
Masterthesis

Entwicklung und Verifikation eines autonomen Logistik-Fahrzeugs



Von

Dennis Hotze
Matrikelnr. 012203256

Dominik Eickmann
Matrikelnr. 012205639

Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
Hochschule Bochum

Februar 2018

Erstgutachter: Dr. Arno Bergmann

Zweitgutachter: Dr. Johannes Krettek, Sebastian Triesch

Eidesstattliche Erklärung

Eidesstattliche Erklärung zur Abschlussarbeit:

«Entwicklung und Verifikation eines autonomen Logistik-Fahrzeugs»

Wir versichern, die von uns vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, haben wir als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die wir für die Arbeit benutzt haben, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Unterschrift:

Ort, Datum:

Unterschrift:

Ort, Datum:

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir all jenen danken, die uns im Rahmen dieser Masterarbeit begleitet haben.

Ganz besonders möchten wir Herrn Prof. Dr. Arno Bergmann danken, der unsere Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat.

Besonders möchten wir uns beim *Fachbereich Elektrotechnik und Informatik* der *Hochschule Bochum* (besonders Dipl.-Ing. Jörg Steiner und Dipl.-Ing. Thorsten Bartsch) und der *Smart Mechatronics GmbH* (besonders Sebastian Triesch und Dr. Johannes Krettek) bedanken, ohne deren Hilfe dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Stefan Binder, der uns gerade im Bereich der mechanischen Konstruktion immer wieder gute Hinweise gegeben hat.

Ebenfalls möchten wir uns bei Dipl.-Ing. Thomas Albrecht vom *Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik Dortmund* bedanken, der uns auf Probleme und Lösungsansätze zum Thema Autonomes Fahren in der Logistik-Branche hingewiesen hat.

Für die finanzielle Unterstützung möchten wir uns bei unseren Sponsoren *Smart Mechatronics GmbH, EBM Papst, Texas Instruments Incorporated, item Industrietechnik GmbH, SICK AG, heddier electronic GmbH, Infineon Technologies AG, Mädler GmbH, FRABA B.V., Picotronic GmbH, Nexus Robotics, Ludwig Industriebedarf GmbH, Rippert Anlagentechnik GmbH & Co. KG, Nosta GmbH* und *Schlegel Holding GmbH* bedanken.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ADC	- Analog-to-Digital Converter
ALF	- Autonomes Logistik-Fahrzeug
ATX	- Advanced Technology Extended
BLDC	- Brushless DC
CAD	- Computer-Aided Design
CAN	- Controller Area Network
CONSENS	- CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems
CPU	- Central Processing Unit
DIP	- Dual In-line Package
EDS	- Electronic Data Sheet
EPOS	- EntwicklungsPlattform Ortsfrequenzfilter-Sensor
FMEA	- Failure Mode and Effects Analysis
GPIO	- General Purpose Input/Output
HT	- Hyper-Threading
I ² C	- Inter-Integrated Circuit
iGPU	- integrated Graphics Processing Unit
IO	- Input-Output
KFZ	- KraftFahrZeug
LAN	- Local Area Network
LED	- Light-Emitting Diode

LIDAR	- L ight D etection A nd R anging
LKW	- L ast K raft W agen
MCM	- M otor C ontroller- M odul
NMT	- N etwork M anagemen T
PC	- P ersonal C omputer
PCIe	- P eripheral C omponent I nterconnect e xpress
PF _{Davg}	- P robability of F ailure on D emand (a verage)
PFH	- P robability of F ailure per H our
PTP	- P eer- T o- P eer
PWM	- P ulse- W idth M odulation
RAM	- R andom- A ccess M emory
ROS	- R obot O perating S ystem
RPi	- R aspberry P i
RPZ	- R isiko P rioritäts Z ahl
SEP	- S ensor- E rweiterungs- P latine
SIL	- S icherheits- I ntegritäts L evel
SLAM	- S imultaneous L ocalization A nd M apping
SPI	- S erial P eripheral I nterface
SPS	- S peicher P rogrammierbare S teuerung
TCP	- T ransmission C ontrol P rotocol
UART	- U niversal A synchronous R eceiver T ransmitter
UDP	- U ser D atagram P rotocol
USB	- U niversal S erial B us
WLAN	- W ireless L ocal A rea N etwork
WSL	- W indows- S ubsystem for L inux

TABELLENVERZEICHNIS

2.1	Bedeutung FMEA ¹	7
2.2	Auftretenswahrscheinlichkeit FMEA	8
2.3	Entdeckungswahrscheinlichkeit FMEA	9
2.4	Nenndaten des BLDC ² -Motors	27
2.5	Funktionsverteilung auf Steuerungsgeräte	34
2.6	Komponenten der Hauptsteuerung	36
2.7	SIL ³ Grenzwerte - Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls	42
2.8	SIL Grenzwerte - Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls	43
2.9	Flexi Soft Module	43
2.10	Flexi Soft Ein/Ausgänge	44
2.11	CAN ⁴ -Tabelle 1/2 der Flexi Soft	48
2.12	CAN-Tabelle 2/2 der Flexi Soft	49
2.13	CAN-Tabelle des MCMs ⁵ vorne	50
2.14	CAN-Tabelle des MCMs hinten	50
2.15	CAN-Tabelle der SEP ⁶ 1 vorne links	51
2.16	CAN-Tabelle der SEP2 vorne rechts	51
2.17	CAN-Tabelle der SEP3 hinten rechts	52
2.18	CAN-Tabelle der SEP4 hinten links	52
2.19	Funktionsverteilung Sensorik	53
2.20	Kenndaten des RPLIDAR A2	55
2.21	Microsoft Kinect v2 - Optische Sensoren	56
2.22	Kenndaten des Reflexions-Lichttaster	61
2.23	Kenndaten des Infrarot-Abstandssensors	66
2.24	Kenndaten des Linienlasers	73
2.25	Nennleistungsaufnahmen der Einzelkomponenten	79
2.26	Spannungsebenen	82

¹Failure Mode and Effects Analysis

²Brushless DC

³Sicherheits-IntegritätsLevel

⁴Controller Area Network

⁵MotorController-Moduls

⁶Sensor-Erweiterungs-Platine

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Autonomes Logistik-Fahrzeug - Frontansicht	2
2.1	V-Modell	4
2.2	CONSENS ⁷ Verlauf	5
2.3	Legende des Umfeldmodells	5
2.4	Umfeldmodell	6
2.5	Seite 1/2 der FMEA	12
2.6	Seite 2/2 der FMEA	13
2.7	Anwendungsszenarien des ALFs ⁸	14
2.8	Anwendungsszenario, verschieben des ALFs	15
2.9	Legende der Wirkstrukturen	17
2.10	Haupt-Wirkstruktur	18
2.11	ALF-Chassis	19
2.12	Item Standard-Profil und Economic-Profil	19
2.13	Wartungs-Tür bzw. Klappe	20
2.14	Wirkstruktur einer Antriebseinheit	21
2.15	Antriebseinheit	22
2.16	Antriebseinheit - Explosionszeichnung	23
2.17	Radträger	24
2.18	Mecanum-Rad	25
2.19	Verfahrenmöglichkeiten des Mecanum-Antriebs	26
2.20	Schematische Darstellung der Motoreinheit	27
2.21	Aufbau des Zahnriemengetriebes	28
2.22	Kegelrollenlager	30
2.23	Kegelrollenlager in O-Anordnung	30
2.24	Bremswiderstand	31
2.25	Feststellbremse	32
2.26	Wirkstruktur der Steuerung	34
2.27	Raspberry Pi 3 Model B	37

⁷CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

⁸Autonomes Logistik-Fahrzeugs

2.28 MCM	40
2.29 Erforderlicher Performance Level (PLr) gemäß ISO 13849-1	41
2.30 Erforderlicher SIL gemäß IEC 62061	42
2.31 Sicherheitssteuerung	44
2.32 Sensor-Erweiterungs-Platine	45
2.33 Wirkstruktur der Sensorik	54
2.34 2D-LIDAR	55
2.35 Kamera	56
2.36 Kamerasishtfeld	57
2.37 Konzept einer Reflexions-Lichtschanke	59
2.38 Treppenerkennung - Anordnung der Sensoren	59
2.39 Konzept eines Reflexions-Lichtstasters	60
2.40 Reflexions-Lichttaster	60
2.41 Sicherheitsbereiche der Treppenerkennung	61
2.42 Ultraschallsensor	62
2.43 Messbereiche der Ultraschallsensoren	63
2.44 Komponenten einer Schaltleiste	64
2.45 Platzierung der Schaltleisten	64
2.46 Anschlussplatine des Infrarotsensors	65
2.47 Kennlinie des Infrarotsensors	66
2.48 Anschlussplatine des Helligkeitssensors	67
2.49 Ladefläche des Fahrzeugs	67
2.50 Beschleunigungssensor	68
2.51 Wirkstruktur der Mensch-Maschine-Interaktion	69
2.52 Oberseite des Turms	70
2.53 Touch-Monitor	71
2.54 Lautsprecher	74
2.55 Audioverstärker	74
2.56 LED ⁹ -Streifen	75
2.57 Datenübertragung des LED-Streifens	75
2.58 LED-Streifen in Profilnut	76
2.59 Wirkstruktur der Energieversorgung	78
2.60 Energiespeicher	80
2.61 230V Netzteil	81
2.62 ATX ¹⁰ -Netzteil der Hauptsteuerung	83

⁹Light-Emitting Diode

¹⁰Advanced Technology Extended

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	iv
1 Einleitung	1
2 Systementwurf	3
2.1 Umfeldmodellierung	5
2.2 Risikoanalyse	7
2.3 Anwendungsszenarien	14
2.4 Anforderungserhebung	15
2.5 Systemarchitektur	17
2.5.1 Chassis	18
2.5.2 Antrieb	21
2.5.2.1 Radträger	24
2.5.2.2 Mecanum-Räder	25
2.5.2.3 Motoreinheit	27
2.5.2.4 Zahnriemengetriebe	28
2.5.2.5 Mechanische Lagerung	29
2.5.2.6 Widerstandsbremse	31
2.5.2.7 Mechanische Feststellbremse	32
2.5.3 Steuerung	33
2.5.3.1 Hauptsteuerung	35
2.5.3.2 Schnittstellenerweiterung	37
2.5.3.3 ROS	38
2.5.3.4 Motorcontroller	40
2.5.3.5 Sicherheitssteuerung	41
2.5.3.6 Sensor-Erweiterungs-Platine	45
2.5.3.7 CAN Kommunikation	47

2.5.4	Sensorik	53
2.5.4.1	2D-LIDAR	54
2.5.4.2	Kameras	56
2.5.4.3	Reflexions-Lichttaster	58
2.5.4.4	Ultraschall-Abstandssensoren	62
2.5.4.5	Schaltleisten	63
2.5.4.6	Infrarot-Abstandssensoren	65
2.5.4.7	Helligkeitssensoren	67
2.5.4.8	Beschleunigungssensor	68
2.5.5	Mensch-Maschine-Interaktion	69
2.5.5.1	Touch-Monitor	71
2.5.5.2	Fernsteuerung	71
2.5.5.3	Nothalt-Schalter	72
2.5.5.4	Warnlaser	73
2.5.5.5	Lautsprecher	74
2.5.5.6	Beleuchtung	75
2.5.5.7	Sonstige Bedienelemente	77
2.5.6	Energieversorgung	78
3	Verifikation	84
4	Ausblick und Fazit	86
	Literaturverzeichnis	88
	Anhang	103

EINLEITUNG

Aktuell befinden wir uns mitten in der 4. industriellen Revolution, welche als *Industrie 4.0* bezeichnet wird. Nach Einzug von Dampfmaschinen, Fließbändern und der Digitalisierung von Fabriken, folgt nun die intelligente Vernetzung der Teilsysteme der Fertigungsprozesse. Im Zuge dessen entstehen intelligente, flexible, vollautomatisierte Fertigungssysteme. [10, 14]

Durch die erhöhte Flexibilität stellt *Industrie 4.0* besondere Anforderungen an den Materialfluss und die Logistik eines Fertigungsprozesses [38, 135]. Unternehmen wie die *Daimler AG*, die *Deutsche Post AG* oder *Amazon* forschen an autonom fahrenden LKW¹ [16] und Drohnen [18, 36]. Die Firmen *Jungheinrich AG* und *STILL GmbH* bietet Lösungen an, welche die Automatisierung kompletter Lageranlagen ermöglichen. [51, 118]

Um erste Erfahrungen auf dem Gebiet des autonomen Fahrens zu sammeln, wird im Rahmen dieser Abschlussarbeit ein autonomes Logistik-Fahrzeug konzeptioniert, konstruiert, in Betrieb genommen und verifiziert.

Das Fahrzeug soll einen tatsächlich nutzbaren Mehrwert für die *Hochschule Bochum* liefern. Als Beispiele wären hier der Transport zwischen Poststelle und dem jeweiligen Empfänger einer Sendung oder der Transport von Arbeitsmaterialien zur mechanischen Werkstatt der Hochschule denkbar. Diese Aufgaben sollen ohne Änderungen an der Umgebung ermöglicht werden. Ein Anbringen von Führungslinien oder sonstigen Orientierungspunkten ist nicht erwünscht.

¹LastKraftWagen

Diese Abschlussarbeit wird die Grundlage für weitere Arbeiten auf dem Gebiet des autonomen Fahrens darstellen. In anschließenden Projekt- oder Abschlussarbeiten können diverse Algorithmen zur Kartografierung, Wegfindung und Kollisionsvermeidung entwickelt und getestet werden.

Diese Ausarbeitung befasst sich zunächst mit dem Systementwurf des Fahrzeugs. Hierbei werden Interaktionen des Fahrzeugs mit der Umgebung und dem Anwender analysiert und Anforderungen an das Systems abgeleitet. Einen besonderen Stellenwert stellt hierbei die funktionale Sicherheit dar. Gefahren werden durch eine Risikoanalyse in Form einer FMEA aufgedeckt und durch entsprechende Maßnahmen minimiert. Anschließend wird das Fahrzeug in Teilsysteme zerlegt und konzipiert.

Die Konstruktion der gesamten Mechanik des Antriebs und des Chassis erfolgt in einer 3D-CAD²-Software. Das so erstellte 3D-Modell (Abbildung 1.1 und ??) des Fahrzeugs erleichtert die gesamte Konzeptionierungsphase.

Nach der Montage und Inbetriebnahme folgt die abschließende Verifikation des Fahrzeugs.



Abbildung 1.1: Autonomes Logistik-Fahrzeug - Frontansicht

²Computer-Aided Design

SYSTEMENTWURF

Der Systementwurf wird während dieses Projekts mit Hilfe der CONSENS¹-Methode erstellt. Die CONSENS-Methode basiert auf dem V-Modell. Sie ist zum systematischen Entwickeln von Systemarchitekturen mechatronischer Systeme entwickelt worden und wird von der *Smart Mechatronics GmbH* am Institut für Systemtechnik geschult.

In Abbildung 2.1 ist dargestellt, dass sich der Hauptteil der CONSENS-Methode im oberen linken Teil des V-Modells befindet, also vor der eigentlichen Montage und Implementierung. Konkret liegt der Fokus der CONSENS-Methode auf der Anforderungsermittlung und dem Systementwurf.

¹CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

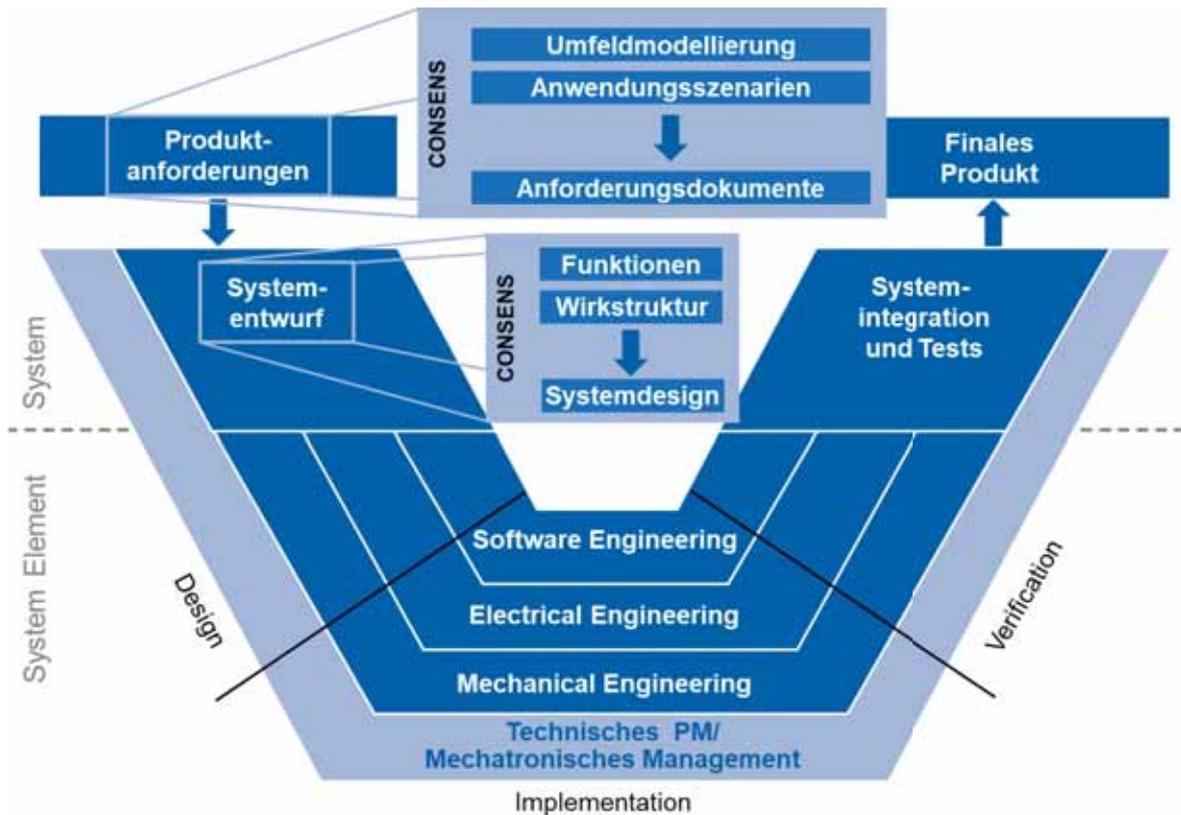


Abbildung 2.1: V-Modell [115]

Abbildung 2.2 zeigt die Partialmodelle der CONSENS-Methode. Da während dieses Projekts die Komponentenauswahl, die Planung des Sicherheitskonzepts, die Montage und dessen Verifikation durchgeführt wird und nicht die Software-Implementierung für den autonomen Fahrmodus, werden nur die farbigen Zwischenstufen behandelt. Zuerst wird während der Umfeldmodellierung (Abschnitt 2.1) das Umfeld und dessen Auswirkungen auf das System als Black Box begutachtet. In Form von Anwendungsszenarien (Abschnitt 2.3) wird daraufhin das Verhalten des Fahrzeugs in bestimmten Szenarien bestimmt, woraus in Verbindung mit der Umfeldmodellierung Systemanforderungen festgelegt werden. Die optische und praktische Gestaltung des Systems wird kontinuierlich verfeinert und die Verwirklichung des Systems wird in mehreren Wirkstrukturen dargestellt, welche die Systemarchitektur beinhalten (Abschnitt 2.5). [115]

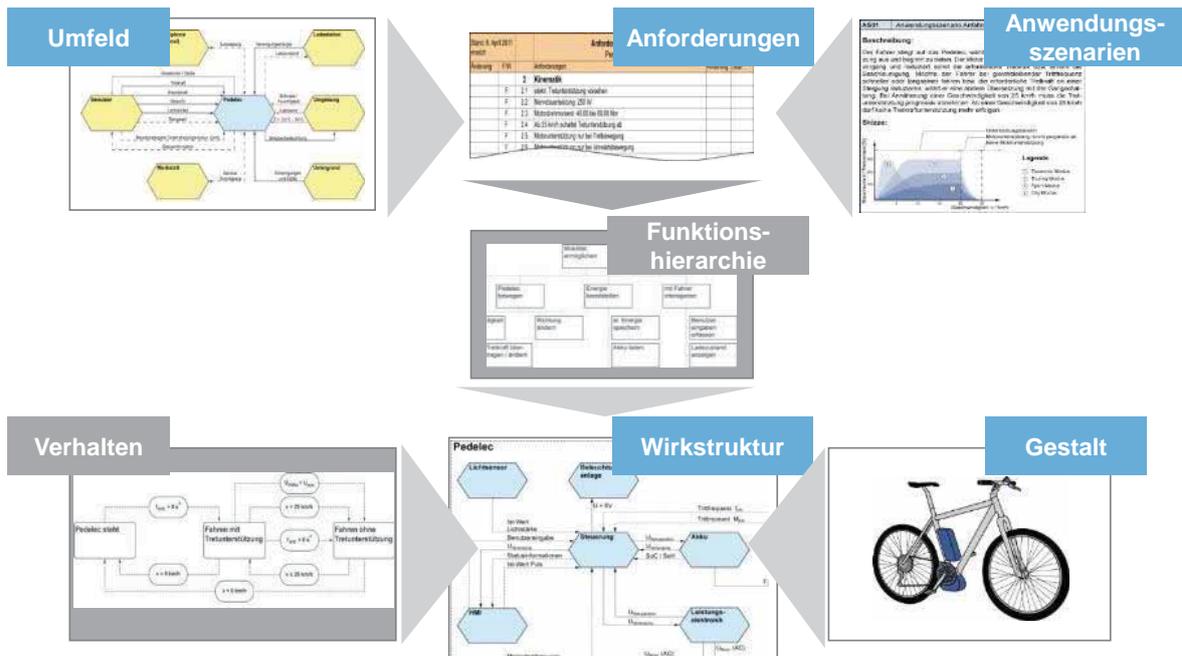


Abbildung 2.2: CONSENS Verlauf [115]

2.1 Umfeldmodellierung

Um die gewollte und ungewollte Interaktion des Systems mit dem Umfeld zu beschreiben, wird ein Umfeldmodell erstellt. Das ALF² ist das zentrale System. Elemente mit denen das System interagiert bezeichnet man als Umfeldelemente. Die Art der Interaktion wird in Form von Pfeilen zwischen den Elementen dargestellt (Abbildung 2.3). Das Umfeldmodell, wie auch die nachfolgenden Wirkstrukturen, wurde mit der Software *Enterprise Architect* der Firma *Sparx Systems Pty Ltd* erstellt. [115]

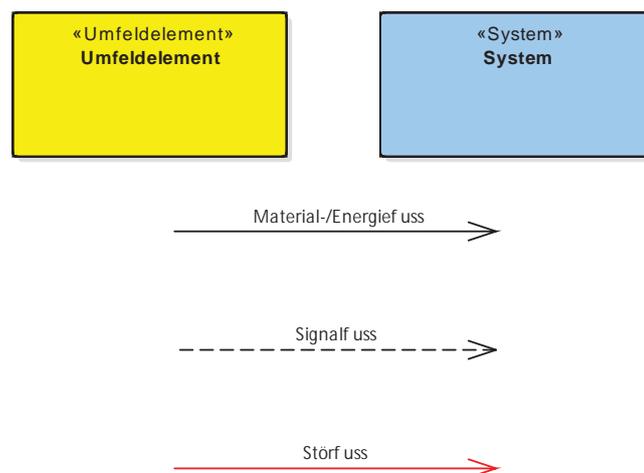


Abbildung 2.3: Legende des Umfeldmodells

²Autonomes Logistik-Fahrzeug

Das ALF interagiert mit vier Umfildelementen. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Interaktionen ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

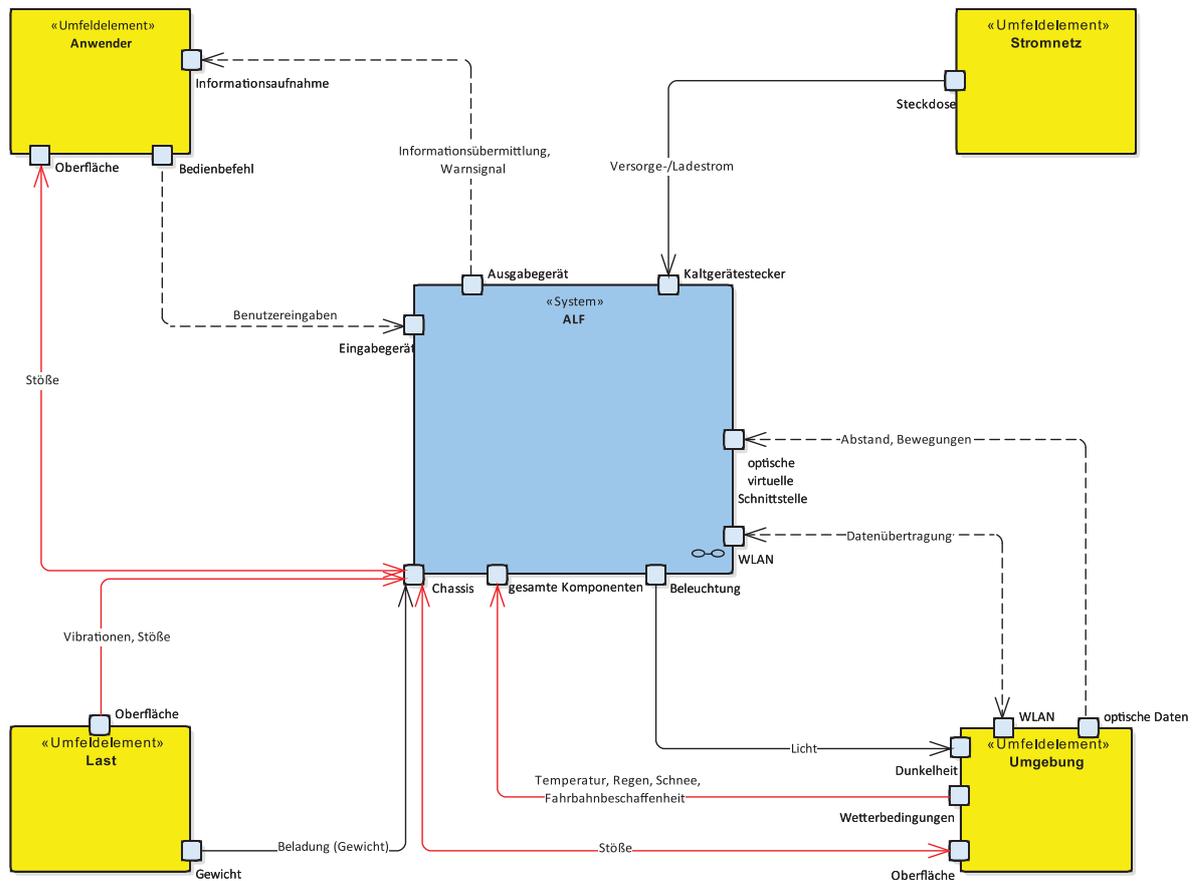


Abbildung 2.4: Umfeldmodell

Durch die Verwendung des Umfeldmodells haben sich zum Beispiel die Anforderungen ANF_3, ANF_13, ANF_23 und ANF_25 ergeben (Abschnitt 2.4).

2.2 Risikoanalyse

Während der Entwicklung und des Betriebs des ALFs sind viele Situationen denkbar, welche ein Risiko für die Umfeldelemente darstellen. Um diese Risiken aufzuzeigen und ggf. minimieren zu können, wird eine Risikoanalyse auf Basis einer FMEA³ durchgeführt. Die Bedeutung (Tabelle 2.1), Auftretens- (Tabelle 2.2) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (Tabelle 2.3) kritischer Situationen werden jeweils bewertet und das resultierende Risiko in Form eines Zahlenwertes bestimmt. Anhand dieses Wertes kann nun entschieden werden, ob eine Maßnahme zur Risikoreduktion notwendig bzw. sinnvoll ist.

Bedeutung	Beschreibung
sehr hoch 10-9	Äußerst schwerwiegender Fehler, der die Sicherheit beeinträchtigt und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften verletzt. Existenzbedrohendes Firmenrisiko.
hoch 8-7	Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs stark eingeschränkt bzw. Ausfall von Funktionen, die zum Fahrbetrieb notwendig sind. Sofortiger Werkstattaufenthalt zwingend erforderlich.
mäßig 6-5-4	Funktionsfähigkeit des Fahrzeugs ist eingeschränkt, sofortiger Werkstattaufenthalt nicht erforderlich. Ausfall wichtiger Bedien- und Komfortsysteme.
gering 3-2	Geringe Funktionsbeeinträchtigung des Fahrzeugs. Funktionseinschränkung wichtiger Bedien- und Komfortsysteme.
sehr gering 1	Sehr geringe Funktionsbeeinträchtigung. Nur vom Fachpersonal erkennbar.

Tabelle 2.1: Bedeutung FMEA [137]

³Failure **M**ode and **E**ffects **A**nalysis

Auftreten	Beschreibung
sehr hoch 10-9	Entwicklung von Systemen/Komponenten ohne Erfahrung bzw. unter ungeklärten Einsatzbedingungen. Bekanntes System mit Problemen.
hoch 8-7	Entwicklung von Systemen/Komponenten unter Einsatz neuer Technologien bzw. Einsatz bisher problematischer Technologien. Bekanntes System mit Problemen.
mäßig 6-5-4	Entwicklung von Systemen/Komponenten mit Erfahrung bzw. Detailänderungen früherer Entwicklungen unter vergleichbaren Einsatzbedingungen. Bewährtes System/Komponenten mit langjähriger, schadensfreier Serienerfahrung unter geänderten Einsatzbedingungen.
gering 3-2	Entwicklung von Systemen/Komponenten mit positiv abgeschlossenen Nachweisverfahren. Detailänderungen an bewährten Systemen/Komponenten mit langjähriger, schadensfreier Serienerfahrung unter vergleichbaren Einsatzbedingungen.
sehr gering 1	Entwicklung bzw. bewährte Systeme/Komponenten mit Erfahrung unter vergleichbaren (Unterscheidung zu 2-3 erforderlich!) Einsatzbedingungen mit positiv abgeschlossenem Nachweisverfahren. Bewährte Systeme/Komponenten mit langjähriger, schadensfreier Serienerfahrung unter geänderten Einsatzbedingungen.

Tabelle 2.2: Auftretenswahrscheinlichkeit FMEA [137]

Entdeckung	Beschreibung
sehr gering 10-9	Sehr geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion, da kein Nachweisverfahren bekannt bzw. kein Nachweisverfahren festgelegt ist.
gering 8-7	Geringe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion, da das Nachweisverfahren unsicher ist bzw. keine Erfahrung mit dem festgelegten Nachweisverfahren vorhanden ist.
mäßig 6-5-4	Mäßige Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion. Bewährtes Nachweisverfahren aus vergleichbaren Produkten unter neuen Einsatz-/Randbedingungen.
hoch 3-2	Hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion durch bewährtes Nachweisverfahren. Die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahme wurde für dieses Produkt nachgewiesen.
sehr hoch 1	Sehr hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion durch bewährtes Nachweisverfahren an einer Vorgängergeneration. Die Wirksamkeit der Entdeckungsmaßnahme wurde für dieses Produkt nachgewiesen.

Tabelle 2.3: Entdeckungswahrscheinlichkeit FMEA [137]

Zunächst werden die Situationen ohne Maßnahme bewertet und aus den drei Werten für Bedeutung, Auftreten und Entdeckung durch Multiplikation die RPZ⁴ berechnet. Je höher diese RPZ ist, desto höher ist das Risiko für Menschen. Daraufhin werden verschiedene Maßnahmen zur Risikoreduktion bewertet und mit der vorherigen RPZ verglichen. Nach diesem Vergleich wird eine Maßnahme ausgewählt.

Maßnahmen zur Verringerung der RPZ können Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen sein. Vermeidungsmaßnahmen verringern die Auftretens- und Entdeckungsmaßnahmen erhöhen die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Ursache. Eine Verringerung der RPZ kann durch einzelne bzw. eine Kombination aus Maßnahmen erzielt werden. Die Punktevergabe bei Bedeutung, Auftreten und Entdecken ist nicht objektiv zu bestimmen und ist sehr von der Erfahrung des Anwenders der FMEA abhängig. Deshalb gibt es keinen exakten Wert, ab dem eine Maßnahme nicht als ausreichend sicher gilt. Während dieses Projektes wird sich entweder für eine Maßnahme mit einer maximalen RPZ von 200 entschieden oder für eine Kombination aus mehreren Maßnahmen. Abbildung 2.5 und 2.6 zeigen die FMEA. [137]

Exemplarisch werden im Folgenden zwei Beispiele betrachtet.

Um Komponenten austauschen zu können und um für eine einfachere Wartung zu sorgen, sind einige Komponenten durch Steckverbindungen an die Spannungsversorgung oder zur Kommunikation angebunden. Dazu zählen beispielsweise der Energiespeicher (Abschnitt 2.5.6) und die MCMs⁵ (Abschnitt 2.5.3.4). Beim Anschließen dieser Komponenten können Fehler auftreten, wodurch die sicherheitsrelevante Kommunikation ausfällt oder zur Verpolung der Spannungsversorgung führt. Dies kann im schlimmsten Fall zu einem Brand und dadurch zur Lebensgefahr führen. Ohne eine Maßnahme werden Bedeutung, Auftreten und Entdeckung als „sehr hoch“ bewertet. Als mögliche Maßnahmen werden ein verpolungssicherer Steckeraufbau und eine Brückenschaltung aufgeführt. Die Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit einer Verpolung der Spannungsversorgung ist mit beiden Maßnahmen damit „sehr gering“, da sie nicht mehr möglich ist. Doch ein Vertauschen von Kommunikationsleitungen ist durch eine Brückenschaltung nicht zu verhindern, daher wird als Maßnahme der verpolungssichere Steckeraufbau ausgewählt.

Im zweiten Beispiel geht es um die Situation, wenn das Fahrzeug eine Treppe herunterfährt. Dies kann passieren, wenn das Fahrzeug diese Treppe nicht rechtzeitig oder gar nicht erkennt. Die Bedeutung dieser Situation ist mit „sehr hoch“ zu bewerten, da dadurch Menschen schwer verletzt oder getötet werden können. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit ist „sehr gering“, da der Fehler ohne Maßnahme nicht vom Fahrzeug

⁴RisikoPrioritätsZahl

⁵MotorController-Moduls

erkannt werden kann. Die Auftretenswahrscheinlichkeit ist von der Ursache abhängig. Verschiedene Fehlerursachen sind denkbar. Es kann ein Sensor ausgefallen bzw. beeinträchtigt sein, oder ein Defekt an der Steuerung vorliegen. Des Weiteren können Fehler in der Software zur fehlerhaften Auswertung eines Sensors, und so zum Nichterkennen einer Treppe, führen. Für jede Fehlerursache werden eine oder mehrere Maßnahmen in Betracht gezogen. Letztendlich wird eine Kombination aus einer redundanten Ausführung der Sensoren, der Verwendung einer speziellen Sicherheits-SPS, dem Einsatz von Bremsen, welche im spannungsfreien Zustand aktiv sind und einer drahtbruchsicheren Auswertung der Sensorsignale festgelegt.

