

Hochschule Merseburg (FH)
University of Applied Sciences



Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Bachelorarbeit zum Thema:

Machbarkeitsstudie zum Einsatz eines fahrerlosen
Transportfahrzeuges in einem Unternehmen der Feinchemie
zur Erlangung des Grades Bachelor of Engineering (B. Eng)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ortwein

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Frank Mahlert

eingereicht von: Oliver Hache

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Matrikel-Nummer: [REDACTED]

Abgabetermin: 08.04.2022

Abstract

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Ausrüstung eines Gabelstaplers für autonomes Fahren und Gütertransport.

Zunächst wird der Stand der Technik abgehandelt.

Außerdem geht es um den Vergleich verschiedener Methoden zur autonomen und sicheren Navigation, der Überwachung von Aktorik, und Programmen, die Daten von vorgeschlagenen Sensoren filtern, normieren und in ein Navigationssystem einbringen können.

Schlagwörter

Autonomes Fahren, Objekterkennung, Objektidentifizierung, Gabelstapler, Industrie 4.0

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	8
1.1.	Zielstellung	11
1.1.1.	Autonomes Fahren	11
1.1.2.	Autonome Ein- und Auslagerung.....	12
1.1.3.	Autonomes Energie-Management	12
1.2.	Aktueller Stand	12
1.2.1.	Fahrerlose Transportfahrzeuge im Indoor-Bereich.....	12
1.2.2.	Fahrerlose Transportfahrzeuge im Outdoor-Bereich.....	13
2.	Herausforderung	16
2.1.	Standortanforderungen.....	16
2.1.1.	Einsatzzeiten.....	16
2.1.2.	Geographische Bedingungen.....	16
2.1.3.	Witterungsbedingungen.....	19
2.1.4.	Lokale Lagerinfrastruktur	19
2.1.5.	Technische Infrastruktur	20
2.1.6.	Rechtliche Bedingungen	21
2.2.	Datenerfassung und -Kommunikation	22
2.2.1.	Zusätzliche Bidirektionale Datenübertragung mit dem ERP	22
2.2.2.	Überprüfung der Gebinde	22
2.2.3.	Anbindung an das Bussystem.....	22
3.	Methodik.....	24
4.	Lösungsansätze.....	25
4.1.	Nötige Sensorsysteme.....	25
4.1.1.	Lokalisierung und Orientierung	25
4.1.2.	Gebinde-Identifikation	35
4.1.3.	Objekterkennung.....	37
4.1.4.	Überwachung der Motorik des StockDroiden.....	37

4.2.	Software:	39
4.2.1.	Level der Automatisierung	39
4.2.2.	Software für automatische Paletten-Erkennung.....	40
4.2.3.	SLAM-Algorithmen:	42
4.2.4.	Kalman-Filter	50
4.2.5.	Steuralgorithmen für Spurfindung	50
5.	Vorstellung einer Komplettlösung.....	54
5.1.	Navigation von FTFs.....	54
5.1.1.	Odometrie und LIDAR-SLAM	54
5.1.2.	RFID-basierte Navigation.....	55
5.2.	Lokalisation und Identifikation von Gebinden	55
5.2.1.	Lokalisierung.....	55
5.2.2.	Identifikation	56
5.3.	Sicherheitstechnik	57
5.4.	Überwachung der Gabelbewegung.....	57
5.5.	Aktorik und PC.....	57
5.6.	Bilanz	58
6.	Fazit	59
7.	Glossar	60
8.	Literaturverzeichnis.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kreuzung mit intelligenten Fahrzeugen	8
Abbildung 2: Kreuzung durch Linksabbieger blockiert.....	8
Abbildung 3: Aufgaben von FTFs in der Industrie	14
Abbildung 4: Einsatzbereich von FTF in der Industrie	15
Abbildung 5: Lageplan des Standortes (A4-Lageplan im Anhang)	17
Abbildung 6: Blickwinkel 1.....	17
Abbildung 7: Blickwinkel 2.....	17
Abbildung 8: Blickwinkel 3.....	18
Abbildung 9: Blickwinkel 4.....	18
Abbildung 10: Blickwinkel 5	18
Abbildung 11: Blickwinkel 6	18
Abbildung 12: Blickwinkel 7	18
Abbildung 13: Blickwinkel 8	18
Abbildung 14: Blickwinkel 9	19
Abbildung 15: Blickwinkel 10	19
Abbildung 16: Skizze des Lagers L1	20
Abbildung 17: Skizze des Gefahrenstofflagers L2	20
Abbildung 18: schematische Darstellung des Gefahrenstofflagers L2.....	20
Abb.: 19: Gabelstapler E20 evo	21
Abbildung 20: Sicherheitsintegrationslevel: Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate	21
Abbildung 21: Sicherheitsintegrationslevel: Betriebsart mit kontinuierlicher Anforderungsrate	21
Abbildung 22: Referenzstationen für SAPOS in Sachsen-Anhalt.....	27
Abbildung 23: Funktionsweise der Positionierung mit GPS und Korrekturdaten	27
Abbildung 24: 4 Herangehensweisen an die Aufnahme von 3D-Lidar-Daten.....	30
Abbildung 25: Skizze der Funktionsweise des MEMS	32
Abbildung 26: Schema eines magnetischen Lesegerätes.....	35
Abbildung 27: tatsächliche und gemessene Marker-Positionen in U-Kurve.....	35
Abbildung 28: Darstellung der Gabelneigung	38
Abbildung 29: seitliche Verschiebung des Gabelstaplers.....	38
Abbildung 30: vertikale Verschiebung der Gabel.....	39
Abbildung 31: Ausfahren des Mastes.....	39
Abbildung 32: Aufbau eines neuronalen Netzwerkes für mehrschichtiges Lernen.....	42
Abbildung 33: Begriffe der Epipolargeometrie	42
Abbildung 34: Vergleich von Methoden für das Zusammenfügen von Lidar- und IMU-Daten	48

