreihe 2 [PES13]

Auf den Aufnahmen in Abbildung 5-44 sind deutlich die Palettenöffnungen zu erkennen. In

einem nächsten Schritt wurden jeweils zwei Bilder zu einer Gesamtansicht zusammengefügt entsprechend dem Sichtbild in der Anwendung im Doppelkufensystem.

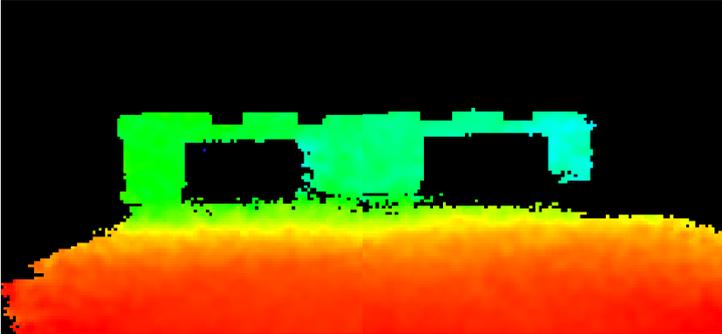


Abbildung 5-45: Zusammengefügte Ansicht [PES13]

Nach Auswertung der aufgenommenen Bilder lässt sich feststellen, dass in Abstandsradien bis zu 40 cm Spurkorrekturen bis zu Winkeln von 30° möglich sind, sodass eine Kufe unter einer Palette einfahren kann. Bei näheren Abständen sind feine Korrekturen zwischen Anfahrwinkeln von 0° bis max. 20° möglich. Mit der durchgeführten Versuchsreihe 2 konnte mit der CamBoard nano 3D-Kamera ein Überblick zu möglichen Anfahrswegen zweier optimal zueinander positionierten Kufen auf eine Europoolpalette gewonnen werden. Daraus sind Aussagen zu Spurkorrekturen bis zu bestimmten Abstandsradien möglich (vgl. [PES13]).

In einer dritten Versuchsreihe wurde eine Durchfahrt einer Kufe unter einer Palette simuliert. Hierbei musste eine entsprechend hohe Anzahl an Bildern aufgenommen werden, um die Verhältnisse bei einer Durchfahrt gut veranschaulichen zu können.



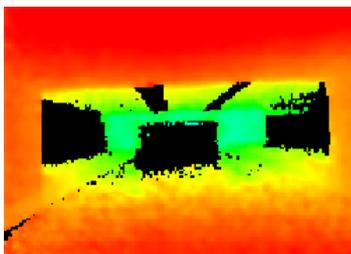
Abbildung 5-46: Versuchsaufbau zur Durchfahrt einer Palette [GRO13]

In Abbildung 5-46 ist auf der rechten Seite der Versuchsaufbau zur Durchfahrt der Palette dargestellt. Abbildung 5-46 links zeigt die schon in der vorhergehenden Versuchsreihe 2 verwendete Haltevorrichtung, auf der das CamBoard nano über einen Klippmechanismus

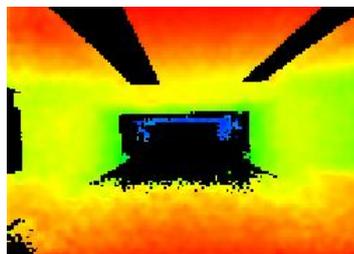
fixiert wurde. Durch die Haltevorrichtung ist eine realistische Einbauhöhe des Sensors mit ca. 5 cm gewährleistet.

Bei der Durchführung des Versuchs wurden Bilder an verschiedenen Punkten innerhalb der Palette aufgenommen. An jedem Messpunkt wurde die Haltevorrichtung so unter der Palette platziert, dass eine Blickrichtung senkrecht zur Palettenöffnung gegeben ist. Durch die Symmetrie einer Europoolpalette wurde jeweils ein Bild in einem Abstand von 30 cm aufgenommen. Dies entspricht 5 Bildern. Ein zusätzliches Bild wurde am Ende der Palette aufgenommen, um die Perspektive am Ende einer Durchfahrt genauer darzustellen (vgl. [PES13]).

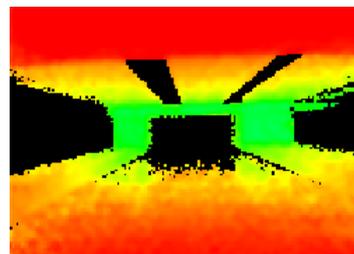
Als Ergebnis entstand aus 6 Bildern ein realistisches Abbild einer Durchfahrt einer Kufe unter einer Palette (Siehe Tabelle 5).



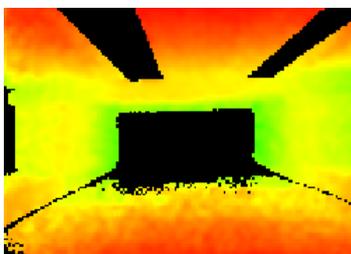
Messpunkt 1



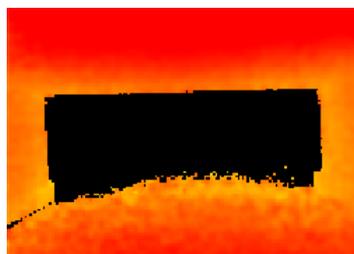
Messpunkt 2



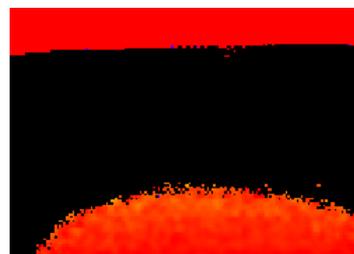
Messpunkt 3



Messpunkt 4



Messpunkt 5



Messpunkt 6

Tabelle 5: Messergebnisse bei Versuch 3 mit Aufnahmeabstand 30 cm [PES13]

Die in den Versuchsreihen gewonnenen Daten lassen eine Bestimmung der Orientierung und Lage der Palette und somit der Palettenöffnungen zu. Die Kamera liefert verwertbare Bilder, trotz einer relativ geringen Auflösung von 160 x 120 Pixeln. Neuere Generationen dieser Kamerasysteme liefern deutlich größere Auflösungen. Damit sollten die Konturen der Palette noch deutlich erkannt werden. Durch eine entsprechende Auswertung der Messdaten kann theoretisch eine Abstandsmessung und eine Schwerpunktberechnung einer dargestellten Rechteckfläche realisiert werden. Mittels dieser Daten wird dann die

genaue Lage und Orientierung der Palette errechnet.

Aufgrund der kompakten Bauform dieser ToF-Kamerasysteme ist ein Einsatz in den Doppelkufen möglich und die Ergebnisse der Versuchsreihen haben gezeigt, dass ausreichend genaue Messwerte erfasst werden können, welche eine Lagebestimmung der Palette in ausreichender Genauigkeit ermöglichen.

6 Multifunktionale Fahrzeuge

Wie in Kapitel 4 beschrieben wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Gliederungskategorie von FTF eingeführt, die multifunktionalen Fahrzeuge. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht speziell an eine gezielte Aufgabe angepasst sind, wie die monofunktionalen FTF, sondern sich an verschiedene Aufgaben z.B. durch variable Lastaufnahmemittel anpassen können. Solche Systeme sind immer dann von Vorteil, wenn verschiedene Aufgaben innerhalb eines Logistiksystems oder einer Produktionsversorgung realisiert werden müssen. Dort ist es nicht sinnvoll verschiedenartige FTF für die einzelnen Aufgaben einzusetzen und somit viele verschiedene Fahrzeuge vorhalten zu müssen. Bei solchen Anwendungen ist es sinnvoll Fahrzeuge einzusetzen, die sich an die verschiedenen Aufgaben anpassen können. Solche multifunktionalen FTF verfügen in der Regel über komplexe Sensorik, Sicherheitstechnik, Navigationstechnik etc.

In Kapitel 2 wurden mit dem System Multishuttle Move und dem System KARIS bereits zwei Multifunktionale Fahrzeuge von deutschen Forschungseinrichtungen vorgestellt.

In den letzten Jahren wurden durch den Verfasser verschiedene multifunktionale FTF entwickelt. Diese Entwicklungen entstanden im Rahmen von mehreren, durch das Wirtschaftsministerium und das Wissenschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg geförderte Projekten (FlexProLog mit 300.000€ durch das Wissenschaftsministerium gefördert, LeitFlexPro mit 160.000€ durch das Wissenschaftsministerium gefördert und MWK Groß-FTF mit 350.000€ durch das Wirtschaftsministerium gefördert). Diese Projekte wurden im Rahmen der Arena2036¹² der Universität Stuttgart umgesetzt, bei der es um die Fragestellung der zukünftigen Automobilproduktion und der dazugehörigen Logistik unter der Forderung flexible wandelbare Automobillogistik für die Stückzahl 1 ging. In deren Zusammenhang sind am IFT insgesamt 3 Dissertationen (1. Popp *Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band* im Jahr 2018 [POP18] , 2. Hofmann *Konzept, Konstruktion und prototypische Umsetzung neuartiger intralogistischer Komponenten für die zukünftige flexible und wandlungsfähige*

¹² ARENA2036 steht für „Active Research Environment for the Next generation of Automobiles“ und ist einer von neun Forschungscampi der Förderinitiative „Forschungscampus – öffentlich-private Partnerschaft für Innovationen“ in Deutschland mit dem Schwerpunkt „Mobilität der Zukunft“. ARENA2036 wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt und wird als eingetragener Verein mit Mitgliedern aus Wissenschaft und Industrie geführt.

Automobilmontage der Stückzahl eins im Jahr 2022 [HOF22], 3. die Dissertation des Autors für die Entwicklung der Riegel-FTF und das Groß-FTF der mobilen Montageinsel) entstanden.

Popp hat sich mit dem Konzept der wandelbaren, flexiblen Automobilproduktionslogistik für Stückzahl 1 und den Simulationen dieses Konzeptes beschäftigt. Hofmann hat Geräte und Einrichtungen der Logistik für die Umsetzung dieses Konzeptes (in Form von Prototypen Mini-RBG, Riegel-Regale, Warenkorbgestelle, Handhabungstechnik auf der mobilen Montageinsel etc.) entwickelt. Der Verfasser dieser Dissertation konzipierte und entwickelte das universelle Riegel-FTF sowie das Groß-FTF für die mobile Montageinsel.

6.1 Riegel FTF

Dieses neuentwickelte FTF dient dem Transport von sogenannten Riegel- und Warenkorbgestellen vom Bereitstellungs- zum Groß-FTF (mobile Montageinsel). Es dient also als Zuliefer-/Schlepp-FTS. Der Name Riegel-FTF ist aus der Funktion des Transports der Riegelgestelle entstanden.

Wie oben bereits beschrieben, wurde das Riegel-FTF am IFT unter dem Hintergrund verschiedener Projekte zur Neugestaltung der zukünftigen Automobilproduktion entwickelt. Die in der Automobilproduktion eingesetzten Fließbandproduktionen stoßen zunehmend an ihre Grenzen. Dies wird vor allem dadurch verursacht, dass der Variantenreichtum der Fahrzeuge immer mehr zunimmt und immer häufiger Modellwechsel stattfinden. Losgröße 1 ist längst nicht mehr nur eine Vorstellung, sondern dort, wie auch in anderen Industriezweigen, bereits Realität. Dies betrifft somit nicht nur z.B. Sondermaschinen, die in Kleinserien hergestellt werden, sondern auch Produkte wie Automobile, die in Großserie produziert werden. Die Automobilproduktion ist hierfür somit nur ein Beispiel von vielen, allerdings durch die großen Produktionsanlagen auch ein wichtiges.

Die in Automobilproduktionen aktuell meist eingesetzten, fest verketteten und getakteten Produktionssysteme mit ihren Arbeitsschrittfolgen erschweren die Fertigung variantenreicher Produkte zunehmend, so dass der Wunsch nach flexiblen und wandelbaren Produktionssystemen branchenübergreifend zunimmt. Sollen getaktete Montagelinien durch neuartige Montagesysteme ersetzt werden, bedingt dies neue Konzepte für die Bereitstellung von Komponenten und des Montagematerials innerhalb der Fertigung. Im Rahmen des Forschungsprojekts „FlexProLog“, gefördert durch das

Ministerium für Wirtschaft und Finanzen Baden-Württemberg, wurden sämtliche intralogistische Prozesse des Materialflusses in der Automobilindustrie in Zusammenhang mit solchen Systemen untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Problematik des steigenden Flächenbedarfs statischer Lagersysteme zur bandnahen Versorgung im Zuge der höheren Produkt- und damit einhergehenden Teilevarianz massiv verschärft hat. Als Teil des Forschungsprojektes wurde ein alternatives Konzept zum Vorhalten eines vollumfänglichen Warenkorbsystems direkt am Band entwickelt. Dessen Aufgabe ist die zielgerichtete und punktgenaue Bereitstellung des benötigten Materials, nicht mehr just in sequence, sondern in Realtime. Zur Umsetzung dieses Konzeptes wurde das Riegel-Konzept entwickelt. Dieses sieht die Materialbereitstellung durch mobile und vorkommissionierter Regale vor.

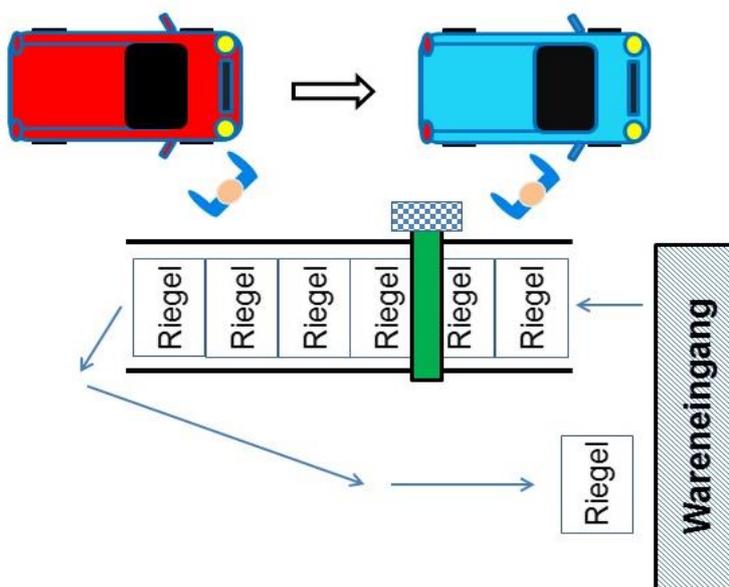


Abbildung 6-1: Riegelkonzept des IFT [POP18]

Die Abbildung 6-1 zeigt das Konzept exemplarisch an einem Verbauort an der Automobilmontage. Die zu verbauenden Komponenten werden durch Regalmodule bereitgestellt, die sogenannten Riegel. Die Beladung eines solchen Regals kann, dem Einsatzzweck entsprechend, individuell erfolgen. So ist eine „sortenreine“ Bestückung mit gleichen Bauteilen für eine Montagestation, z.B. verschiedene Lenkräder für x Varianten, ebenso denkbar, wie die Bestückung des Regals mit Material (z.B. mit Komponenten für die Innenausstattung einer Fahrzeugvariante) für eine bestimmte Fahrzeugkonfiguration. Wie

in der Abbildung zu sehen, können mehrere der Riegel zu einem großen Regal zusammengefasst werden, bei dem die einzelnen Segmente samt deren Beladung unabhängig voneinander getauscht werden können, was vor allem an Montagestationen mit hoher Teilevarianz und stark unterschiedlichen Verbräuchen der einzelnen Teile Vorteile schafft.

Werden mehrere einzelne Riegel zu einem großen Regal zusammengefasst, kann die Materialentnahme vollautomatisiert durch ein speziell dafür entwickeltes Mini-Regalbediengerät erfolgen. Dies bietet den Vorteil, dass der Werker keine falschen Teile aus dem Regal entnehmen kann, da ihm automatisiert stets nur die tatsächlich benötigten Teile übergeben werden.

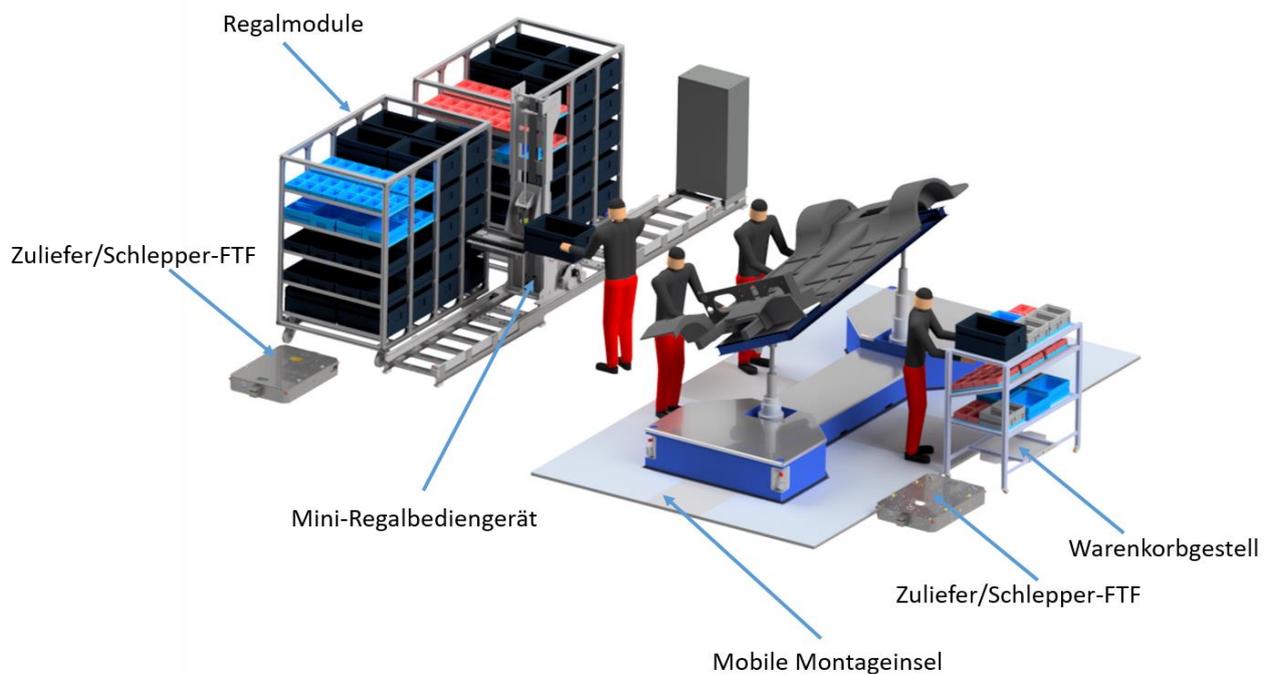


Abbildung 6-2: Beispielansicht Montagestation mit Regalmodulen und Regalbediengerät [HOF22]

Die Abbildung 6-2 zeigt zwei Regalmodule, welche durch das Zuliefer/Schlepper-FTF = Riegel FTF angeliefert werden und an das Regalbediengerät andocken. Die Regalmodule werden durch das Regalbediengerät entladen und die KLT mit dem jeweiligen richtigen Material dem Werker unmittelbar am Verbauert bereitgestellt. Dieses Riegel-Konzept wurde am IFT entwickelt und bis zur Prototypenreife umgesetzt. Es stellt somit ein innovatives Materialflusssystem dar, mit dem sich eine mobile Teilebereitstellung in Realtime realisieren

lässt.