FMEA		Hochschule Bochum Bochum University of Applied Sciences		BO		Smart Mechatronics								
		- Zu vernachlässigen gegenüber höher priorisierten Fehlerfolgen oder wird durch die selben Maßnahmen behandelt						~ Maßnahme kann noch durchgeführt werden						
ID	Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				Verbesserter Zustand				Umgesetzt?		
				Derzeitige Maßnahme	Bedeutung	Auftreten	Entdeckung	RPZ Risikoprioritäts- zahl	Mögliche Maßnahmen	Bedeutung	Auftreten		Entdeckung	RPZ Risikoprioritäts- zahl
1 Akku														
1.1	Verpolung	Brand	Menschliches Versagen	Keine	10	9	10	900	Steckeraufbau	10	1	10	100	Ja
		Zerstörung des Akkus	-	-	-	-	-	-	Brückenschaltung	10	1	10	100	Nein
		Zerstörung des Ladegeräts	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.2	Überladung des Akkus	Brand	Menschliches Versagen	Keine	10	9	10	900	Feuermelder	10	9	1	90	~
									Geeignetes Ladumfeld	2	9	10	180	~
									Akku einhausen	10	9	2	180	Nein
									Überspannungsschutz im ALF	10	9	1	90	Ja
		Falsch eingestelltes Ladegerät	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zerstörung des Akkus	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
1.3	Überhitzung	Brand	Überstrom	Keine	10	7	10	700	Akku einhausen	10	4	10	400	Nein
									Strommessung/Sicherung	10	7	1	70	Ja
									Akku einhausen	10	4	10	400	Nein
		Geringe Kühlung	Keine	10	7	10	700	aktive Kühlung	10	2	10	200	Nein	
								passive Kühlung	10	4	8	320	Ja	
								Autobatterien verwenden	10	2	10	200	Ja	
Temperaturmessung	10	6	2	120	~									
2 Fahren														
2.1	Anfahren eines Menschen	Personenschäden	Ausfall eines Sensors	Keine	9	6	10	540	techn. Redundanz / Auswertung	9	6	1	54	Ja
			Plötzliches Auftreten	Keine	9	8	10	720	Warnsignal (Ton/Licht)	9	3	10	270	Ja
			Programmierfehler	Keine	9	7	10	630	Aufwendige Verifikation	9	3	2	54	Ja
			Beeinträchtigung eines Sensors	Keine	9	8	10	720	techn. Redundanz / Auswertung	9	8	1	72	Ja
2.2	Anfahren eines Objekts	Sachschäden	Ausfall eines Sensors	Keine	7	6	10	420	techn. Redundanz / Auswertung	7	6	1	42	Ja
			Programmierfehler	Keine	7	7	10	490	Aufwendige Verifikation	7	7	2	98	Ja
			Beeinträchtigung eines Sensors	Keine	7	8	10	560	techn. Redundanz / Auswertung	7	5	1	35	Ja
2.3	Herunterfahren einer Treppe	Personenschäden	Ausfall eines Sensors	Keine	10	6	10	600	techn. Redundanz / Auswertung	10	6	1	60	Ja
			drahtbruchsichere Auswertung	10	1	10	100	Ja						
			Sicherheits-SPS verwenden	10	6	1	60	Ja						
			Aufwendige Verifikation	10	5	2	100	Ja						
		Ausfall der Steuerung	Keine	10	4	10	400	Sicherheits-SPS verwenden	10	1	10	100	Ja	
Beeinträchtigung eines Sensors	Keine	10	8	10	800	Low-aktiv Bremsen	10	1	10	100	Ja			
Sachschäden	-	-	-	-	-	-	techn. Redundanz / Auswertung	10	5	1	50	Ja		
2.4	Umkippen	Personenschäden	Hoher Schwerpunkt	Keine	9	5	10	450	Unterweisung des Anwenders	9	5	3	135	Ja
			Höhenerkennung	Keine	9	5	4	180	Ja					
			Rückfrage an Anwender	9	5	3	135	Ja						
		Hohe Steigung	Keine	9	3	10	270	Neigungssensoren	9	3	2	54	Ja	
Sachschäden	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2.5	Wegrollen/Verrutschen am Hang	Personenschäden	Hohe Steigung	Keine	9	3	10	270	Neigungssensoren	9	3	2	54	Ja
			Versagen der Feststellbremse	Keine	9	3	10	270	techn. Redundanz / Auswertung	9	3	1	27	Ja
			Low-activ Bremsen	9	2	10	180	Ja						
			Bodenbeschaffenheit	Keine	9	4	10	360	Kein Betrieb bei Nässe	9	2	10	180	Ja
		Messfehler (Geschwindigkeit)	Keine	9	6	10	540	techn. Redundanz / Auswertung	9	6	2	108	Ja	
Sachschäden	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
2.6	Unvorhergesehener Fahrzustand	Personenschäden	Bedienungsfehler	Keine	10	7	10	700	Nothalt-Schalter	10	7	4	280	Ja
									Aufwendige Verifikation	10	5	2	100	Ja
									Modellbasierte Entwicklung	10	5	4	200	~
		Programmierfehler	-	-	-	-	-	-	techn. Redundanz / Auswertung	10	7	1	70	Ja
Sachschäden	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Abbildung 2.5: Seite 1/2 der FMEA

FMEA		Hochschule Bochum Bochum University of Applied Sciences		BO		Smart Mechatronics								
		- Zu vernachlässigen gegenüber höher priorisierten Fehlerfolgen oder wird durch die selben Maßnahmen behandelt ~ Maßnahme kann noch durchgeführt werden												
ID	Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Fehlerfolge	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				Verbesserter Zustand				Umgesetzt?		
				Derzeitige Maßnahme	Bedeutung	Auftreten	Entdeckung	RPZ Risikoprioritäts- zahl	Mögliche Maßnahmen	Bedeutung	Auftreten		Entdeckung	RPZ Risikoprioritäts- zahl
3 Transport														
3.1	Nichtererkennung einer unzulässig schweren Last	Sachschäden	Menschliches Versagen	Keine	5	5	10	250	Sensoren (wiegen der Last)	5	5	4	100	Ja
									Reversible Sollbruchstelle	5	5	5	125	Nein
									Federung	5	5	4	100	Ja
3.2	Nichtererkennung einer unzulässig großen Last	Personenschäden	Menschliches Versagen	Keine	9	7	10	630	Unterweisung des Anwenders	9	4	3	108	Ja
									Rückfrage an Anwender	9	7	2	126	Ja
									Erkennung durch Sensorik	9	7	2	126	~
3.3	Last fällt vom ALF	Personenschäden	Menschliches Versagen	Keine	9	7	10	630	Unterweisung des Anwenders	9	4	2	72	Ja
									Wannenartige Ladefläche	9	5	10	450	Nein
									Geschwindigkeits-Modi	9	4	10	360	~
									Fixierhilfen	9	2	10	180	Ja
3.5	Personentransport	Personenschäden	Menschliches Versagen	Keine	9	9	10	810	Unterweisung des Anwenders	9	4	3	108	Ja
4 Sonstiges														
4.1	externe Manipulation	Personenschäden	krimineller Vorsatz	Keine	10	2	10	200	Deakt. überfl. Schnittstellen	10	1	10	100	~
									Zugriffskontrolle	10	1	2	20	Ja
									Abschließbarkeit	10	1	10	100	Ja
4.2	Durch elektromagnetische Störungen erzeugte Fehlfunktionen	Personenschäden	Ext. elektromagnetische Quelle	Keine	9	3	10	200	Faradayscher Käfig	9	1	10	90	~
									EMV konforme Bauteile	9	1	10	90	Nein
									Sachschäden	-	-	-	-	-
4.3	Versagen eines Nothalt-Schalters	Personenschäden	Defekt	Keine	10	1	10	100	Zweikanalige Ausführung	10	1	2	20	Ja
									Schaltleisten an Fahrzeugseiten	10	1	10	100	Ja
									Redundanz	10	1	1	10	Ja
4.4	Durch Wetter erzeugte Fehlfunktionen	Objekte werden nicht erkannt	Dunkelheit	Keine	9	9	10	810	Nachtsichtkameras	9	2	2	36	Ja
									Scheinwerfer	9	3	3	81	Nein
									LED-Beleuchtung	9	4	4	144	Ja
		Personen übersehen das ALF	Dunkelheit	Keine	9	9	8	648	Scheinwerfer	9	2	2	36	Nein
									IP-Schutzklasse	9	1	10	90	Nein
									Kein Betrieb bei Nässe	9	1	10	90	Ja
Fehlfunktionen (Sensoren)	Regen/Schnee	Keine	9	7	10	630	Umhüllung / Kapselung	9	1	10	90	Nein		
							Fahren durch eine Pfütze	-	-	-	-	-	-	
4.5	Versagen einer Teilkomponente	Personenschäden	CAN-Kommunikation fällt aus	Keine	10	3	10	300	Heartbeat-Überwachung	10	3	2	60	Ja
									seperate Überwachungseinheit	10	3	2	60	Nein
			Zentrale Komponente fällt aus	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	

Abbildung 2.6: Seite 2/2 der FMEA

2.3 Anwendungsszenarien

Nach der Umfeldmodellierung sieht das CONSENS-Modell eine Nutzenanalyse vor, welche in Anwendungsszenarien resultiert. Diese Anwendungsszenarien beschreiben die Verwendung des Systems aus Sicht des Anwenders. Um die Szenarien zu dokumentieren wird eine Vorbedingung, das Systemverhalten und gegebenenfalls Nachbedingungen angegeben. Beispielsweise wird festgelegt, was der Anwender tun muss, damit er das Fahrzeug durch eigene Kraft verschieben kann. Die Anwendungsszenarien sind im Anhang aufgeführt. [115]



Abbildung 2.7: Anwendungsszenarien des ALFs

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Das ALF verschieben	Nr. 3
Vorbedingung: - Anwendermodus „Hand“ muss ausgewählt sein (Moduswechsel nur möglich mit dementsprechender Freigabe, z.B. durch einen Schlüssel)	
Systemverhalten: - Die Feststellbremsen und sonstige Bremsmechanismen sind deaktiviert - Das Fahrzeug kann nun verschoben werden	
Anmerkungen: - Die Treppenerkennung ist nicht mehr aktiv - Ein Wegrollen des Fahrzeugs wird nicht mehr verhindert - Das Drücken eines Nothalt-Schalters führt weiterhin zu einer Bremsung	

Abbildung 2.8: Beispiel für ein Anwendungsszenario - Verschieben des ALFs

2.4 Anforderungserhebung

Auf Basis der Umfeldmodellierung und der Anwendungsszenarien werden die Systemanforderungen bestimmt und als Anforderungsliste im Lastenheft festgehalten (siehe Anhang).

Zu jeder Systemanforderung werden im Lastenheft die folgenden Punkte aufgeführt:

- Beschreibung
- Wechselwirkungen mit anderen Anforderungen
- Risiken, welche während der Entwicklung auftreten können
- Testhinweise
- eine grobe Einschätzung des Entwicklungsaufwands

Durch die Kontrolle oder Mitgestaltung der Anforderungen durch den Kunden, werden Kommunikationsfehler und abweichende Vorstellungen des zu entwickelnden Systems, bereits zu Beginn der Entwicklungsphase erkannt und können korrigiert werden. Dadurch wird Geld und Zeit eingespart.

Da am Ende der Entwicklungsphase das System und damit jede Anforderung verifiziert werden muss, wird ein Verifikationsplan erstellt, welcher den Test oder die Tests zu jeder Anforderung enthält. Der Verifikationsplan befindet sich ebenfalls im Lastenheft (siehe Anhang).

Es folgt eine Auflistung aller Anforderungen. In Klammern werden Werkzeuge der CONSENS-Methode erwähnt, wenn die Anforderung daraus hervorgegangen ist oder mit diesen behandelt wird.

Anforderungen:

- ANF_1 Nicht StVO-gerecht
- ANF_2 Höchstgeschwindigkeit (FMEA ID 2.1, 2.2, 2.3, Umfeldmodellierung)
- ANF_3 Max. Gewicht der Beladung (FMEA ID 3.1, 3.3, Umfeldmodellierung)
- ANF_4 Min. Distanz
- ANF_5 Fahrbahnbeschaffenheit (Umfeldmodellierung)
- ANF_6 Max. Steigung
- ANF_7 Wenderadius
- ANF_8 Max. Breite
- ANF_9 Max. Höhe
- ANF_10 Max. Fahrzeugdiagonale
- ANF_11 Max. Eigengewicht (FMEA ID 2.1, 2.2, 2.3, Umfeldmodellierung)
- ANF_12 Kein Personentransport (FMEA ID 3.5)
- ANF_13 Wetterbedingungen (FMEA ID 4.4, Umfeldmodellierung)
- ANF_14 Akkuzustand (Umfeldmodellierung)
- ANF_15 Befestigung der Akkus
- ANF_16 Schutz der Akkus (FMEA ID 1.2, 1.3)
- ANF_17 Hauptschalter
- ANF_18 Nothalt (FMEA ID 2.6, 4.3, Anwendungsszenario 6)
- ANF_19 Feststellbremse (FMEA ID 2.3, 2.5, Anwendungsszenario 5)
- ANF_20 Grundlage für autonomes Fahren
- ANF_21 Überschreitung der max. Zuladung (FMEA ID 3.1, Umfeldmodellierung)
- ANF_22 Kommunikation mit Anwender (FMEA ID 2.1, Umfeldmodellierung)
- ANF_23 Temperaturbereich (Umfeldmodellierung)
- ANF_24 Verpolungsschutz (FMEA ID 1.1)
- ANF_25 Bodenfreiheit (Umfeldmodellierung)
- ANF_26 Manuelle Steuerung (Umfeldmodellierung)
- ANF_27 Befestigung der Beladung (FMEA ID 3.3, Umfeldmodellierung, Anwendungsszenario 7)
- ANF_28 Konnektivität per WLAN (Umfeldmodellierung)

2.5 Systemarchitektur

Auf Basis des Umfeldmodells (Abschnitt 2.1), der Anforderungsliste und der Risikoanalyse (Abschnitt 2.2) wird die Systemarchitektur mit Hilfe einer Wirkstruktur erstellt. Eine Wirkstruktur bildet jede Komponente des Systems ab und zeigt wie diese Komponenten miteinander interagieren. Des Weiteren wird dargestellt, welche Komponenten die Energie-, Material-, Stör- und Signalflüsse aus dem Umfeldmodell verarbeiten (Abbildung 2.4). Auf Grund der Anzahl an erforderlichen Komponenten wird die Wirkstruktur in Teil-Wirkstrukturen aufgeteilt, welche in den nachfolgenden Unterabschnitten näher erläutert werden. Die Aufteilung in mehrere Teil-Wirkstrukturen führt zu einer erhöhten Übersichtlichkeit. Zusätzlich zur Visualisierung und Beschreibung der Wirkzusammenhänge der Komponenten dienen Wirkstrukturen dazu, dass alle Beteiligten möglichst gleiche Vorstellungen vom gesamten System haben, da sie vorzugsweise mit mindestens einem Mitarbeiter jeder Abteilung erstellt werden. Wenn mehrere Mitarbeiter an verschiedenen Teilsystemen arbeiten, hat die Erstellung einer oder mehrerer Wirkstrukturen den Vorteil, dass die Mitarbeiter eine Übersicht über die Komponenten und Schnittstellen der anderen Teilsysteme erhalten. Sie können dadurch erkennen, ob eine Änderung in ihrem Teilsystem Folgen für andere Teilsysteme hat. Während der Entwicklungsphase wird, bei auftretenden Änderungen, die Wirkstruktur stets aktualisiert. In den Abbildungen 2.9 und 2.10 ist die Haupt-Wirkstruktur und die dazugehörige Legende dargestellt.

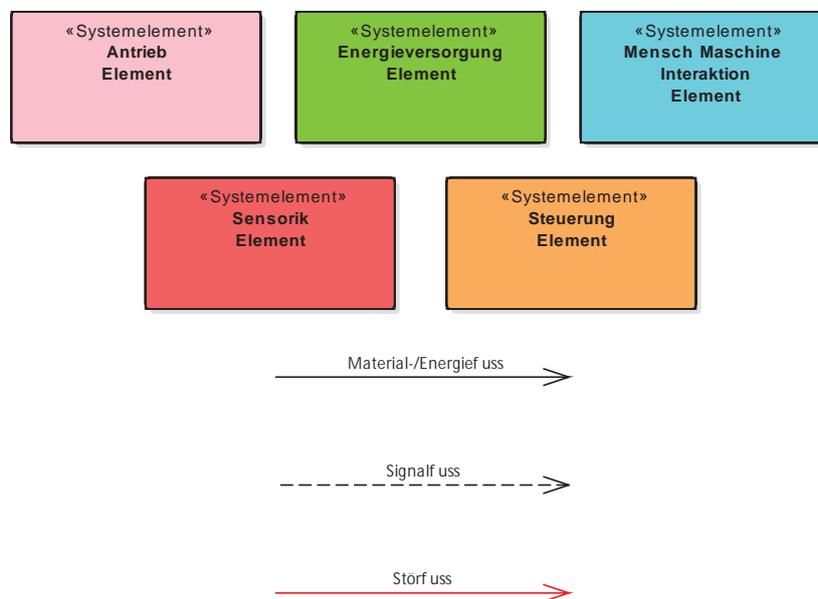


Abbildung 2.9: Legende der Wirkstrukturen

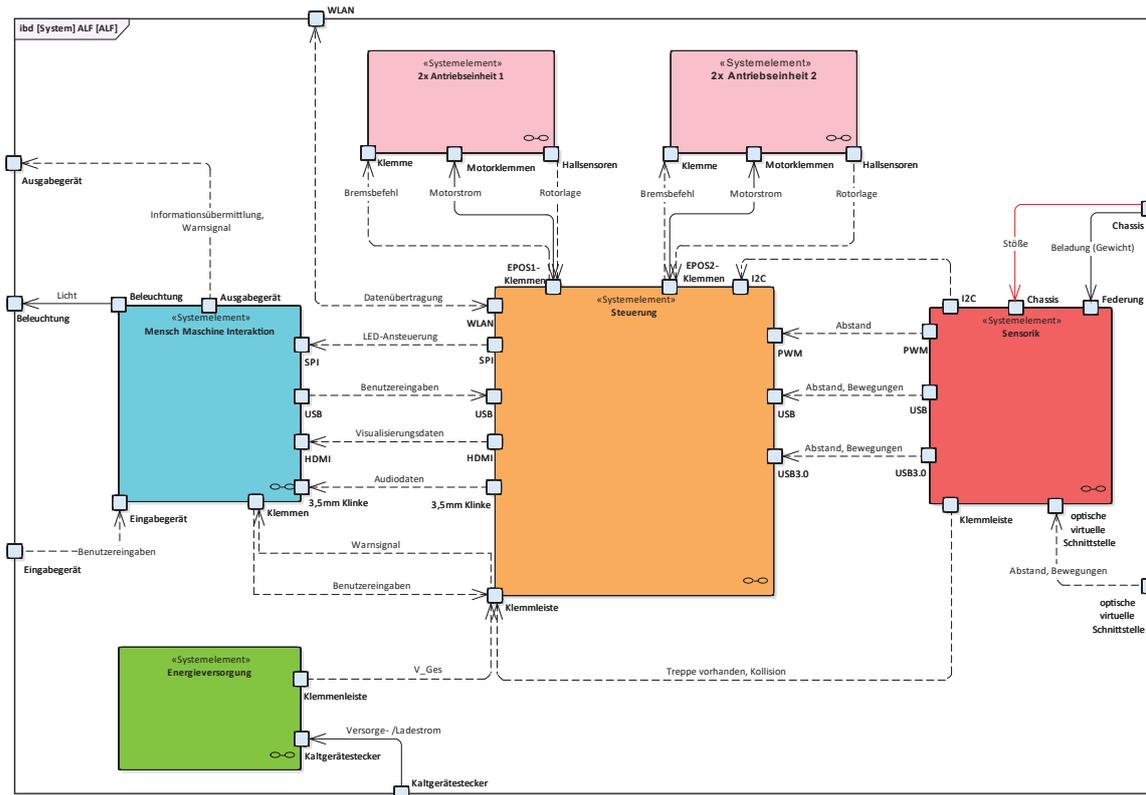


Abbildung 2.10: Haupt-Wirkstruktur

Die nachfolgenden Abbildungen des ALF's bzw. dessen Konstruktion, werden mit Hilfe der 3D-CAD⁶-Software *Inventor Professional 2018* der *Autodesk GmbH* erstellt (siehe beispielsweise Abbildung 2.13). Das gesamte Fahrzeug mit sämtlichen Komponenten (Chassis, Antriebskomponenten, Steuerungsgeräte, Sensoren, Klemmen, Netzteile, etc.) wird mit dieser Software konzipiert. Dadurch kann die exakte Positionierung der Komponenten geplant werden. Darüber hinaus wird der Radträger (Abschnitt 2.5.2.1) und einige benötigte Adapter zur Befestigung von Sensoren entworfen (Abschnitt 2.5.4).

2.5.1 Chassis

Das Chassis stellt das Grundgerüst des gesamten Fahrzeugs dar. Es muss ausreichend Bauraum zur Montage aller in Abschnitt 2.5 erläuterten Komponenten bieten, ohne die in der Anforderungen erhobenen maximalen Ausmaße des Fahrzeugs zu überschreiten (Anforderungen ANF_8, ANF_9, ANF_10). Des Weiteren muss die Konstruktion dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs standhalten, ohne dieses durch sein Eigengewicht (Anforderung ANF_11) zu sehr zu erhöhen und so die effektive Nutzlast des Fahrzeugs zu verringern.

⁶Computer-Aided Design



Abbildung 2.11: ALF-Chassis

Das Chassis des ALFs wird aus Aluminium-Profilen der Firma *item Industrietechnik GmbH* konstruiert. Konkret werden Profile der *Baureihe 8* verwendet. Diese Baureihe bietet eine ausreichend hohe Belastbarkeit des Aufbaus und eine Vielzahl an kompatiblen Komponenten. Die Längsnut der Profile ermöglicht das nachträgliche Einschwenken von diversen Nuten-Steinen. Durch die Verwendung von Ringschrauben lässt sich die Beladung durch Spanngurte sichern (ANF_27). Standard-, Automatik- und Universal-Verbindungssätze bieten Möglichkeiten zur Montage der Profile. Eine zukünftige Anpassung und Erweiterung des Fahrzeugs durch weitere Komponenten oder Profile ist möglich. [45]

Besonders beanspruchte Bereiche, wie die Ladefläche oder Radaufhängung, werden durch massive Profile ausgeführt und durch zusätzliche Längs- und Querverstrebungen verstärkt. In weniger kritischen Bereichen des Fahrzeugs kommen weniger widerstandsfähige Profile vom Typ *Economic* zum Einsatz. *Economic-Profile* bieten, im Vergleich zu gewöhnlichen Profilen, einen Gewichtsvorteil von ca. 50% und reduzieren so das Gesamtgewicht der Konstruktion bzw. des gesamten Fahrzeugs. [45]



Abbildung 2.12: Standard-Profil (links), Economic-Profil (rechts)

Um ausreichend Bauraum für Komponenten (Haupt-/Sicherheitssteuerung, Hauptrelais, Spannungswandler, Klemmleisten, Sicherheitseinrichtungen, etc.) zu schaffen, wird das Fahrzeug mit einem Turm ausgestattet. Der Turm ermöglicht zu dem eine komfortable Arbeitshöhe zur Interaktion mit dem Anwender (Abschnitt 2.5.5).

Sowohl Turm als auch Ladefläche des Fahrzeugs sind mit einer Wartungs-Tür bzw. Klappe ausgestattet. Ein Öffnen ohne Werkzeug ist nicht möglich, es wird ausschließlich befugten Personen Zugriff auf die Komponenten des Fahrzeug gewährt (FMEA ID 4.1). Die Wartungs-Tür und Klappe ist jeweils mit einen *Endschalter 8 - 1NC* ausgestattet, welcher durch die Sicherheitssteuerung (2.5.3.5) überwacht wird.

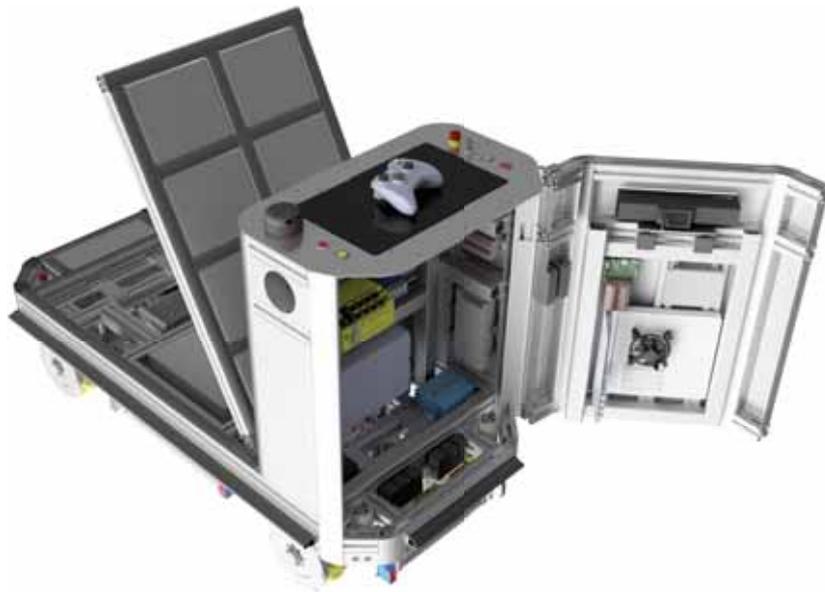


Abbildung 2.13: Wartungs-Tür bzw. Klappe

2.5.2 Antrieb

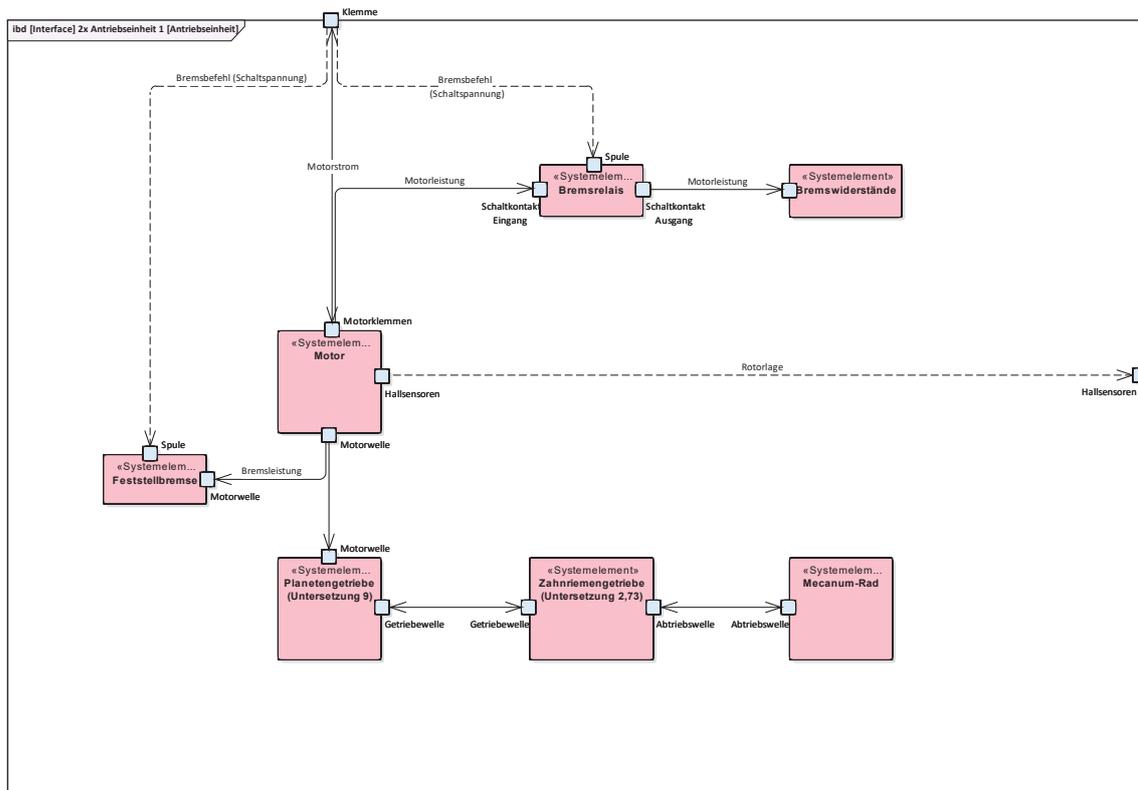


Abbildung 2.14: Wirkstruktur einer Antriebseinheit

Für den Betrieb des Fahrzeugs wird eine Antriebseinheit konzipiert. Sie besteht im wesentlichen aus: Rädträger, Mecanum-Rad, Zahnriemengetriebe mit Spannmechanismus und einer Motoreinheit. Die gesamte Antriebseinheit ist durch *Gelenke 8 40x40* [45] der Firma *item Industrietechnik GmbH* und einer Federung [54] mit dem Chassis des Fahrzeugs verbunden. Der Antriebseinheit stehen 35 mm Federweg zur Verfügung. Eine Messung des Federwegs ermöglicht Rückschlüsse auf die aktuelle Beladung des Fahrzeug und die Erkennung einer Überladung (Abschnitt 2.5.4.6) (Anforderung ANF_21).



Abbildung 2.15: Antriebseinheit

Zusätzlich zu diversen Normteilen wie Lager, Schrauben und Muttern, ist die Erstellung spezieller Bauteile in einer CAD-Software notwendig. Dies betrifft den Radträger, den Spannmechanismus des Zahnriemens und die Aufnahme der Federung. Die Fertigung und die Anpassung anderer Komponenten erfolgt durch die mechanische Werkstatt der *Hochschule Bochum*. Insgesamt kommen vier der in Abbildung 2.15 und 2.16 gezeigten Antriebseinheit zum Einsatz.



Abbildung 2.16: Antriebseinheit - Explosionszeichnung

2.5.2.1 Radträger

Der Radträger stellt das Grundgerüst der Antriebseinheit dar. Er ermöglicht die Montage der Abtriebswelle samt Kegelrollenlager (Abschnitt 2.5.2.5) und der Motoreinheit (Abschnitt 2.5.2.3).



Abbildung 2.17: Radträger

Die frontseitige Nut erlaubt die Aufnahme eines Spannschlittens. Durch Drehen der oberseitig versenkten Schraube kann der Spannschlitten vertikal verschoben werden, bis sich die gewünschte Riemen Spannung des Zahnriemengetriebes (Abschnitt 2.5.2.4) einstellt. Durch Verschrauben der Spann-Abdeckung wird der Spannschlitten fixiert. Sollte es dennoch zum Lockern des Schlittens kommen, kann er zusätzlich durch eine frontseitige Madenschraube gesichert werden.

Um eine hohe Stabilität bei vergleichsweise geringem Gewicht zu erzielen, wird der Rädträger aus Aluminium gefertigt. Eine zusätzliche Gewichtsreduktion wird durch seitliche Aussparungen am Radträger erzielt.

2.5.2.2 Mecanum-Räder

Das ALF wird mit vier Mecanum-Rädern ausgestattet (Abbildung 2.18). Ein Mecanum-Rad verfügt über mehrere um 45° verdrehte, frei drehende Laufrollen entlang des Umfangs. Anzahl und Anordnung dieser Laufrollen sind so gewählt, dass im Profil des Rades eine möglichst runde und durchgehende Abrollfläche entsteht. Die verwendeten Mecanum-Räder [67] sind sowohl für den Betrieb in Innenräumen als auch im Freien geeignet und können mit einer Masse von jeweils bis zu 200kg belastet werden.



Abbildung 2.18: Mecanum-Rad

Dieser Räder-Typ bietet gegenüber herkömmlichen Rädern einen relevanten Vorteil. Durch gezielte Ansteuerung der vier Räder kann das Fahrzeug in drei Freiheitsgraden bewegt werden. Es können Translation in Längs- und Querrichtung, als auch die Rotation um die Höhenachse des Fahrzeugs vollzogen werden (Abbildung 2.19). Darüber hinaus ist auch eine Kombination dieser Bewegungen möglich, sodass beispielsweise eine seitliche Bewegung bei gleichzeitiger Rotation möglich ist. Das Fahrzeug erhält Manövrierfähigkeiten, welche denen eines Luftkissenboots ähneln. Dies bietet, vor allem beim Manövrieren in enger Umgebung wie Fluren oder Büros, einige Vorteile. [138]

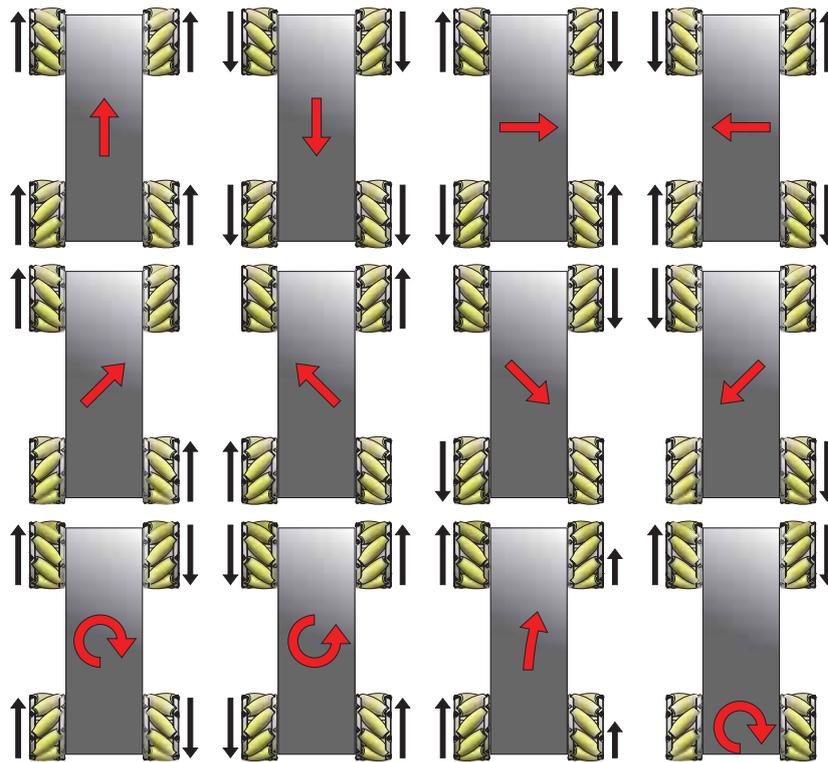


Abbildung 2.19: Verfahrmöglichkeiten des Mecanum-Antriebs

Des Weiteren ist durch den Einsatz von Mecanum-Rädern keine Lenkmechanik notwendig, was Bauraum, Entwicklungsaufwand und Kosten einspart.