Abbildung 35: Skizzen von 3 Dezimierungsfunktionen	48
Abbildung 36: Reduktion der Datenpunkte am Beispiel eines Gebirges	49
Abbildung 37: Profildraufsicht der 4 Beispiele	49
Abbildung 38: schematische Darstellung der Auswahl von Punkten die gelöscht werden	49
Abbildung 39: Arbeitsspeicherauslastung und Berechnungszeit über Datensatzgröße	52
Abbildung 40: Orte für Sensoren-Installation	54
Abbildung 41 Abstand zwischen Gebinde und Gabelstapler	56
Abbildung 42: Anfahrt an einen IBC	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stufen des Autonomen Fahrens	9
Tabelle 2:	Vergleich verschiedener Sensorkombinationen mit GPS-Navigation.....	26
Tabelle 3:	Kosten für Korrekturdaten der SAPOS.....	28
Tabelle 4:	Kosten und Genauigkeit kommerzieller Anbieter	28
Tabelle 5:	Hersteller von Lidar-Sensoren und deren angewendete Technik	30
Tabelle 6:	Resultierender Genauigkeitsverlust	32
Tabelle 7:	Eigenschaften der Radiofrequenzbereiche.....	34
Tabelle 8:	Vergleich von Positionierungsmethoden basierend auf RFID	34
Tabelle 9:	Eigenschaften des behandelten Navigationssystems.....	35
Tabelle 10:	Vor- und Nachteile von GNSS und SLAM	42
Tabelle 11:	Vergleich der Auswertung durch unterschiedliche Methoden von verschiedenen Objekten (Rechtwinkligkeit und Größenverhältnis; Ziel 90 und 1).....	43
Tabelle 12:	Vergleich der Genauigkeit von verschiedenen auf GPS-basierenden Systemen.....	45
Tabelle 13:	wichtige Eigenschaften und Preise der Nvidia JETSON-Reihe	46
Tabelle 14:	Vergleich der absoluten Genauigkeiten der SLAM-Algorithmen.....	46
Tabelle 15:	Datenreduktion für 4 verschiedene Oberflächen.....	49
Tabelle 16:	Vor- und Nachteile der Kontrollalgorithmen	51
Tabelle 17:	Genauigkeiten der Kontrollalgorithmen für verschiedene Geschwindigkeiten	51
Tabelle 18:	Arbeitsspeicher und benötigte Rechenleistung für verschieden große Datensätze	52
Tabelle 19:	Computer-Setups zur Ausgabe der Punktwolkendaten mit Auslastungsprofi	53

Abkürzungsverzeichnis

A

ADRC · *Active Disturbance Rejection Control*
AGV · *automated guided vehicle*
APD · *avalanche photodiodes*
API · *application program interface*

C

CAN · *controller area network*
CPU · *central processing unit*

D

DGPS · *Differentielle Globale Positionierungs-System*
DOF · *Degree of Freedom*

E

EGNOS · *European Geostationary Navigation Overlay Service*
ERP · *enterprise resource planning*
ESA · *European Space Agency*

F

FMCW · *frequency modulated continuous wave*
FPS · *frames per second*
FTF · *fahrerlose Transportfahrzeuge*
Fzf · *Fahrzeugführung*

G

GPS · *Global-Positioning-Service*
GPU · *graphics processing unit*
GSPN · *Generalized Stochastic Petri Nets*

I

IBC · *intermediate Bulk container*
IMU · *inertial measurement unit*
INS · *inertial navigation system*
IoT · *Internet of Things*
ISVD · *image singular value decomposition*

L

Lidar · *Light detection and ranging*
LKW · *Lastkraftwagen*
LPV · *linear parameter varying*

M

MEMS · *mikroelektrische mechanische Systeme*
MOT · *multiple Objekt-Tracking*
MPC · *Model Predictive Control*