Bei den Regalmodulen handelt es sich um fahrbare Regale, in die KLT eingelagert werden können.

In einem ersten Prototyp wurde ein Regalmodul mit 40 KLT-Stellplätzen umgesetzt. Die KLTs werden dabei doppeltief eingelagert. Die Räder des Regals sind aktiv gebremst, so dass sich das abgestellte Regal nicht selbstständig bewegen kann. Die Bremsen des Regals können durch das FTF nach dem Andocken freigeschalten werden. Das FTF unterfährt beim Andockprozess das Regal und orientiert sich mit seinen hochgeschwenkten Spurführungskameras an Barcodemarkierungen an der Regalunterseite. Durch die konstruktive Umsetzung, die Spurführungskameras nach oben zu schwenken, wird an dieser Stelle keine separate kostenintensive Sensorik benötigt (Siehe auch Kapitel 7). Ist das Fahrzeug unter dem Regal ausgerichtet, werden vier Bolzen nach oben ausgefahren, welche federvorgespannt sind. Das FTF nimmt dabei nicht die ganze Last des Regalmoduls auf. Dieses bewegt sich während dem Transport auf den eigenen Rädern. Durch die Federvorspannung wird allerdings ein Teil der Gewichtskraft auf das Fahrzeug übertragen. Dies ist nötig, um die Normalkraft der Antriebsräder am Fahrzeug, und somit die Traktion zu erhöhen. Im Falle einer Notbremsung werden zusätzlich die vier Bremsen am Regalmodul ausgelöst, so dass ein kurzer Bremsweg erreicht werden kann. Dadurch, dass nicht die gesamte Last von bis zu 1,2 Tonnen des Regalmoduls durch das FTF aufgenommen werden muss, kann dies deutlich kleiner und damit kostengünstiger dimensioniert werden.

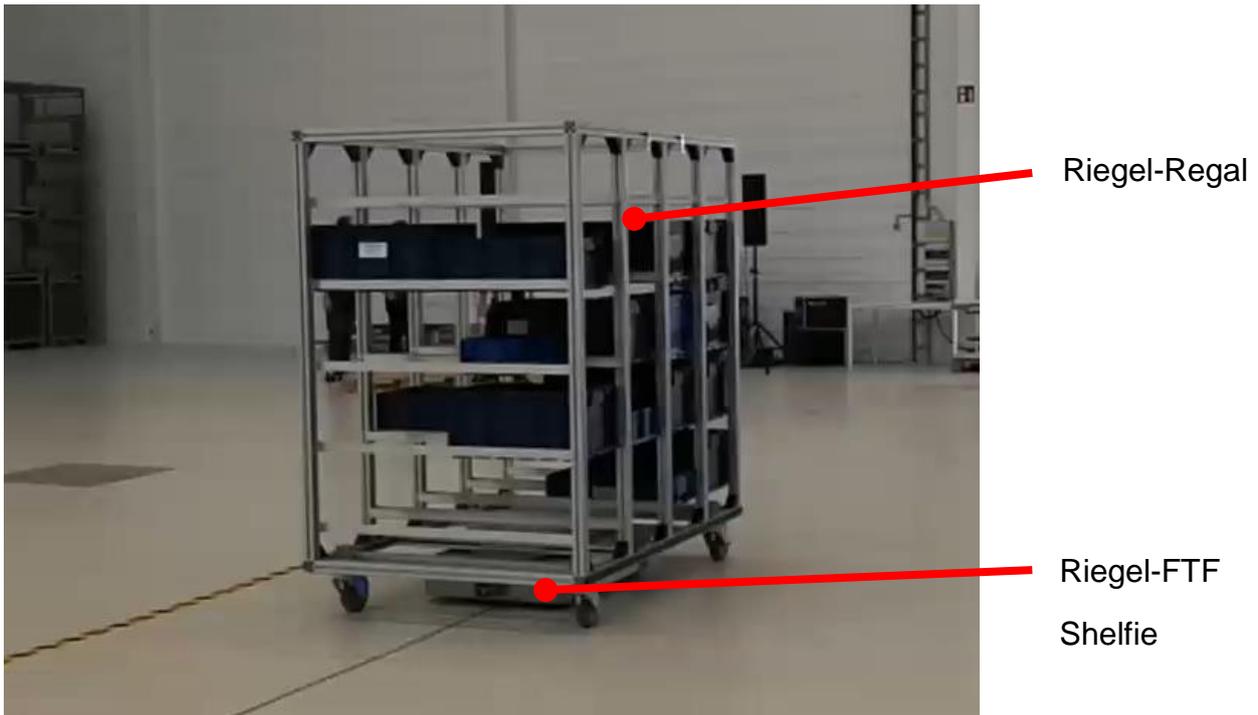


Abbildung 6-3: FTF Shelfie beim Transport eines Regalmoduls

Bei dem für den Transport der Regale entwickelten FTF handelt es sich um ein multifunktionales FTF, welches auch mit dem Namen „Shelfie“ bezeichnet wird. Es verfügt über mehrere Möglichkeiten der Navigation und ist in der Lage neben den Regalmodulen auch Warenkorbgestelle (siehe Abbildung 6-4) oder Gestelle für Einzeltransporte zu transportieren.

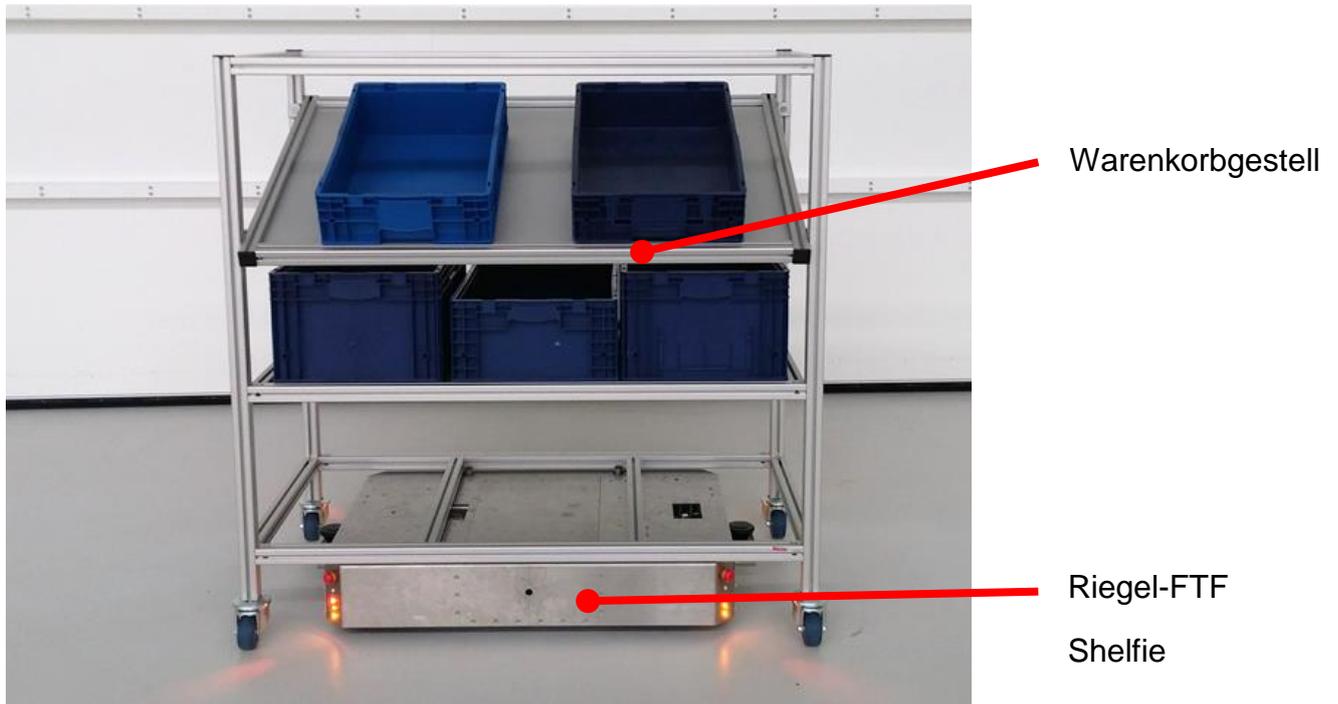


Abbildung 6-4: FTF Shelfie beim Transport eines Warenkorbgestells

Das FTF (siehe Abbildung 6-5) verfügt über 3 Lenk- und Fahrtriebe, um eine omnidirektionale Manövrierbarkeit zu gewährleisten.

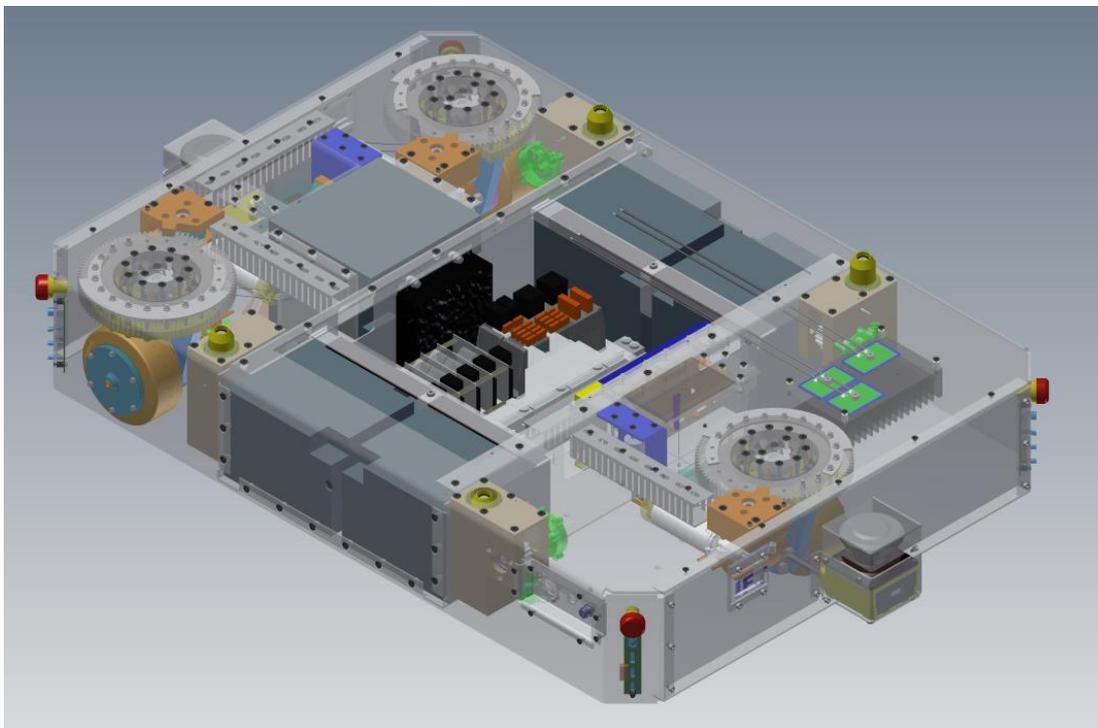


Abbildung 6-5: Prinzipieller Aufbau des Riegel FTF (Gehäuse transparent dargestellt)

Dabei kann jeder der drei Lenk- und Fahrtriebe über einen Lenkmotor, welcher über ein

Ritzel die Verzahnung am Drehlager antreibt, um 270° gelenkt werden. Damit zum einen der in der Höhe der Regalmodule nicht nutzbare Bereich möglichst geringgehalten wird und die Regalmodule sowohl von Vorne oder Hinten, als auch von der Seite zwischen den Rädern des Regals unterfahren werden können, muss das FTF eine möglichst geringe Bauhöhe von unter 200mm (Prototyp 192mm) und maximale Außenabmessungen von 1200mm x 700mm (Prototyp 1160mm x 700mm) aufweisen. Somit ist der zur Verfügung stehende Bauraum für die Lenk- und Fahrtriebe sehr stark eingeschränkt. Da dennoch die Antriebsmotoren ausreichend dimensioniert und die Räder über eine entsprechende Tragkraft verfügen müssen, konnte nicht auf ein kaufbares Lenk- und Fahrtriebsmodul zurückgegriffen werden. In den geforderten Größendimensionen sind bisher solche Systeme nicht verfügbar.

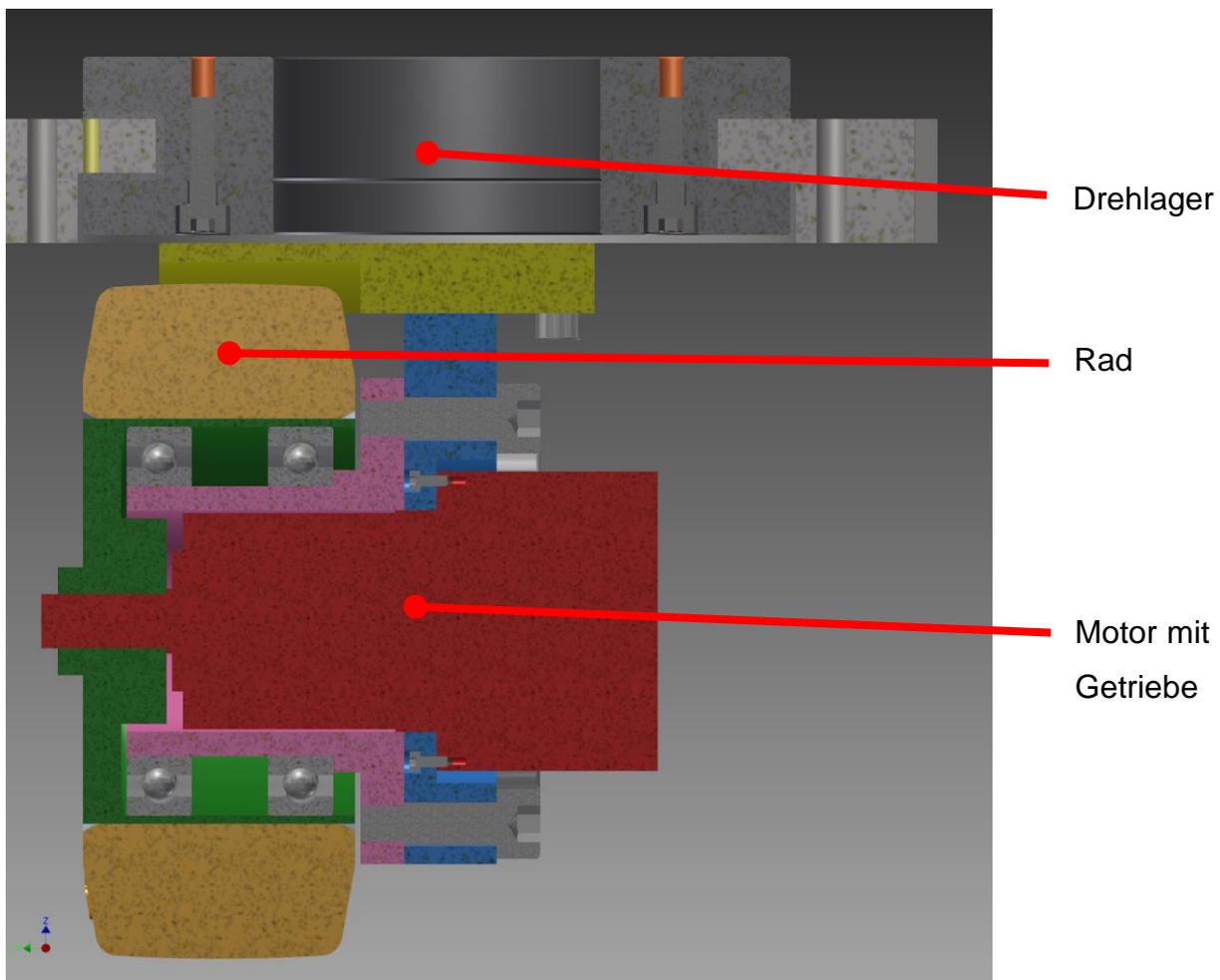


Abbildung 6-6: Schnittbild selbstentwickeltes Lenk- und Fahrmodul

Daher musste zur Umsetzung des FTF ein neues, möglichst kompaktes, Lenk- und Fahrmodul entwickelt werden (siehe Abbildung 6-6). Bei kaufbaren Lenk- und Fahrmodulen

wird das Laufrad meist mittig unter dem Drehpunkt angeordnet und der Motor mit Getriebe seitlich an das Rad angeflanscht. Durch diese Anordnung steht der Motor jedoch meist weit zur Seite ab. Wird diese Anordnung nun gelenkt entsteht ein sehr großer Bauraumbedarf im Fahrzeug. In dem selbstentwickelten Modul wurde daher der Motor mit Getriebe (in der Abbildung 6-6 rot dargestellt) möglichst weit innerhalb der Radaufhängung (rosa) angeordnet. Das Drehmoment des Motors wird über eine Mitnehmerscheibe (grün) auf das Rad übertragen. Zudem wurde das Rad (gelb) nicht mittig unter der Drehachse angeordnet, sondern seitlich verschoben. Dadurch konnte das Lenk- und Fahrmodul nochmals deutlich kompakter realisiert werden und das Rad wird bei einer Lenkbewegung nicht auf der Stelle bewegt und somit kein hoher Verschleiß am Rad erzeugt. Dies bedingt allerdings wiederum, dass bei einer Lenkbewegung der Fahrtrieb gleichzeitig so angesteuert werden muss, dass sich das Rad auf der Kreisbahn der Lenkbewegung abrollen kann.