Allerdings bringt die Verwendung von Mecanum-Rädern auch einige Nachteile bzw. besondere Anforderungen mit sich. Um eine Steuerung des Fahrzeugs realisieren zu können, ist eine separate Ansteuerung der vier Räder notwendig. Dies macht den Einsatz eines Motors pro Mecanum-Rad unumgänglich. Ein Fahrzeug, welches mit Mecanum-Rädern ausgestattet ist, bietet zudem einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad, außerdem können vor allem bei hohen Geschwindigkeiten Vibrationen auftreten. Durch die geringe Auflagefläche der Räder kann es während der Fahrt zu nicht vorhersehbarem Schlupf und zum Wegdriften des Fahrzeugs kommen. Um diesen Drift erkennen und kompensieren zu können, ist eine gesonderte Sensorik erforderlich (Abschnitt 2.5.4.8). Des Weiteren ist ein möglichst gleichmäßiger Anpressdruck aller Räder zum Boden notwendig. Nur so kann sichergestellt werden, dass das gewünschte Fahrmanöver korrekt ausgeführt wird. Um dies gewährleisten zu können wird das Fahrzeug mit einer gefederten Einzerradaufhängung ausgestattet (Abbildung 2.15). [44, 138]

2.5.2.3 Motoreinheit

Wie bereits in Abschnitt 2.5.2.2 erläutert, erfordert das auf Mecanum-Räder basierende Antriebskonzept eine individuelle Ansteuerung jedes einzelnen Rades. Hierzu wird jedes Rad durch eine Motoreinheit angetrieben. Die Einheit besteht aus einem Motor *ECI-63.60-B00-K1* [21], einem Planetengetriebe *PerformaxPLUS 63* [21] und einer mechanischer Feststellbremse *BFK 457-03* [21] (Abschnitt 2.5.2.7).

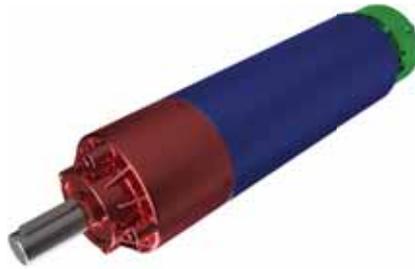


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung der Motoreinheit - Planetengetriebe (rot), Motor (blau), mechanische Feststellbremse (grün)

Beim verwendeten Motor handelt es sich um einen elektronisch kommutierten BLDC⁷-Motor der Firma *ebm papst*. Der Motor ist bereits serienmäßig mit Hall-Sensoren ausgestattet. Durch Auswertung der Hall-Sensoren kann die aktuelle Lage der Motorwelle bestimmt werden, was für eine feldorientierte und somit effiziente Regelung des Motors besonders wichtig ist. Die komplette Regelung des Motors erfolgt durch den in Abschnitt 2.5.3.4 beschriebenen Motorcontroller. In den Vorgängerprojekten wurden bereits gute Erfahrungen mit diesem Motor gesammelt [28, 52, 97]. Prinzipiell können jedoch auch ähnliche BLDC-Motoren anderer Hersteller verwendet werden.

Nennspannung:	16,97V
Nennstrom:	17,6A
Nennleistung:	335 W
Nennmoment:	0,8Nm
Nenndrehzahl:	4000 min ⁻¹

Tabelle 2.4: Nenndaten des BLDC-Motors

Das Planetengetriebe bietet eine 9-Fache Untersetzung auf vergleichsweise kleinem Bauraum. Ausgangsseitig steht somit ein Nennmoment von 7,2Nm bei einer Nenndrehzahl von 444 min⁻¹ zur Verfügung. Durch die einstufige Ausführung des Getriebes wird ein Wirkungsgrad von 90 Prozent erreicht. Die schrägverzahnten Planetenräder aus Kunststoff sorgen zudem für einen wartungsfreien und leisen Betrieb. [21]

⁷Brushless DC

2.5.2.4 Zahnriemengetriebe

Zum Betrieb des ALFs ist eine Wandlung und Übertragung des Drehmoments zwischen Motoreinheit und Abtriebswelle notwendig. Die Untersetzung des Getriebes wird so ausgelegt, dass die in der Anforderungen erhobene Geschwindigkeit erreicht wird (Anforderung ANF_2). Des Weiteren soll ein möglichst hohes Drehmoment des Fahrzeugs bereit gestellt werden. Dies ist vor allem bei Bremsvorgängen relevant und stellt einen sicherheitstechnischen Aspekt dar. Es wird ein Zahnriemengetriebe entworfen.



Abbildung 2.21: Zahnriemengetriebe - Primäre Riemenscheibe (grün), Sekundäre Riemenscheibe (rot), Spannvorrichtung (blau), Zahnriemen (gelb)

Das Riemengetriebe besteht im Wesentlichen aus vier Teilkomponenten: Den primär- und sekundärseitig verbauten synchronen Riemenscheiben [60], einer selbst entwickelten Spannvorrichtung und dem Zahnriemen [59] (Abbildung 2.21). Durch die Kombination der synchronen Riemenscheiben (22 und 60 Zähne) wird eine Untersetzung von $2,7\bar{2}$ erreicht. Inklusiv des Planetengetriebe der Motoreinheit resultiert dies in einer Gesamt-Untersetzung von $24,5\bar{4}$. Bei Nennbetrieb des Motors stehen dem gesamten Fahrzeug ein Antriebsmoment von $78,5\bar{4}$ Nm bei einer Geschwindigkeit von 6,24 km/h zur Verfügung.

Die primärseitige Riemenscheibe ist mit beidseitigen Bordscheiben ausgerüstet, sodass ein Abrutschen der Zahnriemens verhindert wird. Zudem werden beide synchronen Riemenscheiben mit Passfedernuten versehen. Dies ermöglicht die Montage auf der Welle der Motoreinheit bzw. Abtriebswelle. Durch den Einsatz eines Zahnriemens und Passfedern ist eine formschlüssige Übertragung des Drehmoments zwischen Abtriebswelle und Welle der Motoreinheit gewährleistet. Dies bietet den Vorteil, dass es zu keinerlei Schlupf während des Betriebs kommt. Dieses synchrone Verhalten ermöglicht eine zuverlässige Regelung des Fahrzeugs. Durch Auswertung der im Motor verbauten Hall-Sensoren können zuverlässig Rückschlüsse auf die aktuelle Stellung bzw. Drehzahl des jeweiligen Mecanum-Rads getroffen werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichende Vorspannung des Zahnriemens durch die Spannvorrichtung (Abschnitt 2.5.2.1). Eine zu geringe Vorspannung des Zahnriemens kann des Weiteren zu erhöhtem Verschleiß an Riemen und Riemenscheiben führen.

Im Gegensatz zu anderen formschlüssigen Getrieben (Zahnrad- und Kettengertriebe) ist ein Riemengetriebe sehr wartungsarm und selbstschmierend. Durch den Verzicht auf Schmierstoffe kann es zu keiner Verschmutzung (z.B. Teppichböden) während der Fahrt oder Wartungsarbeiten kommen. Der Einsatz eines Riemens hat zudem eine dämpfende Wirkung auf den gesamten Antriebsstrang des Fahrzeugs, da auftretende Stöße oder Vibrationen durch den Riemen aufgenommen und absorbiert werden können. Negative Einflüsse auf sonstige Komponenten wie Motoreinheit oder Spannvorrichtung werden verringert. [57]

2.5.2.5 Mechanische Lagerung

Das Fahrzeug kann voll beladen ein Gesamtgewicht von bis zu 600kg erreichen. Auf ebenem Untergrund wirkt somit eine radiale Kraft von ca. 2000N auf jedes Rad bzw. Abtriebswelle und die damit verbundene mechanische Lagerung. Die in der Realität auftretenden Kräfte können jedoch höher ausfallen. Gründe hierfür können Vibrationen während der Fahrt, eine unsymmetrische oder abrupte Beladung des Fahrzeugs oder ein nicht ebener Untergrund sein. Durch das omnidirektionale Antriebskonzept (Abschnitt 2.5.2.2) können, vor allem bei schrägen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, zudem axiale Kräfte auftreten.

Klassische Rillenkugellager bieten einen geringen Reibwert und somit hohen Wirkungsgrad, können jedoch baubedingt nur im geringen Maße zeitgleich axiale und radiale Kräfte aufnehmen. [114]

Kegelrollenlager eignen sich besonders gut, um eine Kombination aus radialen und axialen Kräften aufzunehmen und sind zudem höher belastbar als vergleichbare Rillenkugellager. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass einreihige Kegelrollenlager axiale Kräfte in nur einer Richtung aufnehmen können. Kräfte in entgegengesetzter Richtung führen zum Auseinanderschieben von Innen- und Außenring des Lagers. [114]

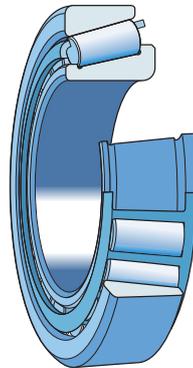


Abbildung 2.22: Kegelrollenlager [114]

Es werden Kegelrollenlager [113] der Firma *SKF* verwendet, welche eine dynamische Tragzahl von 43,9kNm aufweisen. Die verwendeten Lager erfüllen die Norm *DIN 720* und können bei einem eventuellem Defekt durch Lager anderer Hersteller ersetzt werden.

Pro Radträger werden zwei Kegelrollenlager in O-Anordnung verbaut. Axiale Kräfte können nun, je nach Richtung der Kraft, von einem der beiden Lager aufgenommen werden (Abbildung 2.23). Die Verwendung der O-Anordnung eignet sich zudem besonders gut um Kippmomente der Abtriebswelle aufnehmen zu können. [114]

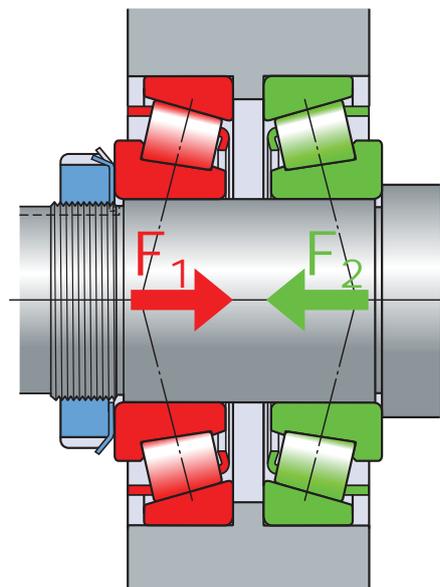


Abbildung 2.23: Kegelrollenlager in O-Anordnung

2.5.2.6 Widerstandsbremse

Die Widerstandsbremse ist durch drei Relais [29] und Bremswiderständen [5] pro Antriebseinheit (Motor, Bremse und Getriebe) umgesetzt. Sie führt zum „Kurzschließen“ der Motorwicklungen über die Bremswiderstände in Sternschaltung. Die kinetische Energie des Fahrzeugs wird in Wärmeenergie am Motor bzw. an den Bremswiderständen umgesetzt, was die Geschwindigkeit des Fahrzeug reduziert.

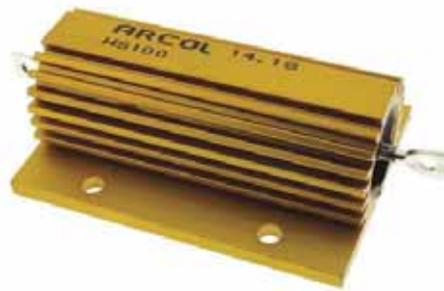


Abbildung 2.24: Bremswiderstand

Die Widerstandsbremse ist im spannungsfreien Zustand aktiv und muss durch die Sicherheitssteuerung freigegeben werden. So wird die Geschwindigkeit des Fahrzeug auch in einem Fehlerfall (z.B. Ausfall eines Motorcontrollers oder der Versorgungsspannung) zuverlässig verringert. Durch das Ruhestromprinzip und die damit gesteigerte Sicherheit, erhöht sich jedoch die Leistungsaufnahme im Fahrbetrieb um 34,8W.

Es werden Leistungswiderstände mit je $0,68\Omega$ eingesetzt, sodass eine maximal mögliche Bremsleistung erzielt wird ohne die Relais zu zerstören. Die Bremsleistung P_{B_n} einer Widerstandsbremse beträgt, bei Nenndrehzahl des Motors 1,27kW. Das daraus resultierende Bremsmoment am Rad beträgt 74Nm. Für das gesamte Fahrzeug ergibt sich somit eine Nennbremsleistung von 5,08kW und ein Nennbremsmoment von 297Nm.

$$P_{B_n} = \frac{U_{i_n}^2}{R} * 3$$

Zu beachten ist jedoch, dass die genannte Bremsleistung bzw. das Bremsmoment nur kurzzeitig anliegt. Mit abnehmender Geschwindigkeit sinkt die induzierte Spannung des Motors, was für ein kontinuierlich sinkende Bremsleistung und eine gleichzeitige Abnahme des Bremsmoments sorgt. Um das Fahrzeug komplett zum Stillstand zu bringen bzw. am Wegrollen zu hindern, ist eine mechanische Zusatzbremse (Abschnitt 2.5.2.7) notwendig. [83]

2.5.2.7 Mechanische Feststellbremse

Wie im Abschnitt 2.5.2.6 erläutert, ist zusätzlich zur Widerstandsbremse eine weitere Bremseinrichtung erforderlich (ANF_19). Um ein Bremsen im Fehlerfall (z.B. kompletter Ausfall der Versorgungsspannung) garantieren zu können, ist jede Motoreinheit (Abschnitt 2.5.2.3) mit einer mechanischen Feststellbremse *BFK 457-03* [21] ausgestattet.



Abbildung 2.25: Feststellbremse BFK 457-03 [21]

Die Bremse ist federbetätigt und elektronisch belüftet. Es muss also Spannung angelegt werden um die Bremse zu lösen, andernfalls wird die Motorwelle blockiert (Ruhestromprinzip). Die so erhöhte Sicherheit des Fahrzeugs resultiert jedoch in einer gesteigerten Leistungsaufnahme. Pro Motor bzw. Bremse werden während der Fahrt 9W Leistung zur Freigabe der Bremse benötigt.

Jede Feststellbremse bringt ein primärseitiges Bremsmoment von 1Nm auf. Dies resultiert in einem Gesamt-Bremsmoment des Fahrzeugs von $98,18\bar{N}m$ bzw. einer Bremskraft F_B von 966,36N. Um den Bremsweg des Fahrzeug errechnen zu können, wird zunächst die Energie bzw. Beschleunigungsarbeit bei einem Maximalgewicht m_{max} von 600kg und einer Nenngeschwindigkeit v_n von 6km/h ($1,6\bar{m}/s$) bestimmt:

$$E = W_B = \frac{1}{2} * m_{max} * v_n^2$$

Aus der Beschleunigungsarbeit W_B und der Bremskraft F_B lässt sich nun der Bremsweg berechnen:

$$s_B = \frac{W_B}{F_B}$$

Der errechnete Bremsweg des Fahrzeug beträgt auf ebenem Untergrund 0,86m. Diese Berechnung stellt eine Abschätzung des Bremswegs dar. Vernachlässigt werden hierbei die Trägheitsmomente der beteiligten Komponenten und eventueller Schlupf zwischen Untergrund und den Mecanum-Räder. Die Herstellerangaben der Motoreinheit [21] und der verwendeten Mecanum-Räder [67] erhalten keine Angaben zu Trägheitsmomenten bzw. Werte zur Haft und Rollreibung.

Die Berechnung betrachtet allein die mechanische Feststellbremse. Durch die Widerstandsbremse (Abschnitt 2.5.2.6) oder ein regeneratives Bremsen durch die Motorcontroller 2.5.3.4) kann das Bremsmoment weiter erhöht bzw. der Bremsweg verringert werden.

Bremsvorgänge sorgen, vor allem bei hohen Geschwindigkeiten, zu Verschleiß der Bremsbelege. Dies kann zur Abnahme der allgemeinen Bremsleistung, bis hin zum kompletten Versagen der Feststellbremse führen. Eine regelmäßige Wartung bzw. Kontrolle der Bremse ist erforderlich. Um den Verschleiß zu minimieren, sollte die Feststellbremse nur im Stillstand bzw. bei niedrigen Geschwindigkeiten, oder im Notfall betätigt werden. [47]

Kommt es zu einem Defekt, sodass eine Spannungsversorgung des Fahrzeugs durch die verbauten Akkumulatoren oder das Netzteil nicht mehr möglich ist, kann das Fahrzeug nicht bewegt werden. Um ein Lösen der Feststellbremse zu ermöglichen, kann ein mobiler Akkumulator an die dafür vorgesehene Buchse der Hauptklemmleiste angeschlossen werden. Das Fahrzeug kann nun manuell verschoben werden.

2.5.3 Steuerung

Die Steuerung des ALFs muss verschiedene Anforderungen erfüllen. Beispielsweise muss die Steuerung leistungsstark sein, um alle erforderlichen Sensordaten erfassen und verarbeiten zu können und über viele verschiedene Schnittstellen verfügen, um viele Sensoren anschließen und testen zu können. Darüber hinaus müssen Aktoren wie die verbauten Bremsen und Signalleuchten angesteuert werden und dabei ein hohes Sicherheitslevel erfüllt werden, da vom sicheren Betrieb des Fahrzeugs Menschenleben abhängig sind. Um die Anforderungen zu erfüllen, werden mehrere Steuerungsgeräte ausgewählt und die zu realisierenden Funktionen auf diese verteilt.

Funktion	Hauptsteuerung	Schnittstellenerweiterung	Motorcontroller	Sicherheitssteuerung
Kollisionsvermeidung	X			
Treppenerkennung				X
Kartografierung	X			
Neigungsbestimmung		X		
Drifterkennung		X		
Geschwindigkeitsbestimmung		X	X	
Motorsteuerung			X	
Notbremsung				X
Beleuchtung		X		

Tabelle 2.5: Funktionsverteilung auf Steuerungsgeräte

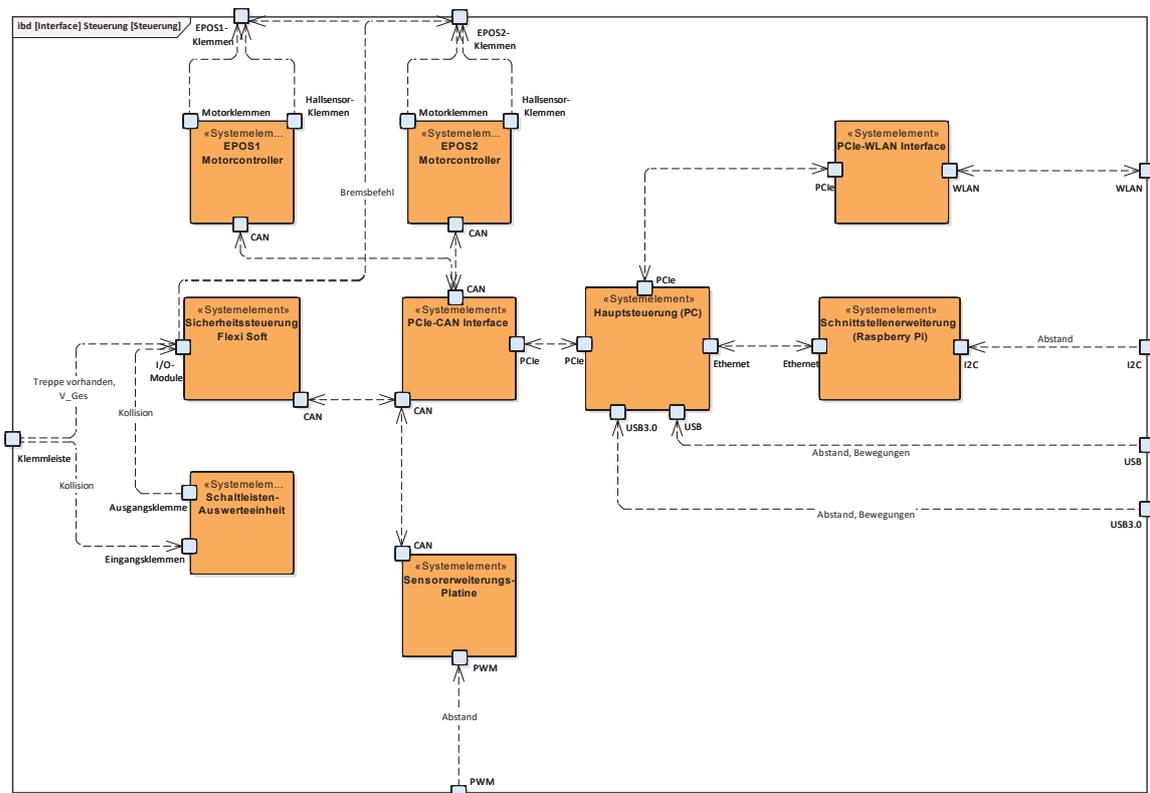


Abbildung 2.26: Wirkstruktur der Steuerung

2.5.3.1 Hauptsteuerung

Als Hauptsteuerung wird handelsübliche PC⁸-Hardware eingesetzt. Gründe dafür sind die sehr hohe Leistungsfähigkeit der Hardware, die einfache Erweiterbarkeit des Systems und die zukünftige Verfügbarkeit von Ersatzteilen. Des Weiteren ist eine Installation von *Matlab* auf der Zielplattform möglich. Diese bietet einige Vorteile bei der Programmierung von neuer Software. Ein direktes Erstellen und Testen der Software kann direkt auf der Zielplattform erfolgen.

Der PC wird durch zwei PCIe⁹-Karten erweitert. Eine WLAN¹⁰-Karte ermöglicht das Einwählen in WLAN-Netzwerke (Anforderung ANF_28), eine weitere Einsteckkarte den Zugriff auf das CAN¹¹-Netzwerk des Fahrzeugs. Ein CAN-Netzwerk ist zur Kommunikation mit dem MCM (Abschnitt 2.5.3.4) und weiteren Geräten notwendig. Das verwendete Mainboard bietet zudem die Möglichkeit, das System durch zwei weitere Zusatzkarten zu erweitern. Mögliche sinnvolle Erweiterungen können z.B. eine Grafikkarte zum Beschleunigen diverser Algorithmen (z.B. zur Bilderkennung) oder ein Bluetooth-Adapter sein.

Der Einsatz von Standard-PC-Hardware bringt jedoch den Nachteil der verhältnismäßig hohen Leistungsaufnahme mit sich. Da es sich bei diesem Projekt jedoch um ein Versuchsfahrzeug handelt, wird dieser Fakt bewusst in Kauf genommen. Die durch die erhöhte Leistungsaufnahme resultierende Reduzierung der Fahrzeugreichweite wird durch die einfachere Entwicklung von neuer Software und den Leistungsreserven des Rechnersystems kompensiert. Ein späterer Umstieg auf eine sparsamere Rechner-Architektur ist darüber hinaus möglich.

Durch die Befestigung der gesamten PC-Hardware mit Hilfe von Gummipuffern, werden negative Einflüsse, welche durch Vibrationen des ALFs auftreten, verringert.

⁸Personal Computer

⁹Peripheral Component Interconnect express

¹⁰Wireless Local Area Network

¹¹Controller Area Network

Komponente	Typ	Eigenschaften
CPU ¹²	Intel i7-7700 [46]	4 x 3,6 - 4,0GHz + HT ¹³ , iGPU ¹⁴
RAM ¹⁵	Corsair 2 x 4GB [15]	DDR4 PC-2400
Mainboard	ASROCK Z270M Pro4 [6]	µATX ¹⁶ Sockel 1151 5 x USB ¹⁷ 2.0 9 x USB3.0 Sound 4 x PCIe (x16, x4, x1, x1)
WLAN-Adapter	TP-LINK TL-WN881ND [129]	PCIe(x1) 2,4GHz (802.11 b/g/n)
CAN-Adapter	Peak CAN IPEH-003026 [80]	PCIe(x1) 5-1000kb/s galvanische Trennung

Tabelle 2.6: Komponenten der Hauptsteuerung

Die Hauptsteuerung wird mit einem auf *Linux* basierenden Betriebssystem betrieben. Konkret wird sich für die *Linux*-Distribution *Ubuntu* [13] entschieden. Der Paketmanager erlaubt eine Installation von zusätzlicher Software. Dies ermöglicht unter anderem eine Installation und Erweiterung von ROS¹⁸ (Abschnitt 2.5.3.3). Eine Installation von ROS auf einem Windows-Betriebssystem ist prinzipiell möglich, bringt allerdings Einschränkungen und Probleme mit sich [76]. *Linux* ermöglicht zudem die Installation von *Matlab*, sodass eine modellbasierte Softwareentwicklung auf der Zielplattform möglich ist. Durch das Software-Paket *SocketCAN* [123] kann der verbundene CAN-Adapter angesprochen werden.

¹²Central Processing Unit

¹³Hyper-Threading

¹⁴integrated Graphics Processing Unit

¹⁵Random-Access Memory

¹⁶Advanced Technology Extended

¹⁷Universal Serial Bus

¹⁸Robot Operating System

2.5.3.2 Schnittstellenerweiterung

Da handelsübliche PC-Hardware keine Bussysteme wie beispielsweise SPI¹⁹ und I²C²⁰ zur Verfügung stellt, diese jedoch zur Kommunikation mit Sensorik und für die Mensch-Maschine-Interaktion erforderlich ist, ist eine Schnittstellenerweiterung notwendig. Die Einplatinen-Computer der RPi²¹-Familie der *Raspberry Pi Foundation* stellen eine Lösung dar, um das ALF durch zusätzliche Hardware-Schnittstellen zu erweitern. Jedes Modell stellt I²C, SPI, GPIO²², PWM²³ und UART²⁴ bereit [84]. Sind weitere Schnittstellen notwendig, lassen sich diese durch Zusatzplatinen, sogenannte *Shields*, realisieren. Sie ermöglichen so beispielsweise den Zugriff auf ADCs²⁵ oder ein CAN-Netzwerk [22].



Abbildung 2.27: Raspberry Pi 3 Model B [88]

Im Fahrzeug wird ein RPi [85] der dritten Generation verwendet. Er verfügt über einen 64-Bit-Prozessor mit vier Recheneinheiten und 1 GB Arbeitsspeicher. Der Systemtakt der CPU beträgt bis zu 1,2GHz. Zusätzlich, zu der bereits in früheren Versionen vorhandener LAN²⁶-, ist dieses Modell mit einer WLAN- und einer Bluetooth-Schnittstelle ausgestattet (Anforderung ANF_28). [85]

Der RPi wird mit *Ubuntu MATE 16.04.2 (Xenial)* [130] betrieben, einem speziell auf die Hardware angepasstes Derivat der Linux-Distribution *Debian*. Alternativ stehen andere Linux-Derivate bzw. Betriebssysteme wie *Raspbian* [86], *Windows 10 IoT Core* [64] oder *Risc OS* [89] zu Verfügung. *Ubuntu MATE* wird für den Betrieb eines RPis mit ROS (Abschnitt 2.5.3.3) empfohlen [72].

¹⁹Serial Peripheral Interface

²⁰Inter-Integrated Circuit

²¹Raspberry Pi

²²General Purpose Input/Output

²³Pulse-Width Modulation

²⁴Universal Asynchronous Receiver Transmitter

²⁵Analog-to-Digital Converters

²⁶Local Area Network

Mathworks bietet ein Hardware-Support-Package für *Matlab* bzw. *Simulink* [126, 127] an. Dies ermöglicht bestehende Modelle in, auf die Zielplattform optimierten, C-Code zu übersetzen und auszuführen. Dabei werden alle relevanten Funktionen und Hardware-Schnittstellen des RPi unterstützt. Des Weiteren ist es möglich, ROS-Nodes in Simulink zu erstellen [125].

Andere Einplatinen-Computern, wie der *BeagleBone Black* [7] der *BeagleBoard.org Foundation* können auch verwendet werden. Jedoch unterstützt das dazugehörige Hardware-Support-Package für *Matlab* bzw. *Simulink* weniger Schnittstellen als das der RPi-Familie [124, 128]. Zusätzlich wurde in vorangegangenen Projekten schon viel Erfahrung mit der RPi-Familie gesammelt.

2.5.3.3 ROS

Anders als der Name vermuten lässt, handelt es sich beim **Robot Operating System** um kein klassisches Betriebssystem, sondern um ein Software-Framework zur Entwicklung von Robotersoftware. Ein überlagertes Betriebssystem muss weiterhin ausgewählt und installiert werden. Die gängigsten Betriebssysteme stellen hierbei die Linux-Distributionen *Ubuntu* und *Debian* dar, es wird jedoch an der Unterstützung von weiteren Betriebssystemen gearbeitet, wie zum Beispiel *OS X* oder *Gentoo*. Eine Verwendung von ROS unter *Windows* ist prinzipiell möglich, jedoch nur über Umwege, durch die Verwendung von virtuellen Maschinen oder WSL²⁷ zu realisieren [76].

Begonnen hat die Entwicklung des Frameworks im Jahr 2007 im *Stanford Artificial Intelligence Laboratory* der *Stanford University* unter dem Namen *switchyard*. Unter dem Namen ROS wurde es an dem *Willow Garage Robotikforschungsinstitut* weiter entwickelt und schließlich durch die *Open Source Robotics Foundation* übernommen. Der Open-Source-Ansatz erlaubt die Nutzung in nicht kommerziellen, als auch kommerziellen Projekten. Durch die weite Verbreitung [73] des Frameworks existieren bereits viele fertige Lösungen in Form von sogenannten Packages, welche häufig auftretende Problematiken im Bereich der Robotik behandeln. Zu nennen sind hier beispielsweise Algorithmen zur Wegfindung [75], die Auswertung von Sensoren oder die Ansteuerung von Aktoren. Die aktive Community sorgt für eine stetige Weiterentwicklung des ROS-Frameworks. In Form eines Forums [74] kann Hilfe bei Problemen geleistet werden, welche während der Entwicklung auftreten können.

ROS stellt den Zugriff bzw. die Ansteuerung der Sensoren und Aktoren des Roboter-Systems bereit. Darüber hinaus übernimmt es die Verwaltung von verschiedenen Prozessen zur Steuerung bzw. Regelung des Roboters und die Kommunikation dieser untereinander.

²⁷Windows-Subsystem for Linux

Prozesse, so genannte Nodes, können sowohl zentral auf einem Rechner bzw. Mikrocontroller, als auch dezentral auf mehreren Recheneinheiten verteilt sein. Das Netzwerk basiert auf dem Master-Slave-System, das heißt einer der Teilnehmer muss den ROS-Master starten und damit die Kommunikation für die Slaves leiten. Die einzelnen Nodes kommunizieren entweder über Parameter Server, Topics oder Services miteinander. Der Parameter Server wird auf dem Master ausgeführt, über ihn werden Konfigurationsdaten ausgetauscht. Topics ermöglichen es, Datenpakete periodisch anzubieten (publish) bzw. zu abonnieren (subscribe). Falls Daten nur auf Anfrage benötigt werden, bietet sich die Verwendung von Services an. Hier werden Datenpakete durch eine Anfrage (Request) angefordert und in Form einer Antwort (Reply) zurückgeschickt. Der Datenaustausch per Topics und Services erfolgt durch eine PTP²⁸-Kommunikation. Standardmäßig kommen hierbei die Protokolle TCP²⁹ und UDP³⁰ zum Einsatz. Der Aufbau des ROS-Netzwerks ermöglicht eine einfache Erweiterung des autonomen Fahrzeugs. Soll das Fahrzeug zukünftig durch weitere Sensoren oder Steuerungen erweitert werden, können diese an das Netzwerk angebunden und angesprochen werden. Wichtige Informationen zum aktuellen Status des Roboters lassen sich über die Kommandozeile abrufen, sodass sich beispielsweise eine Auflistung aller aktiven ROS-Nodes oder Topics erstellen lässt. ROS bietet darüber hinaus komplexe Werkzeuge an, die eine grafische Benutzeroberfläche bieten. Programme wie *rqt* [78] oder *rviz* [79] ermöglichen eine Visualisierung aller relevanten Parameter und Sensordaten des Roboters. Der Roboter-Simulator *Gazebo* [71] ermöglicht die Simulation eines gesamten Roboter-Systems, mit all seinen Sensoren und Aktoren, in einer virtuellen Umgebung. Die Ausrichtung von Sensoren oder Algorithmen zur Steuerung und Wegfindung können so gefahrlos im virtuellem Raum erprobt werden. Als Version wird *ROS Kinectic* verwendet. [69, 70]

²⁸**P**eer-**T**o-**P**eer

²⁹**T**ransmission **C**ontrol **P**rotocol

³⁰**U**ser **D**atagram **P**rotocol

2.5.3.4 Motorcontroller

Zur Ansteuerung der Motoren wird das im Projekt EPOS³¹ entwickelte **MotorController-Modul** eingesetzt [28, 97]. Die Verwendung dieses Controllers wurde bereits zu Beginn des Projekts durch eine Systemvoraussetzung festgelegt (siehe Anhang: Lastenheft).



Abbildung 2.28: MCM

Das MCM ist für den Betrieb von zwei BLDC-Motoren samt Auswertung der Hall-Sensorik ausgelegt. Insgesamt werden zwei MCM im Fahrzeug verwendet. Ein Modul regelt jeweils die Motoren an der Front bzw. am Heck des Fahrzeugs. Die Module verfügen über eine CAN-Schnittstelle und können so mit den anderen Komponenten im Fahrzeug kommunizieren. Übertragen werden hier unter anderem Nachrichten mit diversen Statusmeldungen, Drehmoment-Anforderungen oder die aktuelle Drehzahl der Motoren (Tabellen 2.14 und 2.13). Ursprünglich wurde der Motorcontroller für den Einsatz in einem elektronisch betriebenen Long- bzw. Skateboard entwickelt. Für den sicheren Betrieb eines autonom fahrenden Fahrzeugs sind einige Anpassungen bzw. Erweiterungen an der Software notwendig. Durch die modellbasierte Entwicklung der Motorcontroller sind die Änderungen mit einem verhältnismäßig geringen Zeitaufwand realisierbar.

Die Software wird durch einige Sicherheitsfunktionen sowie Statusmeldungen und Freigaben ergänzt. Jeder Motorcontroller sendet zyklisch ein Heartbeat-Signal (FMEA ID 4.5). Andere CAN-Teilnehmer können anhand dieses Signals den korrekten Betrieb des Controllers erkennen. Wird ein verfälschtes bzw. kein Heartbeat-Signal empfangen, befindet sich der jeweilige Motorcontroller in einem nicht definierten und somit unsicheren Zustand. In diesem Fall wird eine Notbremsung durch die verbaute Sicherheitssteuerung eingeleitet. Zusätzlich sendet jeder Controller eine entsprechende Meldung bei Stillstand seiner Motoren. Dies ermöglicht ein automatisches Aktivieren der Feststellbremse, ohne Eingriff der Hauptsteuerung oder des Anwenders.

³¹EntwicklungsPlattform Ortsfrequenzfilter-Sensor

2.5.3.5 Sicherheitssteuerung

Aus der Sicherheitsanalyse geht ein sehr hohes Gefahrenpotential durch das Fahrzeug hervor (Abschnitt 2.2). Kritisch zeigt sich hier vor allem das autonome Fahren in Gebieten mit hohem Menschenaufkommen in Kombination mit dem Vorhandensein einer Treppe. Der Einsatz einer Sicherheits-SPS³² minimiert das Restrisiko.