N

NIR · *nahes infrarot*

O

OPA · *optical phase array*

P

PKW · *Personenkraftwagen*
PPM · *Pure Pursuit Mode*

R

RMSE · *root mean square error*
ROS · *Robot operating system*

RTK · *real time kinematic*

SWIR · *short wave infrared*

S

SAPOS · *Satellitenpositionierungsdienst*

SFFSD · *statistic filter of feature space displacement*

SIL · *Sicherheitsintegrationslevel*

SiPM · *Silicium photo multiplier*

SLAM · *simultanous localization and mapping*

SPAD · *single photon avalanche diode*

T

ToF · *Time of flight*

V

VS · *vehicle sensors*

1. Einleitung

Verkehrschaos und Stau sind auf der Straße allgemein akzeptiert, über Verspätungen von Bus und Bahn regen sich zwar jede Menge Menschen auf, trotzdem scheint sich nichts zum Positiven zu entwickeln. Jedes Jahr fahren zudem mehr Autos auf der Straße und es wird vor allem allein gefahren (Zuwachs: 2018: 1,6% [1]; 2019: 1,6% [2]; 2020, 1,6% [3]). Car-Sharing (engl. Auto-teilen) und Mietautos wirken dem Trend zwar langsam entgegen [4]. Die Anzahl der Staus wird dadurch jedoch kaum verringert. Die Lösung des Mobilitätsproblems scheinen FTF (fahrerlose Transportfahrzeuge; engl. AGV automated guided vehicle) zu sein. Sie können Staus verhindern, indem sie miteinander kommunizieren und ihre Geschwindigkeit anpassen, um andere intelligente Fahrzeuge einordnen zu lassen oder damit sie Kreuzungen überqueren können. Ein Beispiel aus dem Alltag sind Linksabbieger ohne Linksabbiegerspur, da kein Fahrzeugführer anhalten möchte und den Verkehr auf seiner eigenen Spur verzögern möchte, staut sich der Verkehr auf der anderen Fahrseite immer weiter an. Bei vielbefahrenen Straßen kann das zu erheblichen Zeitverlusten führen, obwohl überhaupt keine Fahrbahnbehinderung im eigentlichen Sinne vorliegt. Abbildung 1 und 2 vergleichen eine solche Abbiegung.

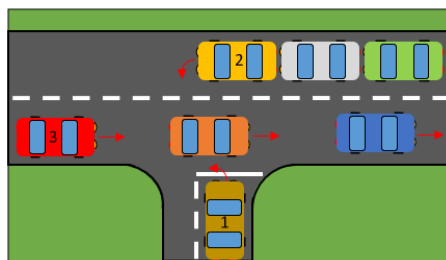


Abbildung 2: Kreuzung durch Linksabbieger blockiert

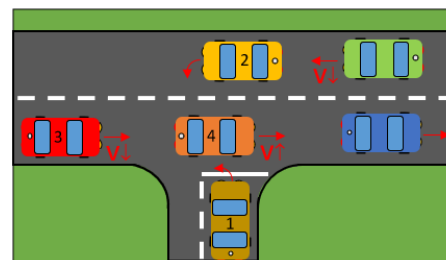


Abbildung 1: Kreuzung mit intelligenten Fahrzeugen

In Abbildung 5 ist eine typische Situation des Verkehrs, der heutzutage auftritt, dargestellt. Ein Linksabbieger (Fahrzeug 2) blockiert eine komplette Fahrbahn, da die Gegenfahrer (Fahrzeug 3) den Verkehr ihrer eigenen Fahrbahn nicht verzögern wollen. Natürlich werden dadurch auch alle Fahrzeuge der anderen Fahrbahn verhindert (Fahrzeug 1). Bei einer Beispiel-Kreuzung (Abbildung 2) mit intelligenten Fahrzeugen (mit grauen Punkten markiert) kann eine Blockade durch die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander aufgelöst werden, beziehungsweise würde sie gar nicht erst entstehen. Da die Fahrzeuge 1 und 2 abbiegen wollen, wird den entgegenkommenden Fahrzeugen 3 und 4 kommuniziert, dass sie ihre Geschwindigkeit erhöhen ($v\uparrow$) oder senken ($v\downarrow$) müssen. Durch diese leichte Geschwindigkeitsveränderung der Fahrzeuge 3 und 4, die deren Fahrzeit kaum beeinflusst, kann das Abbiegen der Fahrzeuge 1 und 2 ermöglicht werden. Kein Fahrzeug in Abbildung 2 muss anhalten, sodass die Verkehrsdichte und die Effizienz der Straße ungemein erhöht werden kann.