Durch den Einsatz von drei dieser Lenk- und Fahrtriebe kann sich das FTF vollständig omnidirektional bewegen, d.h. z.B. drehen auf der Stelle oder 90° traversieren.



Abbildung 6-7: Riegel-FTF dockt das Regalmodul an das Mini-Regalbediengerät an

Das Riegel-FTF ist in der Lage Regalmodule bis zu einem Gewicht von 1200kg zu transportieren, bei einem Eigengewicht von nur 130kg. Im Vergleich zu anderen Systemen stellt dies ein sehr gutes Nutzlast-zu-Eigengewicht-Verhältnis dar.

Zur Navigation de Riegel-FTF sind verschiedene Technologien verbaut. Zum einen Verfügt

das Riegel-FTF über zwei Spurführungskameras der Firma Pepperl und Fuchs, die einer optischen Leitlinie, Barcodebänder oder einzelne Barcodes (Rasternavigation) folgen können. Das Kamerasystem ist dabei nicht nur in der Lage, die Position der Leitlinie quer zur Fahrtrichtung zu bestimmen, sondern es kann auch deren Winkel ermitteln. Dadurch kann beim Einfahren des FTF in eine Kurve dies frühzeitig als Kurvenfahrt detektiert und somit die Lenkungsregelung des Fahrzeuges vorgesteuert werden. Somit lässt sich das Fahrverhalten des Fahrzeuges erheblich verbessern. Durch Erkennung der Barcodes kann das Fahrzeug sehr genau positioniert werden, was auch wie oben beschrieben, durch Schwenken der Spurführungskameras nach oben zur Positionierung unter dem Regalmodul genutzt wird. Es ist sowohl vorne als auch hinten eine Spurführungskamera platziert, so dass das Fahrzeug in beide Richtungen einer Linie folgen kann. Neben der optischen Spurführung werden auch die Messdaten der beiden Sicherheitslaserscanner ausgewertet. Durch diese Messdaten kann eine sogenannte „freie“ Navigation über ein SLAM-Verfahren realisiert werden. Dazu wird im Riegel-FTF eine Software vom Fraunhofer IPA Institut in Stuttgart genutzt.

Zusätzlich wurde noch ein Ultra-Wideband-Ortungssystem der Firma Naise in das Riegel FTF integriert. Die Versuchshalle des Projektes Arena2036 ist vollständig mit dieser Technologie des Startups der Universität Stuttgart ausgestattet. Durch die UWB Ortung kann die absolute Position des Fahrzeugs auf etwa 20cm genau in der Halle bestimmt werden.

Das Riegel-FTF stellt ein gutes Beispiel für ein Multifunktionales FTF dar. Durch konsequente maschinenbaulich Optimierung und Neuentwicklung (Beispiel Lenk- und Fahrtriebe) sowie konzeptionelle Optimierung (Fahrzeug trägt nicht Gewicht des Regalmoduls) konnte ein sehr kompaktes kostengünstiges FTF (Fertigung und Zukauf Teile sowie Montage ca. 25.000€) prototypisch realisiert werden.

6.2 Mobile Montageinsel für die Automobilproduktion

Bei der mobilen Montageinsel für die Automobilproduktion handelt es sich um ein weiteres multifunktionales FTF, welches entwickelt, konstruiert und auch prototypisch umgesetzt wurde. Dieses FTF entstand im Rahmen eines durch das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg geförderten Projektes für neue Lösungsansätze zukünftiger

Produktionssysteme.

Die Endmontagelinien in der Automobilproduktion sind aktuell in der Regel durch Stetigfördertechnik, wie z.B. Elektrohängebahnen oder Schubplattformen etc. realisiert. Diese starren Fördertechniksysteme verhindern jedoch die Umsetzung von flexibleren Montagesystemen, die es erlauben mehrere Modellvarianten in einer Fertigungslinie zu produzieren. Solche flexiblen Systeme können allerdings durch bestehende Förder-, Lager- und Handhabungsmaschinen nur mit erheblichem Mehraufwand bewältigt werden. Um die geforderte Flexibilität in der Automobilmontage umzusetzen, müssen die getaktete Bandmontage aufgelöst und die Montageträger so umgesetzt werden, dass diese modellübergreifend verwendet werden können. Zur Realisierung einer solch flexiblen Fertigung soll künftig auf starre Fördertechnik komplett verzichtet werden. Diese soll durch ein flächenbewegliches FTF ersetzt werden, welches als Montageträger fungiert.

Dazu wurde eine mobile und universell einsetzbare Montageinsel auf Basis eines (großen) Fahrerlosen Transportsystems konzipiert. Diese Montageinsel wurde so gestaltet, dass sie universell innerhalb der Produktpalette verwendet werden kann (Anpassungsfähigkeit an diverse Fahrzeugmodelle) und sämtliche Handhabungsfunktionalitäten, die vormals durch starre getaktete Fördertechnik realisiert wurden, zukünftig übernehmen kann.

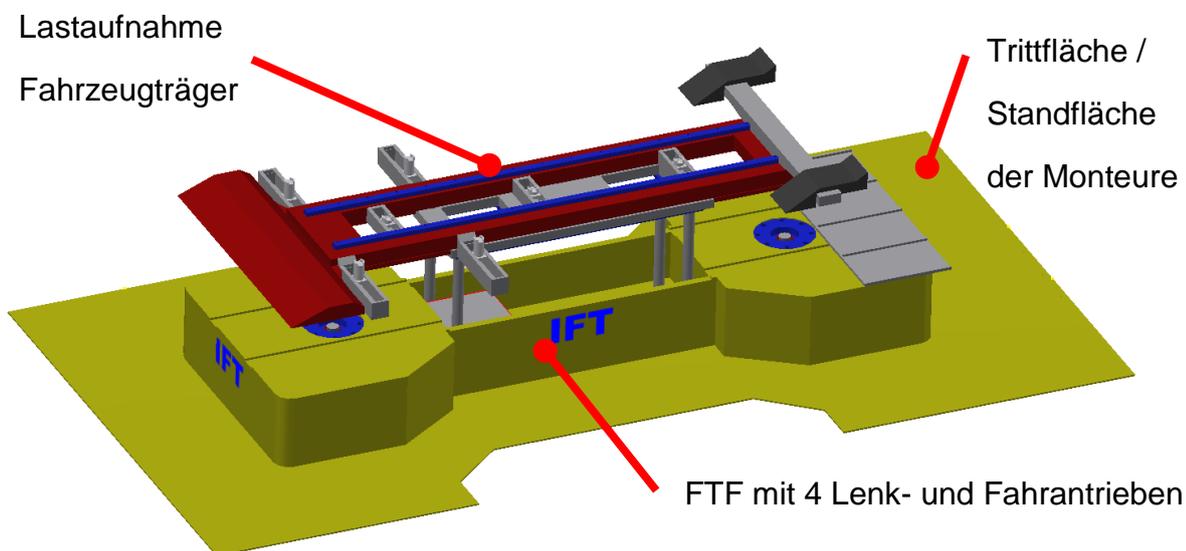


Abbildung 6-8: erster Entwurf der mobilen Montageinsel

Die Abbildung 6-8 zeigt einen ersten Entwurf der mobilen Montageinsel. Diese besteht aus einem „knochenförmigen“ FTF, welches an den 4 Ecken mit jeweils einem Lenk- und

Fahrertriebsmodul ausgestattet ist und einen Schwenkbereich von 160° in beide Richtungen ermöglicht. Dadurch kann sich das FTF vollständig omnidirektional bewegen.

In der Abbildung 6-8 kann man darüber hinaus die um das eigentliche FTF angeordnete Trittpläche erkennen. Auf dieser Trittpläche können Montagemitarbeiter mitfahren, um so während der Bewegung der mobilen Montageinsel weitere Montageumfänge durchzuführen.

Auf das FTF wurde eine Lastaufnahme aufgesetzt welche die nötigen Handhabungsfunktionen zur Bewegung des Montageobjekts umsetzen kann. Die Lastaufnahme kann Heben und Senken und ermöglicht ein Drehen um die Vertikalachse und ein Schwenken um die Längsachse. Durch diese Beweglichkeit des Lastaufnahmemittels kann den Werkern die Montage in ergonomisch sinnvoller Körperhaltung ermöglicht werden. In bestehenden Montagesystemen werden diese Funktionalitäten, also das ergonomische Verstellen des Montageobjekts, in der Regel durch EHB oder starr an einem Montageplatz verbaute Handhabungstechnik umgesetzt. Um diese starren Systeme allerdings durch die Mobilien Montageinseln ersetzen zu können, ist es zwingend notwendig diese Funktionen auf dem Fahrzeug umzusetzen.

Konstruktiv wurde die Handhabungstechnik über einen Hubtisch mit integriertem Drehantrieb und einem darauf angebrachten Fahrzeugträger realisiert. Der Fahrzeugträger (in der Abbildung 6-8 rot dargestellt) besteht aus einem Grundträger mit voneinander unabhängig verschiebbaren Längs- und Querträgern. Dabei wurde ein Verstellbereich der Längs- und Querträger vorgesehen, welcher die Anpassung an unterschiedliche Fahrzeugabmessungen ermöglicht und somit die Varianz bezüglich Spurbreite und Radstand der zu montierenden PKW stufenlos abdecken kann. Dadurch wird eine baureihenübergreifende Verwendbarkeit, ohne aufwendige Arbeitsumfänge zur Umrüstung, gewährleistet. Somit kann das System auch über mehrere Modellzyklen hinweg verwendet werden. Bestehende spezifisch angepassten Montageträger hingegen konnten aufgrund mangelnder Flexibilität stets nur für eine konkrete Baureihe und nur einen Modellzyklus eingesetzt werden.

Die Anpassungsfähigkeit und Variabilität des Fahrzeugträgersystems ist somit ein unmittelbarer Beitrag zur Wandlungsfähigkeit der Automobilmontage. Die am IFT entwickelte Absetzvorrichtung hebt sich derart vom aktuellen Stand der Technik ab, dass diesbezüglich eine Patentanmeldung durch die Universität Stuttgart vorgenommen wurde.

Einen weiteren wesentlichen Aspekt dieses Konzeptes stellt die Möglichkeit der Handhabungstechnik dar, dass fertig montierte Fahrzeug durch entsprechende Verstellmechanismen direkt auf den Boden abzusetzen. Durch dieses Konzept sind keine zusätzlichen Handhabungsgeräte notwendig, welche das Fahrzeug am Ende der Montage vom FTF abheben und auf den Boden absetzen können.



Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des Absetzens des Fahrzeuges [HOF22]

In der Abbildung 6-9 wird der Absetzprozess des Fahrzeuges schematisch dargestellt. Für den Absetzprozess kann der Fahrzeugträger (rot dargestellt) bei abgesetztem Hubtisch längs über das FTF verschoben werden. Durch ein Abkippen des Fahrzeugträgers und verstellen der Längs- und Querträger kann das Fahrzeug selbstständig auf den Boden abgesetzt werden. Aufgrund des eingeschränkten Projektumfangs konnte der variabel verstellbare Fahrzeugträger und der Absetzmechanismus nur konzeptionell und im Rahmen einer CAD-Konstruktion umgesetzt werden. Der Aufbau eines Prototyps war nicht möglich. Das eigentliche Fahrzeug mit der Trittfäche wurde als Prototyp umgesetzt.



Abbildung 6-10: Prototyp der mobilen Montageinsel in der Arena2036

Die Abbildung 6-10 zeigt den Prototyp der Mobilen Montageinsel. Im Prototyp wurde ein vereinfachter Fahrzeugträger umgesetzt, welcher die Anpassungsfähigkeit an verschiedene Fahrzeugmodelle nicht abbilden kann. Der Hubtisch allerdings wurde so umgesetzt, dass das zu montierende Fahrzeug mit dem Fahrzeugträger in der Höhe verstellt werden kann und ein schwenken sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung möglich ist.

Das Groß-FTF der mobilen Montageinsel wurde wie im Konzept vorgesehen mit 4 Lenk- und Fahrantrieben ausgestattet, wodurch ein omnidirektionales Verfahren ermöglicht wird. Das FTF ist dabei für eine Nutzlast (Fahrzeugträger plus zu montierendes Fahrzeug) von 2,5t ausgelegt und kann sich mit einer Geschwindigkeit von 0,02 bis 1,5m/s bewegen.

Die Trittpläche für die Werker wurde so realisiert, dass diese sich auf eigenen kleinen Schwenkrollen bewegt. Es besteht keine mechanische starre Verbindung zwischen dem FTF und der Trittpläche. Dadurch muss das Gewicht der Trittpläche und der sich darauf befindlichen Werker nicht durch das FTF getragen werden. Da die Trittpläche das FTF vollständig umschließt, werden die Fahrbewegungen des FTF auf diese übertragen. Die Trittpläche bewegt sich somit gemeinsam mit dem FTF.

An den 4 Ecken der Trittfäche wurden personensichere Laserscanner angebracht (in Abbildung 6-10 nicht dargestellt). Diese Laserscanner überwachen den Fahrweg und ermöglichen über die Messdaten der Scanner auch die Navigation über SLAM-Verfahren. Die Laserscanner überwachen gleichzeitig auch die Trittfäche des Fahrzeuges und erkennen ob sich Werker auf dieser befinden. Diese Überwachung ist notwendig, da eine Mitnahme der Werker aus Sicherheitsgründen nur bei niedrigen Geschwindigkeiten möglich ist. Die Tatsache, dass sich Personen auf dem FTF mitbewegen ist zum Zeitpunkt der Umsetzung in den Normen nicht vorgesehen. In Folgeprojekten muss daher ein vollständiges Sicherheitskonzept für diesen Fall ausgearbeitet werden.

6.3 Indoor-Navigationssysteme

Bei den hier gezeigten Beispielen von Multifunktionalen FTF, wie das Riegel-FTF oder die mobile Montageinsel, werden auch SLAM oder UWB Systeme zur Navigation eingesetzt.

SLAM Navigation

Als SLAM (englisch: Simultaneous Localization and Mapping; deutsch: Simultane Positionsbestimmung und Kartierung) wird ein Verfahren bezeichnet, bei dem ein Fahrzeug gleichzeitig eine Karte seiner Umgebung durch Vermessung erstellt und seine räumliche Lage innerhalb dieser Karte abschätzt.

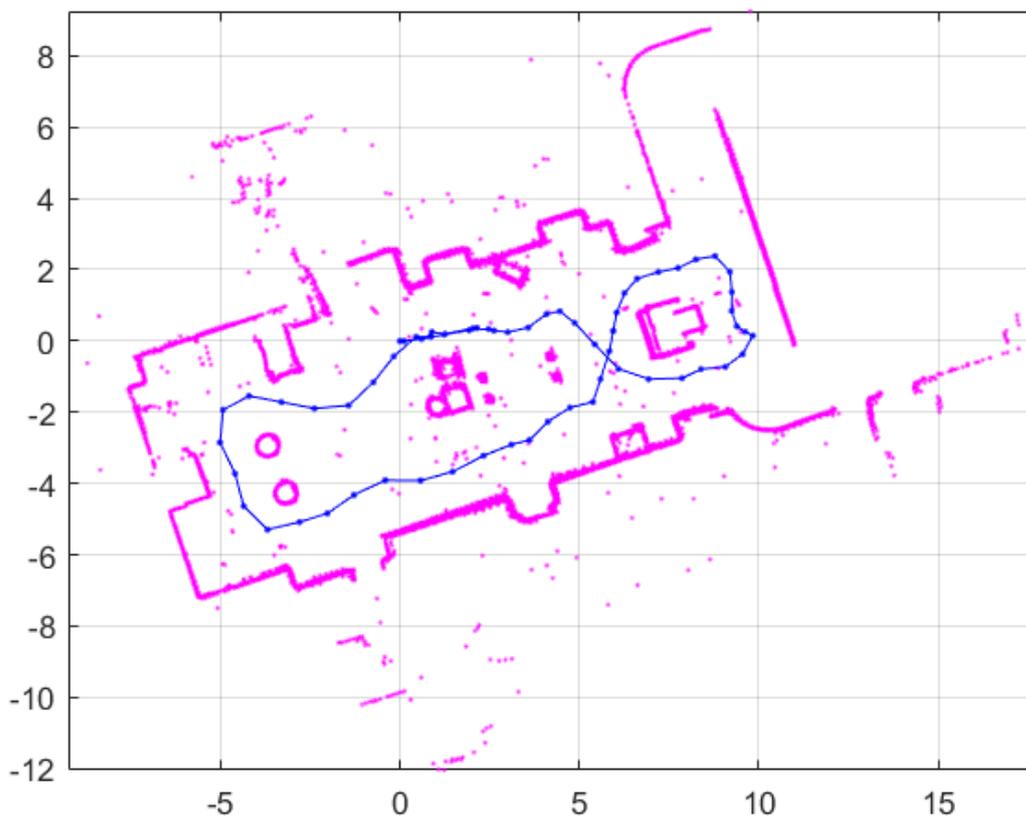


Abbildung 6-11: Durch Vermessung eines Fahrzeuges mit SLAM-Algorithmen erstellte Karte [LEJ22]

Die Abbildung 6-11 zeigt eine Umgebungskarte, welche mittels der Messdaten eines Laserscanners auf einem Fahrzeug ermittelt wurde. Das Fahrzeug hat dabei die blaue Strecke abgefahren. Dieser Prozess muss anfangs bei Inbetriebnahme einer SLAM-Ortung immer durchgeführt werden (meist durch manuell gesteuertes Abfahren mit dem Fahrzeug),

um so eine erste Karte zu erstellen.