Mit Hilfe von Abbildung 2.29 kann durch einsetzen der Parameter S2, F2 und P2 der erforderliche Performance Level PL_r bestimmt werden. [108]

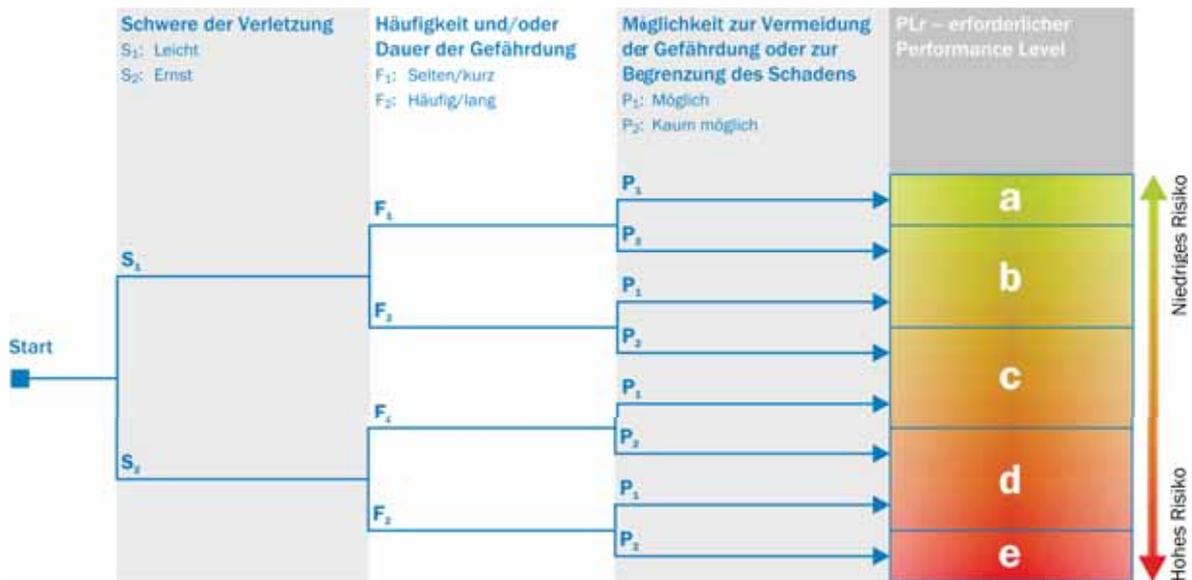


Abbildung 2.29: Erforderlicher Performance Level (PL_r) gemäß ISO 13849-1

³²Speicherprogrammierbare Steuerung

Mit Hilfe von Abbildung 2.30 kann durch einsetzen der Parameter S=4, F=5, W=5 und P=5 der erforderliche Sicherheits-IntegritätsLevel SIL³³ bestimmt werden. [108]

Auswirkungen	Schadensausmaß S	Klasse K = F + W + P				
		4	5-7	8-10	11-13	14-15
Tod, Verlust von Auge oder Arm	4	SIL2	SIL2	SIL2	SIL3	SIL3
Permanent, Verlust von Fingern	3			SIL1	SIL2	SIL3
Reversibel, medizinische Behandlung	2				SIL1	SIL2
Reversibel, Erste Hilfe	1					SIL1

Häufigkeit ³¹ des Gefährdungsereignisses F		Eintrittswahrscheinlichkeit des Gefährdungsereignisses W		Möglichkeit zur Vermeidung des Gefährdungsereignisses P	
F ≥ 1 × pro Stunde	5	Häufig	5		
1 × pro Stunde > F ≥ 1 × pro Tag	5	Wahrscheinlich	4		
1 × pro Tag > F ≥ 1 × in 2 Wochen	4	Möglich	3	Unmöglich	5
1 × in 2 Wochen > F ≥ 1 × pro Jahr	3	Selten	2	Möglich	3
1 × pro Jahr > F	2	Vernachlässigbar	1	Wahrscheinlich	1

Abbildung 2.30: Erforderlicher SIL gemäß IEC 62061

Verwendet wird eine Sicherheits-SPS der Firma SICK AG. Die Flexi Soft genügt den Anforderungen nach PLe und SIL3 und verfügt auf Grund dessen über eine hohe Ausfallsicherheit (Tabelle 2.7 und 2.8). [111]

SIL	Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls bei Anforderung der Sicherheitsfunktion (PFD _{avg} ³⁴)
4	$\geq 10^{-5} \text{ bis } < 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4} \text{ bis } < 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3} \text{ bis } < 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2} \text{ bis } < 10^{-1}$

Tabelle 2.7: Sicherheits-Integritätslevel - Grenzwerte für Mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls [39]

³³Sicherheits-IntegritätsLevel

SIL	Mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls der Sicherheitsfunktion (PFH ³⁵)
4	$\geq 10^{-9} \text{ bis } < 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8} \text{ bis } < 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7} \text{ bis } < 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6} \text{ bis } < 10^{-5}$

Tabelle 2.8: Sicherheits-Integritätslevel- Grenzwerte für Mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls [39]

Die Sicherheit der Steuerung entspricht dem Performance Level PLe, welches das höchste Level darstellt und eine hohe Zuverlässigkeit verspricht. Programmiert wird die *Flexi Soft* über die kostenlose Software *Flexi Soft Designer 1.8.0*. Die Verwendung dieser Sicherheitssteuerung hat einige Vorteile. Sie ist modular aufgebaut, also durch weitere Module erweiterbar. Es stehen verschiedene Module zur Verfügung, für weitere Digitale Ein- und Ausgänge oder die Anbindung an CAN, Ethernet oder Profinet. Die ausgewählte Konfiguration stellt sich wie folgt zusammen:

Systemstecker	FX3-MPL000001 [105]
CPU	FX3-CPU000000 [104]
digitale Ein- und Ausgänge	FX3-XTIO84002 [107]
digitale Eingänge	FX3-XTDI80002 [106]
CAN-Gateway	FX3-GCAN00000 [103]
Sicherheitsschaltgerät	UE10-3OS2D0 [112]

Tabelle 2.9: Flexi Soft Module

Insgesamt stehen somit 32 Eingänge, 12 Ausgänge und eine Kommunikation mit dem CAN-Netzwerk zur Verfügung. Die grafische Programmierung der Sicherheitssteuerung erfolgt im *Flexi Soft Designer* und die Übertragung der Software über eine serielle Schnittstelle. Die Steuerung kann somit den aktuellen Status ihrer Eingänge versenden oder Signale aus dem Netzwerk empfangen und dementsprechend reagieren. Bei der CAN-Kommunikation ist jedoch zu beachten, dass diese nicht den gleichen Sicherheitsstandard wie der Rest der Steuerung erfüllt. Um den automatischen Programmstart nach Hochfahren der Steuerung zu ermöglichen, muss das erstellte Programm zuvor durch den Programmierer verifiziert werden. Die Konfiguration des CAN-Gateways erfolgt entweder per EDS³⁶-Datei in *CoDeSys* oder direkt über CAN. [103]

³⁶Electronic Data Sheet

Die Sicherheits-SPS verwaltet sowohl Sensoren als auch Aktoren:

Sensoren:	Aktoren:
8 x Reflexions-Lichttaster	Widerstandsbremse
Vitector Schaltleisten-Auswerteeinheit	mechanische Feststellbremse
Über- / Unterspannungsschutzeinrichtung	Signal- /Warnleuchten
3 x Nothalt-Schalter	
Betriebsmodi-Wahlschalter	
Start-/Stopp-/Reset-Taster	
Endschalter (Wartungs-Tür, -Klappe)	
Feststellbremse Relais-Kontrolle	

Tabelle 2.10: Flexi Soft Ein/Ausgänge

Die Sensoren sind drahtbruchsicher konfiguriert, so dass auch ein defekter oder nicht angeschlossener Sensor zur Notbremsung des Fahrzeugs führt. Durch den Einsatz einer Sicherheitssteuerung können diese Risiken auf ein Minimum reduziert werden. Jede Freigabe der Widerstands- bzw. mechanischen Bremse erfolgt über die verbaute Sicherheits-SPS.



Abbildung 2.31: SICK Sicherheitssteuerung (Flexi Soft) [102]

2.5.3.6 Sensor-Erweiterungs-Platine

Wie in Abschnitt 2.5.4.4 erläutert, wird das Fahrzeug mit insgesamt 20 Ultraschallsensoren ausgestattet. Zur Auswertung aller Ultraschallsensoren werden somit 40 digitale Ein- bzw. Ausgänge benötigt. Eine Auswertung durch die Sicherheits-SPS wäre wünschenswert, wäre jedoch auf Grund der großen Anzahl an benötigten IO³⁷-Erweiterungen sehr kostspielig, würde sehr viel Bauraum einnehmen und ist durch den eingeschränkten Funktionsumfang der SPS nicht möglich. Von einer Auswertung durch die Schnittstellenerweiterung (RPI) wird abgesehen. Durch die Länge der Signal-Leitungen zwischen Sensor und Auswertung, könnte es zu Störungen und somit Fehlern bei der Auswertung kommen. Des Weiteren ist bei der Verwendung einer zentralen Steuerungseinheit zur Auswertung der Ultraschallsensoren ein sehr großer Verdrahtungsaufwand von Nöten.

Um eine korrekte Auswertung der Ultraschallsensoren ermöglichen zu können, wird eine **Sensor-Erweiterungs-Platine** und die dazugehörige Software entwickelt.

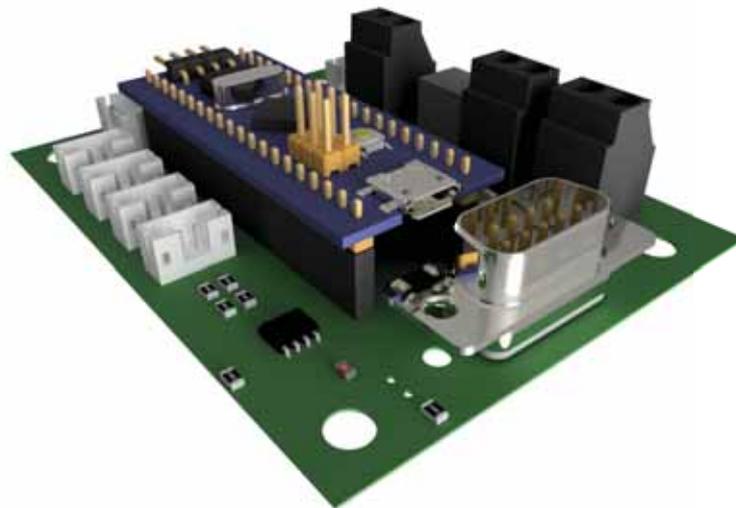


Abbildung 2.32: Sensor-Erweiterungs-Platine

Insgesamt werden 4 Platinen eingesetzt, welche jeweils 8 Ultraschallsensoren auswerten können. Der Einsatz von mehreren Platinen ermöglicht eine geringe Entfernung zwischen Sensor und der SEP³⁸. Des Weiteren können die freien Anschlüsse zur zukünftigen Erweiterung des Fahrzeugs durch zusätzliche Sensorik genutzt werden. Es wird in jeder Ecke des Fahrzeugs eine SEP positioniert, wodurch der Verdrahtungsaufwand kleiner ist, im Vergleich zur Verdrahtung mit einer zentral angeordneten Steuerungseinheit. Neben der Ultraschall-Auswertung stellt die Platine noch weitere Funktionen bereit.

³⁷Input-Output

³⁸Sensor-Erweiterungs-Platine

Die Platine wird so entworfen, dass anstelle der Ultraschallsensoren auch die Hel-
ligkeitssensoren (Abschnitt 2.5.4.7) angeschlossen und abgefragt werden können. Sie
ermöglicht das Ein- bzw. Ausschalten eines Linienlasers (Abschnitt 2.5.5.4) (FMEA ID
2.1), das Messen der Batteriespannung (Anforderung ANF_14) und das Auswerten ei-
nes in Abschnitt 2.5.4.6 erläuterten Infrarot-Abstandssensors, welcher zur Erkennung
einer zu schweren Beladung eingesetzt wird (Anforderung ANF_21, FMEA ID 3.1).

Die Platine basiert auf einem Mikrocontroller der STM32-F1-Familie. Er bietet eine
ausreichende Anzahl an GPIO-Pins und die für den Anwendungsfall notwendige ADC-
und I²C-Schnittstelle.

Die CAN-Hardware des Controllers ermöglicht, in Verbindung mit einem Transceiver,
eine Integration in das CAN-Netzwerk des Fahrzeugs. Über DIP³⁹-Schalter können
bis zu 8 Platinen im CAN-Netzwerk adressiert werden. Jede Platine zeigt ihre Adres-
sierung im CAN-Netzwerk, durch das rhythmische Blinken einer Status LED⁴⁰, an.
Ein dreifaches Aufblinken der LED, gefolgt von einer Pause, signalisiert beispielsweise,
dass es sich um die dritte Platine im Netzwerk handelt.

Zusammen mit der Möglichkeit des optionalen Zuschaltens eines CAN-Endwiderstands
bzw. der busseitigen 5V-Spannungsversorgung (welche zur Kommunikation mit dem
MCM, Abschnitt 2.5.3.4, notwendig ist), ist eine einfache Erweiterung des Fahrzeugs
durch zusätzliche Platinen möglich. Die Platine ist auf eine Versorgungsspannung von
5V-DC ausgelegt und durch eine Schmelzsicherung abgesichert.

Um eine gegenseitige Störung der Ultraschallsensoren zu vermeiden, erfolgt die Mess-
werterfassung erst, nachdem diese über das CAN-Netzwerk angefordert wurde. Nach
Empfang dieses Trigger-Signals werden die Sensoren nacheinander abgefragt. Die
Messung der Batteriespannung erfolgt durch den internen ADC des Mikrocontrollers,
welcher über eine Auflösung von 12 Bit verfügt. Die Batteriespannung wird vor der
Analog-Digital-Wandlung durch einen Spannungsteiler um den Faktor $\frac{3}{28}$ verringert.
Die gesamte Kommunikation mit der Platine erfolgt über das CAN-Netzwerk. Alle von
der Platine erfassten Messwerte werden als Rohwerte übertragen, sodass Änderungen
der Auswertung in der Hauptsteuerung, ohne Anpassungen der Platinen-Software,
möglich sind.

³⁹Dual In-line Package

⁴⁰Light-Emitting Diode

2.5.3.7 CAN Kommunikation

Die Sicherheit des ALFs hängt von mehreren Steuerungsgeräten ab. Deshalb muss jede Steuerung erfassen können, ob die anderen Steuerungsgeräte noch aktiv sind. Zu diesem Zweck senden die Hauptsteuerung, die Sicherheitssteuerung und die MCMs über das CAN-Netzwerk einen Heartbeat (FMEA ID 4.5). Der Zustand eines Bits wird in einem 250ms-Takt gewechselt, so kann die Aktivität der anderen Steuerungen überprüft werden.

Sämtliche CAN-Nachrichten der einzelnen Teilnehmer sind in den folgenden Tabellen aufgeführt. Die Periodendauer T gibt an, in welchem zeitlichen Abstand die jeweilige Nachricht periodisch gesendet oder empfangen wird. In der Spalte S/E wird angegeben, ob das jeweilige Gerät diese Nachricht empfängt oder sendet (S = wird gesendet, E = wird empfangen).

Ident	Name	T	S/E	Byte	Bit	Beschreibung				
00h	NMT		E		0	OP NMT ⁴¹ Operation				
					1	N CANopen Adresse (1)				
80h	SYNC		E	-	-	Synchronisation				
181h	TxPDO1	Async	S	4	0	S2 Start Taster				
					1	S3 Stopp Taster				
					2	S4 Reset Taster				
					3	S1 Anwendermodus (Admin)				
					4	S1 Anwendermodus (Unsafe)				
					5	S1 Anwendermodus (User)				
					6	F2 Über-/Unterspannungsschutz				
				5	0	P1 PowerProx Treppenerkennung 1				
					1	P2 PowerProx Treppenerkennung 2				
					2	P3 PowerProx Treppenerkennung 3				
					3	P4 PowerProx Treppenerkennung 4				
					4	P5 PowerProx Treppenerkennung 5				
					5	P6 PowerProx Treppenerkennung 6				
					6	P7 PowerProx Treppenerkennung 7				
					7	P8 PowerProx Treppenerkennung 8				
				6	0	S5-S7 Not-Halt-Taster				
					2	K16 PC Spannung 12V				
					4	B1 Endschalter Wartungsklappe				
					5	B2 Endschalter Tür				
				7	5	K14 Vitector Schaltleisten				
					6	UE10.Y2 Relaiskontrolle				
				381h	TxPDO3	Async	S	1	0	H2 Start Taster LED
									1	H3 Stopp Taster LED
									2	H4 Reset Taster LED
									3	H5-H7 Nothalt-Schalter LEDs
								2	1	H1 Alarm LED
									2	K2-K13 Widerstandsbremse Relais
									3	K14 Quittieren der Schaltleisten
3	0	Hauptrelais K1								
	1	K15 Halterelais für Hauptrelais K0								
	2	Einschaltbefehl für PC-Netzteil								
	3	UE10.B1/B3 Feststellbremse								

Tabelle 2.11: CAN-Tabelle 1/2 der Flexi Soft

⁴¹Network Management

Ident	Funktion	T ⁴²	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
481h	TxPDO4	Async	S	4	0	Treppen vorne erkannt
					1	Treppen rechts erkannt
					2	Treppen hinten erkannt
					3	Treppen links erkannt
				5	0	Das ALF ist eingeschaltet
					1	Der Admin-Modus ist ausgewählt
					2	Der User-Modus ist ausgewählt
					3	Der Hand-Modus ist ausgewählt
				6	4	Quittierung ist möglich
					0	Heartbeat des PCs ist korrekt
					1	Heartbeat des MCMs vorne korrekt
					2	Heartbeat des MCMs hinten korrekt
					3	UE10 Relaisfehler Feststellbremse
				7	4	Vitector Schaltleisten ausgelöst
					0	Heartbeat der Flexi Soft
				201h	RxPDO1	500 ms
0	Heartbeat des PCs					
1	Bremse deaktivieren					
301h	RxPDO2	500 ms	E	4	2	MCMs neustarten
					0	MCM vorne CAN Error
					1	MCM vorne Stillstand
					2	MCM vorne gewollter Stillstand
401h	RxPDO3	500 ms	E	4	3	Heartbeat des vorderen MCM
					0	MCM hinten CAN Error
					1	MCM hinten Stillstand
					2	MCM hinten gewollter Stillstand
					3	Heartbeat des hinteren MCM

Tabelle 2.12: CAN-Tabelle 2/2 der Flexi Soft

⁴²T=Periodendauer

Ident	Funktion	T	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
102h	n_{\max}	10 ms	E	0-1		maximale Drehzahl Motor 1+2
101h	$M1_{\text{soll}}$	10 ms	E	0-1		Soll-Drehmoment Motor 1
103h	$n1_{\text{ist}}$	10 ms	S	0-1		Ist-Drehzahl Motor 1
104h	temp1	1000 ms	E	0		Temperatur Leistungselekt. 1
111h	$M2_{\text{soll}}$	10 ms	E	0-1		Soll-Drehmoment Motor 2
113h	$n2_{\text{ist}}$	10 ms	S	0-1		Ist-Drehzahl Motor 2
114h	temp2	1000 ms	E	0		Temperatur Leistungselekt. 2
301h	Flags	500 ms	E	4	0	MCM CAN Error
					1	Stillstand
					2	angeforderter Stillstand
					3	Heartbeat

Tabelle 2.13: CAN-Tabelle des MCMs vorne

Ident	Funktion	T	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
102h	n_{\max}	10 ms	E	0-1		maximale Drehzahl Motor 1+2
121h	$M1_{\text{soll}}$	10 ms	E	0-1		Soll-Drehmoment Motor 1
123h	$n1_{\text{ist}}$	10 ms	S	0-1		Ist-Drehzahl Motor 1
124h	temp1	1000 ms	E	0		Temperatur Leistungselekt. 1
131h	$M2_{\text{soll}}$	10 ms	E	0-1		Soll-Drehmoment Motor 2
133h	$n2_{\text{ist}}$	10 ms	S	0-1		Ist-Drehzahl Motor 2
134h	temp2	1000 ms	E	0		Temperatur Leistungselekt. 2
401h	Flags	500 ms	E	4	0	MCM CAN Error
					1	Stillstand
					2	angeforderter Stillstand
					3	Heartbeat

Tabelle 2.14: CAN-Tabelle des MCMs hinten

Ident	Funktion	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
500h	Laser	E	0	0	Laser aktivieren/deaktivieren
501h	Messung	E	0		Anforderung Messwerte
502h	Ultra1	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 1
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 2
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 3
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 4
503h	Ultra2	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 5
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 6
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 7
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 8
504h	Beladungserkennung	S	0-1		Messwert Infrarotsensor
505h	Spannung	S	0-1		Messwert Spannungsmessung

Tabelle 2.15: CAN-Tabelle der SEP1 vorne links

Ident	Funktion	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
500h	Laser	E	0	0	Laser aktivieren/deaktivieren
507h	Messung	E	0		Anforderung Messwerte
808h	Ultra1	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 1
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 2
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 3
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 4
509h	Ultra2	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 5
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 6
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 7
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 8
50Ah	Beladungserkennung	S	0-1		Messwert Infrarotsensor
50Bh	Spannung	S	0-1		Messwert Spannungsmessung

Tabelle 2.16: CAN-Tabelle der SEP2 vorne rechts

Ident	Funktion	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
500h	Laser	E	0	0	Laser aktivieren/deaktivieren
50Dh	Messung	E	0		Anforderung Messwerte
50Eh	Ultra1	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 1
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 2
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 3
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 4
50Fh	Ultra2	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 5
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 6
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 7
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 8
510h	Beladungserkennung	S	0-1		Messwert Infrarotsensor
511h	Spannung	S	0-1		Messwert Spannungsmessung

Tabelle 2.17: CAN-Tabelle der SEP3 hinten rechts

Ident	Funktion	S/E	Byte	Bit	Beschreibung
500h	Laser	E	0	0	Laser aktivieren/deaktivieren
513h	Messung	E	0		Anforderung Messwerte
514h	Ultra1	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 1
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 2
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 3
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 4
515h	Ultra2	S	0-1		Messwert Ultraschallsensor 5
			2-3		Messwert Ultraschallsensor 6
			4-5		Messwert Ultraschallsensor 7
			6-7		Messwert Ultraschallsensor 8
516h	Beladungserkennung	S	0-1		Messwert Infrarotsensor
517h	Spannung	S	0-1		Messwert Spannungsmessung

Tabelle 2.18: CAN-Tabelle der SEP4 hinten links

2.5.4 Sensorik

Um ein autonomes Fahren des Fahrzeugs und einen sicheren Betrieb zu ermöglichen, müssen die folgenden Funktionen erfüllt werden:

- Kollisionsvermeidung (Anforderung ANF_20)
- Treppenerkennung (Anforderung ANF_20)
- Navigation (Anforderung ANF_20)
- Neigungsbestimmung (Anforderung ANF_27)
- Erkennung eines ungewollten Drifts, wie in Abschnitt 2.5.2.2 erläutert
- Erweiterung der Geschwindigkeitsbestimmung
- Beladungserkennung / Überbeladungserkennung (Anforderung ANF_21)

Tabelle 2.19 ordnet diese Funktionen den in dieser Arbeit ausgewählten Lösungen zu.

Sensor	Kollisionsvermeidung	Treppenerkennung	Navigation	Neigungsbestimmung	Drifterkennung	Geschwindigkeitsbestimmung	Beladungserkennung
2D-LiDAR	X		X				
Kameras	X	X	X				
Reflexions-Lichttaster		X					
Ultraschallsensoren	X						
Schaltleisten	X						
Infrarot-Abstandssensoren							X
Helligkeitssensoren							X
Beschleunigungssensor				X	X		

Tabelle 2.19: Funktionsverteilung Sensorik

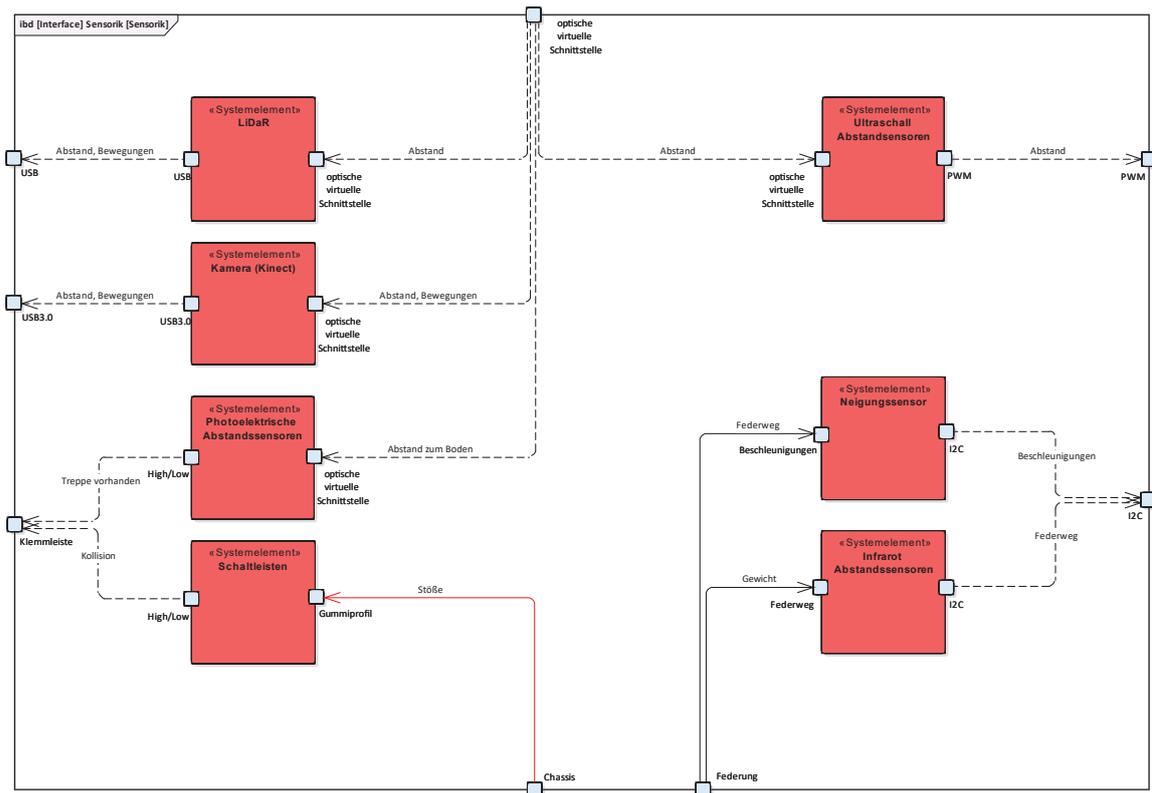


Abbildung 2.33: Wirkstruktur der Sensorik

2.5.4.1 2D-LIDAR

Zur Erkennung der Umgebung wird ein rotierender 360°-LIDAR⁴³-Sensor *RPLIDAR A2* [98] der Firma *SLAMTEC* eingesetzt. Der Sensor wird per USB mit Spannung versorgt, angesteuert und ausgelesen. Ein vom Hersteller bereitgestellter ROS-Node [77] ermöglicht die einfache Integration in ein bereits vorhandenes ROS-Netzwerk (Abschnitt 2.5.3.3). Durch einen SLAM⁴⁴-Algorithmus ist zudem eine zeitgleiche Kartografierung der Umgebung und die Bestimmung der Fahrzeug-Position möglich. [117]

⁴³Light Detection And Ranging

⁴⁴Simultaneous Localization And Mapping



Abbildung 2.34: RPLIDAR A2

Da sich der *RPLIDAR A2* um 360° dreht, erfasst er Hindernisse und Wände auf der Montagehöhe von ca. 1 m (Anforderung ANF_20, FMEA ID 2.1, 2.2). Andere 2D-LIDAR-Sensoren erfüllen den selben Zweck, beispielsweise ein Sensor der *TiM*-Serie der *SICK AG*. Ausgewählt wird der *RPLIDAR A2*, weil dieser vergleichsweise günstig ist, eine Anbindung per USB-Schnittstelle ermöglicht und ein offizieller ROS-Node des Herstellers verfügbar ist. Während der Inbetriebnahme fällt auf, dass der Sensor gelegentlich Anlaufschwierigkeiten aufweist. Falls dies während des Betriebs zu Problemen führen sollte, kann versucht werden dies durch den Anschluss der optionalen 5V-Spannungsversorgung des USB-Adapters zu beheben. Tabelle 2.20 zeigt die Kenndaten des *RPLIDAR A2*.

Distanz:	0,15 m - 8 m
Sichtfeld:	360°
Auflösung (Distanz):	$< 1\%$
Auflösung (Winkel):	$0,45^\circ - 1,35^\circ$
Abtastrate:	5 Hz - 15 Hz
Wellenlänge:	~ 785 nm
Laserklasse:	1

Tabelle 2.20: Kenndaten des RPLIDAR A2

Im Februar 2018 ist die neue Version *RPLIDAR A3* veröffentlicht worden. Diese Version ermöglicht Messungen über eine höhere Distanz, verfügt eine über höhere Abtastrate und einen *Outdoor Mode*. Dieser *Outdoor Mode* bietet eine höhere Zuverlässigkeit bei Tageslicht, wobei eine geringere Abtastrate akzeptiert werden muss. Die Maße des *A3* sind baugleich zum *A2*, jedoch ist die 5V-Spannungsversorgung des USB-Adapters notwendig. [99, 100]

2.5.4.2 Kameras

Zur Erfassung der Umgebung im Mittel- und Fernbereich wird das Fahrzeug mit Kameras ausgestattet (Anforderung ANF_20). Anhand der aufgenommenen Bilddaten kann eine Kartografierung und dadurch die Navigation und Zielfindung realisiert werden. Konkret werden Kameras vom Typ *Microsoft Kinect v2* [40] verwendet. Ursprünglich wurden *Kinect*-Sensoren zur Steuerung von Videospielen entwickelt. *Kinect*-Sensoren ermöglichen die Erkennung von Gestik und Mimik des Spielers und so die Interaktion mit Gegenständen im Spiel oder die Steuerung des virtuellen Avatars. Durch die vielseitigen Möglichkeiten des Sensors wird der *Kinect*-Sensor jedoch auch von vielen Entwicklern in der Forschung und Entwicklung verwendet.



Abbildung 2.35: Microsoft Kinect v2

Der Sensor vereint drei verschiedene optische Sensoren mit den folgenden Kenndaten:

Sensoren-Typ	Auflösung in Pixel xy	Blickfeld in ° xy	maximale Abtastrate in Hz
Farbkamera:	1920x1080	70x60	30
Tiefensensor:	512x424	70x60	15-30
Infrarotsensor:	512x424	70x60	30

Tabelle 2.21: Microsoft Kinect v2 - Optische Sensoren

Der Tiefen- und der Infrarotsensor ermöglicht dem *Kinect*-Sensor beispielsweise das Erfassen der Umgebung bei Dunkelheit oder die Bestimmung des Abstands zu Objekten (FMEA ID 2.1, 2.2, 2.3). Die Reichweite des Tiefensensors beträgt 0,5m bis 5m [53]. Des Weiteren verfügt *Kinect* über eine Anordnung von mehreren Mikrofonen, sodass z.B. eine Spracherkennung möglich ist. Durch die Anordnung der Mikrofone ist es möglich, ein Geräusch bzw. akustisches Signal räumlich zu lokalisieren [58]. Konkret wird sich für Sensoren der zweiten *Kinect*-Generation entschieden, da diese einige Verbesserungen zur Vorgängerversion aufweisen (z.B höhere Auflösungen

und Abstraten der optischen Sensoren) [40]. Zu beachten ist jedoch, dass durch die verbesserten Sensoren der zweiten Version eine deutlich erhöhte Datenmenge anfällt, sodass zwingend ein Betrieb über USB3.0 notwendig ist. Für die Anbindung an eine USB3.0-Schnittstelle ist ein Adapter notwendig. [40]

Durch die im Abschnitt 2.5.2.2 erläuterten Räder ist ein omnidirektionales Verfahren des ALFs möglich, in der Praxis sollte dies lediglich zu Demonstrationszwecken, für kurze Kurvenfahrten oder für Positionskorrekturmanöver angewendet werden. Mit der maximalen Geschwindigkeit über längere Zeit sollte entweder in Richtung der Ladefläche oder in die entgegengesetzte Richtung verfahren werden. Deshalb wurden jeweils in diese Richtungen ein *Kinect-Sensor* angebracht. In Abbildung 2.36 wird das Sichtfeld der *Kinect-Sensoren* bezogen auf das ALF dargestellt.

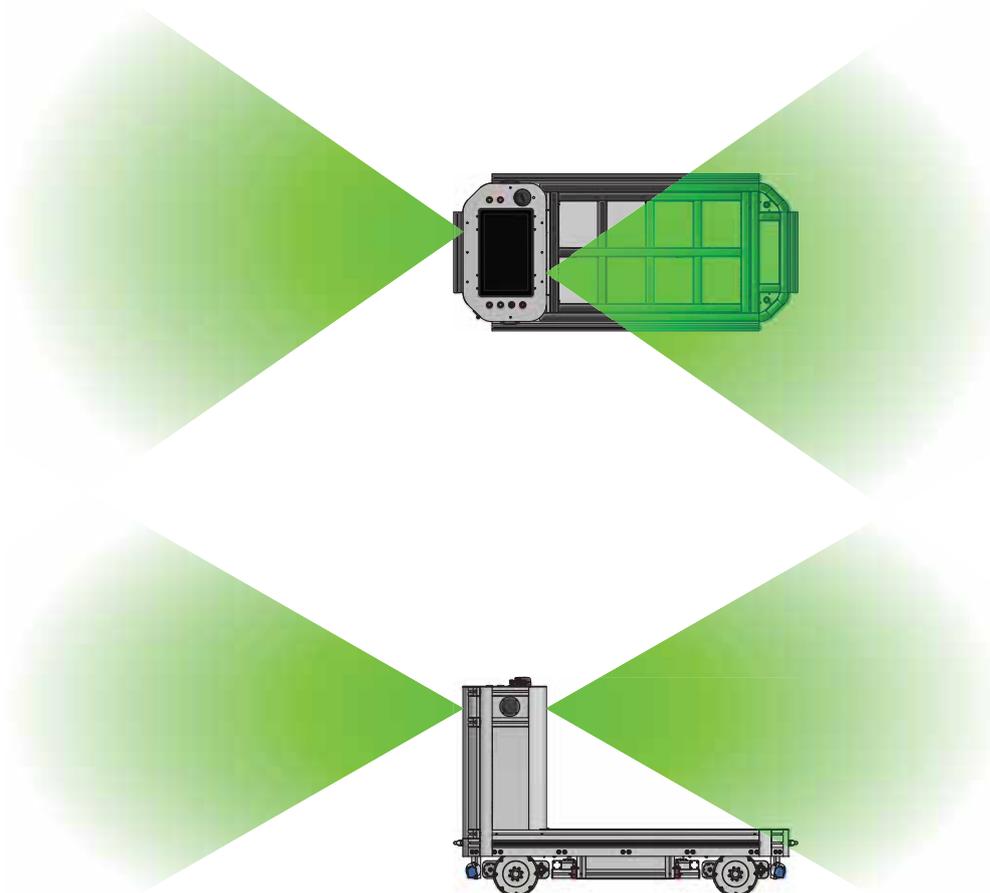


Abbildung 2.36: Kerasichtfeld

Bei der Beladung des ALFs muss darauf geachtet werden, dass sich diese im Erfassungsbereich des *Kinect*-Sensors befinden kann. Dies kann entweder vermieden oder bei der Auswertung der Messdaten berücksichtigt werden (FMEA ID 2.4, 3.2). Des Weiteren muss bei der Auswertung darauf geachtet werden, dass bei beiden Sensoren innerhalb eines Bereichs in der Nähe des ALFs, Objekte nicht erkannt werden können.