Viele Wissenschaftler kooperieren hierfür schon mit Autokonzernen, die als Erste eine solche Lösung entwickeln wollen. Die ersten Schritte dieser Entwicklung sind bereits implementierte Fahrer-Assistenz-Systeme, allerdings bilden sie nur die erste von fünf Stufen des autonomen Fahrens (siehe

Tabelle 1). Ziel dieser Anstrengungen sind intelligente Fahrzeuge, bei denen der Mensch nicht mehr als Fahrzeugführer agiert, sondern nur als Passagier mitreist. SIEMENS, Renault, Daimler, Audi und Lufthansa sind nur wenige der Firmen, die sichere autonome Fahrzeuge konzipieren wollen, um als erste Mobilität als Dienstleistung und nicht als nutzbares Eigentum anbieten zu können. [5]

Level	Name	Fzf-Übernahme	Menschliche Rolle	Bsp.:
1	Assistiertes Fahren	Quer oder Längs	Dauerhafte	ACC, Parkassistent
2	Teilautomatisiertes Fahren	Quer und Längs	Überwachung, zum Eingreifen bereit	Stau-, Spurhalteassistent
3	Hochautomatisiertes Fahren		Eingreifen nach Aufforderung	Autobahnfahrt
4	Vollautomatisiertes Fahren	Vollständig in spez. Situationen	Kein Eingreifen	Valet parking
5	Autonomes Fahren	Vollständig		

Tabelle 1: Stufen des Autonomen Fahrens (Fahrzeugführung abgek.: Fzf) Vergl. [5], Abb.: 1.1

Die sich anbahnende Automatisierung hört nicht im öffentlichen Straßenverkehr auf, sie zieht sich durch alle Aspekte des Lebens, auch in der Industrie. Die Anschaffung von autonomen Fahrzeugen ist aufgrund der verbauten Hard- und Software bedeutend teurer als die Einstellung eines Mitarbeiters, der die gleiche Arbeit erledigt. Die entscheidenden Punkte sind aber die laufenden Kosten und die Einsatzzeiten. Ein durch perfekte Implementierung, fehlerfreier Roboter steigert die Effektivität von Fabriken und Logistikzentren maßgeblich.

Für eine solche Automatisierung sind nicht unbedingt Fahrzeuge nötig. Von Firmen wie DAMBACH Lagersysteme GmbH & Co. KG werden Lager als Komplett-Paket verkauft. [6] Diese Lagersysteme können an ERP-Programme (enterprise resource planning) angebunden werden und verwalten Lagerbestände mit bedeutend höherer Effizienz als ein von Menschen verwaltetes Lager. Sensorik muss hier nur zum Personenschutz oder zur Ortung und Identifizierung von Waren installiert werden. Der 2. Weg zur Lagerautomatisierung funktioniert über FTFs. Auch hier hängt die Komplexität der Sensorik von den benutzten Systemen ab. Einfache Modelle wie die „LEO Locative“ von BITO Lagertechnik GmbH werden durch optische Spurführung gesteuert, dabei folgt das jeweilige Fahrzeug einer auf den Boden geklebten Linie. Aufträge oder Anweisungen erhält es durch neben der Spur, am Boden angebrachte Barcodes. Mit der Objektdetektion in Fahrtrichtung sind es lediglich 3 Systeme mit denen diese FTFs schon „autonom“ funktionieren kann. [7]

Die Orientierung anhand von anderen Systemen und eine höhere Bewegungsfreiheit führen dazu, dass zusätzliche Systeme installiert werden müssen. Omnidirektionale Objektüberwachung und zusätzliche Sensoren für die Genauigkeit der Orientierung resultieren in immer komplexeren Lösungen und umfangreicheren Rechnungen. [8] [9] Dadurch steigen zudem der Stromverbrauch und die benötigte Rechenleistung.

Lösungen für den Indoor-Bereich gibt es bereits, Firmen wie Linde Material Handling [10], Jungheinrich [11], Toyota Material Handling [12] bieten autonome Gabelstapler für die Lagerverwaltung an. Durch

die einfachen Standortanforderungen (ebener Boden, keine Witterung) und die im Indoor-Bereich leicht zu installierenden Navigationssysteme sind dafür entwickelte Produkte ohne Probleme in anderen Indoor-Umgebungen einsetzbar.

Anders sieht es für den Outdoor-Bereich aus. Es ist praktisch kein Angebot vorhanden, mit Ausnahme von Speziallösungen zum Beispiel von der Firma EK Automation GmbH. Hierbei geht es um den Transport von Tabakwaren zwischen verschiedenen Lagern. Die Navigation wird hier auch mittels optischer Spurlinien und im Boden eingelegten Magnetschleifen geführt. Die einzige Aufgabe ist hierbei jedoch der Transport von Punkt A nach B. [13]

Die Besonderheit des Standortes der Miltitz Aromatics GmbH und der einhergehenden Herausforderungen lässt sich durch die spezielle Branche erklären. Die Integration eines fahrerlosen Transportfahrzeuges, wie dem StockDroiden wird durch den Batchbetrieb begünstigt. Dieser wird vornehmend in der Feinchemie und der Pharmazie angewendet, da es meist um geringe Mengen oder wechselnde Produkte geht. So ist es auch im Falle der Miltitz Aromatics GmbH. Die vertriebenen Stoffe reichen von leicht veränderten Vorprodukten, bis zu selbstentwickelten Aromastoffen, wie Hydroxyambran. [14] [15] Die Branchen, welche sich der Stoffe bedienen bestehen auf hohe Qualität. Resultat des Batchbetriebs und der von der Industrie abhängigen strengen Kontrollen sind das Handling der Stoffe in IBCs und Fässern. Die verwendeten Behältnisse stehen allesamt auf Paletten, wodurch nur eine Form der Aufnahme nötig ist.