Die Karte wird dabei inkrementell aufgebaut. Zu Beginn wird die Position des FTF definiert und als Koordinatenursprung festgelegt. Die erste Messung der Umgebung kann direkt in die Karte eingetragen werden. Wird das FTF weiterbewegt und vermisst dabei seine Umgebung, wird einen Teil der schon bekannten Umgebung erneut, aber auch ein bisher unbekannter Bereich zum ersten Mal vermessen. Aus der Überlappung der neuen Messung mit der bisherigen Karte kann die Bewegung des FTF berechnet werden, so dass wieder die absolute Position bekannt ist und damit auch die neue Messung in die Karte integriert werden kann. So wird nach und nach die komplette Karte aufgebaut und Veränderungen im späteren Betrieb erfasst und in der Karte angepasst. Da die Bestimmung der Bewegung des FTF zwischen zwei Messungen nie exakt ist, wird die berechnete Position des FTF von der vorher ermittelten Karte immer weiter abweichen, womit auch die Qualität der Karte abnimmt. Damit die Karte trotzdem konsistent bleibt, muss der Algorithmus in der Lage sein zu erkennen, wann ein schon bekannter Teil der Umgebung erneut vermessen wurde (Loop Closing Verfahren).

Somit kann sich das FTF in der bekannten Umgebung orientieren und neue Hindernisse erkennen und diese zum Beispiel umfahren.

Ultra-Wideband Ortung

Die Ortung von Tags durch die Ultra-Wideband (UWB) Technologie basiert auf einer Nahbereichsfunkkommunikation. Dabei werden im Gegensatz zu anderen funkbasierten Ortungsverfahren wie Bluetooth Low Energy- oder WLAN-Ortung nicht die Signalstärken der Funksignale gemessen, sondern es wird die Laufzeit der Funksignale (Time of Flight) bestimmt. Dabei wird die Laufzeit zwischen dem zu ortenden Tag (Empfänger z.B. am Fahrzeug, dessen Position bestimmt wird) und mehreren an der Halle fest angebrachten Anchor (Anker oder Satelliten, in der Halle fest verbaut und der Lage genau vermessen) gemessen. Für die genaue Lokalisierung eines Tags sind mindestens 3 Empfänger nötig (Trilateration), außerdem müssen direkte Sichtverbindungen zwischen Empfänger und Sender bestehen.

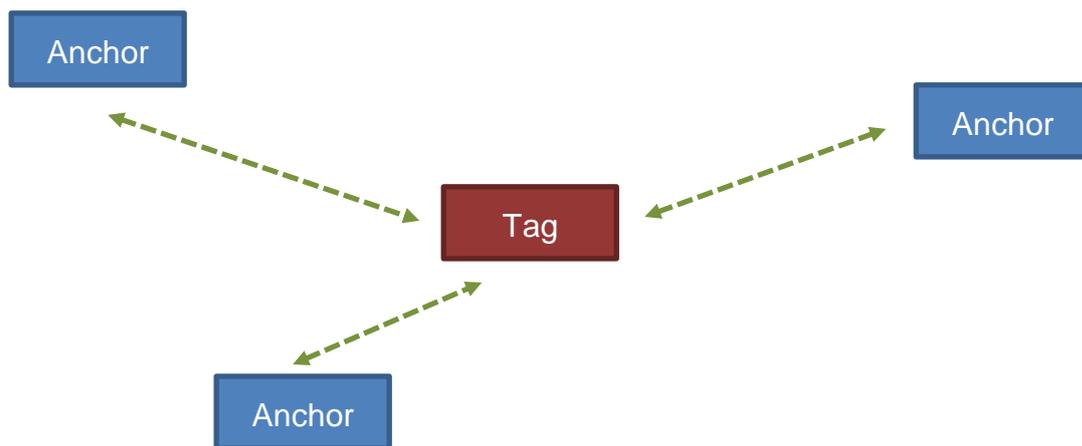


Abbildung 6-12: Prinzip der UWB-Ortung

Die Abbildung 6-12 zeigt den schematischen Aufbau. Dabei handelt es sich in der Anwendung eigentlich um eine dreidimensionale Anordnung der Anchors und Tags. Werden die Anchors z.B. in verschiedenen Höhen in der Halle angebracht kann auch relativ genau die Höheposition eines Tags ermittelt werden.

Das IFT arbeitet im Bereich der UWB Ortung mit dem Stuttgarter Startup Naise GmbH zusammen. Die Versuchshalle des IFT wurde mit dem UWB-System ausgestattet und auch verschiedene FTF. Auch die Arena2036 Versuchshalle verfügt über diese UWB-Technologie. Dort wurden zahlreiche Versuchsreihen unter verschiedenen Randbedingungen und mit verschiedenen Fahrzeuge durchgeführt. Dabei konnten unter optimalen Bedingungen Ortungsgenauigkeiten von 10cm erreicht werden. Unter normalen Anwendungsbedingungen wurden in den Tests typischerweise Genauigkeiten von etwa 30cm erzielt.

Über SLAM- Verfahren und die UWB-Technik stehen neue Möglichkeiten der Ortung und damit Navigation der Fahrzeuge innerhalb von Logistiksystemen zur Verfügung. Diese Verfahren bieten Vorteile gegenüber anderen Verfahren wie z.B. der optischen Spurführung. So müssen keine Leitlinien angebracht werden die ggf. mit der Zeit durch Fahrzeuge etc. beschädigt werden. Allerdings sind für UWB Systeme auch Infrastrukturmaßnahmen nötig. So müssen die UWB-Anchor in der Halle angebracht und mit Strom und ggf. Netzwerkanschluss versehen werden. Diese Ausstattung ist mit erheblichen Kosten verbunden. Bei SLAM Verfahren werden am Fahrzeug messende Laserscanner und eine Rechnerplattform mit entsprechender Rechenleistung für die Software benötigt. Dies verteuert die Fahrzeugkosten.

7 Modulare Fahrzeuge / Baukastenfahrzeuge

Eine Analyse der Kapitel 5 und 6 zeigt, dass nicht alle Fahrzeuge in Monofunktionale und Multifunktionale FTF eingeteilt werden können.

Monofunktionale Fahrzeuge unterscheiden sich in ihrer Anwendung. Sie sind gezielt dafür gebaut eine Aufgabe zu erfüllen. Sie verfügen nicht über komplexe, variable Lastaufnahmeeinrichtungen. Die Sensorik ist auf ein Minimum reduziert (vgl. Kapitel 5).

Multifunktionale Fahrzeuge können sich an verschiedene Aufgaben anpassen, z.B. durch variable Lastaufnahmemittel. Sie verfügen in der Regel über komplexere Sensorik und Sicherheitstechnik, Sensorik zur Feinpositionierung, Navigationstechnik etc. (vgl. Kapitel 6).

Der Übergang zwischen monofunktionalen und multifunktionalen Fahrzeugen ist in der Praxis häufig nicht eindeutig zu trennen. Oft werden Fahrzeuge von Seiten der Hersteller so gestaltet, dass sie durch einfache Umbauten/Erweiterungen an verschiedene Anwendungsanforderungen, wie zum Beispiel Navigationstechnologien (optische Spurführung, Lasernavigation, UWB System etc.) oder Lastaufnahmemittel (Hubtisch, Rollenbahn etc.) angepasst werden können.

Solche Fahrzeuge können aus Sicht des Anwenders als Monofunktionale FTF erscheinen, da sie genau für eine Aufgabe gebaut sind und diese mit mehr oder weniger Technik umsetzen. Aus Sicht des Herstellers handelt es sich dabei dagegen um einen Baukasten, um so, durch einfache Anpassungen und modularen Aufbau, auf verschiedenste Kundenanforderungen mit ein und derselben Fahrzeugplattform reagieren zu können.

Zur sicheren und eindeutigen Einordnung solcher Fahrzeuge wird daher eine neue dritte Kategorie, die **Modularen Fahrzeuge**, eingeführt.

Wie in Kapitel 4 bereits definiert, handelt es sich bei modularen FTF um Fahrzeuge, die als Baukastensysteme individuell aufgebaut werden können. Kunden möchten für ihre Anwendungen spezielle Lösungen, die an ihre verschiedenen Anforderungen angepasst und optimiert sind. Ein FTF wiederum, dass alle Anforderungen verschiedener Aufgaben abdecken kann, ist aufgrund der entstehenden Komplexität zu teuer. Es müssen also durch die Hersteller verschiedene individuelle Lösungen geschaffen werden, ohne dabei für jede Kundenanforderung eine neue Lösung zu entwickeln.

Hieraus ergibt sich der Aufbau von Modularen Systemen / Baukasten.

Dabei können, durch verschiedene Kombinationen einzelner Komponenten und

Komponentenvarianten, beliebige kundenspezifische Lösungen generiert werden.

Ein solches Baukastensystem für FTF ist somit aus der Sicht des Herstellers multifunktional. Aus Kundensicht kann seine individuelle Lösung jeweils monofunktional sein. Der Kunde hat ein spezifisches FTF, das genau für seine spezielle Anwendung gemacht (konfiguriert) wurde.

Vom Verfasser wurde bisher als modulares System das FTF Scooty entwickelt, welches im Detail in Kapitel 7.2 beschrieben wird.

Zukünftig könnte dieser modulare Ansatz auch dahingehend weiterentwickelt werden, dass durch den Kunden selbst individuelle Anpassungen umgesetzt werden können. Der Kunde kann sich selbst aus dem Baukasten sein individuell angepasstes FTF konfigurieren und, bei ggf. sich über die Laufzeit ändernden Anforderungen, Anpassungen vornehmen. Ein dabei zu lösendes Problem stellt die Sicherheitstechnik und Zertifizierung dar. Es muss geklärt werden, wer bei einem Umbau garantiert, dass die Sicherheit der Systeme noch gewährleistet ist. Gegebenenfalls muss eine Abnahme durch den Hersteller oder entsprechend geschultes Personal (Sicherheitsbeauftragter etc.) erfolgen. Unter diesem Hintergrund wird sich der Umbau eher auf nicht sicherheitsrelevante Bereiche (z.B. die Lastaufnahmeeinrichtung) beschränken.

Bei modularen FTF ist eine Klassifizierung in Hauptgruppen notwendig, wie sie in Kapitel 4 bereits vorgenommen wurde und hier nochmals aufgeführt wird:

1. Maschinenbaulicher Teil der FTF

- Chassis
- Fahrwerk
- Antrieb
- Lastaufnahmemittel (aktiv bzw. passiv)
- Ladungssicherung
- Akku und Ladetechnik

2. Sensorik, Aktorik, Steuerung/Regelungstechnik

- Navigation/Spurführung
- Hinderniserkennung
- Sicherheitstechnik
- Sensorik

- Steuerung und Regelung
- Leitsteuerung
- Layouterfassung und Bahnplanung

7.1 Komponenten modularer FTF

Für die verschiedenen Hauptgruppen von Modulen FTF sind unterschiedliche Lösungen von Herstellern verfügbar. Beispiele von FTF und Komponenten in Baukastenausführung von sich am Markt befindlichen Geräten sind in Tabellenform im Folgenden dargestellt. Die gezeigten Beispiele bieten dabei keine Gewähr auf zukünftige Vollständigkeit.

1. Maschinenbaulicher Teil der FTF	
Chassis	<p>Ein Beispiel für solche Lösungen sind änderbare Systeme auf Basis eines Modulbaukastens.</p>  <p>Abbildung 7-1: FTF Baukasten der Firma FlexQube [FLE21]</p> <p>Bei dem System eQart der Firma FlexQube kann ein Chassis für ein FTF aus Standardmodulen beliebig zusammengebaut werden. Dabei gibt es Eckelemente mit integrierter Sicherheitssensorik und Verbindungselemente um die Ecken zu verbinden und so einen Fahrzeugrahmen zu erzeugen. Dadurch kann die Größe des FTF an verschiedene Aufgaben beliebig angepasst werden. In der Abbildung 7-1 kann man zwei Ausführungsvarianten eines solchen</p>

	<p>FTF sehen. Bei beiden Varianten werden die selben ECKelemente mit integrierter Sicherheitssensorik und das Bedienterminal verwendet. Die Lastplattform hingegen wurde aus verschiedenen Elementen aufgebaut und zeigt deutlich unterschiedliche Größen (Fahrzeug links ca. 1 x 1 Meter, Fahrzeug rechts ca. 2 x 2 Meter). Vergleiche [FLE21].</p>
<p>Fahrwerk/ Antrieb</p>	<p>FTF können aus einer beliebigen Anordnung von Antriebsrädern und Laufrollen aufgebaut werden. Dabei sind zum Beispiel angetriebene Räder von FTF in verschiedenen Größen verfügbar. Somit können modular verschiedene Fahrwerke realisiert werden.</p> <div data-bbox="523 831 1278 1167" data-label="Image"> </div> <p>Abbildung 7-2: FTF Antriebssystem von Gefeg-Neckar in verschiedenen Größen [GEF22]</p> <p>Die Abbildung 7-2 zeigt ein Antriebssystem für FTF der Firma Gefeg-Neckar, vergleiche [GEF22]. Das System ist dadurch gekennzeichnet, dass das Getriebe in die Radnabe integriert wurde. An das Getriebe ist seitlich der Moor mit angebauter Bremse angeflanscht. Es sind drei verschiedene Größen eines Baukastens mit verschiedenen Raddurchmessern, Traglasten und Antriebsleistungen dargestellt.</p> <p>Ein weiteres Beispiel für ein Baukastensystem im Bereich der Antriebssysteme für FTF stellt das System ArgoDrive der Firma ebmpapst dar. Dabei handelt es sich um einen Baukasten von Fahrtenmodulen, welche immer die gleichen mechanischen Anschlussmöglichkeiten und die gleiche Steuerungstechnik</p>

aufweisen, aber für verschiedene Radlasten und somit Traglasten des FTF angepasst werden können.

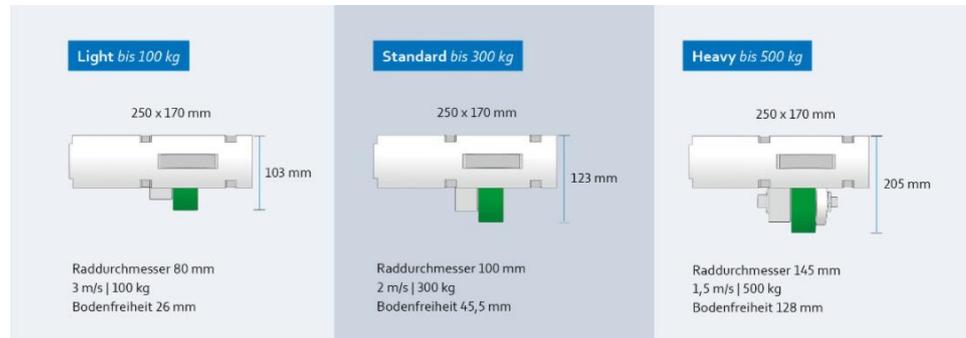


Abbildung 7-3: Antriebsbaukasten ArgoDrive von ebm-papst für verschiedene Radlasten [EBM22]

Die Abbildung 7-3 zeigt die verschiedenen Fahrtenkmodule für ansteigende Lastklassen. Auf den jeweiligen Abbildungen ist deutlich das größer werdende Rad und die massivere Radaufhängung bei den Modulen für größere Traglast (rechte Seite) zu sehen (vergleiche [EBM22]).

Lastaufnahmemittel

Bei den Lastaufnahmemitteln von FTF gibt es eine breite Spanne an Automatisierungsgraden.



Abbildung 7-4: FTF mit einfachem LAM (KaTe Firma Götting) [GÖT18] links und FTF mit automatisierter Übergabe [MKT22] rechts

Dies geht vom rein passiven Lastaufnahmemittel wie im linken Teil der Abb. 7-4 zu sehen - dort kann in diesem Fall die Box nur manuelle be- oder entladen werden - hin bis zur vollautomatisierten Übergabe der Ladung z.B. durch angetriebene Rollenförderertechnik auf dem

	FTF wie im rechten Teil des Bildes dargestellt.
Akku und Ladetechnik	<p>Die Energieversorgung von FTF (Laden der Akkus) kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Beliebte sind kontaktbehaftete Systeme, die bei entsprechender Konstruktion auch automatisch angefahren werden können (Siehe Abbildung 7-5 auf der linken Seite).</p>  <p>Abbildung 7-5: Kontaktbehaftete (links) [VAL20] und berührungslose (rechts) [CON22] Energieübertragung zum Laden der Systeme</p> <p>Durch solche kontaktbehafteten Systeme können große Ströme sehr verlustfrei übertragen werden. Allerdings kommt es zum Verschleiß der Kontakte, wodurch diese im Betrieb ggf. gewartet werden müssen.</p> <p>Eine alternative stellen berührungslose Energieübertragungssysteme (siehe Abbildung 7-5 rechts) dar. Hier kann auf mechanische Kontakte verzichtet werden. Eine solche Form der Energieübertragung unterliegt allerdings gewissen Verlusten (Wirkungsgrad zum Teil über 90% [CON22]). Es ist darüberhinaus eine relativ genaue Positionierung der Spulenpaare zueinander nötig (Wenige Zentimeter bis Millimeter) um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen.</p>

2. Sensorik Aktorik Steuerungs-/Reglungstechnik

Navigation/
Spurführung

Für die Navigation von FTF sind heute sehr viele verschiedene Lösungen (Spurgebunden, Rasternavigation, SLAM-Verfahren, UWB etc.) verfügbar, die unterschiedlichste Anforderungen an die Infrastruktur stellen, aber auch unterschiedlichste Möglichkeiten, z.B. hinsichtlich der Flexibilität beim Einsatz von FTF, bieten.

Ein immer noch weit verbreitetes System stellt die optische Spurführung dar, bei dem das Fahrzeug einer optischen Linie auf dem Boden folgt (siehe Abbildung 7-6).

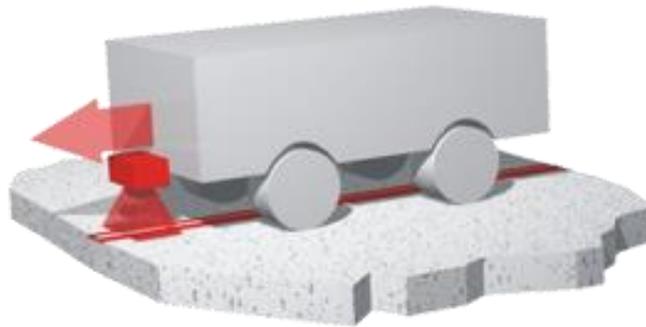


Abbildung 7-6: Optische Spurführung [GÖT16]

Dies ist eine sehr einfache und zuverlässige Technologie und kommt meist bei kleineren, häufig monofunktionalen Fahrzeugen zum Einsatz. Die Fahrzeuge sind dabei an fixe Fahrwege gebunden, ein dynamisches Ausweichen zum Beispiel bei Hindernissen (z.B. abgestellte Palette auf dem Fahrweg) ist in der Regel nicht möglich. Es stellt dabei aber eine sehr kostengünstige Möglichkeit zur Spurführung dar.