2.5.4.3 Reflexions-Lichttaster

Eine Treppenerkennung (FMEA ID 2.3) lässt sich durch die Tiefenwahrnehmung der *Kinect*-Sensoren realisieren (Abschnitt 2.5.4.2), welche jedoch nicht als sicher eingestuft werden können. Es sind viele mögliche Fehlerursachen an Hard- und Software denkbar, die zu Fehlern und somit nicht Detektieren einer Treppe führen können. Die Betrachtung der Sensor-Sichtfelder (Abbildung 2.36) zeigt zudem, dass eine Treppe nur erkannt wird, wenn sie sich vor oder hinter dem Fahrzeug befindet. Da durch den Einsatz von Mecanum-Rädern (Abschnitt 2.5.2.2) ein omnidirektionales Fahren ermöglicht wird, ist eine seitliche Treppenerkennung zwingend notwendig. Ein Ergebnis der Risikoanalyse (Abschnitt 2.2) ist, dass von dieser Treppenerkennung Menschenleben abhängig sind, deshalb soll die Zuverlässigkeit der Treppenerkennung besonders hoch gestaltet werden.

Es werden Sensoren verwendet, welche mit der in Abschnitt 2.5.3.5 erläuterten Sicherheitssteuerung ausgewertet werden können. Einweg-Lichtschranken sind für diese Anwendung ungeeignet, da in diesem Fall Sender und Empfänger räumlich getrennt angeordnet werden müssen. Eine Unterbrechung des Lichtstrahls zwischen Sender und Empfänger führt zur Erkennung des Objekts. Um eine Treppe zu erkennen, ist es notwendig, dass Sender und Empfänger fest auf dem Fahrzeug montiert sind. Reflexions-Lichtschranken vereinen Sender und Empfänger in einem Gehäuse, jedoch benötigen diese einen Reflektor, um den Lichtstrahl vom Sender zum Empfänger zu lenken. Es wäre möglich, Treppen auf dem Einsatzgelände mit Hilfe von Reflektoren zu markieren und diese mit Reflexions-Lichtschranken zu erkennen. Jedoch wurde als Systemvoraussetzung aufgenommen, dass keine Veränderungen an der Umgebung vorgenommen werden müssen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten (siehe Anhang: Lastenheft). Eine Verschmutzung der Reflektoren könnte dazu führen, dass die Treppe nicht erkannt werden kann. Zusätzlich würde jedes reflektierende Hindernis innerhalb des Detektionsabstandes als Treppe erkannt werden, was eine Vollbremsung zur Folge hätte.

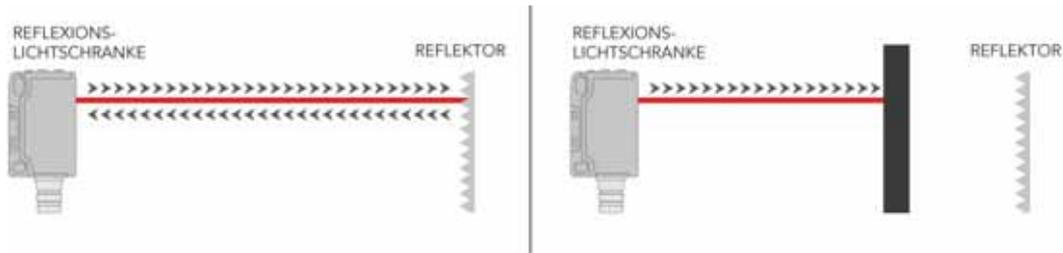


Abbildung 2.37: Konzept einer Reflexions-Lichtschranke [136]

Es werden Sensoren eingesetzt, welche den Abstand schräg zum Boden messen und so eine Treppe oder einen Vorsprung erkennen können. Dies ist mit Hilfe von Reflexions-Lichttastern, welche an den Seiten und dem Front- bzw. Heckbereich des Fahrzeugs montiert werden, möglich.



Abbildung 2.38: Treppenerkennung - Anordnung der Sensoren

Reflexions-Lichttaster benötigen keine Reflektoren, der Lichtstrahl wird von den Objekten selbst reflektiert. Es wird ein Sensor getestet, welcher auf dem Verfahren der Lichtlaufzeitmessung basiert. Der *DT35-B15551* [101] der Firma *SICK AG* erfasst jedoch Objekte mit einer dunklen oder stark reflektierenden Oberfläche nicht zuverlässig. Reflexions-Lichttaster mit Hintergrundausbldung bestimmen den Abstand zum Objekt nicht nur durch eine Laufzeitmessung des Lichtstrahls, sondern zusätzlich durch Triangulation. Signale von Objekten, die hinter der eingestellten Schaltabstandsebene liegen, werden ausgeblendet. [109]

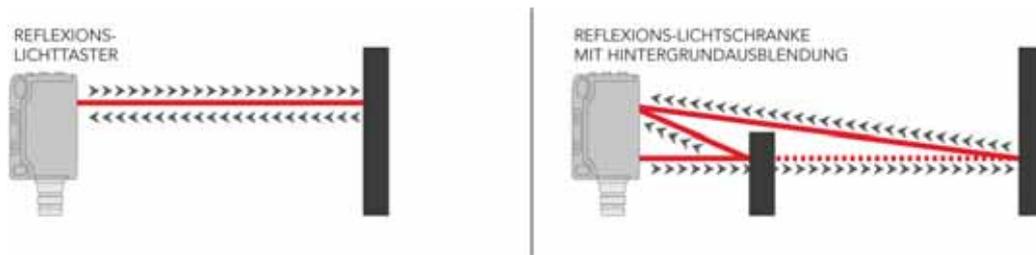


Abbildung 2.39: Konzept eines Reflexions-Lichtstasters [136]

Es werden Reflexions-Lichttaster *WTT12LC-B2563* [110] der Firma *SICK AG* eingesetzt. Der Sensor arbeitet mit einem für das menschliche Auge ungefährlichen Laser. Der sichtbare rote Laserpunkt erleichtert die korrekte Ausrichtung des jeweiligen Messpunkts. Der Sensor ermittelt den Abstand zu Objekten durch die Laufzeitmessung des ausgesendeten Laserstrahls. Zusätzlich beherrscht der Sensor das Verfahren der Hintergrundausblendung, was die Genauigkeit und Zuverlässigkeit erhöht. Durch eine Diffus-LED in Verbindung mit der von der *SICK AG* patentierten *SIRIC®-Technologie* wird eine Tiefenwahrnehmung ermöglicht und eine Detektions- und Fremdlichtsicherheit bei kleinen, transparenten oder spiegelnden Objekten sichergestellt [109]. Der Sensor bietet zwei digitale Schaltkanäle, welche unabhängig voneinander konfiguriert werden können. Die Konfiguration kann sowohl direkt am jeweiligen Sensor (per Taster), als auch über den Busanschluss *IO-Link* des Sensors erfolgen. Der verwendete Sensor bietet alle, für eine sichere Treppenerkennung notwendigen, Eigenschaften. Darüber hinaus kann die korrekte Funktion und Zuverlässigkeit des Sensors durch bereitgestellte Testmuster der *SICK AG* bestätigt werden. Ein Testmuster eines ähnlichen Sensors [101], ohne Hintergrundausblendung, verfügt über keine hohe Zuverlässigkeit. Besonders schwarze und reflektierende Objekten führen häufig zu Fehlern bei der Messung.



Abbildung 2.40: Reflexions-Lichttaster PowerProx WTT12LC-B2563 [110]

Reichweite:	5 cm - 3,8 m
Schaltfrequenz:	100 Hz
Distanzauflösung:	1 mm
Distanz-Genauigkeit:	typ. ± 15 mm
Wellenlänge:	658 nm
Laserklasse:	1

Tabelle 2.22: Kenndaten des Reflexions-Lichttaster

Das Einrichten eines Schwellwerts ermöglicht das Setzen eines digitalen Ausgangs auf logisch *LOW*, sobald er überschritten wird. Dieses Signal wird durch die Sicherheits-SPS (Abschnitt 2.5.3.5) ausgewertet, was einen drahtbruchsicheren Betrieb gewährleistet und komplett unabhängig von sonstiger Hard- und Software ist. Insgesamt werden 8 Sensoren eingesetzt, jeweils zwei Sensoren an Vorder-, Hinterseite und seitlich des Fahrzeugs. Die so erreichte Redundanz erhöht die Sicherheit zusätzlich (FMEA ID 2.3). Wird durch einen oder mehrere Sensoren ein Vorsprung bzw. eine Treppe erkannt, wird eine Notbremsung eingeleitet. Ziel dieser Notbremsung ist ein möglichst kurzer Bremsweg, es werden also sowohl Widerstands- als auch mechanische Bremse aktiviert. Über einen selbst entwickelten Adapter lässt sich der Detektionswinkel jedes Sensors stufenlos einstellen, sodass der Messpunkt frei verschiebbar ist. Dies ermöglicht die Definition eines nicht sicheren Bereichs entlang von Treppen oder Vorsprüngen (siehe Abbildung 2.41). Ein Befahren dieses Bereichs hat zwangsläufig eine Notbremsung zur Folge, welche durch die Sicherheitssteuerung eingeleitet wird. Ein gewolltes Fahren innerhalb des nicht sicheren Bereichs wird nicht ermöglicht. Das Fahrzeug kann jedoch innerhalb dieses Bereichs verschoben werden (siehe Abschnitt 2.5.5.7).



Abbildung 2.41: Sicherheitsbereiche - sicherer Bereich (grün), nicht sicherer Bereich (rot)

2.5.4.4 Ultraschall-Abstandssensoren

Ultraschallsensoren ermöglichen die Detektion von Objekten im Nahbereich (Anforderung ANF_20). Ultraschallsensoren arbeiten nach dem Prinzip der Laufzeitmessung und bestehen aus zwei Teilkomponenten: Einer Sende- und einer Empfangs-Einheit.



Abbildung 2.42: Ultraschallsensor SRF05

Die Sende-Einheit erzeugt ein, für das menschliche Ohr nicht wahrnehmbares, akustisches Signal, welches sich kegelförmig im Raum ausbreitet. Falls das Signal an einem Objekt reflektiert wird und auf die Empfangs-Einheit trifft, kann durch eine Messung der Zeitdifferenz, zwischen Senden und Empfangen, die Entfernung des Objekts bestimmt werden. Die Erkennbarkeit hängt stark vom Material und der Beschaffenheit der jeweiligen Objekte ab. So kann es bei schallabsorbierenden Materialien, wie Schaumstoff oder Styropor, zur Verfälschung der gemessenen Entfernung kommen. Des Weiteren können kleine Objekte oder spitze Winkel zwischen Objekt und Sensor zu Problemen bei der korrekten Abstandbestimmung führen. Der Einsatz mehrerer Sensoren kann zudem gegenseitige Störungen zu Folge haben. [96, 116]

Es soll ein möglichst geschlossener Messbereich um das Fahrzeug durch Ultraschallsensoren erfasst werden. Um dies zu erreichen, ist eine große Anzahl an Ultraschallsensoren und die entsprechende Platzierung erforderlich. Es werden Ultraschallsensoren vom Typ *SRF05* [19] eingesetzt (Detektionsdistanz 0,1 m bis 0,8 m). Der günstige Stückpreis und die geringen Ausmaße des Sensors ermöglichen den zahlreichen Einsatz am Fahrzeug. Insgesamt werden 20 Ultraschallsensoren rund um das Fahrzeug verbaut. Der so entstandene Messbereich stellt einen guten Kompromiss aus Anzahl der Sensoren und der Erkennbarkeit von Objekten in der Nähe des Fahrzeugs dar (Abbildung 2.43).

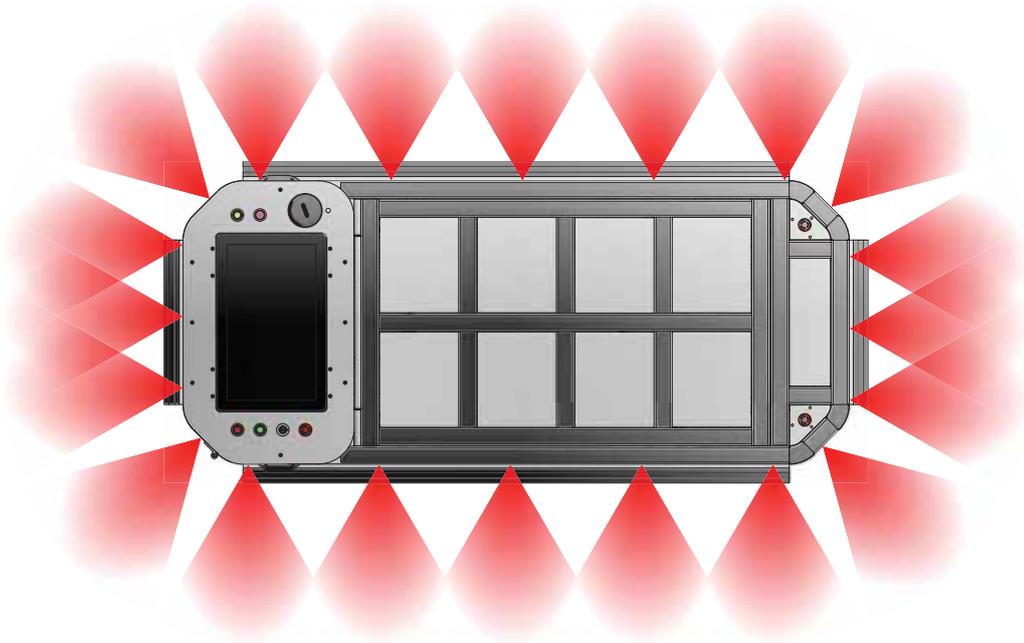


Abbildung 2.43: Messbereiche der Ultraschallsensoren

Der gewählte Sensor benötigt eine Spannungsversorgung von 5V Gleichspannung. Um einen Messvorgang zu starten, wird ein Sprung-Signal an den *Trigger-Eingang* des Ultraschallsensors gelegt. Der Sensor sendet nun 8 Ultraschallimpulse mit einer Frequenz von 40kHz. Die Impulslänge T des Signals am *Echo-Pin* gibt nun Aufschluss über die gemessene Entfernung x zum Objekt, welche wie folgt errechnet werden kann:

$$x = \frac{343 \text{ m/s} * T}{2}$$

Bei der Berechnung ist jedoch zu beachten, dass sich die angenommene Schallgeschwindigkeit von 343 m/s auf eine Umgebungstemperatur von 20°C bezieht. Eine Änderung der Temperatur kann zur Verfälschung der Messergebnisse führen. Die Auswertung der Sensoren erfolgt durch die im Rahmen dieser Abschlussarbeit erstellten SEPs (Abschnitt 2.5.3.6).

2.5.4.5 Schaltleisten

Schaltleisten werden vor allem bei automatischen Lager- oder Garagentoren eingesetzt. Schließt sich das Tor, so erkennt die an der Stoßkante des Tores montierte Schaltleiste den Kontakt mit einem Objekt bzw. Gegenstand und sendet ein Signal an die Torsteuerung, welche das Schließen des Tors stoppt. [35]

Schaltleisten bestehen im Wesentlichen aus vier Komponenten (Abbildung 2.44): Sender, Empfänger, einem Gummiprofil und einer Auswerteeinheit. Sender und Empfänger basieren meist auf optischen bzw. akustischen Messverfahren. An dem ALF werden optische Sensoren eingesetzt. Grund dafür ist vor allem die erhöhte Zuverlässigkeit. So ist beispielsweise auch bei leichter Beschädigung des Gummiprofils die Funktion der Schaltleiste gewährleistet. Bei Eindrücken des Gummiprofils wird das Signal zwischen Sender und Empfänger unterbrochen. [30, 31]



Abbildung 2.44: Komponenten einer Schaltleiste [35]

Insgesamt sind vier Schaltleisten [33, 34] der Firma *FRABA B.V.* am Fahrzeug montiert, die an einer Auswerteeinheit [32] angeschlossen sind. Die Schaltleisten befinden sich an der Vor- und Rückseite und jeweils seitlich am Fahrzeug (Abbildung 2.45). Da der unwirksame Endbereich der verwendeten Schaltleisten 60mm beträgt, ist eine zusätzliche Absicherung in den Ecken des Fahrzeugs platzbedingt nicht möglich [33].

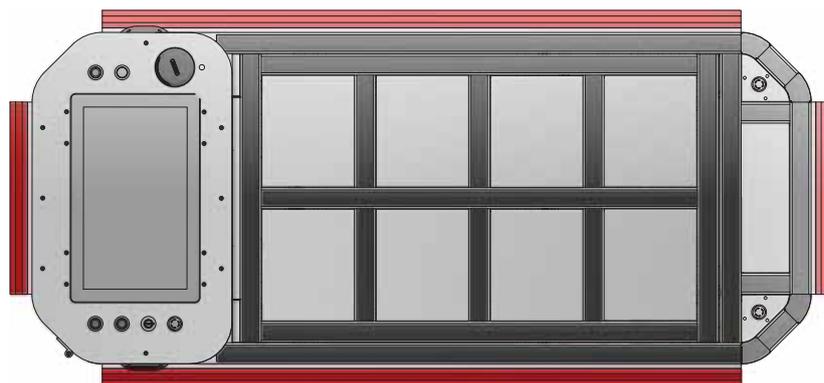


Abbildung 2.45: Platzierung der Schaltleisten

Kommt es zu einer Kollision und somit dem Eindringen einer Schaltleiste, wird das optische Signal zwischen Sender und Empfänger der jeweiligen Schaltleiste unterbrochen und ein Signal zur Auswerteeinheit des Schaltleistenverbunds getrennt. Die Auswerteeinheit liefert einen digitalen Ausgang der auf logisch *LOW* geschaltet wird, wenn eine Schaltleiste ihr Signal trennt. Dieser digitale Ausgang wird durch die Sicherheits-SPS (Abschnitt 2.5.3.5) ausgewertet, was einen drahtbruchsicheren Betrieb gewährleistet und komplett unabhängig von sonstiger Hard- und Software ist. In diesem Fall wird umgehend eine Vollbremsung eingeleitet, um weitere Schäden am Fahrzeug und dem Umfeld zu vermeiden. (FMEA ID 2.1, 2.2)

Falls es Personen nicht möglich ist einen der Nothalt-Schalter (Abschnitt 2.5.5.3) zu erreichen, können die Schaltleisten manuell betätigt werden (FMEA ID 4.3).

2.5.4.6 Infrarot-Abstandssensoren

Wie im Abschnitt 2.1 erläutert, ist es notwendig, eine Überschreitung der zulässigen Gewichtsbelastung des Fahrzeugs zu erkennen (siehe Anforderung ANF_3). Dies wird durch Infrarot-Abstandssensoren *VCNL4010* [134] der Firma *Vishay Electronic GmbH* realisiert. Der Sensor ist durch einen Winkel am Chassis des Fahrzeug montiert. Der Abstand zur Oberseite der Antriebseinheit wird gemessen. Anhand des gemessenen Abstands kann Rückschluss auf die Gewichtsbelastung an der jeweiligen Antriebseinheit gezogen werden. Es kann nun der jeweilige Federweg ermittelt und so Rückschlüsse auf die Beladung des Fahrzeugs getroffen werden. Wird eine oder mehrere Antriebseinheiten überlastet, kann entsprechend reagiert, das Fahrzeug gestoppt und der Anwender benachrichtigt werden. Zum Einsatz kommt hierzu eine Anschlussplatine der Firma *Adafruit* [3]. Das Auslesen der Sensoren erfolgt durch die in Abschnitt 2.5.3.6 erläuterte SEP.



Abbildung 2.46: Anschlussplatine des Infrarotsensors VCNL4010 [4]

Maximale Reichweite:	200 mm
Kommunikation über:	I ² C
Auflösung:	16 Bit
Wellenlänge:	890 nm

Tabelle 2.23: Kenndaten des VCNL4010

Der Abstandssensor verfügt über eine LED und eine Fotodiode, welche im infraroten Bereich arbeiten. Trifft das durch die LED gesendete Licht auf ein Objekt, wird es teilweise reflektiert und von der Infrarot-Fotodiode empfangen.

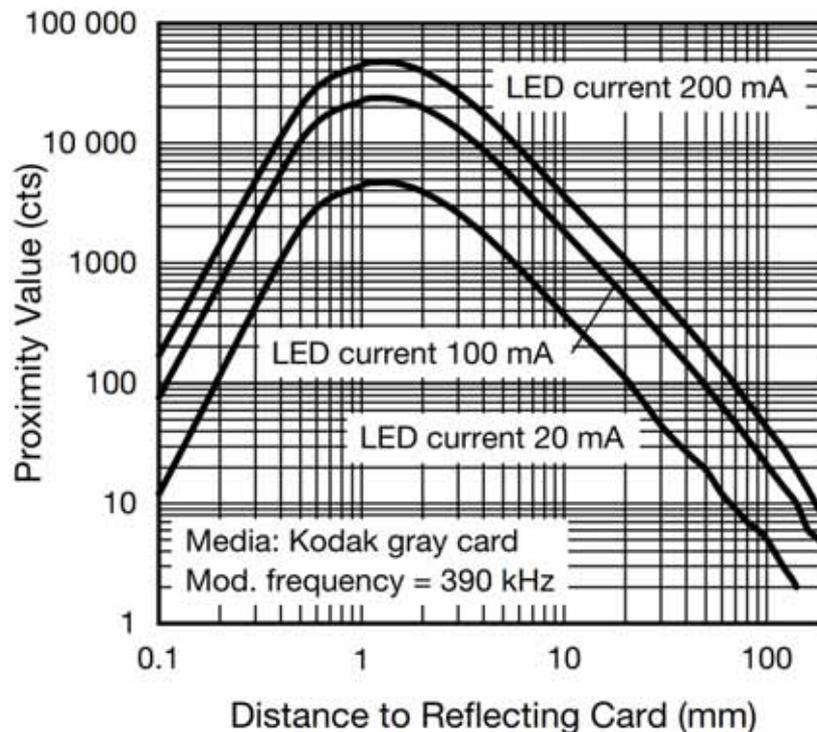


Abbildung 2.47: Kennlinie des VCNL4010

Durch eine interne Spannungsmessung können nun Rückschlüsse auf die Entfernung des Objekts getroffen werden. Die gemessene Spannung wird durch einen ADC digitalisiert und steht über den I²C-Bus zur Verfügung. Zu beachten ist hierbei, dass der Anteil des reflektierten Lichts von der Farbe und Beschaffenheit des jeweiligen Objekts abhängt. Die Leuchtkraft der Infrarot-LED lässt sich über den I²C-Bus konfigurieren. Durch Toleranzen der reflektierenden Oberflächen und Ungenauigkeiten bei der Montage ist der gemessene Abstand im unbeladenen Zustand nicht bei jeder Antriebseinheit gleich. Um diesen Umstand zu korrigieren, muss ein Nullabgleich im unbeladenen Zustand durchgeführt werden. Bei dem Nullabgleich sollte sich das ALF auf einem möglichst geraden und ebenen Untergrund befinden.

2.5.4.7 Helligkeitssensoren

Es werden Helligkeitssensoren vorgesehen, welche auf der Ladefläche des Fahrzeugs angebracht werden. Es wird der *ALS-PT19-315C/L177/TR8* [25] Umgebungslichtsensor verwendet. Für dieses Projekt wird eine fertige Anschlussplatine der Firma *Adafruit* [1] eingesetzt. Sie liefert eine analoge Spannung, welche Rückschlüsse auf die Helligkeit gibt.



Abbildung 2.48: Anschlussplatine des Helligkeitssensors ALS-PT19-315C/L177/TR8 [1]

Die Ladefläche des ALFs besteht unter anderem aus 8 rechteckigen U-Profilen, welche über eine mittige Durchgangsbohrung verfügen (Abbildung 2.49). Wird das Fahrzeug beladen, ändert sich der Lichteinfall durch die entsprechende Bohrung. Der Lichteinfall wird durch die an den Unterseiten der U-Profile angebrachte Helligkeitssensoren erfasst. Die gemessene Umgebungslichtstärke gibt Aufschluss darüber, ob sich ein Objekt auf der Ladefläche des Fahrzeugs befindet.

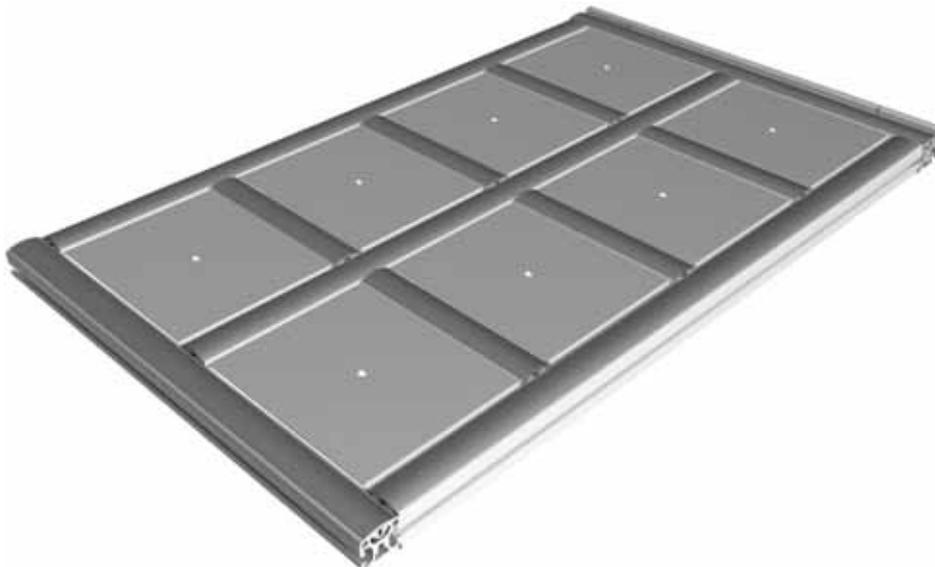


Abbildung 2.49: Ladefläche des Fahrzeugs

Wird eine Änderung der Beladung erkannt, kann eine Anweisung an den Anwender gesendet werden. Erst wenn der Anwender eine korrekte Befestigung der Beladung bestätigt hat, kann der autonome Fahrbetrieb gestartet werden (ANF_27). Zusätzlich kann ein Verrutschen der Last erkannt und das Fahrzeug gestoppt werden.

Bei der Auswertung der Sensoren muss beachtet werden, dass es zu Problemen beim Betrieb des Fahrzeugs kommen kann. Kleine Objekte, welche sich zwischen den Sensoren platziere lassen, führen zu keiner Änderung der Helligkeit und können nicht erkannt werden. Transparente Objekte, wie z.B. Plexiglas, sorgen für sehr kleine Helligkeitsänderungen und erschweren eine Erkennung zusätzlich. Des Weiteren kann der Wechsel zwischen heller und dunkler Umgebung als Änderung an der Beladung des Fahrzeug fehlinterpretiert werden.

2.5.4.8 Beschleunigungssensor

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit und der Fahrtrichtung des ALFs soll zusätzlich zu den in Abschnitt 2.5.2.3 besprochenen Hallsensoren der Beschleunigungssensor *LSM9DS1* [119] verwendet werden. Zusätzlich ist es dadurch möglich, die Neigung des Fahrzeugs zu bestimmen und den in Abschnitt 2.5.2.2 erläuterten Drift zu erkennen.

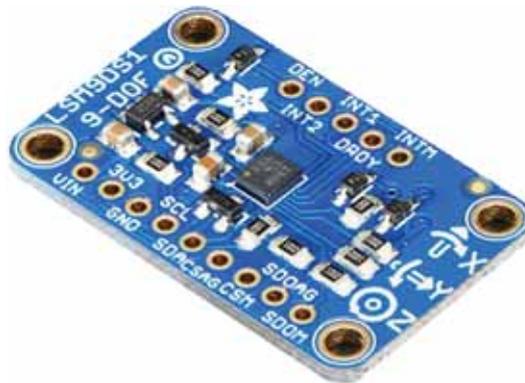


Abbildung 2.50: Beschleunigungssensor - LSM9DS1 [2]

Der Beschleunigungssensor verfügt über die folgenden Sensoren:

- dreidimensionaler Linearbeschleunigungssensor
- dreidimensionaler Winkelbeschleunigungssensor
- dreidimensionaler Magnetfeldsensor

Die Sensordaten können über I²C oder SPI ausgelesen werden. Für dieses Projekt wird eine fertige Anschlussplatine der Firma *Adafruit* verwendet. Auf dieser Anschlussplatine sind die erforderlichen Komponenten, wie beispielsweise Endstörkondensatoren und Widerstände, verbaut und die Anschlüsse zur Kommunikation und Spannungsversorgung herausgeführt. Dieser Sensor wurde ausgewählt, da es für diesen Sensor in dem *Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware* der Entwicklungsumgebung *Matlab* einen Funktionsblock gibt, welcher eine Konfiguration des Sensors und die Messwerte bereitstellt.

2.5.5 Mensch-Maschine-Interaktion

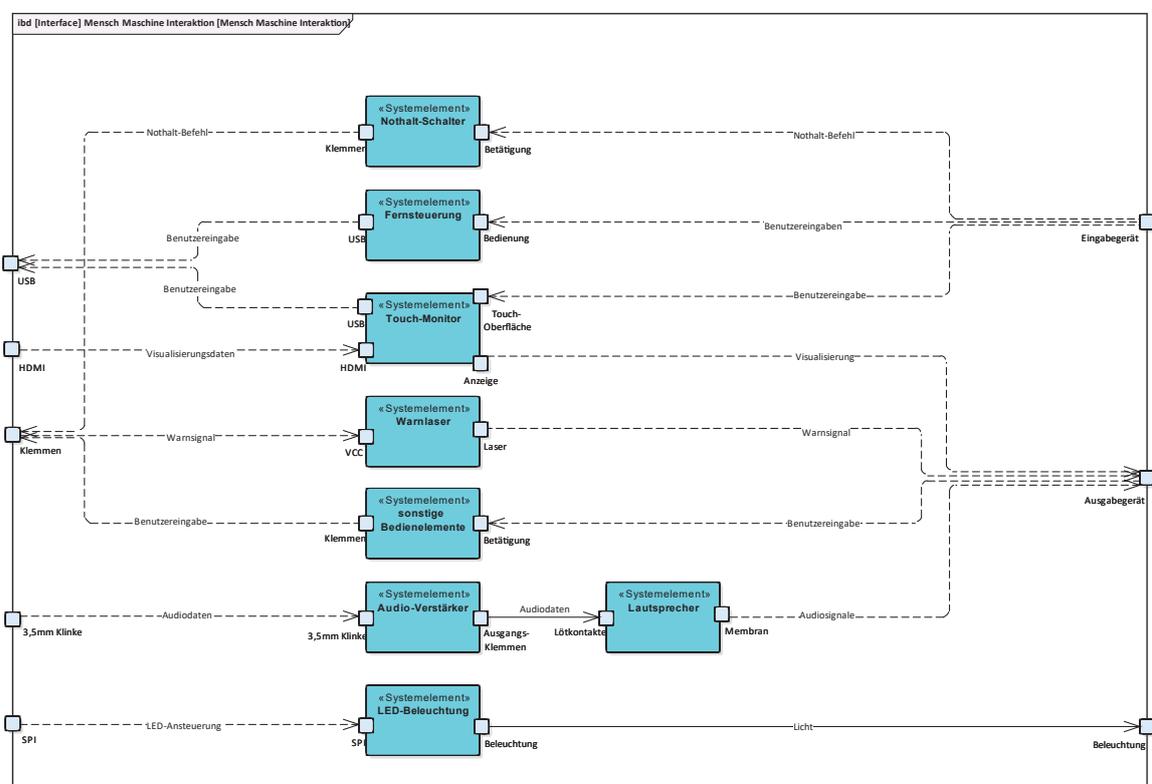


Abbildung 2.51: Wirkstruktur der Mensch-Maschine-Interaktion

Um eine Interaktion zwischen Anwender und Fahrzeug zu ermöglichen, werden verschiedene Möglichkeiten der Kommunikation implementiert (Anforderung ANF_22, FMEA ID 2.1, 2.4, 3.2, 3.3, 4.4). Abbildung 2.52 zeigt die Oberseite des Turms des ALFs. Die markierten Objekte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.



Abbildung 2.52: Oberseite des Turms

- 1: Touch-Monitor
- 2: Fernsteuerung
- 3: S7 Nothalt-Schalter
- 4: S1 Anwendermodus Wahlschalter
- 5: S2 Start-Taster
- 6: S3 Stopp-Taster
- 7: S4 Reset-Taster
- 8: H1 Alarm-Leuchte

2.5.5.1 Touch-Monitor

Der Touch-Monitor ermöglicht es, eine beliebige Bedienoberfläche zu schaffen. Dies kann zu vielerlei Zwecken genutzt werden. Beispielsweise kann die aufgenommene Umgebung dargestellt, ein Zielort eingegeben, Bedienungs- und Beladungshinweise angezeigt und Benutzereingaben ermöglicht werden. Als Monitor wird der *1593L Rev B* [23] der Firma *Elo Touch Solutions* eingesetzt. Der Monitor verfügt über eine Multi-Touch Funktion. (FMEA ID 2.4, 3.2, 3.3)

- Displaygröße: 15,6 Zoll
- Displayauflösung: 1366 x 768
- Video-Schnittstellen: HDMI, VGA, DisplayPort
- Touch-Schnittstelle: USB



Abbildung 2.53: Touch-Monitor

2.5.5.2 Fernsteuerung

Alternativ zum autonomen Fahren, kann das ALF mit einer Fernsteuerung verfahren werden (Anforderung ANF_26). Hierfür wird der *XBOX Wireless Controller* [65] der Firma *Microsoft Corporation* verwendet. Zu dieser Fernsteuerung gibt es viele fertige Software zur Datenerfassung und einen Node für das Software-Framework ROS (Abschnitt 2.5.3.3). Dieser Prozess stellt die Zustände der Knöpfe und Joysticks des Controllers zur Verfügung. Mit diesen Daten kann das ALF ferngesteuert werden.

Folgende Funktionen sind realisiert:

- ein Joystick zur Fahrtrichtungsvorgabe
- ein Regler, welcher während des Betriebs dauerhaft vollständig gedrückt sein muss (Totmannschalter [121])
- ein Regler zur Drehmomentanforderung
- zwei Taster, um eine Rotation um die Höhenachse des Fahrzeugs nach links oder rechts zu veranlassen

2.5.5.3 Nothalt-Schalter

Zu dem Sicherheitskonzept des ALFs gehören Nothalt-Schalter [92] (Anforderung ANF_18, FMEA ID 4.3, Anwendungsszenario 6). Einer befindet sich an der Oberseite des Turms und zwei weitere am Ende der Ladefläche, somit kann von jeder Seite des Fahrzeugs ein Nothalt-Schalter erreicht werden (FMEA ID 4.3). Die um das Fahrzeug verteilten Schaltleisten (Abschnitt 2.5.4.5) können ebenfalls im Notfall betätigt werden, wobei zu beachten ist dass diese geringeren Sicherheitsbestimmungen unterliegen als Nothalt-Schalter. Dennoch wird die Erreichbarkeit einer Nothalt-Einrichtung erhöht (FMEA ID 4.3).