Ein weiterer Grund, warum der Einsatz des Batchbetriebes in dieser Branche Anwendung findet, ist das variierende Anforderungsprofil durch Kunden. Im Lager müssen deshalb viele Ausgangsstoffe vorhanden sein, um die Anfragen auf Basis des Produktkatalogs zeitnah erfüllen zu können. Die Gesamtmenge der eingelagerten IBCs und Paletten beläuft sich auf circa 1000 Behälter. Durch die Automatisierung können menschliche Fehler reduziert werden, indem der StockDroid® die verlangten Behälter aus der Menge heraussucht und am Übergabeort bereitstellt. Eingesparte Arbeitsstunden können nach der Integration für die weitere Verbesserung von Produktionsabläufen und eine Steigerung der Effizienz verwendet werden.

Die Standortanforderungen, als auch die Aufgaben des Produktes der Bachelorarbeit unterscheiden sich massiv von bisherigen Anwendungen des autonomen Fahrens in der Industrie. Neben der autonomen Navigation (Level 5) gehören auch die Lokalisierung, Identifizierung, Überprüfung und das Handling der Gebinde zum Aufgabenfeld des StockDroiden®. Festzuhalten ist jedoch, dass es eine, in ihrer Komplexität fast beispiellose Problemstellung der Automatisierung ist. Sie verbindet die Herausforderungen des autonomen Fahrens mit der Schwierigkeit der zentimetergenauen Positionierung für das Material-Handling. Der StockDroid® agiert zwar in einer bedeutend weniger befahrenen, aber anspruchsvolleren Umgebung.

1.1. Zielstellung

1.1.1. Autonomes Fahren

Eine wesentliche Herausforderung ist das autonome Fahren des StockDroiden® auf dem Firmengelände. Dazu soll ein handelsüblicher Elektro-Gabelstapler, der mit anwendungsorientierter Sensorik und Aktorik ausgestattet ist, auf dem Firmengelände eigenständig (Level 5 s. oben) navigieren können. In Frage kommen verschiedene Systeme, die im Rahmen der Bachelorarbeit verglichen und bewertet werden. Dabei soll es vor allem um GPS (Global-Positioning-Service), 5G (Mobilfunknetz), oder stereo-optische Systeme, Odometrie oder um eine Kombination der Technik gehen.

Es ist das Konzept für eine umfassende, sichere und komplexe Sensor-Aktor-Kommunikation zur Steuerung der Fahrbewegung des Gabelstaplers zu entwickeln, welche in den vorhandenen Elektro-Gabelstapler zu integrieren ist. Die Recherche ergab, dass die Abweichung 0,1 m, beziehungsweise 2° bei der Positionierung des Gabelstaplers nicht überschreiten darf. Da sonst keine sichere Aufnahme von Gebinden gewährleistet werden kann. Da das Arbeitsgelände in vielen Bereichen geneigt ist, muss auch dieser Wert für die Ausrichtung, bspw. mittels gyroskopischer Sensoren (0,1° Genauigkeit), überwacht werden.

Die Komplexität der Aufgabenstellung wird zudem dadurch erhöht, dass Umstellen, Anliefern und das Verbrauchen von palettierten Gebinden zur Veränderung der virtuellen Karte des Gabelstaplers führen. Die Gebinde sind teilweise aus Metall, stehen insbesondere bei der Blocklagerung dicht beieinander oder sind bei der Regallagerung in (überdachte) metallische Regalen eingelagert, was zu Störungen/ Signalverlust etwa bei (aktiven) RFID-Transpondern (Radiofrequenz Identifikation) oder der Ortung via GPS/5G führen kann.

Der StockDroid® wird ausschließlich außerhalb des öffentlichen Verkehrs auf dem umzäunten Betriebsgelände der Miltitz Aromatics GmbH betrieben. Zur Garantie der Sicherheit von Mitarbeitern und Dritten auf dem Betriebsgelände, muss der StockDroid® sicher und reproduzierbar reagieren. Der StockDroid® muss jederzeit Objekte und Personen innerhalb eines 360°- Radius mit ausreichend Sicherheitsabstand erkennen, die Relativbewegung erfassen und nach autonomer Bewertung angemessen reagieren. Unabhängig von gesetzlich geforderter optischer und akustischer Warnung bei Bewegungen des StockDroid® muss er bei Gefahrensituationen mit Entschleunigung, womöglich bis zum Stillstand oder einem Ausweichmanöver reagieren. Nach der Bewältigung der Gefahrensituation hat der StockDroid® seine normale Tätigkeit wieder aufzunehmen.

Die resultierende Navigation besteht aus der eigenständigen Orientierung und Bewegung auf dem Firmengelände und der Anfahrt vor das jeweils benötigte Gebinde. Sie besteht aber auch aus der selbständigen Ent- und Beschleunigung wie auch dem Ausweichen aufgrund von Gefahrensituationen.