Bei multifunktionalen Fahrzeugen kommen häufig auch Navigationstechniken zum Einsatz, die keine Eingriffe in die Infrastruktur (Markierungen auf dem Boden, Einbringung von Transpondern etc.) benötigen. Ein Beispiel stellt hier die SLAM-Navigation dar, bei der das Fahrzeug basierend auf den Messdaten der Laserscanner eine Umgebungskarte erstellt und sich darin

orientiert (siehe auch Kapitel 6.3).

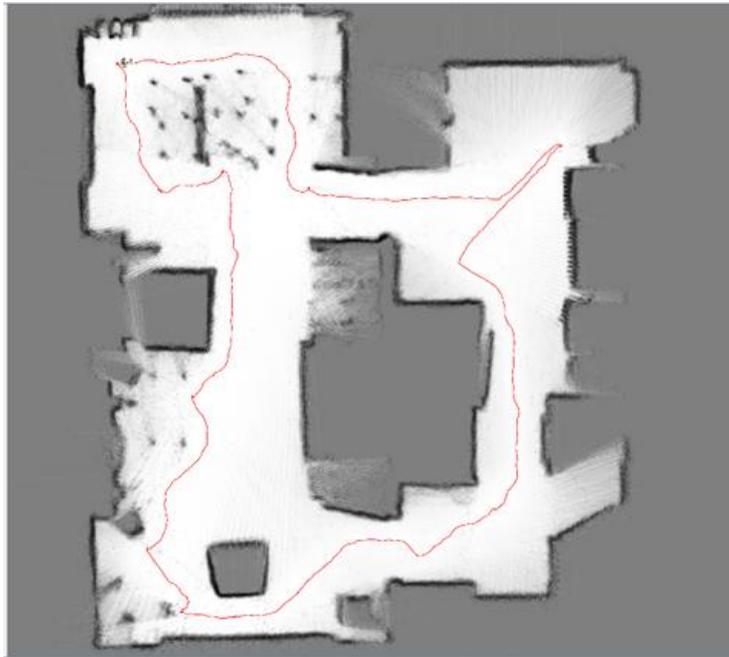


Abbildung 7-7: Durch SLAM Verfahren erzeugte Karte [LEJ22]

Die Abbildung 7-7 zeigt eine basierend auf Messdaten eines Laserscanners mit SLAM-Algorithmen erzeugte Karte. Die Technologie bietet den Vorteil sehr gut auf z.B. dynamische Hindernisse reagieren zu können. Sind im Fahrzeug aufgrund der Sicherheitstechnik bereits Laserscanner verbaut, können deren Messdaten genutzt werden. Probleme bei diesem Verfahren können in großen Räumen auftreten, in denen keine statischen Strukturen (z.B. Regale) vorhanden sind, die durch die Laserscanner erfasst werden können. In solch einem Fall kann sich die Umgebung so stark verändern, dass durch die SLAM-Algorithmen keine Wiedererkennung von Topographien errechnet werden kann und das Fahrzeug somit seine Position nicht mehr bestimmen kann.

Es gibt Modulare Fahrzeuge oder Baukastenfahrzeuge von verschiedenen Herstellern, die je nach Anwendungsfall mit verschiedenen Navigationslösungen ausgestattet werden können. Somit kann auf die jeweilige Kundenanforderung flexibel reagiert werden.

Sicherheitstechnik

Die Sicherheitstechnik stellt für den Einsatz von FTF in nicht abgesperrten Umgebungen (also Bereiche in denen sich auch Personen befinden dürfen) eine wesentliche Voraussetzung dar. Es müssen Personen, die sich im Bewegungsweg der Fahrzeuge befinden, sicher erkannt und dementsprechend eine Kollision verhindert werden. Je nach Gefährdungsbeurteilung des Fahrzeuges werden dabei unterschiedlich hohe Anforderungen an die Sicherheitstechnik gestellt. Der klassische personensichere Hindernissensor ist der Laserscanner.



Abbildung 7-8: Personensicherer Laserscanner [SIC22]

Bei FTF müssen die Laserscanner (siehe Abbildung 7-8) so angebracht werden, dass stets der gesamte Bewegungsbereich des Fahrzeuges abgedeckt werden kann. Dementsprechend müssen bei Fahrzeugen, die sich in mehrere Richtungen bewegen können, wie z.B. flächenbewegliche Fahrzeuge, mindestens 2 dieser Laserscanner angebracht werden. Die Laserscanner stellen dabei einen relativ großen Kostenanteil der Fahrzeuge da.

Alternative Systeme sind sichere Ultraschallsensoren, die vereinzelt auch in FTF zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 7-9)

	<div data-bbox="651 257 1040 739" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="483 790 1126 824">Abbildung 7-9: Sicherer Ultraschallsensor [PEP22]</p> <p data-bbox="483 853 1453 1106">Bisher gibt es auf dem Markt keine weiteren für sichere Personenerkennung zugelassene Sensorsysteme. Es sind gerade verschiedene System, die z.B. auf Sensorfusion aus Radarsensoren kombiniert mit Stereokameras aufbauen, in der Entwicklung, aber aktuell noch nicht zertifiziert auf dem Markt erhältlich.</p>
<p data-bbox="165 1144 454 1178">Hinderniserkennung</p>	<p data-bbox="483 1144 1453 1731">Die Erkennung von Hindernissen wird meist mit der Sicherheitssensorik von FTF realisiert. Die oben beschriebenen Sensoren für Personensicherheit können auch zur Erkennung von Hindernissen eingesetzt werden. Es gibt weitere Sensorsysteme, welche in Fahrzeugen teilweise zusätzlich eingebaut werden, um den Sichtbereich zu verbessern. Sichere Laserscanner haben nur eine Sichte ebene. Hindernisse, die sich in einer höheren Ebene befinden (z.B. hochgestellte Gabelzinken eines Staplers), können damit nicht erkannt werden. Um solche Hindernisse dennoch wahrnehmen zu können, kommen Sensoren wie Mehrebenen-Lidar oder ToF-Kameras (Time of Flight) zum Einsatz.</p>



Abbildung 7-10: ToF-Kamera zur Hinderniserkennung [IFM22]

Mit ToF-Kameras, wie in Abbildung 7-10 dargestellt, können 3D-Sichtbereiche überwacht werden. Die ToF-Kamera liefert dabei ein Bild aus Bildpunkten, die jeweils eine Tiefeninformation (Entfernung zum Objekt) besitzen. Bei solchen Kameras ist der Sichtbereich/Öffnungswinkel jedoch aktuell noch stark eingeschränkt.

Mehrebenen - Lidar - Sensoren liefern dagegen ein deutlich größeres Sichtfeld (bis zu 270°), sind aber mechanisch sehr aufwendig und damit auch sehr teuer und werden somit selten bei FTF eingesetzt.

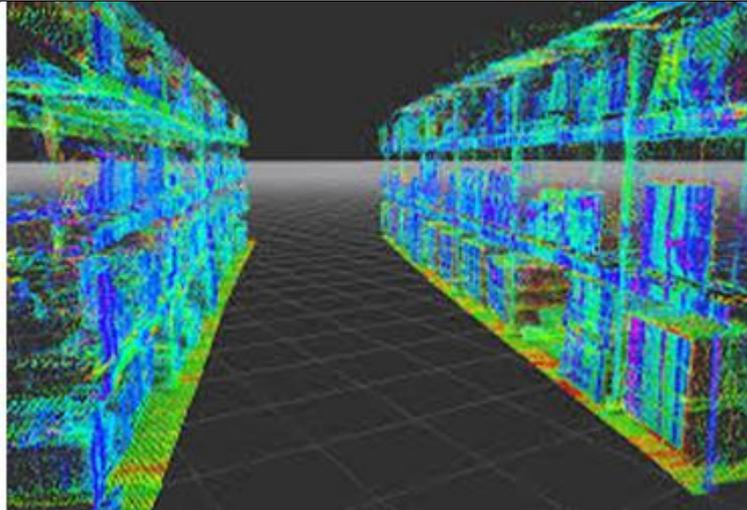


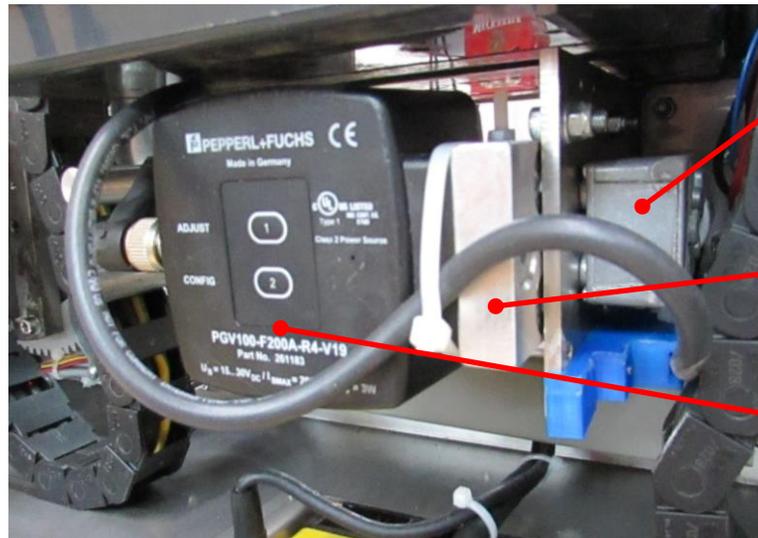
Abbildung 7-11: Regalgang aus Sicht eines Lidar Sensors [TOY22]

Solche Sensorsysteme können in modularen Fahrzeugen meist zugerüstet und an verschiedene Anforderungen angepasst werden. Zur Verarbeitung der umfangreichen Sensordaten wird entsprechend viel Rechenleistung auf dem Fahrzeug benötigt. Mit diesen Sensorsystemen kann der vollständige Bereich vor einem Fahrzeug (nicht nur eine Ebene über dem Boden) überwacht werden.

Sensorik

In FTF kommen, besonders bei speziellen Anforderungen, unterschiedliche Sensorsysteme zum Einsatz. Oft sind die FTF entsprechend so aufgebaut, dass je nach Anforderung verschiedene Sensoren integriert werden können. Häufig werden zusätzliche Sensoren benötigt, wenn das FTF sehr genau positioniert werden muss, wie dies zum Beispiel an einer Übergabestelle auf Stationäre Fördertechnik nötig ist. Hier muss das FTF teilweise auf wenige Millimeter genau positioniert werden, um einen zuverlässigen Übergabeprozess zu gewährleisten. Diese Genauigkeit kann durch die „normale“ Navigationssensorik in der Regel nicht erreicht werden. Auch bei der Positionierung des FTF, unter z. B. Regalmodulen, ist eine entsprechende Sensorik nötig, um ausreichend genau positionieren und somit das Regalmodul sicher

aufnehmen zu können.



- Getriebemotor zum Schwenken der Kamera
- Hebelmechanismus
- Spurführungskamera

Abbildung 7-12: Spurführungs- und Positionierungssensorik des FTF Shelfie

An dem am IFT entwickelten Riegel-FTF wurde für die Sensorik zur Ausrichtung des Fahrzeuges unter den Regalmodulen ein neuartiger Ansatz gewählt (siehe Kapitel 6.1). Dazu wurde die im FTF verbaute optische Spurführungskamera, die zur Navigation des Fahrzeuges auf einer optischen Leitlinie dient, so in das Fahrzeug integriert, dass sie durch einen zusätzlichen Antriebsmotor um 180° nach oben geschwenkt werden kann. Die Spurführungskamera ist dann nicht mehr in Richtung Boden ausgerichtet, sondern senkrecht nach oben. An die Regalmodule wurde an der Unterseite ein Barcodemuster angebracht, an dem sich die Spurführungskamera nun orientieren kann und somit das Fahrzeug millimetergenau unter dem Regal positioniert werden kann. Durch diese genaue Positionierung kann das Regalmodul präzise mittels der Aufnahmevorrichtung, welche aus dem Fahrzeug ausfahren, aufgenommen werden. Diese Zweifachnutzung der Spurführungskamera ermöglicht auf teure zusätzliche Sensorik zur Positionierung unter den Regalmodulen verzichten zu können.

Layouterfassung und Bahnplanung	<p>Es gibt verschiedene Möglichkeiten Layouts für die Fahrwege von FTF zu erfassen. So kann ein Layout vorab z.B. am PC definiert und darin feste Fahrwege zugeordnet werden. Das Layout kann aber auch vor Ort durch Messsysteme (3D-Scanner generiert eine dreidimensionale Punktwolke oder durch die Laserscanner in den Fahrzeugen, welche eine zweidimensionale Punktwolke generieren) erzeugt werden. Durch entsprechende Nachbereitung der gescannten Ergebnisse können dort z.B. gesperrte Flächen und die Fahrtrouten für die FTF definiert werden. Dabei gibt es zwischen den verschiedenen Systemen allerdings sehr große Unterschiede. Die VDA 5050 [VDA22], welche den Standard für eine Einheitliche Kommunikation von Systemen verschiedener Hersteller untereinander definiert, erlaubt nur feste Fahrtrouten, die über einzelne Wegmarken definiert werden (Punkt zu Punkt Navigation). Viele Systeme verfügen heutzutage aber auch über freie Fahrtrouten. Dabei werden nur Bereiche definiert in denen sich das Fahrzeug bewegen darf. Die individuellen Bewegungspfade bestimmt dann das FTF in Abhängigkeit der Umgebung (andere FTF, abgestellte Ladungsträger, Personen etc.) für sich selbst und bewegt sich entsprechend.</p>
---------------------------------	--

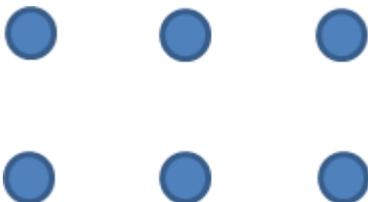
7.2 Konzeptentwicklung modulares FTF

Im Rahmen der Dissertation wurde ein erstes modulares System / Baukastensystem entwickelt. Eine wesentliche Grundidee ist dabei ein modulares Antriebssystem mit möglichst einfach aufgebauten Fahrtenmodulen, welche sich durch ihren mechanischen Aufbau leicht kombinieren lassen und gleichzeitig sehr kostengünstig (im Vergleich zu bisherigen FTF) sind. Dabei geht es nicht nur um die mechanische Umsetzung dieser Module. Einen weiteren Aspekt der Modularität stellt die Steuerungstechnik der Antriebsmodule dar. Ziel ist es ein Steuerungssystem zu entwickeln, mit dem sich eine beliebige Anzahl solcher Fahrtenmodule beliebig geometrisch kombinieren¹³ lassen und die Steuerungssoftware durch wenige Parameter einfach darauf angepasst werden kann. Dazu wurde das FTF „Scooty“ entwickelt, welches im Folgenden genauer beschrieben wird.

¹³ Die Fahrtenmodule können beliebig in Anzahl und Anordnung kombiniert werden wie z.B. drei Fahrtenmodule in einer Dreiecksanordnung:



oder 6 Fahrtenantriebe in einer Rechteckanordnung:



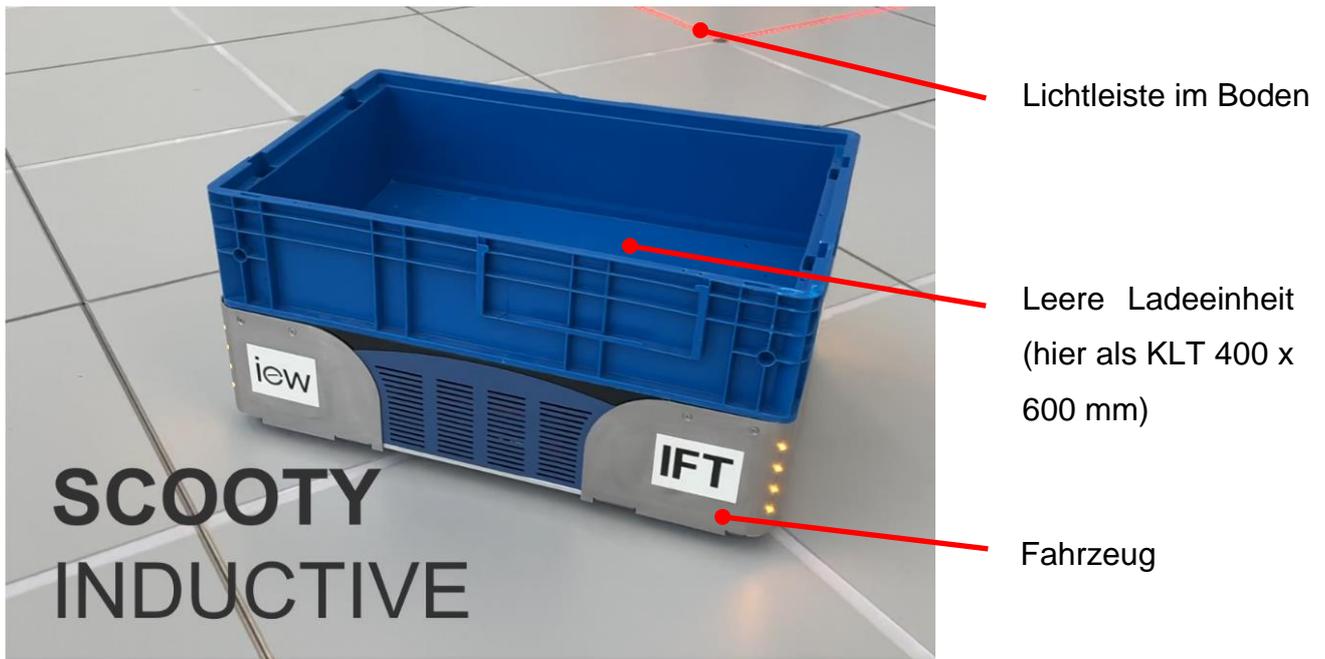


Abbildung 7-13: Vom IFT entwickeltes FTF Scooty

Dieses Steuerungskonzept wird erstmalig im FTF Scooty umgesetzt. Der Name Scooty ist daraus abgeleitet, dass die Antriebsräder (4 Stück je Fahrzeug) aus der Serienfertigung von Street-Scootern (E-Rollern) stammen, weshalb diese in sehr großen Stückzahlen als 24V bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC Motor) mit innerhalb des Rades integriertem Getriebe zum Preis von nur etwa 80 € je Stück beschafft werden können (siehe Abbildung 7-14 und Abbildung 7-18 als Foto).