Verwendet werden Nothalt-Schalter in zwei-kanaliger Ausführung. Falls ein Kontakt versagen sollte, steht zum einen noch ein funktionierender zur Verfügung. Dies kann erkannt werden, wodurch der Nothalt-Schalter umgehend ausgetauscht werden muss (FMEA ID 4.3). Damit die Nothalt-Schalter auch bei schlechten Lichtverhältnissen gut sichtbar sind, werden sie beleuchtet.

Im Notfall muss das Fahrzeug kontrolliert zum Stillstand gebracht werden. Der PC und die Sicherheitssteuerung müssen in Betrieb bleiben, um dem Anwender weiterhin Informationen und Warnsignale zur Verfügung stellen zu können. Aus diesem Grund wird nicht mit Hilfe von Notaus-Schaltern die gesamte Versorgungsspannung abgeschaltet. Alle Nothalt-Einrichtungen sind an die Sicherheitssteuerung angeschlossen. Durch Betätigung einer Einrichtung werden die Feststellbremse (Abschnitt 2.5.2.7) und die Widerstandsbremse (Abschnitt 2.5.2.6) aktiviert.

Nach Entriegelung des Nothalt-Schalters ist das ALF noch nicht wieder betriebsbereit. Die Quittierung der Nothalt-Einrichtungen erfolgt über den Reset-Taster S4.

2.5.5.4 Warnlaser

Innerhalb von schmalen Gängen bzw. Fluren ist die Kollisionsgefahr mit dem ALF sehr groß. So kann das ALF beispielsweise eine Person überraschen, welche ihr Büro verlässt. Der leise Antrieb des Fahrzeugs erhöht dieses Risiko zusätzlich.

Abhilfe schafft hier der Einsatz eines optischen Warnsignals in Form eines Linienlasers [81] der Firma *Picotronic GmbH*. Die vor und hinter das Fahrzeug projizierte Laserlinien kündigen das ALF bereits einige Meter vor dem eigentlichen Eintreffen an, sodass die Person vorgewarnt ist. (FMEA ID 2.1)

Als Farbe der Laserlinie wird grün (520 nm) gewählt. Grünes Licht wird vom menschlichen Auge bis zu 9-mal heller wahrgenommen als rotes Licht der selben Leistung [91]. Dies sorgt für eine bessere Erkennbarkeit und erhöhter Sicherheit, vor allem in heller Umgebung. Es wird ein Laser der Klasse 2M verwendet. Laser dieser Klasse sind, bei direkter Bestrahlung, gefährlich für das Auge des Betrachters [82].

Allerdings sorgt der sogenannte Lidschutzreflex bzw. das reflexartige Abwenden des Betrachters für eine sehr kurze, somit ungefährliche Zeitspanne der direkten Bestrahlung [17]. Um das Risiko noch weiter zu reduzieren, ist der Laser sehr tief am ALF angebracht, sodass im Normalbetrieb kein direkter Sichtkontakt zum Laser besteht. Um Unfälle während Wartungsarbeiten zu vermeiden, wird der Laser bei Stillstand des Fahrzeugs deaktiviert.

Das Ein- und Ausschalter des Warnlasers wird durch die in Abschnitt 2.5.3.6 erläuterte SEP bewerkstelligt.

Nennspannung:	3V
Nennstrom:	40 mA
Optische Leistung:	16 mW
Laser-Klasse:	2M
Wellenlänge:	520 nm
Laserform:	Linie
Öffnungswinkel:	30°

Tabelle 2.24: Kenndaten des Linienlasers LC520-16-3-F(14x55)30-QCW

2.5.5.5 Lautsprecher

Da das Fahrzeug jeden Raum in den Gebäuden der Hochschule Bochum erreichen soll, ist es notwendig, dass das ALF mit einem Aufzug fahren kann. Um dies zu bewerkstelligen, muss das Fahrzeug entweder selbst den Aufzug und die gewollte Etage anfordern oder es lässt sich helfen. Menschen darum zu bitten, den Aufzug und die gewünschte Etage anzufordern, ist in weniger Entwicklungszeit zu realisieren, da es nicht notwendig ist, eine Vorrichtung zu diesem Zweck zu entwickeln. Mit Hilfe von Lautsprechern können beliebige Anfragen an umstehende Personen gestellt werden. Lautsprecher bieten darüber hinaus die Möglichkeit, Warnsignale ausgeben zu können (FMEA ID 2.1). Somit werden an den Seiten des Turms zwei Lautsprecher [133] installiert, welche mit einem Audioverstärker [42] von der Hauptsteuerung angesprochen werden.



Abbildung 2.54: Lautsprecher (Visaton FR8 WP - 8 Ohm) [133]

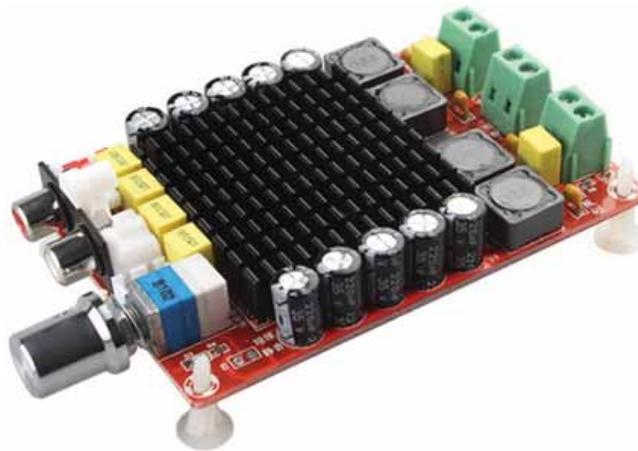


Abbildung 2.55: Audioverstärker [42]

2.5.5.6 Beleuchtung

Das ALF ist mit LED-Streifen vom Typ *APA102C* [56] ausgestattet. Diese sorgen für eine bessere Erkennbarkeit in dunkler Umgebung und verringern so das Unfallrisiko (FMEA ID 4.4). Des Weiteren kann das ALF Statusmeldungen ausgeben, da sich jede einzelne LED separat in Farbe und Helligkeit ansteuern lässt. Dies ermöglicht beispielsweise die Implementierung eines Lauflichts. Die LED-Streifen können nach Belieben gekürzt, aufgetrennt oder verlängert werden. Möglich wird dies durch die spezielle Funktionsweise der einzelnen LEDs.

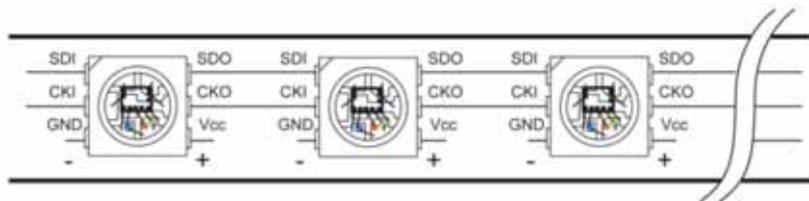


Abbildung 2.56: LED-Streifen APA102C [56]

Ein Meter LED-Streifen besteht aus 30 einzelnen LEDs. Jede LED benötigt neben der Spannungsversorgung von 5V ein Takt- und Datensignal. Takt- und Datensignal sind zudem durchgeschliffen, sodass beliebig viele LEDs hintereinander geschaltet werden können (Abbildung 2.56). Die Ansteuerung erfolgt per SPI-Schnittstelle, welche durch die Schnittstellenerweiterung bereitgestellt (Abschnitt 2.5.3.2) wird.

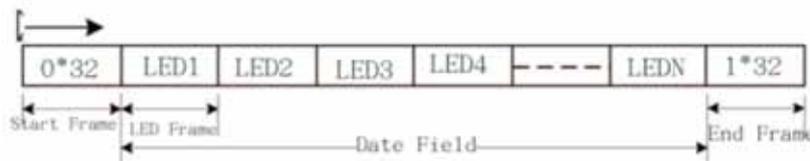


Abbildung 2.57: Datenübertragung des LED-Streifens APA102C [56]

Jede Datenübertragung beginnt mit einem Start-Frame und endet mit einem End-Frame. Zwischen diesen Start- und Endsignalen werden die Daten der einzelnen LEDs hintereinander übertragen (Abbildung 2.57). Jede LED fungiert als Schieberegister, entnimmt also das erste Datenpaket der Übertragung, die weiteren noch übrigen Datenpaketen werden nun an den nächsten Teilnehmern weiter geschliffen.

Um einen gleichmäßigen Helligkeitsverlauf über die gesamte Länge der Beleuchtung zu gewährleisten, ist eine mehrfache Einspeisung der Versorgungsspannung notwendig. Die LED-Streifen sind ab Werk spritzwassergeschützt (IP65) und können zum Schutz vor mechanischer Beschädigung in die Profalnuten des Fahrzeugs eingelassen werden.



Abbildung 2.58: LED-Streifen in Profilnut

Am ALF stehen zahlreiche freie nach außen gerichtete Profilnuten zur Verfügung, in die LED-Streifen eingelassen werden können.

2.5.5.7 Sonstige Bedienelemente

Zusätzlich zu den bisherigen Interfaces zur Mensch-Maschinen-Interaktion werden weitere Interfaces in den Deckel des Turms verbaut (Abbildung 2.52). Der Schlüssel-Wahlschalter *S1* [95] wird dazu verwendet, dem Anwender zu ermöglichen, zwischen drei Anwendermodi zu wechseln.

Der Anwendermodus „User“ ist in der Mittelstellung ausgewählt. Der Schlüssel kann nur in dieser Stellung herausgezogen werden und somit hat dieser Modus keine Sonderbefugnisse. In diesem Modus kann der Anwender weder das Fahrzeug ein- noch ausschalten.

Wenn der Schlüssel nach links gedreht wird, befindet sich das System im Anwendermodus „Admin“. In diesem Modus kann der Anwender mit Hilfe des Start-Tasters *S2* [93] das Fahrzeug, beziehungsweise die Hauptsteuerung, einschalten (Anwendungsszenario 1) und mit dem Stopp-Taster *S3* [93] ausschalten (Anwendungsszenario 2).

Der dritte Anwendermodus, Schlüssel nach rechts, wird als „Hand“-Modus bezeichnet. In diesem Modus werden die Motorcontroller deaktiviert, die Feststellbremse (Abschnitt 2.5.2.7) und die Widerstandsbremse (Abschnitt 2.5.2.6) deaktiviert und somit sind die Räder und Motoren frei drehbar. Dies kann dazu verwendet werden, um das Fahrzeug zu verschieben (Anwendungsszenario 3). Dass sich der Anwender in diesem Modus befindet wird ihm durch Blinken der roten Alarm-Leuchte *H1* [94] signalisiert, da in diesem Modus nicht mehr automatisch im Stillstand die Feststellbremse aktiviert wird. Das Betätigen der Nothalt-Schalter oder einer Schaltleiste führen weiterhin zu einer Bremsung des Fahrzeugs. Zu beachten ist, dass in diesem Modus die Reflexions-Lichttaster (Abschnitt 2.5.4.3) nicht mehr ausgewertet werden und somit die Treppenerkennung nicht mehr zur Verfügung steht. In diesem Modus müssen weder die Wartungsklappe, noch die Wartungstür zum Verschieben geschlossen sein.

Der Reset-Taster *S4* [93] wird zum Quittieren der folgenden Ereignisse verwendet:

- eine Treppe wurde erkannt
- eine geöffnete Wartungsklappe
- eine geöffnete Wartungstür
- Betätigung eines Nothalt-Schalters
- Auslösen einer Schaltleiste

Die Betätigung des Reset-Taster *S4* [93] führt nur zu einer Quittierung, wenn das Ereignis nicht mehr besteht. Vor der Quittierung ist kein Verfahren des Fahrzeugs möglich.

2.5.6 Energieversorgung

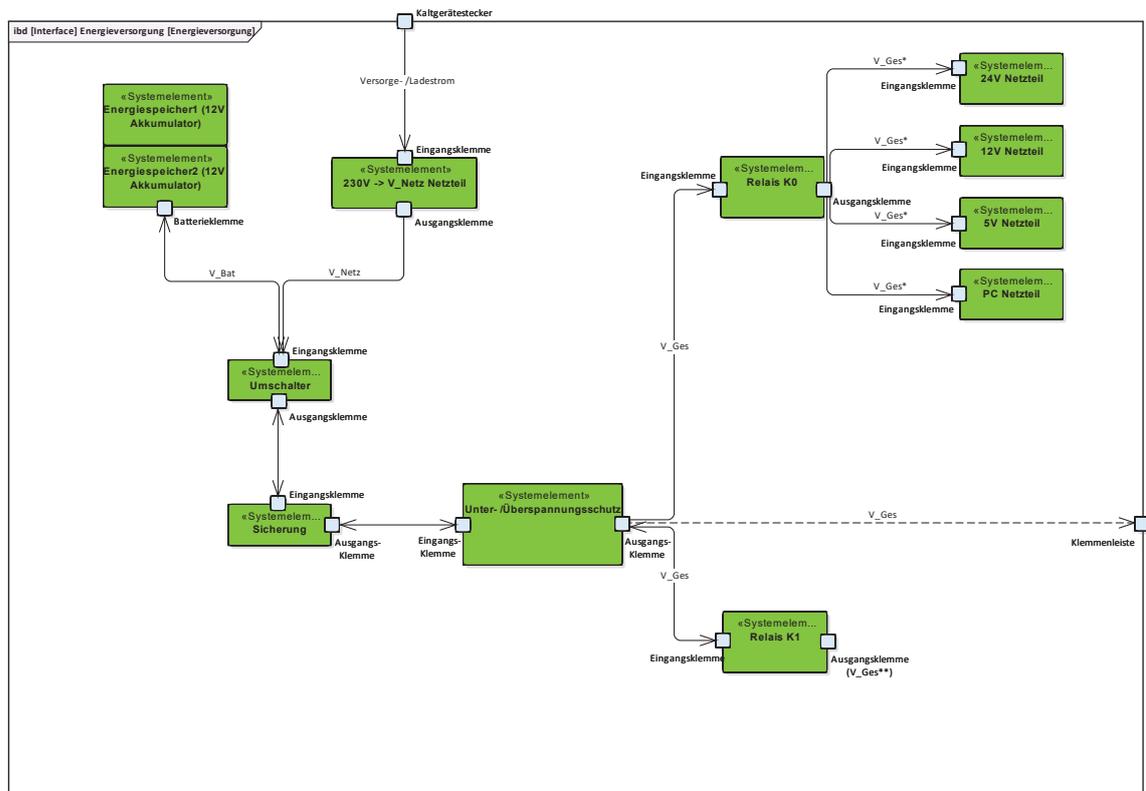


Abbildung 2.59: Wirkstruktur der Energieversorgung

Für den Fahrbetrieb des ALFs ist ein mobiler Energiespeicher erforderlich. Die erforderliche Kapazität folgt, entsprechend der Reichweitenanforderung (ANF_4), aus einer Bilanzierung der gesamten Leistungsaufnahme (Tabelle 2.25). Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass alle Komponenten des Fahrzeugs zeitgleich aktiv sind und unter den im jeweiligen Datenblatt angegebenen Nennbedingungen betrieben werden.

Verbraucher	Nennleistungsaufnahme in W
Motoren	4 x 422,4
Hauptsteuerung	105,26
Audio-Anlage	50
Display	18,13
Kameras	2 x 80
Sicherheitssteuerung	19,87
LED-Streifen	40,54
Schaltleisten	20,78
LIDAR	2,5
Reflexions-Lichttaster	8 x 2,18
Feststellbremsen	4 x 11,68
Bremsrelais	12 x 3,77
SEPs	4 x 6,75
Hauptrelais	2 x 12,98
Schnittstellenerweiterung	14
Meldeleuchten	7 x 0,65
Gesamt:	2294,38

Tabelle 2.25: Nennleistungsaufnahmen der Einzelkomponenten (Wirkungsgrad des ggf. vorgeschalteten Spannungswandlers eingeschlossen)

Die Kalkulation ergibt eine Nennleistungsaufnahme des Systems von ca. 2,3kW. Durch die Verwendung eines Akkumulators mit einer Kapazität von 80Ah ergibt sich eine Betriebsdauer von 50,2 Minuten. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 6km/h wird eine Reichweite von 5,02km erzielt (ANF_4).

Es werden zwei handelsübliche KFZ⁴⁵-Starterbatterien [26] mit einer Nennspannung von je 12V verwendet. In Reihe geschaltet stehen dem Fahrzeug somit 24V Bordspannung zur Verfügung. Die standardisierte Bauform (DIN EN 60095-1) von Starterbatterien ermöglicht den Austausch der Akkumulatoren durch ein Produkt eines anderen Herstellers.

⁴⁵KraftFahrZeug



Abbildung 2.60: Autobatterie (Exide EB802) [122]

Die im Vergleich zu Lithium-Ionen- oder Lithium-Polymer-Akkumulatoren geringe Energiedichte [20] führt zu einem erhöhten Gewicht und Platzbedarf der Akkumulatoren. Dieser Nachteil wird zugunsten des günstigen Preises und der allgemeinen Sicherheit von Blei-Akkumulatoren in Kauf genommen [66].

Die Akkumulatoren werden möglichst tief unterhalb der Ladefläche montiert. Ein niedriger Schwerpunkt des Fahrzeug reduziert das Risiko des „Umkippen“ (FMEA ID 2.4). Die Akkumulatoren lassen sich durch das Fixieren zweier Aluminium-Profile gegen verrutschen sichern (ANF_15). Der Anschluss der Akkumulatoren wird über Schnellverbinder [68] realisiert, welche ein Verpolen verhindern (FMEA ID 1.1).

Das Fahrzeug kann über einen handelsüblichen Gerätestecker (C19) mit 230 V Wechselspannung versorgt werden. Das intern verbaute Netzteil [63] wandelt die Netzspannung in eine einstellbare Gleichspannung zwischen 22 V und 28 V. Die Nennleistung beträgt 2400 W, kurzzeitig stellt das Netzteil eine Leistung von 2688 W bereit. Es verfügt über Sicherheitseinrichtungen zur Erkennung von Überhitzung, Überspannung und Überstrom. Tritt einer dieser Fehler auf, schaltet sich das Netzteil automatisch ab und verhindert Schäden am Netzteil selbst und anderen Komponenten. Insgesamt können bis zu drei Netzteile dieses Typs zusammenschaltet werden (*Current Sharing*), sodass zukünftig bis zu 7200 W bereit gestellt werden können. Alternativ lässt sich das verbaute Netzteil durch Netzteile anderer Hersteller ersetzen. Eine Erweiterung des Fahrzeugs durch weitere Komponenten oder die Implementierung einer Schnelllade-Option für moderne Akkumulator-Technologien ist möglich.

Ein Umschalter [8] ermöglicht sowohl das Laden (Anforderung ANF_17, Anwendungsszenario 4) der Akkumulatoren (Stellung: „1“), einen netzgebundenen Fahrbetrieb (Stellung: „2“), als auch ein paralleles Laden und Fahren (Stellung: „1+2“).



Abbildung 2.61: 230V Netzteil (Mean Well RSP-2400-24)

Das Laden an einer konstanten Spannung von 27,8V verhindert das Überladen und Ausgasen der Akkumulatoren unter üblichen Raumtemperaturen von bis zu 25°C. Im aktuellem Zustand verfügt das Fahrzeug über keine aktive Ladestrombegrenzung. Es kann, vor allem bei tief entladenen Akkumulatoren, zu hohen Ladeströmen kommen, welche zur Erwärmung und Verschleiß bzw. Abnahme der Kapazität führen können. Wird zukünftig auf eine alternative Akku-Technologie gewechselt, sollte das Ladeverfahren entsprechend gewählt und angepasst werden. Das aktuelle Konzept stellt lediglich einen Kompromiss aus Kosten und Nutzen für die Entwicklungs- und Erprobungsphase des Fahrzeugs dar und ist für den finalen Betrieb nur bedingt geeignet. [11, 12]

Ein netzgebundener Fahrbetrieb ist vor allem während der Entwicklungsphase von Vorteil. Künftige Anpassungen an Hard- und Software können im Netzbetrieb erprobt und getestet werden. Ein ständiges Laden und Entladen der Akkumulatoren ist nicht notwendig.

Zum Betrieb der einzelnen Komponenten des ALFs sind neben der Bord-Spannung drei weitere Gleichspannungsebenen (24V, 12V und 5V) notwendig. Hierzu werden Gleichspannungswandler [61, 62] eingesetzt, welche durch die Bord-Spannung versorgt werden. Die verwendeten Wandler verfügen über interne Schutzschaltungen zur Erkennung von Überspannung, Überstrom und Überhitzung.

Das Aluminium-Chassis des Fahrzeugs dient als gemeinsames Masse-Potential aller vorhandenen Spannungsebenen und ist im Netzbetrieb durch den Schutzleiter der Zuleitung geerdet. Die Verwendung von *Potentialausgleich 8, verzinkt* und *Erdungsanschluss 8* der Firma *item Industrietechnik GmbH* ermöglicht ein Durchbrechen der isolierenden Eloxalschicht und sorgen für eine leitende Verbindung zwischen Profilen [45].

Die Stromaufnahme des ALFs beträgt im Batteriebetrieb (24 V) unter Nennbedingungen ≈ 100 A. Das Bord-Netz ist durch ein 150A-Überstromschutzorgan [37] und eine einstellbare Über- bzw. Unterspannungsschutzeinrichtung [132] abgesichert. Der Überstromschutz wird zunächst auf den maximal zulässigen Strom einer 35 mm^2 -Leitung ausgelegt. Aufgrund von Lieferproblemen und dem allgemeinen Platzmangel wird eine Leitung mit 25 mm^2 Querschnitt verwendet. Dies stellt für den Nennbetrieb des Fahrzeug kein Problem dar, jedoch sollte der Überstromschutz bzw. der Leitungsquerschnitt entsprechen angepasst werden. [43]

Nach dem Einschalten des Fahrzeugs sind die Motorcontroller 2.5.3.4 zunächst spannungsfrei. Die Spannungsversorgung der Motorcontroller muss durch die Sicherheitssteuerung (Abschnitt 2.5.3.5) über das Relais K1 [90] freigegeben werden.

Spannung	maximale Leistung in W	Leitungsfarbe	Verbraucher
22-28V	3600	rot	MCM 1
			MCM 2
			24V-Netzteil
			12V-Netzteil
			5V-Netzteil
			Netzteil (Hauptsteuerung)
24V	150	orange	Sicherheitssteuerung
12V	150	gelb	Touch-Monitor
			Kamera 1
			Kamera 2
5V	100	grün	Schnittstellenerweiterung
			LED-Streifen
			SEP 1
			SEP 2
			SEP 3
			SEP 4

Tabelle 2.26: Spannungsebenen

Zum Betrieb der Hauptsteuerung wird ein ATX-Netzteil [48] verwendet. Es arbeitet mit einer Eingangsspannung von 6-30V DC, sodass ein zuverlässiger Betrieb des PCs bei geladenen und entladenen Akkumulatoren gegeben ist.



Abbildung 2.62: ATX-Netzteil der Hauptsteuerung [49]

Das Netzteil stellt die, für den Betrieb eines Standard-PCs notwendigen, Spannungsebenen ($\pm 12V$, 5V und 3,3V) bereit. Die maximale Leistungsabgabe beträgt bis zu 300W. Durch Anlegen eines Signals kann die angeschlossene Hauptsteuerung hochgefahren werden. Nach Entfernen des Signals leitet das Netzteil das Herunterfahren des PCs ein. Ein eventueller Datenverlust durch eine Beschädigung des Dateisystems kann so verhindert werden.

VERIFIKATION

Die Verifikation des Fahrzeugs erfolgt gemäß des Verifikationsplan (siehe Anhang: Lastenheft) aus der Anforderungserhebung (siehe Abschnitt 2.4). Im Anhang befindet sich der ausgefüllte Verifikationsplan

Die folgenden Anforderungen wurden nicht eingehalten:

Die Breite des Fahrzeugs beträgt 71,4 cm statt der geforderten maximalen 70 cm (Anforderung ANF_8). Die Breite des Fahrzeugs wurde im Vorfeld auf diesen Wert begrenzt, damit das Fahrzeug durch eine 80 cm breite Tür (typische Breite einer Bürotür der *Hochschule Bochum*) passt und genügend Platz zum Rangieren zur Verfügung hat. Jedoch wurde die Rangierfähigkeit des Fahrzeug durch die Verwendung von Mecanumrädern (Abschnitt 2.5.2.2) und des damit ermöglichten omnidirektionalen Fahrens so stark erhöht, dass genug Platz zum rangieren zur Verfügung steht. Die Verwendung von Schaltleisten (Abschnitt 2.5.4.5) hat die erhöhte Breite zur Folge, jedoch wird dies auf Grund der damit verbundenen erhöhten Sicherheit akzeptiert.

Das Eigengewicht des Fahrzeugs beträgt 230 kg statt der geforderten maximalen 200 kg (Anforderung ANF_3). Dies wird dadurch kompensiert, dass die geforderte minimale Maximalbeladung von 50 kg um ein Vielfaches kleiner ist als das realisierte von 370 kg. Die verwendeten Blei-Akkumulatoren wiegen zusammen, auf Grund ihrer geringen Energiedichte, ca. 40 kg. Dieses Gewicht kann durch den Austausch, beispielsweise durch Lithium-Ionen- oder Lithium-Polymer-Akkumulatoren, reduziert werden.

Die Spannungsversorgung der Elektromotoren wird nicht wie in Anforderung ANF_18 beschrieben, nach Betätigung eines Nothalt-Schalters spannungsfrei geschaltet. Ein Teil der Energie der Motoren wird über die Widerstandsbremse in Wärme umgewandelt und ein Teil in elektrische Energie für die Energiespeicher, wodurch der Bremsweg kürzer ist als bei spannungsfrei geschalteten Elektromotoren.

Der Test 3.1 „Erkennung von Hindernissen, Testobjekt: Getränkedose“ der Anforderung ANF_20 wurde nicht bestanden. Objekte unterhalb der Montagehöhe des 2D-LIDAR-Sensors (Abschnitt 2.5.4.1) von ca. 1 m werden an den Seiten lediglich von den Ultraschallsensoren erkannt. Diese Erkennung unterliegt den in Abschnitt 2.5.4.4 erläuterten Einschränkungen. Durch die Montagehöhe der Ultraschallsensoren von ca. 20 cm und dessen kegelförmigen Detektionsbereich, kann eine Getränkedose nicht im Abstand von 10 cm erfasst werden. Wie bereits in Abschnitt 2.5.4.2 erläutert, sollte das omnidirektionale Fahren nur zu Demonstrationszwecken, für kurze Kurvenfahrten oder für Positionskorrekturmanöver angewendet werden. Deshalb wird diese Nichterkennung von Objekten im unmittelbaren Nahbereich akzeptiert.

AUSBLICK UND FAZIT

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit wurde ein autonom fahrendes Logistik-Fahrzeug konzipiert, montiert, in Betrieb genommen und verifiziert.

Durch die Anwendung der CONSENS¹-Methode wurde das erforderliche Ziel durch eine Anforderungserhebung spezifiziert. Die Anforderungserhebung besteht aus einer Umfeldmodellierung, der Analyse von Anwendungsszenarien und der Durchführung einer Risikoanalyse in Form einer FMEA², um die Sicherheit des Systems gewährleisten zu können.

Die Partialmodelle der CONSENS-Methode bauen stets aufeinander auf und führen zu einer ständigen Abhängigkeit und Verknüpfungen zwischen den einzelnen Unterlagen. Durch die Partialmodelle der Methode wurde das Projekt in Teilsysteme unterteilt. Dadurch, dass Änderungen während der Planung des Systems ständig in den Unterlagen nachgetragen wurden, konnten Folgen für andere Teilsysteme sofort identifiziert und bedacht werden.

Das gesamte Fahrzeug wurde mit Hilfe einer 3D-CAD³-Software entworfen, wodurch Fehler in der Konstruktion oder bei der Positionierung der Komponenten verhindert wurden.

Durch die Verwendung von Aluminium-Profilen der Firma *item Industrietechnik GmbH* (Abschnitt 2.5.1) bietet die Konstruktion des Fahrzeug nach außen gerichtete Längsnuten, wodurch das Befestigen und Testen weiterer Komponenten möglich ist. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass der verfügbare Raum für die Verkabelung, durch die Anzahl an Komponenten, bereits stark beansprucht ist (siehe Anhang: Komponentenliste, Klemmplan, Schaltplan).

¹CONceptual design Specification technique for the ENgineering of complex Systems

²Failure Mode and Effects Analysis

³Computer-Aided Design

Es sind verschiedene Folgeprojekte denkbar:

- Im Roboter-Simulator *Gazebo* [71] kann das gesamte Fahrzeug, mit all seinen Sensoren und Aktoren, in einer virtuellen Umgebung simuliert werden. Die Ausrichtung von Sensoren oder Algorithmen zur Steuerung und Wegfindung können so gefahrlos im virtuellem Raum erprobt werden.
- Um die Ziel- und Wegfindung oder auch dessen Vorgabe zu ermöglichen, kann mit Hilfe der *Kinect*-Sensoren (Abschnitt 2.5.4.2) und des *RPLIDAR A2* (Abschnitt 2.5.4.1) eine Kartografierung durchgeführt werden. Diese Kartografierung kann als virtuelle Umgebung in *Gazebo* genutzt werden.
- Die Ansteuerung der Mecanum-Räder wurde während dieses Projekts soweit implementiert, dass alle erforderlichen Tests zur Verifikation durchgeführt werden konnten. Es ist innerhalb der MCM⁴ eine Drehmomentregelung realisiert. Da die vier Antriebseinheiten unterschiedliche Anlaufverhalten aufweisen, drehen sich die vier Räder bei gleicher Drehmomentvorgabe unterschiedlich schnell. Dies führt zu einer ungewollten Rotation des Fahrzeugs. Dieser Effekt kann durch eine überlagerte Geschwindigkeitsregelung ausgeglichen werden.
- Zur Bestimmung der optimalen Strecke zum Zielpunkt, kann entweder eine Kartografierung oder die derzeitigen Umgebungsdaten genutzt werden. Die Kartografierung kann, wie bereits erläutert, mit Hilfe der verbauten Sensorik erstellt werden, oder es werden die Messdaten des *Fachbereichs Geodäsie* der *Hochschule Bochum* verwendet.
- Bestimmung einer Ausweichroute falls sich Hindernisse auf der ermittelten Strecke befinden

Das entwickelte Fahrzeug bietet eine Entwicklungs-Plattform, welche für die Erforschung des autonomen Fahrens genutzt werden kann. Mögliche Erweiterungen wurden wie bereits oben beschrieben berücksichtigt.

Das ALF⁵ bietet eine Entwicklungsplattform zur Erforschung des autonomen Fahrens. Das Nachrüsten von noch unbekanntem Technologien ist durch den Einsatz des modularen Aluminium-Profil-Systems der *item Industrietechnik GmbH* möglich.