1.1.2. Autonome Ein- und Auslagerung

Die StockDroid® ist autonom in der Lage, eine ihm übermittelte Position anzufahren, dass dort lagernde Gebinde aufzunehmen und abzutransportieren, sowie an einem anderen Lagerplatz abzusetzen. Die Gebinde werden sowohl im Block bzw. in Regalen mit maximal drei Ebenen gelagert. Nach der Positionierung vor einem Gebinde muss der StockDroid® unterschiedliche Gebinde erkennen und über eine Bild- und Tiefenauswertung mit maschinellem Lernen die Position der Paletten unter dem Produkt errechnen. Den Werten folgend soll er die Gabelzinken ausrichten können. Die Abweichung bei der Positionierung der Gabel sollte vertikal nach Nachkorrektur kleiner als 2,25cm sein. Horizontal ist durch die Querbewegung der Gabel eine Korrektur von 10 cm möglich. Diese Werte bilden die maximale Abweichung.

Es ist eine umfassende, sichere und komplexe Sensor-Aktor-Kommunikation zur Feinsteuerung der Hubbewegung der Gabelzinken sowie Fahrbewegung des Gabelstaplers zur Aufnahme und zum Absetzen von palettierten Gebinden zu entwickeln und in den vorhandenen Elektro-Gabelstapler zu integrieren. [16]

1.1.3. Autonomes Energie-Management

Der StockDroid® ist ein batterieangetriebenes Flurförderfahrzeug. Die Batterie bedient sich Lithium-Ionen-Technik, sodass eine (Teil-)Aufladung unabhängig vom Ladestatus möglich ist. Im Frühjahr 2021 werden mehrere Ladepunkte an einer zentralen Elektrotankstelle für Gabelstapler installiert.

Die Funktion des autonomen Fahrens des StockDroid® ist dahingehend weiterzuentwickeln, dass dieser selbsttätig den Batterieladezyklus einleitet und Strom effizient „tankt“. Diesbezüglich berücksichtigt der StockDroid® seinen Ladezustand und die ihm übermittelten Fahraufträge und schätzt selbstständig die Notwendigkeit ein, ob die Batterie aufgeladen werden muss. Übergangsweise kann der Anschluss des StockDroiden® an die Ladestation durch das Personal erfolgen. [16]

1.2. Aktueller Stand

1.2.1. Fahrerlose Transportfahrzeuge im Indoor-Bereich

1.2.1.1. Leo Locative

Einfache Modelle sind dabei fertige Lager (z.B. von DAMBACH Lagersysteme GmbH & Co. KG) oder die LEO Locative (BITO-Lagertechnik Bittman GmbH). Das erste Beispiel kommt fast ohne Sicherheitssensoren aus. Für die Funktionsfähigkeit des Systems werden höchstens Sensoren verwendet, mit denen der aktuelle Aufenthaltsort der Waren nachvollzogen werden kann. Das 2. Beispiel ist mit mindestens einem Sicherheitssensor ausgestattet, damit er anhalten kann, sobald ein Hindernis im Weg ist. Eine Auffassung der sonstigen Umgebung ist für diesen Roboter allerdings

unnützlich, da er sich an nur an einem gefärbten Klebeband als Wegweiser und an QR-Codes für Anweisungen orientiert. [7]

1.2.1.2. Andere Beispiele für die Indoor-Anwendung

Der nächste Schritt ist die eigenständige Orientierung in einem einfachen Lager, da die Anforderungen hier immer dieselben sind (eben, selbe Etage, konstanter Aufbau). Die zu transportierenden Waren sind einfach zu erreichen oder immer an derselben Stelle. Die Roboter müssen keine unterschiedlichen Neigungen wahrnehmen und aufgrund derer ihre Leistung verändern. Außerdem sind Hindernisse die Ausnahme, sodass sie, bei Personen, auf das Verschwinden des Hindernisses warten können oder eine Fehlermeldung senden. Hierzu gehören zum Beispiel die Produkte der Firmen Innok Robotics GmbH, Emm! Solutions GmbH, Malorg GmbH und Still GmbH. Diese Konzepte können die meisten Problemstellungen bewältigen und sind der Durchschnitt der aktuellen Entwicklung. Die benötigte Rechenleistung kann in diesen Fällen von einem Boardcomputer erledigt werden, da nur Befehle befolgt und keine "eigenen Entscheidungen" getroffen werden müssen. [8]