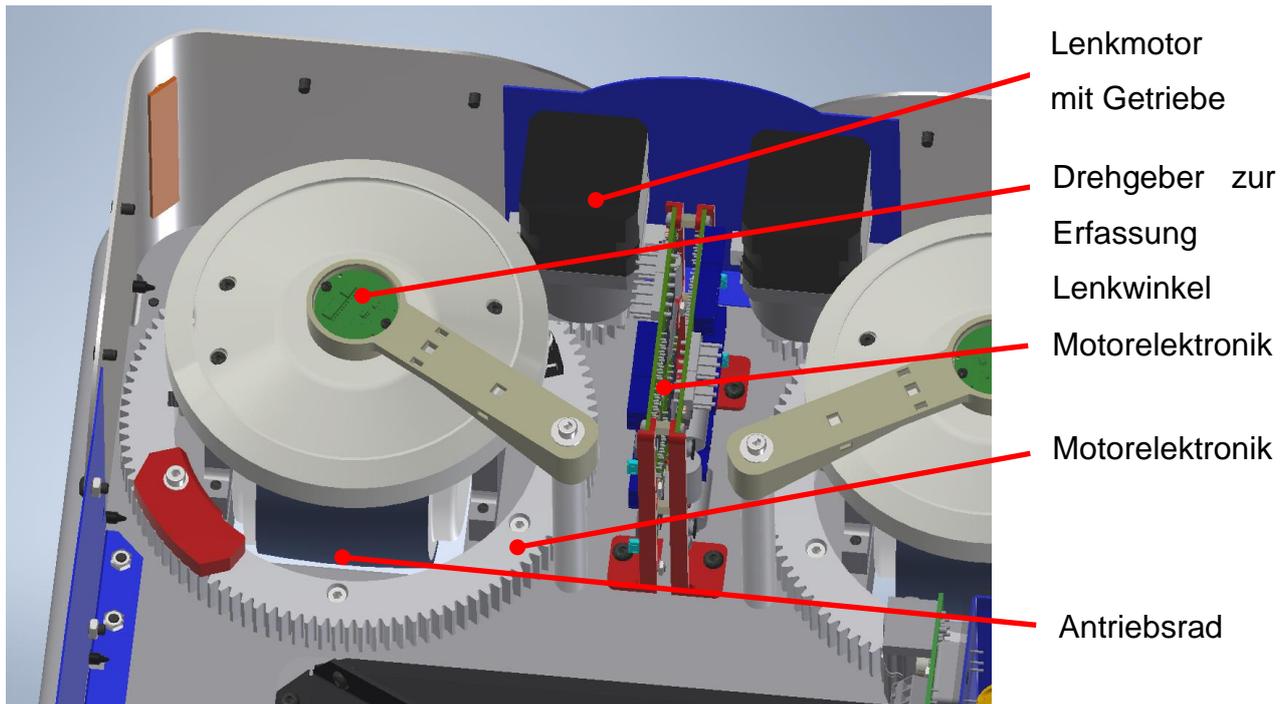


Abbildung 7-14: Fahr-Lenk Antrieb mit Lenkmotor FTF Scooty

Das FTF Scooty ist im Rahmen eines Kooperationsprojekts des Instituts für Fördertechnik und Logistik IFT und des Instituts für Elektrische Energiewandlung IEH (beide Universität Stuttgart) entstanden, welches durch die Universität Stuttgart gefördert wurde. Der Fokus liegt dabei nicht nur auf der reinen Entwicklung des FTF, sondern auch auf einer berührungslosen, unterbrechungsfreien Energieübertragung durch den Intelligenten Boden der Firma Bosch-Rexroth, welche auch Kooperationspartner des Projektes sind. Dazu sind in der Bodenstruktur Induktionsspulen eingebracht, welche die Energie berührungslos an eine im Fahrzeugboden integrierte Sekundärspule übertragen. Darüber hinaus sollen die Induktionsspulen im Boden auch zur Navigation genutzt werden. Dazu sind im Fahrzeugboden zusätzlich vier Sensespulen integriert, welche die Lage und Stärke der Magnetfelder der Spulen im Intelligenten Boden messen können (Siehe Abbildung 7-16).

Der Intelligente Boden ist ein neuer Ansatz hochflexible modulare Produktionssysteme zu realisieren. In solchen zukünftigen Produktionssystemen sollen bisher starre Produktionslinien durch modulare Systeme ersetzt werden. Die einzelnen Module dieser Systeme sind dabei beweglich und funktionieren selbstständig als unabhängige Einheiten. Um diese modularen Systeme beweglich zu realisieren, müssen benötigte Medien, wie zum Beispiel Druckluft, elektrische Energie etc. beliebig an allen Orten auf die Module übertragen werden können.



Abbildung 7-15: Demonstrator Intelligenter Boden der Firma Bosch Rexroth, aufgebaut aus einzelnen Elementen mit integrierter LED-Lichtleiste und Gewichtssensorik in der Arena2036 Versuchshalle

Der intelligente Boden soll nicht nur dazu dienen die Produktionsmodule und FTF mit Energie etc. zu versorgen, sondern es ist weitere Sensorik in den Boden integriert, wodurch zum Beispiel die Position von Personen erfasst werden kann. Diese Information soll langfristig auch zur Erkennung und Absicherung von Begegnungssituationen zwischen FTF und Personen genutzt werden. Zur Erfassung der Positionen sind in der Stützstruktur unter den Bodenplatten Kraftsensoren eingebaut. Aus der Kraftverteilung mehrerer Sensoren lässt sich die Position z.B. einer Person oder eines abgestellten Ladungsträgers ermitteln. Über LED-Lichtleisten im Boden (siehe Abbildung 7-15) können für Personen unter anderem Fahrwege der FTF visualisiert werden. Dadurch kann die Sicherheit und die Leistung der Fahrzeuge im gemischten Betrieb zwischen FTF und Personen erhöht werden. In diesem gemischten Betrieb tritt häufig die Situation auf, dass andere Flurförderzeuge oder Personen die Schutzfelder der FTF Sicherheitssensorik verletzen und es in Folge zu einer

Langsamfahrt oder einem Stillstand des FTF kommt. Dies reduziert teilweise erheblich die Transportleistung solcher FTS. Durch die Visualisierung der Fahrmanöver der FTF für Personen mittels der LED-Lichtleisten im Boden können Warnfeldverletzungen und somit die Fahreinschränkungen der FTF deutlich reduziert werden.

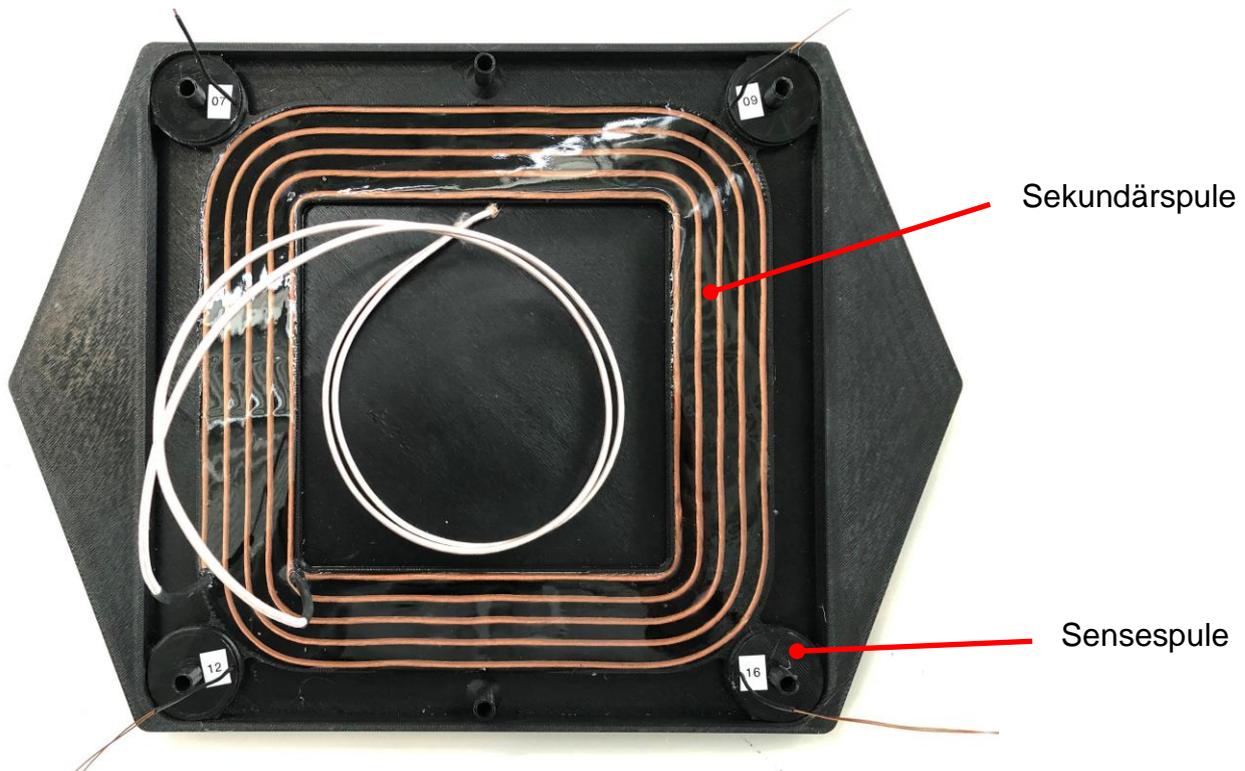


Abbildung 7-16: Sekundärspule des Fahrzeugs mit 4 Sensespulen

Mittels der oben beschriebenen Messspulen im Fahrzeug lässt sich mit einer entsprechenden Messtechnik und Algorithmik die Position des Fahrzeuges auf dem Boden bestimmen und somit das Fahrzeug navigieren. Um das FTF jedoch nicht nur auf dem mit Induktionsspulen ausgestatteten Boden einsetzen zu können, können die Sekundärspule und die Sensespulen auch durch ein Kamerasystem im Fahrzeugboden ersetzt werden. Dadurch ist das FTF in der Lage optischen Spuren im Boden zu folgen. Dies können sowohl passive Spuren aus Farbe oder farbigem Klebeband, als auch aktive Spuren aus LED-Lichtleisten (siehe Abbildung 7-15), wie sie auch im Boden integriert sind, sein. Dadurch kann das Fahrzeug modular an verschiedene Anwendungen angepasst werden. Die LED-Lichtleisten können durch die im Boden integrierte Steuerung aktiv angesteuert werden, um so das FTF zu verschiedenen Zielen dirigieren zu können, indem verschiedene Spuren

dargestellt werden denen das Fahrzeug folgen kann. Zusätzlich können durch Farbwechsel oder Blinkfolgen weitere Informationen (z.B. das FTF soll stoppen) übertragen werden. Die Energieversorgung des Fahrzeuges erfolgt in diesem Anwendungsfall (es steht keine Spule zur induktiven Energieversorgung zur Verfügung) durch einen Standard-Akku aus dem Bereich der Elektrowerkzeuge. In diesem Akkubetrieb können die Fahrzeuge, wie oben beschrieben, auf konventionellen Böden eingesetzt werden ohne darin integrierte induktive Energieversorgung.



Akkukasten im
Chassis des
FTF integriert

wechselbarer
Akku

Abbildung 7-17: Akku von Elektrowerkzeugen als Energiespeicher im Fahrzeug

Der Einsatz dieser Standard-Akkus mit einer Kapazität von bis zu 12Ah (siehe Abbildung 7-17) bietet einen erheblichen Kostenvorteil für die Fahrzeuge, da solche Akkus in großen Stückzahlen als fertig zertifizierte Einheit hergestellt werden. Darüber hinaus kann der Akku sehr schnell manuell getauscht werden. So kann ein kontinuierlicher Betrieb des Fahrzeuges ohne Stillstandszeiten bei Ladevorgängen realisiert werden. Alternativ kann der Akku auch im Fahrzeug mittels Ladekontakten oder einer induktiven Energieversorgung geladen werden.

Das Fahrzeug ist durch die vier lenkbaren Antriebe vollständig flächenbeweglich (omnidirektionale Bewegung). Dadurch kann das Fahrzeug in jeder Ausrichtung jeden

beliebigen Punkt auf dem Boden erreichen. Dies ist eine wichtige Anforderung, da auf dem intelligenten Boden hochflexible modulare Produktionssysteme realisiert werden sollen und das FTF beliebige Übergabestellen in verschiedenster Ausrichtung anfahren können muss.

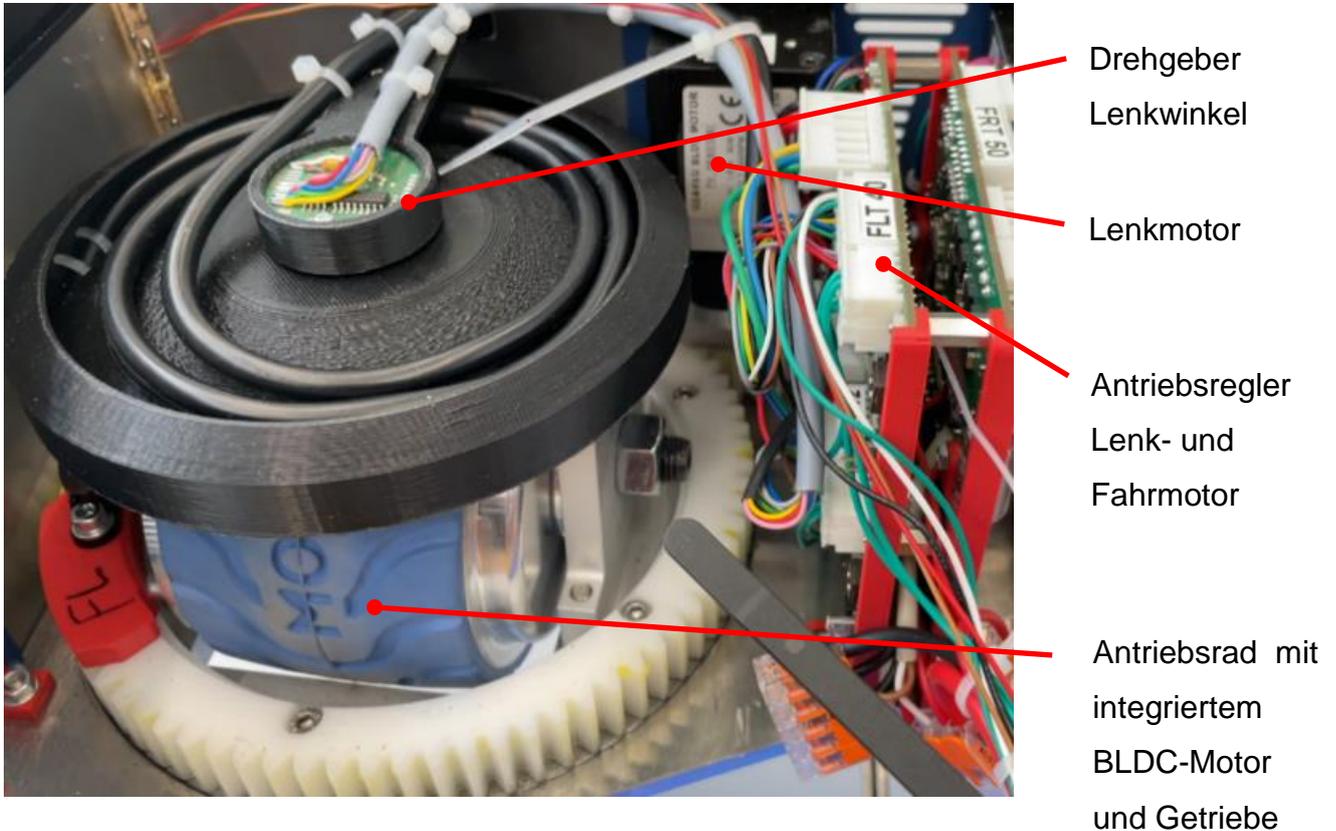


Abbildung 7-18: einer der Fahrlenkantriebe des FTF Scooty

Diese Fahrlenkantriebe sind so aufgebaut, dass sie ein Modul aus Fahrtrieb, Lenkmotor, Lenkwinkelgeber und Motorregler bilden. Dadurch können diese Module in beliebiger Zahl frei innerhalb eines FTF angeordnet werden. Dabei müssen jedoch verschiedene Steuerungsparameter angepasst werden, damit alle Fahrlenkantriebe zusammen so angesteuert werden, dass sich eine eindeutige Fahrbewegung ergibt.

Eine modulares FTF, bei dem sich solche Fahrlenkantriebe frei positionieren lassen, führt dementsprechend zu einem hohen Aufwand bei der Anpassung verschiedener Steuerungsparameter (vor allem geometrische Größen) und der Regelungsarchitektur. Um dies zu vereinfachen wurde durch das IFT das Steuerungskonzept der Omni-Kurven-Parameter entwickelt (vergleiche [COL20]). Dieses Steuerungskonzept wurde dafür konzipiert, alle Bewegungsmöglichkeiten omnidirektionaler Flurförderzeuge vollständig zu beschreiben. Ferner soll es eine einheitliche Behandlung unterschiedlichen Fahrzeugtypen unter manueller sowie automatischer Kontrolle ermöglichen. Dafür wird die zur Ansteuerung

der Fahrzeuge definierte Schnittstelle intuitiv (Darstellung in Parametern, die einfach vorstellbar sind, keine abstrakten Größen) und für jeden Fahrwerkstyp verwendbar gestaltet. Als Steuergrößen werden drei unabhängige, intuitiv erfassbare und physikalisch definierbare Parameter verwendet, welche die möglichen Bewegungen des Fahrzeugs darstellen. Mit diesen so genannten *Omni-Kurven-Parametern* kann jeder Fahrwerkstyp mit seinen Freiheitsgraden passend angesteuert werden. Die Parameter sind:

- eine normierte Geschwindigkeit v_n ,
- ein abstraktes Krümmungsmaß κ_n
- und ein Schwimmwinkel β .