⁴MotorController-Modul

⁵Autonomes Logistik-Fahrzeug

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ADAFRUIT:
Adafruit ALS-PT19 Analog Light Sensor Breakout, <https://goo.gl/szczSe>. –
Zugriff: 09.02.2018

- [2] ADAFRUIT:
Adafruit LSM9DS1 Accelerometer + Gyro + Magnetometer 9-DOF Breakout,
<https://goo.gl/vtQarb>. –
Zugriff: 06.02.2018

- [3] ADAFRUIT:
VCNL4010 Proximity Light sensor, <https://goo.gl/2v3Z9e>. –
Zugriff: 09.02.2018

- [4] ADAFRUIT:
VCNL4010 Proximity/Light sensor, <https://goo.gl/xwj9LS>. –
Zugriff: 06.02.2018

- [5] ARCOL UK LTD:
HS100 ALUMINIUM HOUSED RESISTOR, <https://goo.gl/YxHK8N>. –
Zugriff: 22.01.2018

- [6] ASROCK:
ASROCK Z270M PRO4, <https://goo.gl/dYQ3n8>. –
Zugriff: 08.01.2018

- [7] BEAGLEBOARD.ORG FOUNDATION:
BeagleBone Black, <https://goo.gl/9cPiZS>. –
Zugriff: 21.02.2018

- [8] BEP MARINE:
701S-B - Mini Battery Selector Switch, 200A Continuous, <https://goo.gl/tr6PAh>. –
Zugriff: 17.02.2018

- [9] BRAINBOXES LIMITED:
SW-504 - Industrial Ethernet 4 Port Switch DIN Rail Mountable, <https://goo.gl/p57tr8>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [10] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE:
Digitale Transformation in der Industrie, <https://goo.gl/oXYPXT>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [11] CADEX ELECTRONICS INC.:
BU-403: Charging Lead Acid, <https://goo.gl/8F4iX>. –
Zugriff: 13.02.2018
- [12] CADEX ELECTRONICS INC.:
BU-410: Charging at High and Low Temperatures, <https://goo.gl/qxmEby>. –
Zugriff: 13.02.2018
- [13] CANONICAL LTD.:
Ubuntu 16.04.3 LTS, <https://goo.gl/F2Yyh7>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [14] CHRISTOPH, S. :
Muße – Garant für unternehmerischen Erfolg Ihr Potenzial für Führung und die Arbeitswelt 4.0.
Springer, 2018. –
ISBN 978–3–658–17524–5. –
1.Auflage
- [15] CORSAIR:
Vengeance® LPX Speicherkit 8 GB (2x4 GB) DDR4 DRAM 2400 MHz C16 – Rot (CMK8GX4M2A2400C16R), <https://goo.gl/MhSdZu>. –
Zugriff: 08.01.2018
- [16] DAIMLER AG:
Highway Pilot. Der Autopilot für Lkw, <https://goo.gl/XuucDZ>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [17] DEUS GMBH:
Laser-Gefahren-Klassen Definition DIN EN 60825-1, <https://goo.gl/pF2WaE>. –
Zugriff: 22.02.2018
- [18] DEUTSCHE POST AG:

- Einbindung des DHL-Paketkopters in die Logistikkette erfolgreich getestet*, <https://goo.gl/9Nctmt>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [19] DEVANTECH LTD:
SRF05 - Ultra-Sonic Ranger, <https://goo.gl/bAv8g>. –
Zugriff: 10.02.2018
- [20] E-MOBIL BW GMBH:
STRUKTURSTUDIE BWe MOBIL 2015 - Elektromobilität in Baden-Württemberg, <https://goo.gl/GPqKZw>. –
Zugriff: 11.01.2018
- [21] EBM-PAPST:
Bürstenlose Innenläufermotoren Baureihe ECI, <https://goo.gl/A4Wd93>. –
Zugriff: 17.01.2018
- [22] ELINUX.ORG:
RPi Expansion Boards, <https://goo.gl/zLTt8m>. –
Zugriff: 19.02.2018
- [23] ELO TOUCH SOLUTIONS:
1593L - 15.6 Zoll Open Frame Touchscreen, <https://goo.gl/c9A9fD>. –
Zugriff: 11.01.2018
- [24] EUROPEAN PALLET ASSOCIATION E.V.:
RECORD RESULT OF 115.8M EPAL PALLETS IN 2017.
<https://goo.gl/UjiY7G>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [25] EVERLIGHT:
Ambient Light Sensor Surface - Mount ALS-PT19-315C/L177/TR8, <https://goo.gl/pfEMt7>. –
Zugriff: 09.02.2018
- [26] EXIDE TECHNOLOGIES:
Autobatterie - EB802, <https://goo.gl/5iupSj>. –
Zugriff: 11.01.2018
- [27] FINDER S.P.A. CON UNICO SOCIO:
Serie 4C - Koppelrelais 8 – 16 A, <https://goo.gl/VQqTDj>. –
Zugriff: 09.01.2018

- [28] FLORIAN WAGNER:
Modellbasierte Entwicklung und Verifikation einer modularen Antriebsplattform mit MATLAB/Simulink.
Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences, 2017. –
Masterthesis
- [29] FORWARD INDUSTRIAL CO.:
Relay Series FRC6, <https://goo.gl/Ubgvxv>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [30] FRABA B.V.:
DRUCKWELLENSCHALTER (DW), <https://goo.gl/Js5zeb>. –
Zugriff: 22.01.2018
- [31] FRABA B.V.:
OPTOEDGE SENSOR (OSE), <https://goo.gl/RbpT4H>. –
Zugriff: 22.01.2018
- [32] FRABA B.V.:
OSE-C 5024 - Auswerteeinheiten, <https://goo.gl/5ahTP2>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [33] FRABA B.V.:
OSE-P 25 33 00 - Gummiprofil, <https://goo.gl/HC9DXo>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [34] FRABA B.V.:
OSE-S 6506 - Optische Sensoren, <https://goo.gl/FUYahY>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [35] FRABA B.V.:
Sicherheitssysteme für die Industrie - Schaltleisten, <https://goo.gl/Sp7uws>. –
Zugriff: 10.02.2018
- [36] FRANKFURTER ALLGEMEINE ZEITUNG GMBH:
Amazon will Pakete mit Drohnen ausliefern, <https://goo.gl/SFHQjf>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [37] FRARON ELECTRONIC GMBH:
150A Sicherungs-Automat mit Resetschalter / Aufbauversion, <https://goo.gl/6H5pso>. –
Zugriff: 17.02.2018

- [38] FRAUENHOFER IML:
cyber-physical systems, <https://goo.gl/f2f5GS>. –
Zugriff: 14.02.2018
- [39] GEHLEN, P. :
Sicherheitsfibel zur Maschinensicherheit.
VDE Verlag. –
ISBN 978–3–8007–4257–8. –
2. Auflage
- [40] GERMAN RESEARCH CENTER FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE (DFKI):
Comparison of Kinect v1 and v2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision,
<https://goo.gl/RwywLr>. –
Zugriff: 01.02.2018
- [41] GORDON HENDERSON:
Wiring Pi - GPIO Interface library for the Raspberry Pi, 10-10-2017.
<https://goo.gl/8nw7uS>
- [42] HANDSON TECHNOLOGY ENTERPRISE:
TDA7498 2X100W Class-D Audio Amplifier, <https://goo.gl/cQDXHj>. –
Zugriff: 06.02.2018
- [43] HELUKABEL GMBH:
Strombelastbarkeit (allgemein), <https://goo.gl/J3Wsmx>. –
Zugriff: 19.02.2018
- [44] IMETRON:
Donkey Motion, <https://goo.gl/GyYTGW>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [45] INDUSTRIE TECHNIK GMBH item:
MB Systembaukasten.
10/2016
- [46] INTEL:
Intel® Core™ i7-7700 Processor, <https://goo.gl/0pk0xy>. –
Zugriff: 08.01.2018
- [47] INTORQ GMBH & CO. KG:
INTORQ BFK457, <https://goo.gl/HXWhfh>. –
Zugriff: 21.02.2018

- [48] ITUNER NETWORKS CORP:
M4-ATX, 250w output, 6v to 30v wide input Intelligent Automotive DC-DC Car PC Power Supply, <https://goo.gl/CfoZYY>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [49] ITUNER NETWORKS CORP:
M4-ATX, 250w output, 6v to 30v wide input Intelligent Automotive DC-DC Car PC Power Supply, <https://goo.gl/vEs9jT>. –
Zugriff: 17.02.2018
- [50] JÜSTEL, P. D. T.:
Lichttechnische Begriffe, <https://goo.gl/x593EP>. –
Zugriff: 23.10.2017
- [51] JUNGHEINRICH AG:
Jungheinreich 4.0, <https://goo.gl/X8VYP7>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [52] KEVIN LEIFFELS:
Eintwicklung eines E-Skateboards.
Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences, 2017. –
Masterthesis
- [53] KOUROSH KHOSHELHAM, SANDER OUDE ELBERINK (FACULTY OF GEO-
INFORMATION SCIENCE AND EARTH OBSERVATION, UNIVERSITY OF TWEN-
TE, THE NETHERLANDS):
Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications,
<https://goo.gl/4QPD47>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [54] KURBELIX GMBH:
Kind Shock Feder für Dämpfer 105mm lang 450 LBS, <https://goo.gl/Lc4f3q>.
–
Zugriff: 21.02.2018
- [55] KUTZNER, P. D.-I. R. ; SCHOOF, P. D.-I. S.:
MATLAB/Simulink - Eine Einführung.
Schloßwender Straße 5, 30159 Hannover : Leibniz Universität Hannover und
Fakultät I - Elektro- und Informationstechnik der Hochschule Hannover,
2015. –
7. Auflage

- [56] LED SHIJI LIGHTING iPixel, <https://goo.gl/pYjLY2>. –
Zugriff: 23.10.2017
- [57] LUDWIG MEISTER GMBH Co. KG:
Antriebstechnik, <https://goo.gl/7Y5YWu>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [58] M. GOSEKI, H. TAKEMURA, H. MIZOGUCHI (TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE,
TUS):
Visualizing Sound Pressure Distribution By Kinect and Microphone Array, <https://goo.gl/AxqnVH>. –
Zugriff: 09.02.2018
- [59] MÄDLER GMBH:
T-Zahnriemen, <https://goo.gl/18f5YR>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [60] MÄDLER GMBH:
T-Zahnriemenräder, Teilung 5 mm aus Aluminium, <https://goo.gl/MYyXad>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [61] MEAN WELL:
100W Single Output DC-DC Converter, <https://goo.gl/kwiMeB>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [62] MEAN WELL:
150W Single Output DC-DC Converter, <https://goo.gl/VYL5xr>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [63] MEAN WELL:
2400W Power Supply with Single Output, <https://goo.gl/6P12UA>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [64] MICROSOFT :
Windows IoT Core, <https://goo.gl/NW3eYZ>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [65] MICROSOFT CORPORATION:
Xbox 360 Controller (Wireless und verkabelt), <https://goo.gl/gd8Fam>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [66] NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY:
Vehicle Battery Safety Roadmap Guidance, <https://goo.gl/YfsVoD>. –
Zugriff: 13.02.2018

- [67] NEXUS ROBOTICS:
A set of 8inch (203mm) heavyduty industrial mecanum wheel(load capacity 800kg)
NM203A, <https://goo.gl/cT6omF>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [68] OJOP SWEDEN AB:
Quick power battery connectors, <https://goo.gl/74Cnsj>. –
Zugriff: 13.02.2018
- [69] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION, <https://goo.gl/geDjJ>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [70] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION, <https://goo.gl/MwC1Vu>. –
Zugriff: 15.01.2018
- [71] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
Gazebo, <https://goo.gl/bz38q>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [72] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
Installing ROS Kinetic on the Raspberry Pi, <https://goo.gl/MBJzQ7>. –
Zugriff: 19.02.2018
- [73] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
ROS - Community Metrics Report, <https://goo.gl/3bmgYZ>. –
Zugriff: 05.02.2018
- [74] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
ROS - Forum, <https://goo.gl/xMHJwE>. –
Zugriff: 05.02.2018
- [75] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
ROS - Navigation, <https://goo.gl/2na5g4>. –
Zugriff: 05.02.2018
- [76] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
ROS on Windows installation, <https://goo.gl/auqckx>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [77] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
rplidar- Package Summary, <https://goo.gl/QtEYwv>. –
Zugriff: 18.02.2018

- [78] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
rqt, <https://goo.gl/KvaMUC>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [79] OPEN SOURCE ROBOTICS FOUNDATION:
rviz, <https://goo.gl/BVyMK4>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [80] PEAK-SYSTEM TECHNIK GMBH:
PCAN-PCI Express, <https://goo.gl/oZhCJv>. –
Zugriff: 08.01.2018
- [81] PICOTRONIC, <https://goo.gl/HUn1i2>. –
Zugriff: 23.10.2017
- [82] PICOTRONIC GMBH:
Lasersicherheit, <https://goo.gl/EAhhvx>. –
Zugriff: 23.10.2017
- [83] PROF. DR. ARNO BERGMANN:
Aktorik und Leistungselektronik Master. –
Zugriff: 16.08.2016
- [84] RASPBERRY PI FOUNDATION:
Raspberry Pi, <https://goo.gl/Hj0MZ9>. –
Zugriff: 19.02.2018
- [85] RASPBERRY PI FOUNDATION:
Raspberry Pi 3 Model B, <https://goo.gl/Kck6GY>. –
Zugriff: 13.02.2018
- [86] RASPBERRY PI FOUNDATION:
Raspbian, <https://goo.gl/BYkhLp>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [87] RASPBERRY PI FOUNDATION:
Sales soar and Raspberry Pi beats Commodore 64, <https://goo.gl/trrAvn>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [88] REICHELTELEKTRONIK GMBH, <https://goo.gl/HnQjZR>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [89] RISC OS OPEN LIMITED:

- RISC OS Open*, <https://goo.gl/mBHcG>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [90] ROBERT BOSCH GMBH:
Power relay, <https://goo.gl/uuutPn>. –
Zugriff: 11.01.2018
- [91] SCHILLER, D.-W.-I. C.:
Untersuchungen über spektrale Kontrastempfindlichkeitsfunktionen des menschlichen Auges im mesopischen Bereich und ihre Einflussparameter, <https://goo.gl/aTTKoE>. –
Zugriff: 23.10.2017
- [92] SCHLEGEL ELEKTROKONTAKT CO (FE) PTE LTD:
aktiv-leuchtende sichere Not-Halt-Taste mit Zustandsanzeige aktiv/inaktiv FRVKDOO, <https://goo.gl/CAhb1d>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [93] SCHLEGEL ELEKTROKONTAKT CO (FE) PTE LTD:
Leucht-Tastkontaktgeber ATL2, <https://goo.gl/F95ePn>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [94] SCHLEGEL ELEKTROKONTAKT CO (FE) PTE LTD:
Meldeleuchte mit Flachsteckanschlüssen 2,8x0,8 mm RXJL5, <https://goo.gl/HxUL16>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [95] SCHLEGEL ELEKTROKONTAKT CO (FE) PTE LTD:
Tastkontaktgeber AZOW1, <https://goo.gl/oL5CEG>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [96] SCHNELL, G. :
Sensoren in der Automatisierungstechnik.
Springer Vieweg, 1993. –
ISBN 978–3–528–13370–2, 978–3–663–13943–0 (eBook). –
2.Auflage
- [97] SEAN WILLIAM DALTON:
Entwicklung der eingebetteten Hardware einer modularen Antriebsplattform.
Hochschule Bochum - Bochum University of Applied Sciences, 2017. –
Bachelorthesis

- [98] SHANGHAI SLAMTEC CO., LTD.:
RPLIDAR A2 Laser Range Scanner, <https://goo.gl/ncXgbV>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [99] SHANGHAI SLAMTEC CO., LTD.:
RPLIDAR A3 Development Kit User Manual, <https://goo.gl/enHCje>. –
Zugriff: 10.02.2018
- [100] SHANGHAI SLAMTEC CO., LTD.:
RPLIDAR A3 Specifications, <https://goo.gl/h7SWtc>. –
Zugriff: 10.02.2018
- [101] SICK AG:
DT35-B15551 MID-RANGE-DISTANZSENSOREN, <https://goo.gl/ZURPZM>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [102] SICK AG:
Flexi Soft Modulare Sicherheits-Steuerung, <https://goo.gl/wfPWYb>. –
Zugriff: 01.02.2018
- [103] SICK AG:
FX0-GCAN00000 - Sicherheitssteuerungen Flexi Soft / Gateway / CANopen,
<https://goo.gl/p4vUgL>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [104] SICK AG:
FX3-CPU000000 - Sicherheitssteuerungen Flexi Soft / Hauptmodul, <https://goo.gl/FZUvqt>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [105] SICK AG:
FX3-MPL000001, <https://goo.gl/vd5YZG>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [106] SICK AG:
FX3-XTDI80002 - Sicherheitssteuerungen Flexi Soft / I/O-Modul, <https://goo.gl/CFo9hJ>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [107] SICK AG:
FX3-XTIO84002 - Sicherheitssteuerungen Flexi Soft / I/O-Modul, <https://goo.gl/TYX94L>. –
Zugriff: 09.01.2018

- [108] SICK AG:
Leifaden Sichere Maschinen, <https://goo.gl/7PpYRv>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [109] SICK AG:
Lichttaster und Lichtschranken, <https://goo.gl/2wytXg>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [110] SICK AG:
Lichttaster und Lichtschranken, <https://goo.gl/XCAFo1>. –
Zugriff: 03.02.2018
- [111] SICK AG:
sens:Control – SAFE CONTROL SOLUTIONS, <https://goo.gl/jkUpy8>. –
Zugriff: 22.02.2018
- [112] SICK AG:
UE10-3OS - Sicherheitsschaltgeräte, <https://goo.gl/tSRU86>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [113] SKF:
Tapered roller bearings, single row - 32006 X, <https://goo.gl/6bkzLU>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [114] SKF:
Wälzlager, 01-2014.
<https://goo.gl/qBJjKc>. –
Zugriff: 02.01.2018
- [115] SMART MECHATRONICS GMBH:
CONSENS Workshop Hochschule Bochum, 2016
- [116] SPRICK, N. :
Physik im Auto: Sensoren, 2004.
<https://goo.gl/gG3d3h>. –
Johannes Gutenberg Universität Mainz
- [117] STEFAN KOHLBRECHER:
Hector SLAM for robust mapping in USAR environments, <https://goo.gl/wVirDj>. –
Zugriff: 28.10.2017

- [118] STILL GMBH:
STILL iGo automation solutions- Automated for all situations., <https://goo.gl/RrQgGf>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [119] STMICROELECTRONICS INTERNATIONAL N.V:
LSM9DS1 - iNEMO inertial module:3D accelerometer, 3D gyroscope, 3D magnetometer, <https://goo.gl/XEXfVu>. –
Zugriff: 09.01.2018
- [120] STMICROELEKTRONICS:
L5973D switch step down switcing regulator, 2008.
<https://goo.gl/fyBAIX>
- [121] TANDEM MEDIA GMBH:
ROS - Forum, <https://goo.gl/1LD59q>. –
Zugriff: 12.02.2018
- [122] THE BATTERY SHOP:
Exide EB802, <https://goo.gl/jsduJ9>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [123] THE LINUX CAN / SOCKETCAN PROJECT:
SocketCAN, <https://goo.gl/mnz4zz>. –
Zugriff: 11.02.2018
- [124] THE MATHWORKS, INC.:
Embedded Coder Support Package for BeagleBone Black Hardware Blocks, <https://goo.gl/fVkf9d>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [125] THE MATHWORKS, INC.:
Getting Started with Robot Operating System (ROS) on Raspberry Pi®, <https://goo.gl/5mkdtf>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [126] THE MATHWORKS, INC.:
Raspberry Pi-Unterstützung aus MATLAB, <https://goo.gl/iVKUJc>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [127] THE MATHWORKS, INC.:
Raspberry Pi-Unterstützung aus SIMULINK, <https://goo.gl/8nA5tr>. –
Zugriff: 21.02.2018

- [128] THE MATHWORKS, INC.:
Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware Blocks, <https://goo.gl/LudCc8>. –
Zugriff: 21.02.2018
- [129] TP-LINK:
TP-LINK TL-WN881ND, <https://goo.gl/RE7JSs>. –
Zugriff: 08.01.2018
- [130] UBUNTU MATE TEAM:
Ubuntu MATE 16.04.2 (Xenial), <https://goo.gl/qDaas0>. –
Zugriff: 19.02.2018
- [131] VÍCTOR F. BREÑA-MEDINA:
University of Bristol Thesis Template, 2017.
www.goo.gl/ItPEu9
- [132] VICTRON ENERGY B.V.:
BatteryProtect BP-220, <https://goo.gl/eZB25a>. –
Zugriff: 11.01.2018
- [133] VISATON GMBH Co. KG:
FR 8 WP - 4 Ohm (schwarz), <https://goo.gl/rcnk2G>. –
Zugriff: 03.02.2018
- [134] VISHAY ELECTRONIC GMBH:
Fully Integrated Proximity and Ambient Light Sensor with Infrared Emitter, I2C Interface, and Interrupt Function, <https://goo.gl/caHVaz>. –
Zugriff: 22.01.2018
- [135] VOGEL BUSINESS MEDIA:
Die flexible Intralogistik von morgen ist intelligent, <https://goo.gl/62q65e>. –
Zugriff: 15.02.2018
- [136] WELOTEC GMBH:
Lichttaster und Lichtschranken, <https://goo.gl/qKnQUG>. –
Zugriff: 01.02.2018
- [137] WERDICH, M. :
FMEA – Einführung und Moderation.
Springer Vieweg. –
ISBN 978-3-8348-1787-7. –
2. Auflage

[138] XIE, L. :

Heavy-Duty Omni-Directional Mecanum-Wheeled Robot for Autonomous Navigation, <https://goo.gl/NRMs8T>. –

Zugriff: 15.01.2018

ANHANG

Digitaler Anhang:

- Anwendungsszenarien
- Lastenheft
- Risikoanalyse (FMEA)
- Umfeldmodell
- Wirkstrukturen
- Ausgefüllter Verifikationsplan
- Komponentenliste
- Schaltplan
- Klemmplan
- Datenblätter
- CAN¹-Map (EPOS² MCM)
- CAD-Files
- Software (Flexi Soft, Platinen(STM32)-Software, XBOX-Fernsteuerung, Melmac (Linux-Anwendung))
- Masterthesis

Anhang:

- Anwendungsszenarien
- Ausgefüllter Verifikationsplan
- Komponentenliste
- Schaltplan
- Klemmplan

¹Controller Area Network

²EntwicklungsPlattform Ortsfrequenzfilter-Sensor

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Einschalten des ALFs	Nr. 1
<p>Vorbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anwendermodus „Admin“ muss ausgewählt sein (Moduswechsel nur möglich mit dementsprechender Freigabe, z.B. durch einen Schlüssel) <p>Systemverhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Durch Drücken des On-Tasters kann die Steuerung des ALFs eingeschaltet werden - Sobald die Steuerung mit Spannung versorgt wird, kann der Betriebsmodus gewechselt werden (wird dies vorher getan wird alles wieder ausgeschaltet) <p>Nachbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sobald die Steuerung hochgefahren ist, kann das Fahrzeug bedient und verfahren werden 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Ausschalten des ALFs	Nr. 2
<p>Vorbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anwendermodus „Admin“ muss ausgewählt sein (Moduswechsel nur möglich mit dementsprechender Freigabe, z.B. durch einen Schlüssel) <p>Systemverhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Die Steuerung kann durch Drücken des Off-Tasters heruntergefahren werden - Sobald die Steuerung heruntergefahren ist und in den Anwendermodus „User“ gewechselt wurde, werden sämtliche Verbraucher spannungsfrei geschaltet <p>Nachbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Die Komponenten zwischen OnBoard-Energiespeicher/Steckdosen-Netzteil und Hauptrelais sind weiterhin spannungsführend (diese Komponenten sind nicht ohne den Einsatz von Werkzeug erreichbar) 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Das ALF verschieben	Nr. 3
Vorbedingung: <ul style="list-style-type: none"> - Anwendermodus „Hand“ muss ausgewählt sein (Moduswechsel nur möglich mit dementsprechender Freigabe, z.B. durch einen Schlüssel) Systemverhalten: <ul style="list-style-type: none"> - Die Feststellbremsen und sonstige Bremsmechanismen sind deaktiviert - Das Fahrzeug kann nun verschoben werden 	
Anmerkungen: <ul style="list-style-type: none"> - Die Treppenerkennung ist nicht mehr aktiv - Ein Wegrollen des Fahrzeugs wird nicht mehr verhindert - Das Drücken eines Nothalt-Schalters führt weiterhin zu einer Bremsung 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Elektrisches Laden des ALFs	Nr. 4
Vorbedingung: <ul style="list-style-type: none"> - Der Betriebsmodus „Onboard-Energiespeicher + Steckdose“ muss ausgewählt sein (Moduswechsel nur möglich durch Verwendung von Werkzeug) Systemverhalten: <ul style="list-style-type: none"> - Der OnBoard-Energiespeicher wird geladen. - Währenddessen kann das ALF bedient und verfahren werden 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Lösen der Feststellbremse	Nr. 5
<p>Vorbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Der Steckdosenbetrieb und der OnBoard-Energiespeicherbetrieb sind nicht möglich - Das Fahrzeug steht an einem ungünstigen Ort und muss fortbewegt werden <p>Systemverhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Der Anwender kann durch Anschließen einer externen Energiequelle (nur durch den Einsatz von Werkzeug möglich) die Feststellbremse lösen und das ALF bewegen <p>Nachbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Das Fahrzeug muss entweder repariert werden oder der OnBoard-Energiespeicher geladen werden 	
<p>Anmerkungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Das restliche ALF ist weiterhin spannungsfrei 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Nothalt-Betätigung	Nr. 6
<p>Vorbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ein beliebiger Anwendermodus ist ausgewählt - Mindestens einer der Nothalt-Schalter wird betätigt <p>Systemverhalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Der Antrieb des ALFs wird spannungsfrei geschaltet - Das ALF wird schnellstmöglich gebremst <p>Nachbedingung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Um ein erneutes Beschleunigen des ALFs zu ermöglichen muss der Anwender den Nothalt-Schalter wieder zurücksetzen und quittieren 	
<p>Anmerkungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Von jeder Seite des Fahrzeugs muss mindestens ein Nothalt-Schalter erreichbar sein 	

Produkt: Autonomes Logistik-Fahrzeug	
Anwendungsszenario: Befestigen der Beladung	Nr. 7
Vorbedingung: <ul style="list-style-type: none">- Die Last erfordert eine zusätzliche Maßnahme um deren unbeschädigten Transport zu ermöglichen Systemverhalten: <ul style="list-style-type: none">- Der Anwender benutzt Gurte um ein Herunterfallen der Last zu verhindern	

Ausgefüllter Verifikationsplan

Nr. / ID	Nichttechnischer Titel	Verifikation der Anforderung	Hilfsmittel
ANF_01	Nicht StVO-gerecht	Kein Test erforderlich	Keine
ANF_02	Höchstgeschwindigkeit	<p>Es wird eine gerade Strecke von 15 m gemessen und Anfang und Ende markiert. Anschließend wird die Zeit gemessen, die das ALF benötigt um diese Strecke zurückzulegen. Das ALF wird dabei mit der Maximalgeschwindigkeit bewegt, welche bereits vor Passieren der Startmarkierung erreicht worden sein muss.</p> <p>Test bestanden.</p>	<p>Maßband</p> <p>Kreide</p>
ANF_03	Max. Gewicht der Beladung	<p>Es wird mit einer Beladung mit dem maximal zulässigen Gewicht getestet. Dies erfolgt durch Gewichte (z.B. Sandsäcke, Blumenerde). Es wird die maximale Geschwindigkeit getestet (siehe ANF_02) und die maximale Steigung (siehe ANF_06). Es wird sichergestellt, dass alle Anforderungen erfüllt werden, ohne dass Komponenten Schaden nehmen bzw. Sicherheitssysteme aufgrund von Überlastung ausschalten.</p> <p>370kg bei gleichverteilter Last (theoretisch 570kg)</p>	<p>Handy mit GPS</p> <p>Maßband</p> <p>Kreide</p> <p>Stoppuhr</p> <p>Gewichte</p>
ANF_04	Min. Distanz	<p>Es wird ein Reichweitentest durchgeführt. Die Akkus sollen vollgeladen sein und die Beladung den Anforderungen entsprechen (siehe ANF_03).</p> <p>Das ALF fährt eine abgemessene Strecke solange mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h ab, bis das BMS eine Unterspannungsabschaltung auslöst. Dafür soll ein Geschwindigkeitsmodus vorgesehen werden, der eine konstante Geschwindigkeit von 5 km/h hält.</p> <p>Das Routenprofil wird aufzeichnen, um die gefahrene Distanz zu ermitteln.</p>	<p>Maßband</p> <p>Handy mit GPS</p>

		Test bestanden.	
ANF_05	Fahrbahnbeschaffenheit	<p>Es werden Testfahrten auf folgenden Untergründen des Geländes der HS Bochum durchgeführt.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Asphaltierter Weg hinter dem D3 Gebäude mit 4 km/h. <p>Test bestanden.</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Pflasterstein vor dem D3 Gebäude mit 2 km/h. <p>Test bestanden.</p>	Keine
ANF_06	Max. Steigung	<p>Es werden Testfahrten auf folgenden Steigungen des Geländes der HS Bochum durchgeführt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Steigung auf Pflasterstein vor der beschränkten Ausfahrt des Hochschulgeländes <p>Test bestanden.</p>	Handy mit GPS
ANF_07	Wenderadius	<p>Das ALF wird mit einer den Anforderungen entsprechenden Beladung versehen.</p> <p>Es wird der kleinstmögliche Radius in beide Richtungen gefahren und dieser gemessen</p> <p>Wenderadius = Fahrzeugdiagonale</p>	Maßband
ANF_08	Max. Breite	<p>Es wird die Breite des Fahrzeugs mit sämtlichen Sensoren und zusätzlichen Bauteilen gemessen.</p> <p>Test nicht bestanden. Breite = 71,4cm</p>	Maßband
ANF_09	Max. Höhe	<p>Es wird die Höhe des Fahrzeugs mit sämtlichen Sensoren und zusätzlichen Bauteilen gemessen.</p> <p>Test bestanden. Höhe = 110cm</p>	Maßband
ANF_10	Max. Fahrzeugdiagonale	<p>Es wird die Fahrzeugdiagonale des Fahrzeugs mit sämtlichen Sensoren und zusätzlichen Bauteilen gemessen.</p> <p>Test bestanden. FD= 1600mm</p>	Maßband
ANF_11	Max. Eigengewicht	<ol style="list-style-type: none"> 1. Das gesamte ALF wird gewogen. Die Summe muss weniger als 	Waage

		<p>200 kg betragen.</p> <p>Test nicht bestanden.</p> <p>Gewicht = 230kg</p> <p>2. Bestimmen des Gesamtgewichts durch Datenblattangaben</p>	
ANF_12	Kein Personentransport	Kein Test erforderlich.	Keine
ANF_13	Wetterbedingungen	Alle Testfahrten werden ausschließlich bei trockenen Wetterbedingungen durchgeführt.	Keine
ANF_14	Akkuzustand	<p>Der Akku wird mit dem vorgesehenen Ladegerät bis zur Ladeabschaltung vollgeladen.</p> <p>Das ALF wird eingeschaltet. Es muss die selbe Spannung bestimmt werden wie ein externes Spannungsmessgerät.</p> <p>Der Akku wird durch Fahrttests vollständig entladen. Dabei werden die zur Verfügung stehenden Spannungswerte in regelmäßigen Abständen mit einem externen Spannungsmessgerät verifiziert</p> <p>Test bestanden.</p> <p>Spannung lässt sich durch Sensor-Erweiterungs-Platinen messen (Kalibrierung erforderlich)</p>	Spannungsmessgerät
ANF_15	Ladung der Akkus	<p>Das Ladegerät wird an die Ladevorrichtung des ALFs angeschlossen, ohne eine Demontage dessen vornehmen zu müssen.</p> <p>Durch die Schutzkappe der Ladevorrichtung ist es nicht möglich mit einem kleinen, nichtleitenden Prüfobjekt an die Kontakte zu gelangen</p> <p>Test bestanden.</p>	<p>Ladegerät</p> <p>Prüfobjekt</p> <p>Kleines nichtleitendes Prüfobjekt</p>
ANF_16	Schutz der Akkus	<p>Über Strom- und Spannungsmessung kann der Lade- und Entladevorgang überprüft werden.</p> <p>Bei Erreichen der Ladeschlussspannung muss die Stromaufnahme des Akkupacks durch das BMS unterbrochen werden.</p> <p>Bei Erreichen der</p>	<p>Strommessgerät</p> <p>Spannungsmessgerät</p> <p>Labornetzgerät</p>

		<p>Entladeschlussspannung muss die Stromabgabe des Akkupacks durch das BMS unterbrochen werden.</p> <p>Test bestanden.</p>	
ANF_17	Hauptschalter	<p>Der zu verwendende Akku wird vollständig geladen und mit dem Fahrzeug verbunden. Anschließend wird die Spannung an der Hauptklemme bei nicht betätigtem und betätigtem Hauptschalter gemessen.</p> <p>Test bestanden.</p>	Multimeter
ANF_18	Nothalt	<p>Der zu verwendende Akku wird vollständig geladen und mit dem Fahrzeug verbunden. Anschließen wird die Eingangsspannung des bzw. der Motorcontroller bei nicht betätigtem und betätigtem Nothalt-Schalter gemessen.</p> <p>Motorcontroller nicht spannungsfrei um eine kontrollierte Bremsung durchzuführen.</p>	Multimeter
ANF_19	Feststellbremse	<p>Das maximal beladene Fahrzeug wird der maximal zulässigen Steigung ausgesetzt. Die Feststellbremse wird aktiviert und geprüft ob das Fahrzeug stehen bleibt. Dieser Test muss sowohl beim Anhalten des ALFs, Betätigung des Nothalts und im Spannungsfreien Zustand absolviert werden.</p> <p>Test bestanden.</p>	Maßband
ANF_20	Grundlage für autonomes Fahren	<p>Alle im folgenden aufgeführten Tests werden zunächst im Stillstand des Fahrzeugs durchgeführt. Anschließend bei 1 km/h und der Maximalgeschwindigkeit von 5 km/h. Des Weiteren werden alle Tests unter verschiedenen Winkeln zwischen allen möglichen Fahrrichtungen des Fahrzeugs und dem jeweiligen Testobjekt durchgeführt (90° und 45°)</p> <p>1. <u>Erkennung einer Treppenstufe:</u></p> <p>Das Fahrzeug wird langsam und vorsichtig im manuellen Modus auf eine hinabführende Treppe</p>	<p>Maßband</p> <p>Kreide</p> <p>Treppe</p> <p>Glastür</p> <p>Getränkedose</p> <p>Teleskopstange HoBo</p> <p>Arno B.</p> <p>Wand</p>

		<p>bewegt. Nun wird überprüft ob die verwendeten Sensoren die Treppenstufe detektieren.</p> <p>Das Fahrzeug wird im zweiten Schritt den Testfall mit Höchstgeschwindigkeit absolvieren.</p> <p>Test bestanden.</p> <p>2. <u>Erkennung von Glasscheiben und. -türen</u></p> <p>Das Fahrzeug wird vor einer Glastür positioniert. Nun wird überprüft ob die verwendeten Sensoren die Glastür detektieren.</p> <p>Test bestanden.</p> <p>3. <u>Erkennung von Hindernissen</u></p> <p>Das Testobjekt (siehe Aufzählung unten) wird im jeweiligen Abstand um das ALF platziert. Nun wird überprüft ob die verwendeten Sensoren das jeweilige Testobjekt detektieren.</p> <p><u>Testobjekte:</u></p> <p>3.1 Getränkedose 0,33 l (Verschiedene Farben) (0,1 m und 1 m)</p> <p>Test nicht bestanden.</p> <p>3.2 Teleskopstange von HoBo (0,1 m bis 1,5 m)</p> <p>Test bestanden.</p> <p>3.3 Arno B. (2,5 m)</p> <p>Test bestanden.</p> <p>3.4 Wand (5 m)</p> <p>Test bestanden.</p>	
ANF_21	Überschreiten der max. Zuladung	Das ALF wird mit der maximal zulässigen Beladung beladen, nun sollte keine Überladung erkannt werden.	Personenwaage

		<p>Anschließend wird die Zuladung um weitere 10% erhöht. Jetzt muss eine Überschreitung erkannt werden.</p> <p>Test bestanden. (Kalibrierung erforderlich)</p>	Gewichte
ANF_22	Kommunikation mit Anwender	<p>1. <u>Displaytest:</u></p> <p>Es wird ein Video im Vollbildmodus abgespielt und geprüft ob dieses einwandfrei abgespielt wird und auch bei heller Umgebung (Sonneneinstrahlung) einwandfrei zu erkennen ist.</p> <p>Test bestanden.</p> <p>2. <u>Audiotest:</u></p> <p>Es wird ein Lied bei voller Lautstärke abgespielt. Beträgt der Schalldruckpegel in 10 m Entfernung noch 55 dB(A), gilt der Test als bestanden.</p> <p>Test bestanden.</p>	Handy Schallpegelmessgerät
ANF_23	Temperaturbereich	Ein Test für diese Anforderung ist mit den zu uns zur Verfügung stehenden Mitteln nur sehr schwer zu realisieren.	Thermometer
ANF_24	Verpolungsschutz	<p>Zunächst wird geprüft ob ein verpoltes anschließen aller Steckverbindungen möglich ist. Wenn dies der Fall ist, wird überprüft ob das Fahrzeug bei verpolten Anschlüssen Schaden nimmt. Für diesen Test muss der Akku des Systems geladen und verbunden sein.</p> <p>Test bestanden.</p>	Keine
ANF_25	Bodenfreiheit	<p>Das Fahrzeug wird mit der maximal zulässigen Beladung beladen. Anschließend wird der Abstand zwischen dem tiefsten Punkt des Fahrzeugs und dem Boden gemessen. Diese Messung findet auf ebenen Untergrund mit einer Steigung von 0° statt.</p> <p>Test bestanden. Bodenabstand = 63mm</p>	Maßband Waage
ANF_26	Manuelle Steuerung	Das ALF wird über die zur manuellen Steuerung vorgesehene Bedieneinheit gesteuert. Nun wird geprüft ob alle	

		<p>Fahrmanöver ausgeführt werden können</p> <ol style="list-style-type: none">1. Beschleunigen2. Bremsen3. Lenken <p>Test bestanden.</p>	
ANF_27	Befestigung der Beladung	<p>Das Fahrzeug wird mit der maximal zulässigen Last beladen. Die Last wird dabei mit dem verbauten Befestigungssystem gesichert. Nun wird das Fahrzeug mit maximaler Geschwindigkeit vorm dem D3 Gebäude bewegt. Es wird überprüft ob es zu keinem verrutschen der Last kommt.</p> <p>Test bestanden.</p>	
ANF_28	Konnektivität per WLAN	<p>Zunächst wird mit einem Handy geprüft ob eine Verbindung mit dem festgelegten Zielnetzwerk möglich ist (z.B. Eduroam). Anschließend wird getestet ob auch eine Verbindung zu dem gewählten durch das ALF möglich ist.</p> <p>Test bestanden.</p>	Handy WLAN