Die 3. Stufe sind FTS' (fahrerlose Transportsysteme), die vollkommen autonom Aufträge abarbeiten und dabei selbst entscheiden welche Lieferung zuerst zu erledigen ist. Sie schätzen Abstände zu Hindernissen selbst ein, umfahren stationäre Objekte, warten, bis das Hindernis vorüber ist oder geben eine Fehlermeldung bei vollkommener Blockade des Weges. Um diese Entscheidungen und Aufgaben zu meistern, benötigen sie mehr Rechenleistung, die nur ein großer Board-Computer oder ein zentraler Server bieten kann. Zudem nimmt die Anzahl der Sensoren zu. Für geneigte Flächen wird ein gyroskopischer Sensor benötigt, für die genaue Ausrichtung der Werkzeuge Radar, optische und Distanzsensoren. Für die Erkennung bestimmter Produkte anhand eines Bar-Codes etc. werden außerdem Infrarotsensoren benötigt. Diese "Entwicklungsstufe" haben die meisten FTS-Hersteller noch nicht erreicht, da diese Eigenschaften die bisherigen Anforderungen übertreffen und darum zu teuer sind. Da es sich aber beim StockDroiden® um geneigte Ebenen, verschiedene Witterungseinflüsse, unterschiedliche Paletten und variable Manöver (Um stapeln, Ausweichen, Sortieren) handelt, muss er auch dementsprechend ausgestattet sein.

1.2.2. Fahrerlose Transportfahrzeuge im Outdoor-Bereich

1.2.2.1. EK Automation

Es handelt sich bei den fahrerlosen Transportfahrzeugen auf dem Betriebsgelände der Japan Tobacco Company in Deutschland um 6 Einheiten der „CUSTOM MOVE“-Reihe von EK Automation. Die FTFs dienen zum internen Warentransport zwischen Lagerhallen und sind für diesen Zweck mit verschiedenen Sensoren und Aktoren ausgestattet. Wichtig ist hier der witterungsgeschützte Transport der Materialien, weshalb die Transportfahrzeuge zusätzlich mit Rolltüren zu Schutz der Waren ausgestattet sind. Die Navigation wird durch induktive Spurführung gelöst. Witterungsresistenz gewährleistet ein proprietäres System, dass bei tiefen Temperaturen die Fahrbahn von Eis und Schnee

befreien kann. Zusätzlich sind die FTFs mit IR-Transmittern ausgestattet, die auch für den Outdoor-Bereich zugelassen sind. Mithilfe dieser können die FTFs mit Hallentoren kommunizieren, um sie automatisch zu öffnen.

Für die Gewährleistung der Sicherheit sind die FTFs auch mit Lidar-Sensoren zur Objekterkennung im nahen Bereich ausgestattet. Für den 24/7-Einsatz der Transportfahrzeuge sind Kontakte im Boden zum automatischen Laden eingelassen. [13]

Die wesentlichen Errungenschaften dieses Projektes sind die Lösung von autonomem Materialfluss zwischen Fabrikhallen im Outdoorbereich. Im Vergleich zur vorliegenden Aufgabe handelt es sich um eine simplere Anwendung, da sich die FTFs nur in eine Richtung bewegen und dies auf einer festen Spur. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der omnidirektionalen Überwachung. Lediglich die Kommunikation mit dem Planungssystem und anderen IoT-Komponenten gleicht beziehungsweise übertrifft die Anforderungen des StockDroiden®. Für diesen müssen keine anderen Aktoren mit dem FTF kommunizieren. [17]