Die letzten beiden Parameter beschreiben die Bewegungsmode und beeinflussen lediglich die Lenkungsconfiguration der Fahrzeugräder.

Durch den modularen Aufbau des Scooty FTF mit vier Fahrlenkantrieben in Verbindung mit dem neuartigen Steuerungskonzept, ist eine modulare Plattform entstanden, mit der sich verschiedenste FTF Lösungen abbilden lassen. Die Umsetzung als Scooty stellt nur eine Beispielanwendung dar. Das Fahrzeug wurde auf dem intelligenten Boden erstmals auf der LogiMAT 2022 in Stuttgart im Betrieb gezeigt.

7.3 Modulare Fahrzeuge verschiedener Hersteller

Um die zukünftige Unterteilung in modulare FTF besser nachvollziehen zu können, werden im Folgenden exemplarisch modulare FTF-Lösungen verschiedener Hersteller dargestellt.

Dabei gibt es Lösungen, deren Modularität sich auf das ganze Fahrzeug bezieht, oder nur auf einzelne Funktionsbereich, wie z.B. das Lastaufnahmemittel LAM. Welche Komponenten bei den jeweiligen Systemen dabei modular und austauschbar sind kann sehr stark variieren.

Variationen in einzelnen Funktionsbereichen, wie z.B. verschiedene Energiespeicher (Variation der Akkugröße und des Akkutyps) oder Ladetechnologien (berührungslos oder kontaktbehaftet), können bei vielen Fahrzeugen verschiedener Hersteller durchgeführt werden. Für Variationsmöglichkeiten bei grundlegenden Funktionsbereichen, wie etwa Navigation (z.B. optisch spurgeführt oder freie Navigation mit SLAM Algorithmen), gibt es jedoch kaum Beispiele. Bei den hier betrachteten Beispielen bezieht sich die Modularität der Fahrzeuge auf den grundlegenden Aufbau (Anpassung der Fahrzeuggröße) und Variation der LAM, um verschiedene Ladungsarten aufnehmen zu können und den Automatisierungsgrad der Lastübergabe anzupassen.

7.3.1 Beispiel FTF Agile1500 des Herstellers Comau

Bei diesem FTF handelt es sich um ein modulares System des italienischen Herstellers Comau, welches durch diverse LAM und andere Komponenten wie z.B. Akkutyp, Navigationssensor etc. umfassend angepasst werden kann. Bei den LAM kann zwischen Rollenförderer, Hubvorrichtung mit integriertem Förderband, einfacher Hubvorrichtung, Anhängerkupplung (Einsatz als Schlepp-FTF) und einer Aufnahme zur Wagenmitnahme (Unterfahrschlepper) gewählt werden.



Abbildung 7-19: FTF Agile 1500 des Herstellers Comau [COM21]

Die Abbildung 7-19 zeigt das FTF in der Grundausführung mit einer einfachen Lastplattform, auf der verschiedene Ladungen durch externe Vorrichtungen (z.B. durch Gabelstapler) abgestellt und wieder herunter genommen werden können. In dieser Ausführung kann das FTF selbstständig keine Ladung aufnehmen.

Verschiedene LAM-Module sind in Abbildung 7-20 dargestellt. Auf der linken Abbildung wird die Hubfunktion durch einen Hubtisch realisiert. Mit ihm kann das FTF Ladungsträgergestelle unterfahren und durch anheben selbstständig aufnehmen. Die rechte Abbildung zeigt einen Aufbau mit einem quer angeordneten Rollenförderersystem. Durch diesen Aufbau können kleiner Ladungsträger, wie z.B. KLT, automatisch in Querrichtung aufgenommen und wieder abgegeben werden. Die verschiedenen LAM lassen sich modular auf dem FTF mechanisch montieren und werden über ein Kabel mit Steckverbindung an die Stromversorgung und Steuerung des FTF angeschlossen. Die Module besitzen unterschiedliche Traglasten, welche die maximale Nutzlast von 1500 kg des FTF je nach Modul entsprechend herabsetzen. [COM21]



Abbildung 7-20: Varianten verschiedener LAM [Com21]

Die Modularität des Systems beschränkt sich nicht nur auf die LAM. Je nach Konfiguration können verschiedene Navigationsvarianten in dem Fahrzeug realisiert werden. Es kann eine Umgebungsnavigation basierend auf den Messdaten der beiden vorne und hinten angebrachten Laserscanner integriert werden. Alternativ ist eine Rasternavigation mit Magnetpunkten¹⁴ möglich. Je nach Form der Navigation ergeben sich unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten von 1,7 m/s bei der Umgebungsnavigation und 1,2 m/s bei der Rasternavigation. Das Fahrwerk des Fahrzeugs baut auf einem Differentialantrieb an der Hinterachse auf. [COM21]

Beim Energiesystem hat man die Möglichkeit, zwischen einem manuellen und automatischen Ladevorgang sowie einem Austauschakku zu wählen. Für den automatischen Ladevorgang fährt das FTF an eine Dockingstation heran und wird über Kontaktplatten seitlich am Fahrzeug geladen. [COM21]

7.3.2 Beispiel FTF VARIO MOVE von ek robotics

Der FTF-Baukasten VARIO MOVE der Firma ek robotics stellt ein modulares FTF-System dar, welches durch verschiedene Anbauten von LAM an unterschiedliche Logistikaufgaben angepasst werden kann. Dafür gibt es in diesem System verschiedene Module zur Lastaufnahme, die mit der omnidirektionalen Antriebseinheit über eine definierte Schnittstelle verbunden werden (siehe Abbildung 7-21). Dabei stehen verschiedenste Hochhub- und Fördermodule sowie ein Gegengewichtsmodul zur Verfügung. Die Antriebseinheit kann diese Module beliebig an- und abkoppeln und das FTF sich so für viele

¹⁴ Es werden Magnete in einem Raster auf im Boden angebracht. Das FTF kann sich anhand dieses Rasters orientieren.

Aufgabenstellungen anpassen [EKR21-1].

Im Bereich der Navigationstechnik kann das System mit verschiedenen Technologien und verschiedenster Kombinationen dieser ausgestattet werden [EKR21-2].



Abbildung 7-21: Variationsmöglichkeiten des FTF Systems VARIO MOVE [EKR21-1]

Zur Erkennung von Hindernissen und als Sicherheitstechnik im kombinierten Verkehr mit Personen, ist das System mit Laserscannern ausgestattet, welche jeweils in die Hauptfahrtrichtungen angeordnet sind. Darüber hinaus sind weitere Scanner zur vertikalen Erkennung von schwebenden Hindernissen und manuellen Eingriffen an der Seite des FTF integrierbar. Zur dreidimensionalen Hinderniserkennung können je nach Konfiguration beispielsweise mehrere Laserscanner in verschiedenen Höhen oder 3D-Kameras (ToF-Kameras) und Lidar-Scanner integriert werden [EKR21-3].

Dieses modulare Fahrzeug verfügt somit über eine sehr große Variationsmöglichkeit vom automatisierten „Gegengewichtsstapler“ bis zum FTF mit aufgebauter Rollenfördertechnik zur automatisierten Lastübergabe an stationäre Fördersysteme.

7.3.3 Beispiel FTF CALL THE DONKEY der Firma imetron

Bei diesem System handelt es sich um ein FTF welches mit Mecanum-Antrieb ausgestattet ist, um so omnidirektionale Bewegungsmöglichkeiten zu erreichen.

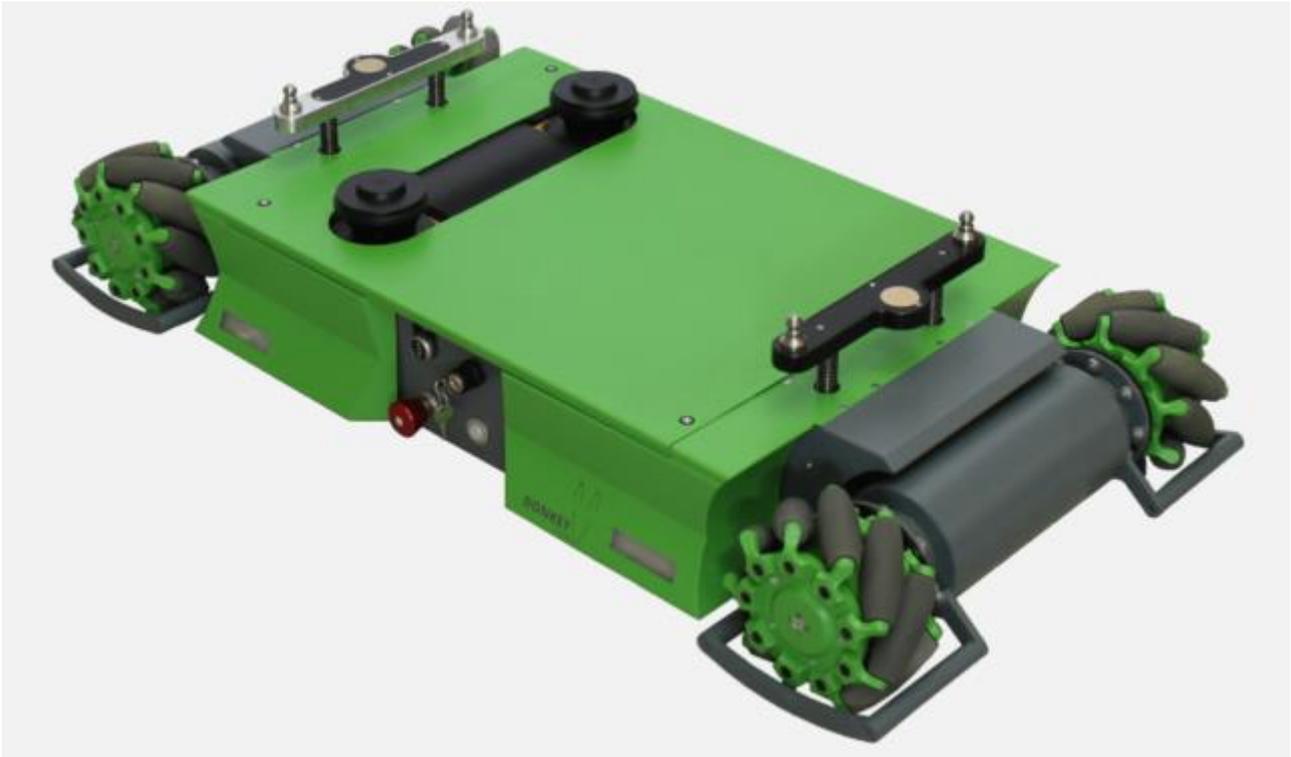


Abbildung 7-22: Grundmodul des FTF CALL THE DONKEY [DON21]

Diese FTF-Plattform kann mit unterschiedlichen Lastmodulen ausgestattet werden, welche den Transport von Paletten, Kisten, Rollbehältern oder auch ganz individuellen Warenträgern mit kundenspezifischen Lösungen ermöglichen (siehe Abbildung 7-22). Die verschiedenen Lastmodule können durch ein in das Grundmodul integriertes Spindelhubsystem mit 80mm Hub selbstständig angekoppelt werden.



Abbildung 7-23: Lastmodul für KLT-Trolleys (links) und Paletten (rechts) [DON21]

Die Besonderheit dieses FTF- Systems stellt die Energieversorgung dar. Das eigentliche FTF Grundmodul besitzt nur eine kleine Lithium-Pufferbatterie. Die eigentlichen Traktionsbatterien sind in die unterschiedlichen Lastmodule integriert und versorgen nach Kopplung mit dem FTF dieses mit Strom. Zur Ladung der Traktionsbatterien werden die Lastmodule an entsprechenden Ladestationen automatisch abgesetzt und aufgeladen. Durch dieses System ist ein dauerhafter Betrieb des FTF ohne Ladepausen möglich [DON21].

Diese verschiedenen Beispiele von Herstellern sowie das System Scooty zeigen, dass Fahrzeuge die der Kategorie Modulare FTF zuzuordnen sind immer häufiger vorkommen werden. Durch die einfache Anpassbarkeit der Systeme auf verschiedene Anforderungen können FTF dieser Kategorie einen guten Kompromiss, auch aus Kostensicht darstellen, um ein breites Spektrum verschiedener Anwendungen abdecken zu können. Sie können allerdings nur eingeschränkt oder gar nicht (je nach Konfiguration) die Kosten von Monofunktionalen FTF erreichen, die für ganz gezielte Aufgaben optimiert und auf ein Minimum reduziert werden können.

8 Zusammenfassen der Ergebnisse über die Forschung und Entwicklung im Bereich Mono- und Multifunktionale sowie Modulare FTF

Vor den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Verfassers, die in Kapitel 5 (monofunktionale FTF), Kapitel 6 (multifunktionale FTF) und Kapitel 7 (modulare FTF) dargestellt wurden, gab es in den vorherigen FTF Entwicklungsepochen Fahrerlose Transportsysteme, die in der Regel sehr komplexe Systeme mit viel aufwendiger Technik, komplexer Sensorik und komplexen Leitsystemen beinhalteten. In Folge dieser damaligen Entwicklung waren solche Systeme in der Investition teuer und aufwendig. Diese Situation (siehe auch Kapitel 1.2) war Ausgangspunkt von Überlegungen drei Generationen von FTF zu schaffen, die sich von der Entwicklungs- und Konstruktionssystematik her gravierend dadurch unterscheiden, dass sie möglichst einfach und kostengünstig aufgebaut sind, um somit die Investitionskosten so niedrig wie möglich zu halten, aber trotzdem die spezifischen Aufgaben des jeweiligen Fahrzeugtyps zur Automatisierung zu erfüllen. Wie erfolgreich diese Neuentwicklungen zur Senkung der Kosten für FTF waren, lässt sich durch folgenden Vergleich darstellen.

FTF der alten Konstruktionen, z.B. in den 1990er Jahren, verursachten (siehe Kapitel 3) für den Palettentransport 100.000 bis 150.000€ Anschaffungskosten. Das Doppelkufensystem hatte in der Entwicklung einen Zielpreis von 30.000 Euro für zwei Kufen und somit ein Fahrzeug für den Palettentransport.

Das KaTe Fahrzeug zum Transport von KLT der Maße 600 x 400mm hatte einen Entwicklungszielpreis von nur 3.000 Euro. Somit zeigt sich das hohe Potential der Kostensenkung durch diese neu entwickelten FTS. Die Forderung der Senkung der Kosten galt nicht nur für das Fahrzeug selbst d. h. der maschinenbaulichen Entwicklung, sondern auch für alle anderen notwendigen Komponenten des FTF oder des Gesamtsystems. Dies umfasst die Bereiche:

- Spurführung
- Hindernissensorik
- Akku und Ladetechnik
- Fahrwerkskomponenten
- Neue Lösungsansätze von Antriebssystemen (z.B. Kombination Fahr-Lenk-und

Hubantrieb)

- Leitsteuerung / Systemsteuerung
- Konfiguration des Gesamtsystems (auch mit der Realisierung der Forderung, dass der Betreiber selbstständig über einfache Tools das Layout für die FTS Anlage erstellen und verändern kann, Stichwort Transportkontrolle)

Wie in Kapitel 5 im Detail beschrieben ist dies für Monofunktionale Fahrzeuge unter dem Gesichtspunkt von sehr einfachen, nur für eine bestimmte Aufgabe entwickelten, FTS durchgeführt worden.

Die gleichen Forderungen standen aber auch bei der im Kapitel 6 dargestellten Entwicklung der multifunktionalen Fahrzeuge im Zielkorridor. Diese Aufgabe war bei multifunktionalen Fahrzeugen noch schwieriger zu realisieren, weil sie nicht nur auf eine spezifische Automatisierungsaufgabe abgestimmt waren, sondern verschiedene, stark unterschiedliche Funktionen erfüllen mussten. Beispielhaft sei hier an die Entwicklung der Riegel-FTF für das Projekt Arena 2036 (siehe Kapitel 6) erinnert, welche sowohl die neu entwickelten Riegelgestelle aufnehmen und transportieren, als auch Warenkörbe bzw. Einzelkomponenten transportieren können. Noch anspruchsvoller war die Entwicklung des Mini RBG und der Regalgestelle, da sie sowohl zur automatischen Handhabung an die Monteure bei der PKW-Endmontage, als auch zur Bereitstellung fertiger Kommissionierbehälter geeignet sein mussten.

Die Forderung nach kostengünstigen, aber trotzdem modernen und zukunftsweisenden Elementen der Sensorik, Aktorik, Steuerungs- und Regelungstechnik, als auch der Antriebstechnik und Spurführung der Fahrzeuge, konnte nur dadurch erfüllt werden, dass außerordentlich umfangreiche grundlegende Untersuchungen an bestehenden Elementen, an modifizierten Elementen und nicht zuletzt auch extra durch neu entwickelte Elemente (z.B. die schwenkbare Spurführungskamera zur Orientierung an den Regalmodulen siehe Kapitel 7.1 oder die Sensorik zur Messung des Abstandes und des Versatzes an den beiden Kufen des Doppelkufensystems siehe Kapitel 5.4.1) durchgeführt wurden. Nur hierdurch war die Erfüllung der Pflichtenheftanforderungen möglich. Hier sei auf das Kapitel 5 hingewiesen, in dem beispielhaft verschiedene dieser Entwicklungen, Versuche und Optimierungsschritte dargestellt werden. So wird z.B. die Neuentwicklung eines neuen Spurführungssensors und eines Sensorsystems zur Ermittlung der Lage der Europaletten, sowie eines neuartigen Fahr- Lenk und Hubantriebes für das Doppelkufensystem

beschrieben. Erst durch diese Entwicklungen war die Umsetzung der neuartigen kostengünstigen FTF möglich.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass durch diese Grundlagenuntersuchungen heutzutage am Markt der Komponentenlieferanten für Sensorik, Aktorik, Antriebseinheiten, Steuerungs- und Regelungstechnik eine große Anzahl von Entwicklungen vorhanden sind, die es nun ermöglichen in einigen Bereichen auf kaufbare Elemente zurückzugreifen. Dies macht weitere Kostensenkungen und gewisse Standardisierungen möglich. An dieser Stelle sei deshalb noch einmal beispielhaft auf das Doppelkufensystem eingegangen (siehe Kapitel 5). Aufgrund der schwierigen Bauraumsituation bei diesem System musste eine eigene Mikroprozessorsteuerung sowohl hardware- als auch softwareseitig neu konzipiert und entwickelt werden.