Komponenten

Bezeichnung	Komponente
F1	150A Sicherungsautomat
F2	Unter-/ Überspannungsschutz
Bat1	12V Batterie 1
Bat2	12V Batterie 2
AC/DC	230V -> V_Ges Netzteil
DC/DC_24	V_Ges -> 24V Netzteil
DC/DC_12	V_Ges -> 12V Netzteil
DC/DC_5	V_Ges -> 5V Netzteil
DC/DC_PC	Computer Netzteil
PC	Computer-Hauptsteuerung
LCD	Touch-Monitor
Audio	Audioverstärker für Lautsprecher
LED	LED-Strips zur Beleuchtung
RPi	Raspberry Pi (Schnittstellenerweiterung)
K0	Hauptrelais 1
K1	Hauptrelais 2 (EPOS1 und EPOS2)
K2	Kurzschlussrelais 1 (M1.U)
K3	Kurzschlussrelais 2 (M1.V)
K4	Kurzschlussrelais 3(M1.W)
K5	Kurzschlussrelais 4 (M2.U)
K6	Kurzschlussrelais 5 (M2.V)
K7	Kurzschlussrelais 6 (M2.W)
K8	Kurzschlussrelais 7 (M3.U)
K9	Kurzschlussrelais 8 (M3.V)
K10	Kurzschlussrelais 9 (M3.W)
K11	Kurzschlussrelais 10 (M4.U)
K12	Kurzschlussrelais 11 (M4.V)
K13	Kurzschlussrelais 12 (M4.W)
K14	Rücksetzen von Schaltleisten-Auswerteeinheit
K15	Halten von Hauptrelais K0
K16	PC-Spannungsrelais 12V -> 24V (Rückmeldung)
K17	12V Relais (Reserve)
R2	Bremswiderstand 1 (M1.U)
R3	Bremswiderstand 2 (M1.V)
R4	Bremswiderstand 3(M1.W)
R5	Bremswiderstand 4 (M2.U)
R6	Bremswiderstand 5 (M2.V)
R7	Bremswiderstand 6 (M2.W)
R8	Bremswiderstand 7 (M3.U)
R9	Bremswiderstand 8 (M3.V)
R10	Bremswiderstand 9 (M3.W)
R11	Bremswiderstand 10 (M4.U)
R12	Bremswiderstand 11 (M4.V)

Komponenten

Bezeichnung	Komponente
R13	Bremswiderstand 12 (M4.W)
EPOS1	Controllerplatine 1 (Motor 1 und Motor 2)
EPOS2	Controllerplatine 2 (Motor 3 und Motor 4)
M1	Motor 1 (vorne links)
M2	Motor 2 (vorne rechts)
M3	Motor 3 (hinten rechts)
M4	Motor 4 (hinten links)
FB1	Feststellbremse von Motor 1
FB2	Feststellbremse von Motor 2
FB3	Feststellbremse von Motor 3
FB4	Feststellbremse von Motor 4
S0	Umschalter (Betriebsmodi OnBoard-Energiespeicher, Steckdose, Laden, Aus)
S1	Schlüsselschalter (Anwendermodi Admin, User, Unsafe)
S2	On-Taster
S3	Off-Taster
S4	Reset Taster
S5	Nothalt-Schalter (vorne links)
S6	Nothalt-Schalter (vorne rechts)
S7	Nothalt-Schalter (Tower Deckel)
H1	Alarm LED
H2	On-Taster LED
H3	Off-Taster LED
H4	Reset Taster LED
SEP1	Sensor-Erweiterungs-Platine 1 (vorne links)
SEP2	Sensor-Erweiterungs-Platine 2 (vorne rechts)
SEP3	Sensor-Erweiterungs-Platine 3 (hinten rechts)
SEP4	Sensor-Erweiterungs-Platine 4 (hinten links)
Laser1	Warnlaser 1 (vorne)
Laser2	Warnlaser 2 (hinten)
Flexi	Sicherheits-SPS (FlexiSoft)
UE10	Relais für Feststellbremsen
P1	Treppenerkennungssensor 1 (PowerProx) (vorne links)
P2	Treppenerkennungssensor 2 (PowerProx) (vorne rechts)
P3	Treppenerkennungssensor 3 (PowerProx) (rechts vorne)
P4	Treppenerkennungssensor 4 (PowerProx) (rechts hinten)
P5	Treppenerkennungssensor 5 (PowerProx) (hinten rechts)
P6	Treppenerkennungssensor 6 (PowerProx) (hinten links)
P7	Treppenerkennungssensor 7 (PowerProx) (links hinten)
P8	Treppenerkennungssensor 8 (PowerProx) (links vorne)
B1	Endschalter 1 (Wartungsklappe)
B2	Endschalter 2 (Tür)
Kin1	Kinect-Sensor 1
Kin2	Kinect-Sensor 2

Komponenten

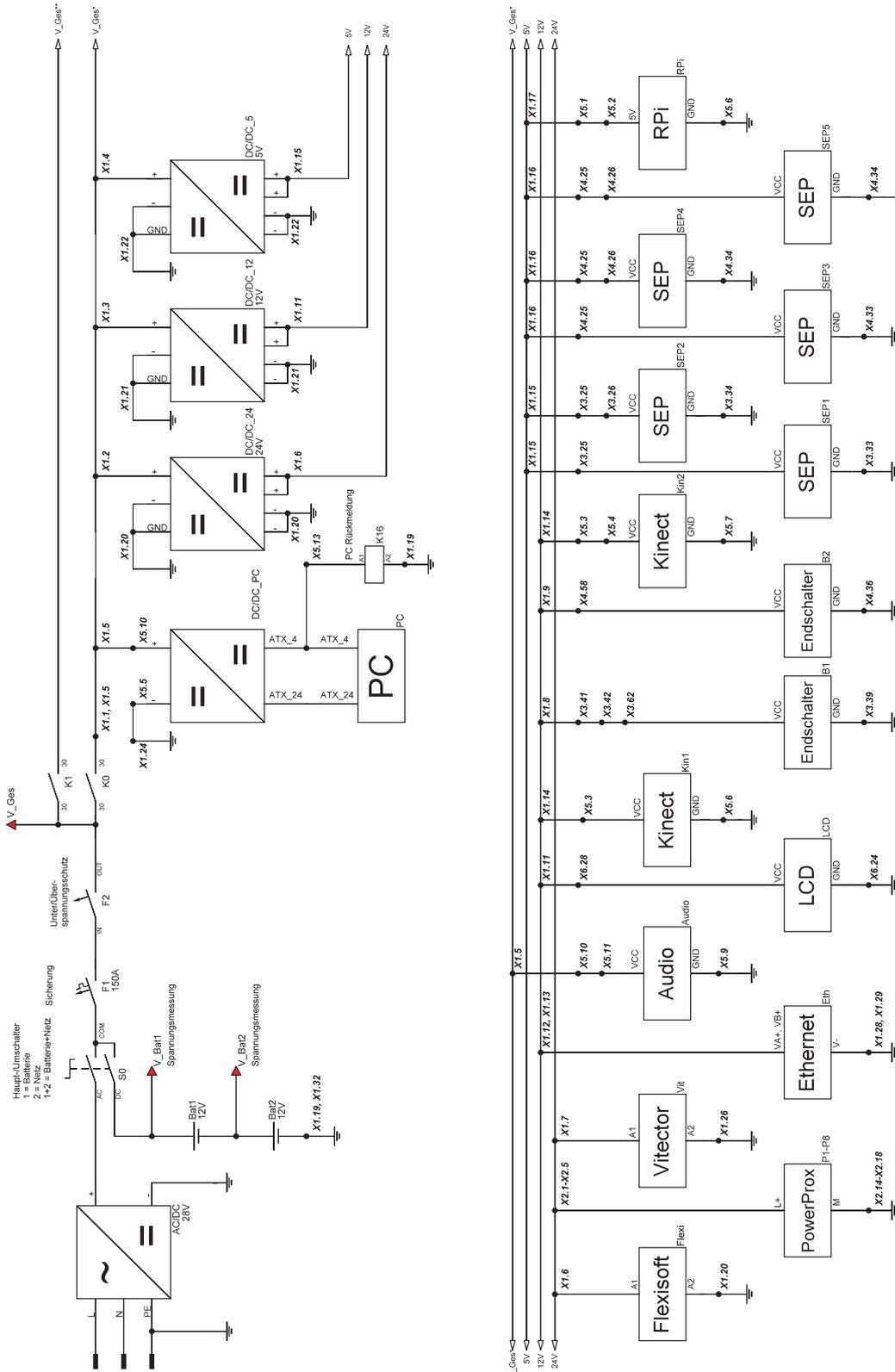
Hochschule Bochum
Bochum University
of Applied Sciences



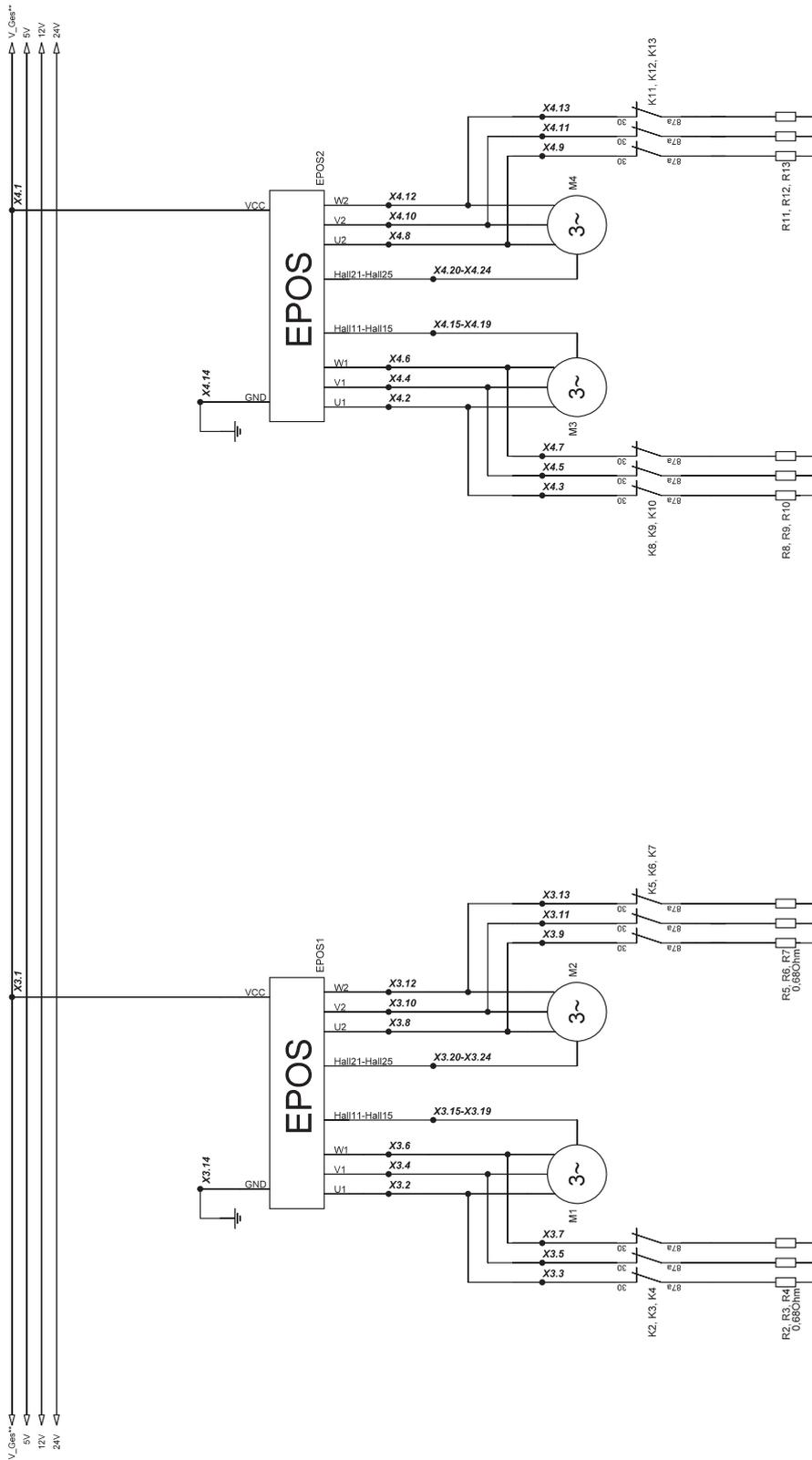
Smart
Mechatronics

Bezeichnung	Komponente
Vit	Auswerteeinheit für Schaltleisten (Vitector)
OSE-T1	Sender Schaltleiste 1
OSE-R1	Empfänger Schaltleiste 1
OSE-T2	Sender Schaltleiste 2
OSE-R2	Empfänger Schaltleiste 2
OSE-T3	Sender Schaltleiste 3
OSE-R3	Empfänger Schaltleiste 3
OSE-T4	Sender Schaltleiste 4
OSE-R4	Empfänger Schaltleiste 4
Prox1	Abstandssensor 1 zur Überlasterkennung
Prox2	Abstandssensor 2 zur Überlasterkennung
Prox3	Abstandssensor 3 zur Überlasterkennung
Prox4	Abstandssensor 4 zur Überlasterkennung
UL1.1	Ultraschallsensor 1 zur Kollisionsvermeidung
UL1.2	Ultraschallsensor 2 zur Kollisionsvermeidung
UL1.3	Ultraschallsensor 3 zur Kollisionsvermeidung
UL1.4	Ultraschallsensor 4 zur Kollisionsvermeidung
UL1.5	Ultraschallsensor 5 zur Kollisionsvermeidung
UL2.1	Ultraschallsensor 6 zur Kollisionsvermeidung
UL2.2	Ultraschallsensor 7 zur Kollisionsvermeidung
UL2.3	Ultraschallsensor 8 zur Kollisionsvermeidung
UL2.4	Ultraschallsensor 9 zur Kollisionsvermeidung
UL2.5	Ultraschallsensor 10 zur Kollisionsvermeidung
UL3.1	Ultraschallsensor 11 zur Kollisionsvermeidung
UL3.2	Ultraschallsensor 12 zur Kollisionsvermeidung
UL3.3	Ultraschallsensor 13 zur Kollisionsvermeidung
UL3.4	Ultraschallsensor 14 zur Kollisionsvermeidung
UL3.5	Ultraschallsensor 15 zur Kollisionsvermeidung
UL4.1	Ultraschallsensor 16 zur Kollisionsvermeidung
UL4.2	Ultraschallsensor 17 zur Kollisionsvermeidung
UL4.3	Ultraschallsensor 18 zur Kollisionsvermeidung
UL4.4	Ultraschallsensor 19 zur Kollisionsvermeidung
UL4.5	Ultraschallsensor 20 zur Kollisionsvermeidung
HE1	Helligkeitssensor 1 zur Lasterkennung
HE2	Helligkeitssensor 2 zur Lasterkennung
HE3	Helligkeitssensor 3 zur Lasterkennung
HE4	Helligkeitssensor 4 zur Lasterkennung
HE5	Helligkeitssensor 5 zur Lasterkennung
HE6	Helligkeitssensor 6 zur Lasterkennung
HE7	Helligkeitssensor 7 zur Lasterkennung
HE8	Helligkeitssensor 8 zur Lasterkennung
LSM9DS1	Beschleunigungssensor
ExtBat	Externe 24V Batterie (zum Lösen der Feststellbremsen)

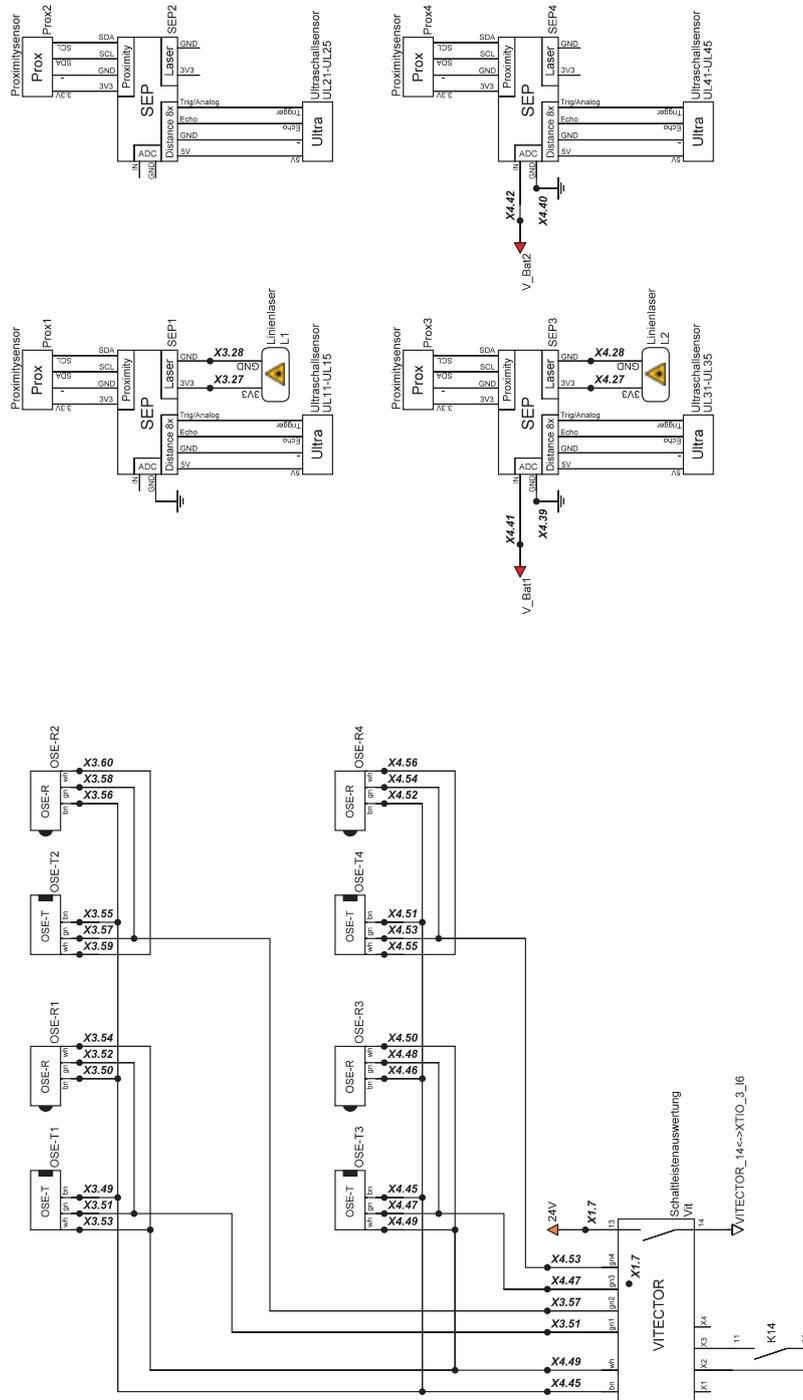
Schaltplan: Hauptstromkreis



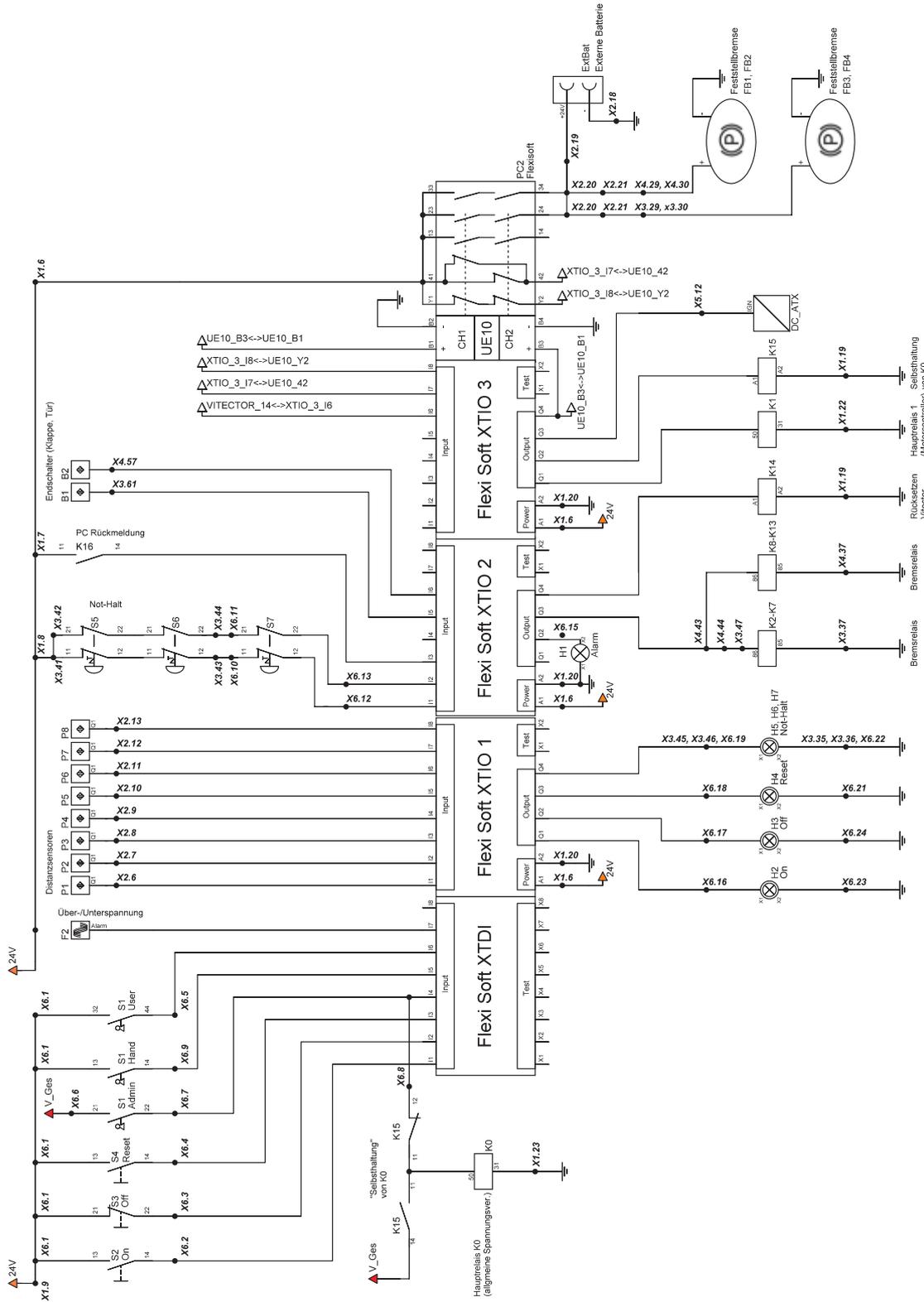
Schaltplan: Motorcontroller



Schaltplan: Schaltleisten/Platinen Schaltplan: Sensoren



Schaltplan: Steuerung



Klemmplan

X1 (Tower rechts)					
Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Ø	Bezeichnung
K0.30	2,5	1	1		
DC/DC_24.in_+	2,5	2	2		
DC/DC_12.in_+	2,5	3	3		
DC/DC_5.in_+	2,5	4	4		
K0.30	2,5	5	5	2,5	X5.10
DC/DC_24.out_+	,75	6	6	,75	Flexi_CPU.A1
K14.COM	,75	7	7	,75	Vit.A1
X2.1	,75	8	8	,75	X3.41
X6.1	,75	9	9	,75	X4.58
		10	10		
DC/DC_12.out_+	,75	11	11	,75	X6.28
Eth.VA+	,75	12	12		
Eth.VB+	,75	13	13		
		14	14	,75	X5.3
DC/DC_5.out_+	,75	15	15	,75	X3.25
		16	16	,75	X4.25
		17	17	,75	X5.1
		18	18		
GND	2,5	19	19	,75	K14.A2
DC/DC_24.in_-	2,5	20	20	,75	Flexi_CPU.A2
DC/DC_12.in_-	2,5	21	21	,75	X2.14
DC/DC_5.in_-	2,5	22	22	,75	K1.31
	,75	23	23	,75	K0.31
	,75	24	24	,75	X5.5
	,75	25	25	,75	X6.20
	,75	26	26	,75	Vit.A2
	,75	27	27	,75	Kin1.GND
Eth.V-	,75	28	28	,75	Kin2.GND
Eth.V-	,75	29	29	,75	
X4.31	,75	30	30	2,5	
X3.31	,75	31	31		
GND	2,5	32	32		

X2 (Flexi)					
Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Ø	Bezeichnung
		1	1	,75	X1.8
P1.L+	,75	2	2	,75	P5.L+
P2.L+	,75	3	3	,75	P6.L+
P3.L+	,75	4	4	,75	P7.L+
P4.L+	,75	5	5	,75	P8.L+
P1.Q1	,75	6	6	,75	Flexi_XTIO1.I1
P2.Q1	,75	7	7	,75	Flexi_XTIO1.I2
P3.Q1	,75	8	8	,75	Flexi_XTIO1.I3
P4.Q1	,75	9	9	,75	Flexi_XTIO1.I4
Flexi_XTIO1.I5	,75	10	10	,75	P5.Q1
Flexi_XTIO1.I6	,75	11	11	,75	P6.Q1
Flexi_XTIO1.I7	,75	12	12	,75	P7.Q1
Flexi_XTIO1.I8	,75	13	13	,75	P8.Q1
P1.M	,75	14	14	,75	X1.18
P2.M	,75	15	15	,75	P5.M
P3.M	,75	16	16	,75	P6.M
P4.M	,75	17	17	,75	P7.M
ExtBat_-	2,5	18	18	,75	P8.M
ExtBat_+24V	2,5	19	19		
UE10.24	,75	20	20	,75	UE10.34
X3.29	,75	21	21	,75	X4.29

Klemmplan

X3 (EPOS_vorne)

Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Ø	Bezeichnung
K1.30	6	1	1	6	EPOS1.VCC
EPOS1.U1	2,5	2	2	2,5	M1.U
	2,5	3	3	2,5	K2.30
EPOS1.V1	2,5	4	4	2,5	M1.V
	2,5	5	5	2,5	K3.30
EPOS1.W1	2,5	6	6	2,5	M1.W
	2,5	7	7	2,5	K4.30
EPOS1.U2	2,5	8	8	2,5	M2.U
	2,5	9	9	2,5	K5.30
EPOS1.V2	2,5	10	10	2,5	M2.V
	2,5	11	11	2,5	K6.30
EPOS1.W2	2,5	12	12	2,5	M2.W
	2,5	13	13	2,5	K7.30
GND	6	14	14	6	EPOS1.GND
EPOS1.Hall11	,75	15	15	,75	M1.Hall1
EPOS1.Hall12	,75	16	16	,75	M1.Hall2
EPOS1.Hall13	,75	17	17	,75	M1.Hall3
EPOS1.Hall14	,75	18	18	,75	M1.Hall4
EPOS1.Hall15	,75	19	19	,75	M1.Hall5
EPOS1.Hall21	,75	20	20	,75	M2.Hall1
EPOS1.Hall22	,75	21	21	,75	M2.Hall2
EPOS1.Hall23	,75	22	22	,75	M2.Hall3
EPOS1.Hall24	,75	23	23	,75	M2.Hall4
EPOS1.Hall25	,75	24	24	,75	M2.Hall5
X1.15	,75	25	25	,75	SEP1.VCC
	,75	26	26	,75	SEP2.VCC
L1.3V3	,75	27	27	,75	SEP1.L_3V3
L1.GND	,75	28	28	,75	SEP1.L_GND
X2.21	,75	29	29	,75	M1.Fest.VCC
	,75	30	30	,75	M2.Fest.VCC
X1.27	,75	31	31	,75	M1.Fest.GND
		32	32	,75	M2.Fest.GND
		33	33	,75	SEP1.GND
		34	34	,75	SEP2.GND
		35	35	,75	S5.X2
		36	36	,75	S6.X2
		37	37	,75	K4.85
		38	38	,75	K5.85
		39	39	,75	B1.GND
		40	40		
X1.8	,75	41	41	,75	S5.11
X3.62	,75	42	42	,75	S5.21
X6.10	,75	43	43	,75	S6.12
X6.11	,75	44	44	,75	S6.22
Flexi_XTIO1.Q4	,75	45	45	,75	S5.X1
		46	46	,75	S6.X1
X4.44	,75	47	47	,75	K4.86
		48	48	,75	K5.86
		49	49	,75	OSE-T1.bn
X3.55	,75	50	50	,75	OSE-R1.bn
Vit.gn1	,75	51	51	,75	OSE-T1.gn
		52	52	,75	OSE-R1.gn
		53	53	,75	OSE-T1.wh
X3.59	,75	54	54	,75	OSE-R1.wh
X3.50	,75	55	55	,75	OSE-T2.bn
X4.52	,75	56	56	,75	OSE-R2.bn
Vit.gn2	,75	57	57	,75	OSE-T2.gn
		58	58	,75	OSE-R2.gn
X3.54	,75	59	59	,75	OSE-T2.wh
X4.56	,75	60	60	,75	OSE-R2.wh
Flexi_XTIO3.I4	,75	61	61	,75	B1.Signal
X3.42	,75	62	62	,75	B1.VCC

X4 (EPOS_hinten)

Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Ø	Bezeichnung
K1.30	6	1	1	6	EPOS2.VCC
EPOS1.U3	2,5	2	2	2,5	M3.U
	2,5	3	3	2,5	K8.30
EPOS1.V3	2,5	4	4	2,5	M3.V
	2,5	5	5	2,5	K9.30
EPOS1.W3	2,5	6	6	2,5	M3.W
	2,5	7	7	2,5	K10.30
EPOS1.U4	2,5	8	8	2,5	M3.U
	2,5	9	9	2,5	K11.30
EPOS1.V4	2,5	10	10	2,5	M3.V
	2,5	11	11	2,5	K12.30
EPOS1.W4	2,5	12	12	2,5	M3.W
	2,5	13	13	2,5	K13.30
GND	6	14	14	6	EPOS2.GND
EPOS2.Hall11	,75	15	15	,75	M3.Hall1
EPOS2.Hall12	,75	16	16	,75	M3.Hall2
EPOS2.Hall13	,75	17	17	,75	M3.Hall3
EPOS2.Hall14	,75	18	18	,75	M3.Hall4
EPOS2.Hall15	,75	19	19	,75	M3.Hall5
EPOS2.Hall21	,75	20	20	,75	M4.Hall1
EPOS2.Hall22	,75	21	21	,75	M4.Hall2
EPOS2.Hall23	,75	22	22	,75	M4.Hall3
EPOS2.Hall24	,75	23	23	,75	M4.Hall4
EPOS2.Hall25	,75	24	24	,75	M4.Hall5
X1.16	,75	25	25	,75	SEP3.VCC
SEP5.VCC	,75	26	26	,75	SEP4.VCC
SEP3.L_3V3	,75	27	27	,75	L2.VCC
SEP3.L_GND	,75	28	28	,75	L2.GND
X2.21	,75	29	29	,75	M3.Fest.VCC
	,75	30	30	,75	M4.Fest.VCC
X1.28	,75	31	31	,75	M3.Fest.GND
	,75	32	32	,75	M4.Fest.GND
	,75	33	33	,75	SEP3.GND
SEP5.GND	,75	34	34	,75	SEP4.GND
		35	35		
		36	36	,75	B2.GND
		37	37	,75	K10.85
		38	38	,75	K11.85
		39	39	,75	SEP3.ADC_GND
Batterie2-	,75	40	40	,75	SEP4.ADC_GND
Batterie1+	,75	41	41	,75	SEP3.ADC_IN
Batterie2+	,75	42	42	,75	SEP4.ADC_IN
Flexi_XTIO3.Q3	,75	43	43	,75	K10.86
X3.47	,75	44	44	,75	K11.86
Vit.bn	,75	45	45	,75	OSE-T3.bn
X4.51	,75	46	46	,75	OSE-R3.bn
Vit.gn3	,75	47	47	,75	OSE-T3.gn
		48	48	,75	OSE-R3.gn
Vit.wh	,75	49	49	,75	OSE-T3.wh
X4.55	,75	50	50	,75	OSE-R3.wh
X4.46	,75	51	51	,75	OSE-T4.bn
X3.56	,75	52	52	,75	OSE-R4.bn
Vit.gn4	,75	53	53	,75	OSE-T4.gn
		54	54	,75	OSE-R4.gn
X4.50	,75	55	55	,75	OSE-T4.wh
X3.60	,75	56	56	,75	OSE-R4.wh
Flexi_XTIO3.I5	,75	57	57	,75	B2.Signal
X1.9	,75	58	58	,75	B2.VCC

Klemmplan

X5 (Tür)				
Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Bezeichnung
		1	1	,75 X1.17
		2	2	,75 RPi.5V
Kin1.VCC	,75	3	3	,75 X1.14
Kin2.VCC	,75	4	4	
DC/DC_PC.in_-	2,5	5	5	2,5 X1.24
Kin1.GND	,75	6	6	,75 RPi.GND
Kin2.GND	,75	7	7	
		8	8	
AUDIO.GND	,75	9	9	
DC/DC_PC.in_+	2,5	10	10	2,5 X1.5
AUDIO.VCC	,75	11	11	
DC/DC_PC.IGN	,75	12	12	,75 Flexi_XTIO3.Q3
K16.A1	,75	13	13	,75 TPC.out_+

Legende

V_Ges
24V
12V
5V & 3,3V
GND
57A Klemme
24A Klemme
Brücke

X6 (Deckel)				
Bezeichnung	Ø	Klemme	Klemme	Bezeichnung
X1.10	,75	1	1	,75 S2.13
Flexi_XTDI.I1	,75	2	2	,75 S2.14
Flexi_XTDI.I2	,75	3	3	,75 S3.22
Flexi_XTDI.I3	,75	4	4	,75 S4.14
Flexi_XTDI.I6	,75	5	5	,75 S1.44
K15.11	,75	6	6	,75 S1.21
Flexi_XTDI.I4	,75	7	7	,75 S1.22
		8	8	
Flexi_XTDI.I5	,75	9	9	,75 S1.14
X3.43	,75	10	10	,75 S7.11
X3.44	,75	11	11	,75 S7.21
Flexi_XTIO2.I1	,75	12	12	,75 S7.12
Flexi_XTIO2.I2	,75	13	13	,75 S7.22
		14	14	,75
Flexi_XTIO2.Q2	,75	15	15	,75 H1.X2
Flexi_XTIO1.Q1	,75	16	16	,75 H2.X1
Flexi_XTIO1.Q2	,75	17	17	,75 H3.X1
Flexi_XTIO1.Q3	,75	18	18	,75 H4.X1
Flexi_XTIO1.Q4	,75	19	19	,75 H7.X1
X1.25	,75	20	20	,75
		21	21	,75 H4.X2
		22	22	,75 H7.X2
		23	23	,75 H2.X2
		24	24	,75 H3.X2
		25	25	,75 H1.X2
		26	26	
		27	27	,75 LCD.GND
X1.14	,75	28	28	,75 LCD.VCC