Nach Verkauf der Patentrechte und der Prototypen der Doppelkufen an die Firma Eisenmann in Böblingen im Jahr 2013 wurde die selbstentwickelte Mikroprozessorsteuerung, im Rahmen der Entwicklungen zur Marktreife, durch eine auf dem Markt jetzt kaufbare SPS ersetzt, ohne dass dies zu funktionalen Fehlern oder Mängeln geführt hat. Dies war nur durch die Weiterentwicklung von Standardkomponenten möglich. So sind heute auf dem Markt personensichere Hindernissensoren verfügbar, welche so klein sind, dass sie in den beschränkten Bauraum des Doppelkufensystems integriert werden können. Zu Beginn der Entwicklung des Systems war hierfür noch keine Lösung vorhanden. Durch diese beschriebenen Entwicklungen ist es möglich die Kosten für FTF wie gefordert deutlich zu senken.

Während der verschiedenen Entwicklungsphasen der ersten FTF hat sich gezeigt, dass zur Einordnung aller verschiedenen FTF eine zusätzliche Kategorie, die Modularen FTF, geschaffen werden muss (Siehe Kapitel 7). Darunter verstehen sich im wesentlichen Baukastensysteme, die es ermöglichen, durch die Variation verschiedener Komponenten, eine leichte und somit kostengünstige Anpassung an verschiedene Aufgaben durchzuführen. Als Modulares FTF wurde das Fahrzeug „Scooty“ entwickelt, welches in Kapitel 7.2 detailliert dargestellt wird. Dabei wurde der Baukastengedanke nicht nur im mechanischen Aufbau und somit der Möglichkeit beliebige Fahrwerksgeometrien zu realisieren umgesetzt. Es wurde auch ein neuartiges Steuerungskonzept (Stichwort Omni-Kurven-Parameter, siehe Kapitel 7.2) entwickelt, welches leicht und mit sehr geringem Aufwand parametrierbar ist und somit an beliebige Fahrwerksgeometrien angepasst werden

kann. Dadurch ist eine kostengünstige Umsetzung eines Baukastensystems möglich, da bei Varianten keine großen Softwareanpassungen in der Fahrzeugsteuerung nötig sind. In einem nächsten Schritt können damit auch Verbundfahrten mehrerer Fahrzeuge zum gemeinsamen Lasttransport realisiert werden.

Durch die im Rahmen der Arbeit entstandene neuartige Einteilung der Systeme in:

- Monofunktionale FTF
- Multifunktionale FTF
- Modulare FTF

können die aktuellen Systeme, aber auch zukünftige Neuentwicklungen systematisch gegliedert werden, was die Definition in der VDI2510 [VDI05] ersetzen könnte.

Die beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass die Forschungsfragen, welche in Kapitel 1.3 definiert wurden, im Rahmen der Arbeit vollständig beantwortet werden konnten.

9 Ausblick

In der Zukunft ist zu erwarten, dass neue Sicherheitssensorik-Systeme verfügbar sind, die neben der klassischen Sensorik für Abstandsmessung von FTF und Hinderniserkennung im direkten Fahrweg, zusätzliche Funktionalitäten bieten. Ziel ist es mit diesen neuartigen Sensorsystemen das Umfeld des FTF zu analysieren und vorrausschauend zu ermitteln, ob sich Gefahrensituation entwickeln könnten. Somit könnte vorausschauend eine solche Sicherheitsgefährdung verhindert werden, in dem das FTF eine andere Route wählt oder z.B. seine Fahrgeschwindigkeit reduziert. Diese Sensorsysteme können dabei nicht nur in den FTF untergebracht werden, sondern sich wie im Kapitel 7 Modulare Fahrzeuge / Baukastenfahrzeuge beschrieben im Boden befinden oder an der Decke etc. angebracht werden. Auch der Einsatz von sogenannten Begleitfahrzeugen oder z.B. Drohnen, mit darin untergebrachter Sensorik, wäre denkbar. Durch damit gewonnene Daten könnten FTF Hindernisse und vorab identifizieren und diese vorausschauend verhindern. Gerade im gemischten Betrieb mit FTF und Personen könnten somit Schutzfeldverletzungen der Fahrzeuge und damit verbundene Stopps und Wartezeiten verhindert werden. Dies könnte die Leistungsfähigkeit von FTS in solchen gemischten Betrieben deutlich erhöhen.

Die von Dr. Korte am IFT entstandene Dissertation mit dem Thema *Konzept eines sicherheitsbezogenen Sensorsystems für die Erkennung von Personen im Umfeld Fahrerloser Transportfahrzeuge* [KOR21] zeigt neue Entwicklungstrends im Bereich der Sicherheitssensorik, die es erlauben bei Hindernissen zwischen Personen und Ware etc. sicher zu unterscheiden. Wenn diese sichere Unterscheidung gelingt ermöglicht dies, dass FTF an abgestellten Paletten etc. mit hoher Geschwindigkeit vorbeifahren, während sie bei der Begegnung mit Personen die Geschwindigkeit reduzieren können und somit die Sicherheit erhöht wird. Durch diese Funktionalität kann ebenfalls die Leistung von FTS im gemischten Betrieb deutlich erhöht werden.

Ein weiterer zu berücksichtigender Entwicklungstrend ist das Ersetzen oder Ergänzen der heutigen zentralen oder dezentralen Steuerungssysteme von FTS durch schwarmfähige FTS, die im Sinne von autonomen Fahrzeugen, selbstständige Entscheidungen treffen. Solche Ansätze, wie sie z.B. am Fraunhofer-Institut IML in Dortmund oder inzwischen auch bei verschiedenen FTF Herstellern unter dem Stichwort schwarmfähige autonome FTS entwickelt werden, könnten in der Zukunft von entscheidender Wichtigkeit werden.

10 Literaturverzeichnis

- [AMA22] Amazon, 2022. *Amazon Robotics nutzt Amazon SageMaker und AWS Inferentia, um ML-Inferenzierung in großem Maßstab zu ermöglichen.*
Seattle: Händler, Verfügbar: <https://aws.amazon.com/de/solutions/case-studies/amazon-robotics-case-study/> Zugriff 12.12.2022
- [CON22] Conductix-Wampfler GmbH, 2022. *Wireless Charger 3.0*
Weil am Rhein: Energieübertragung, Verfügbar: https://www.conductix.de/sites/default/files/downloads/PRB9200-0032-EN_Wireless_Charger_3-0_0.pdf Zugriff: 12.08.2022
- [COL11] Colomb, A.: *Entwurf und Implementierung einer Lenkungsregelung für Fahrerlose Transportfahrzeuge: Studienarbeit.* Universität Stuttgart IFT, 2011
- [COL12] Colomb, A.: *Algorithmen zur Parallellenkung zweier autonomer Fahrzeuge im Verbund: Diplomarbeit.* Universität Stuttgart IFT, 2012
- [COL16] Colling, D.; Ibrahimasic, S.; Trenkle, A.; Furhmans, K.: *Dezentrale Auftragserzeugung und -vergabe für FTF.* Dortmund: Logistics Journal, 2016
- [COL20] Colomb, A.; Brenner, C.: *Konzept zur intuitiven Steuerung omnidirektionaler Flurförderzeuge mit beliebiger Radkonfiguration.* Dortmund: Logistics Journal, 2020
- [COM21] Comau, 2021. *Agile1500*
Turin: Uploads, Verfügbar: https://www.comau.com/wp-content/uplo-ads/2021/07/Comau_AGILE1500_Brochure_EN.pdf
Zugriff: 28.11.2021
- [DEG98] Degtiarova-Kostova, E., Kostov, V.: *Irregularity of Optimal Trajectories in a Control Problem for a Car-like Robot.* RR-3411, INRIA, 1998
- [DIN13] DIN EN ISO 445:2013-08: *Paletten für die Handhabung von Gütern – Begriffe.* Berlin: Beuth Verlag, 2013
- [DIN89] DIN 30781-2:1989-05: *Transportkette; Systematik der Transportmittel und Transportwege.* Berlin: Beuth Verlag, 1989
- [DON21] Donkey Motion, 2021. *Fahrerlose Transportsysteme für die modern Intralogistik*
Umkirch: Call the donkey, Verfügbar: <https://www.donkey-motion.de/loesungen/call-the-donkey>
Zugriff: 29.09.2021
- [EBM22] ebm-papst St.Georgen GmbH, 2022. *Motors and drivesystems*

- St. Georgen: Antriebshersteller, Verfügbar: <https://www.ebm-papst.com/de/de/campaigns/product-campaigns/motors-and-drive-systems/argodrive.html#medical> Zugriff: 26.08.2022
- [EKR21-1] ek robotics, 2021. *VARIO MOVE*
Rosengarten: Fahrzeuge, Verfügbar: <https://ek-robotics.com/de/fahrzeuge/vario-move/>
Zugriff: 28.11.2021
- [EKR21-2] ek robotics, 2021. *Navigation*
Rosengarten: Technologie, Verfügbar: <https://ek-robotics.com/de/technologie/navigation/>
Zugriff: 28.11.2021
- [EKR21-3] ek robotics, 2021. *Sicherheit*
Rosengarten: Technologie, Verfügbar: <https://ek-robotics.com/de/technologie/sicherheit/>
Zugriff: 28.11.2021
- [FLE21] Flexqube, 2021. *All Industrial Carts*
Oberursel: Mobile Transportroboter, Verfügbar: <https://www.flexqube.com/all-carts/> Zugriff: 24.07.2021
- [GEF22] Gefeg-Neckar Antriebssysteme GmbH, 2022. *FTF / FTS / AGV Antriebssysteme*
Gosheim: Antriebssysteme, Verfügbar: https://www.gefeg-neckar.de/fileadmin/user_upload/user_upload/GE-FEG_Neckar_Flyer_FTS_Deutsch.pdf Zugriff: 28.06.2022
- [GÖT16] Götting KG, 2016. *Optische Spurführung nach Leitlinie*
Lehrte: Komponenten für FTF, Verfügbar: <https://www.goetting.de/loesungen> Zugriff 17.08.2016
- [GÖT18] Götting KG, 2018. *Sensorik für Fahrerlose Transportfahrzeuge: Sicherheit, Spurführung und Kommunikation*
Lehrte: Komponenten für FTF, Verfügbar: <https://www.goetting.de/news/2016-cemat-vorschau> Zugriff 15.03.2018
- [GRA08] Graf, B., Westkämper, E.: *Ein benutzer- und umgebungsangepasstes Steuerungssystem für die Zielführung roboterbasierter Gehhilfen*. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2008
- [GRO13] Grotz, P.: *Entwicklung von Positionierstrategien für das Doppelkufen-system: Studienarbeit*. Universität Stuttgart IFT, 2013
- [HEN08] Henrie, J., Wilde, D.: *Planning continuous curvature paths using constructive polylines*. In Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 4. Jahrgang, Nr. 12, 2007
- [HIP09] Hippenmeyer, H.; Furmans, K.; Stoll, T.; Schönung, F.: *KARIS – dezentral gesteuert*. Huss Verlag Berlin: Hebezeuge Fördermittel, 2009

- [HOF21] Hoffman, M.: *Vergleichende Analyse der Forschungen und Industrieentwicklung von monofunktionalen und multifunktionalen fahrerlosen Transportsystemen: Studienarbeit*. Universität Stuttgart IFT, 2021
- [HOF22] Hofmann, M.: *Konzept, Konstruktion und prototypische Umsetzung neuartiger intralogistischer Komponenten für die zukünftige flexible und wandlungsfähige Automobilmontage der Stückzahl eins: Dissertation*. Universität Stuttgart IFT, 2022
- [IFM22] Ifm electronic GmbH, 2022. *3D-Kamerasysteme*
Essen: Sensorik und Kamerasysteme, Verfügbar: <https://www.ifm.com/de/de/product/O3D303> Zugriff: 12.06.2022
- [IML10-1] Fraunhofer IML, *Zellulare Transportsysteme – Shuttle-Systeme für den flexiblen Einsatz*. Informationsbroschüre, Fraunhofer IML Dortmund, 2010
- [IML10-2] Fraunhofer IML, *Jahresbericht des Instituts für Materialfluss und Logistik 2010*. Fraunhofer IML Dortmund, 2010
- [INT18] Intralogistik Netzwerk BW, 2018. *KARIS – kleinskaliges autonomes redundantes Intralogistiksystem*. Stuttgart: Verband, Verfügbar: <https://www.intralogistik-bw.de/leistungsspektrum/fe-projekte/karis/> Zugriff: 17.03.2018
- [JOL09] Jolly, K.G., Sreerama Kumar, R., Vijayakumar, R.: *A Bezier curve based path planning in a multi-agent robot soccer system without violating the acceleration limits*. In *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 57, 2009
- [KAR18] KARIS Projektkonsortium, *KARIS PRO – Autonomer Materialtransport für flexible Intralogistik*. Abschlussbericht, Karlsruhe 2017
- [KIR12] Kirks, A.; Stenzel, C.; Kamagaew, A.; ten Hompel, M.: *Zellulare Transportfahrzeuge für flexible und wandelbare Intralogistiksysteme*. Dortmund: Logistics Journal, 2012
- [KOR21] Korte, D.: *Konzept eines sicherheitsbezogenen Sensorsystems für die Erkennung von Personen im Umfeld Fahrerlosen Transportsystemen: Dissertation*. Universität Stuttgart IFT, 2021
- [LAT91] Latombe, J.-C.: *Robot Motion Planning*. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [LAV06] LaValle, S. M.: *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006
- [LEJ22] leJOS News, 2022 *SLAM Navigation*
Onlineforum, Verfügbar: <https://lejosnews.wordpress.com/2017/07/15/slam/> Zugriff: 18.05.2022
- [LEP03] Lepetic, M., Klancar, G., Skrjanc, I., Matko, D., Potocnik, B.: *Time optimal path planning considering acceleration limits*. In *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, 2003

- [LEU13] Leuze GmbH 2013. *Maßzeichnung Lasertriangulationssensor ODSL 8*
Owen: Sensorik, Verfügbar: www.leuze-electronic.de/de/deutschland/produkte/messende_sensoren/abstandssensoren/optische_abstandssensoren Zugriff: 21.07.2013
- [LIA05] Liang, T.-C., Liu, J.-S., Hung, G.-T., Chang, Y.-Z.: *Practical and flexible path planning for car-like mobile robot using maximal-curvature cubic spiral*. In Robotics and Autonomous Systems, Volume 52, 2005
- [LÖF12] Löffler-Mang, M., *Optische Sensorik*. Stuttgart: Teubner Verlag, 2012
- [MEE92] Meek, D. S., Walton, D. J.: *Clothoid spline transition spirals*. In Mathematics of Computation, Jahrgang 59, 1992
- [MEM18] Memmelsheimer, R.: *Lagerhaus-Automatisierung am Beispiel Kiva Systems*. Universität Koblenz-Landau, 2015
- [MKT22] mk Technology Group, 2022. *FTS oder klassische Fördertechnik?* Troisdorf: Sondermaschinenbau, Verfügbar: https://www.mk-group.com/fileadmin/media/documents/whitepaper/mk-Whitepaper_FTS_de.pdf Zugriff 14.05.2022
- [PEP22] Pepperl+Fuchs GmbH, 2022. *Ultraschallsensorsystem* Mannheim: Sensorik, Verfügbar: https://www.pepperl-fuchs.com/germany/de/ultrasonic_safety_sensor.htm Zugriff: 8.06.2022
- [PES13] Pesch, F.: *Erprobung und Bewertung von Sensoren für die Hinderniserkennung und Abstandsmessung des Doppelkufensystems: Studienarbeit*. Universität Stuttgart IFT, 2013
- [PIA00] Piazzzi, A., Bianco, C. G. L.: *Quintic G2-splines for trajectory planning of autonomous vehicles*. In Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings of the IEEE, 2000
- [POP18] Popp, J.: *Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band: Dissertation*. Universität Stuttgart IFT, 2018
- [QUI93] Quinlan, S., Khatib, O.: *Elastic bands: Connecting path planning and control*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Proceedings, 1993
- [SIC22] SICK AG, 2022. *Sicherheitslaserscanner nanoScan3* Waldkirch: Sensorik, Verfügbar: <https://www.sick.com/de/de/sicherheitslaserscanner/sicherheitslaserscanner/nanoscan3/c/g507056> Zugriff: 21.05.2022
- [TAK89] Takahashi, A., Hongo, T., Ninomiya, Y., Sugimoto, G.: *Local Path Planning And Motion Control For AGV In Positioning*. In Intelligent Robots and Systems '89, The Autonomous Mobile Robots and Its Applications, Proceedings, 1989

- [TOY22] Toyota Material Handling Deutschland GmbH, 2022. *A new era of forklifts*
Isernhagen: Gabelstapler und Logistiksysteme, Verfügbar: <https://www.westmat.com/toyotas-automated-forklifts/>
Zugriff: 09.05.2022
- [ULL14] Ullrich, G., *Fahrerlose Transportsysteme*. Heidelberg: Springer Vieweg, 2014
- [VAL20] Vahle GmbH & Co. KG, 2020. *Ladekontakte*
Kamen: Energieübertragung, Verfügbar: <https://www.vahle.de/produkte/ladekontakte> Zugriff: 15.03.2020
- [VDA18] Verband der Automobilindustrie e.V.: *VDA 4500, Teil 1 Kleinladungsträger [KLT]-System Technische Empfehlung*. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2018
- [VDA22] Verband der Automobilindustrie e.V.: *VDA 5050 Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung*. Berlin: Verband der Automobilindustrie, 2022
- [VDI05] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2510 Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [WAL05] Walton, D. J., Meek, D. S.: *A controlled clothoid spline*. In *Computers & Graphics*, Volume 29, 2005
- [WEB09] Weber, M.; Vorwerk, C.: *Neuartiges Antriebskonzept zum Fahren, Lenken und Heben: Tagungsband 6. Fachkolloquium der WGTL e.V. 2010*. Hannover: Leibniz Universität, 2010
- [WEH20] Wehking, K.-H., *Technisches Handbuch Logistik 1: Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik*. Heidelberg: Springer Vieweg, 2020