1.2.2.2. Weitere Beispiele für Outdoor-Einsatz von FTFs

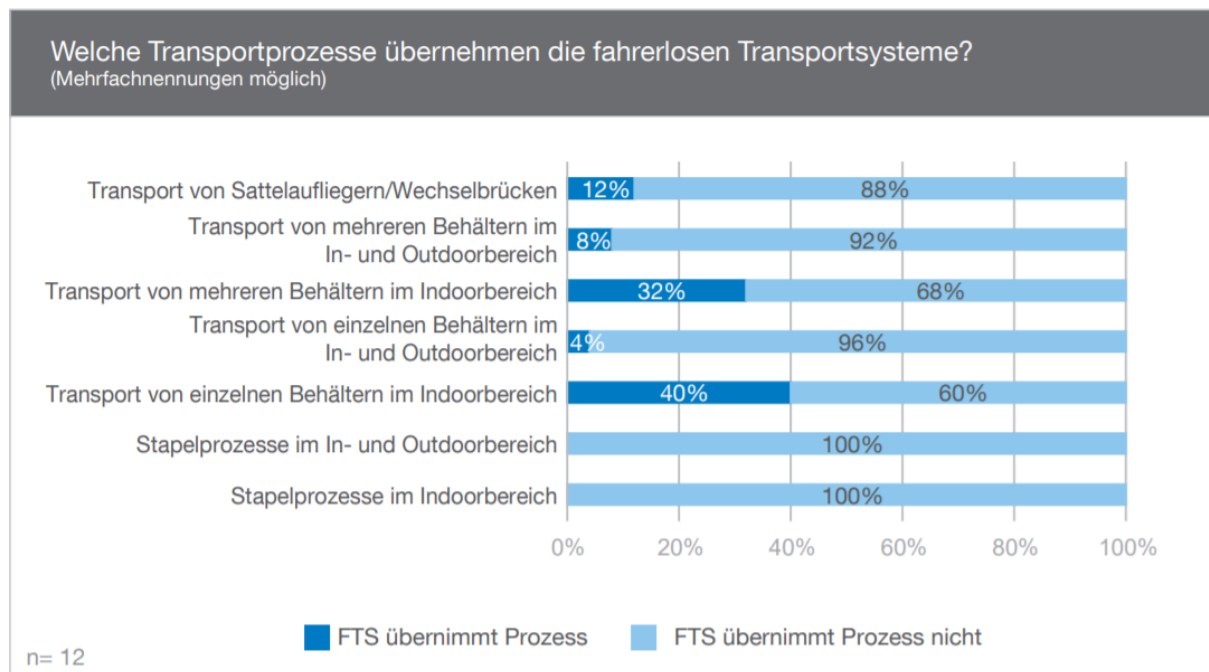


Abbildung 3: Aufgaben von FTFs in der Industrie [18]

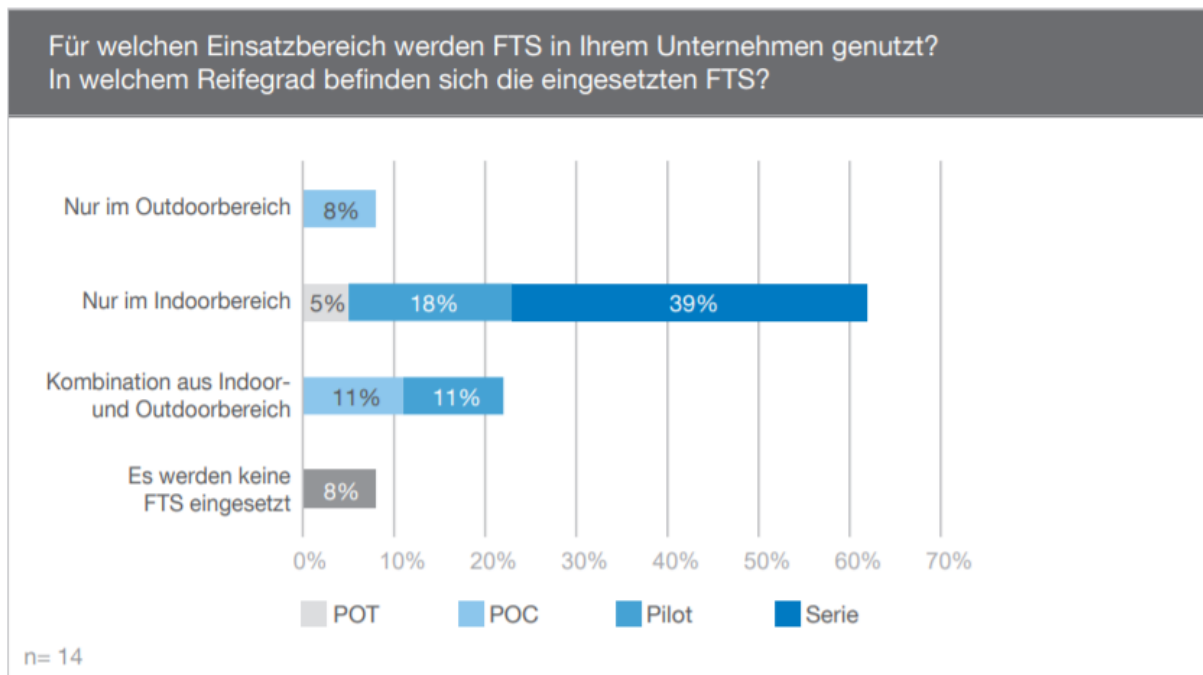


Abbildung 4: Einsatzbereich von FTF in der Industrie [18]

Die Basis der Abbildung 3 und Abbildung 4 bildet die Befragung von 12 bzw. 14 Experten und Mitarbeiter, die sich in ihrer Firma mit dem Einsatz von FTFs beschäftigen. Weiterhin ist beschrieben, dass sich hauptsächlich LKWs, Busse oder PKWs im Augenmerk der Outdoor-Automatisierung befinden. [19]

Der Einsatz eines autonomen Gabelstaplers im Outdoorbereich wird in nur einer einzigen Quelle beschrieben. Andere Hersteller werben zwar mit der Möglichkeit des Einsatzes im Outdoorbereich, allerdings existiert kein Nachweis einer solchen Anwendung. Nur Proof of Concept, also theoretische Machbarkeit, wurde für den Outdoorbereich bewiesen. [20]

2. Herausforderung

2.1. Standortanforderungen

2.1.1. Einsatzzeiten

Der Einsatz des StockDroiden® soll passend zum 3 Schichtrythmus der Produktion also 24 h pro Tag erfolgen. Grundsätzlich ist dies gängig für Produkte der Industrie 4.0, allerdings ist eine elektrische Tankstelle bisher nur geplant und die Umsetzung nicht Ziel der Bachelorarbeit. Für die Einsatzzeit von 24 Stunden an 7 Tagen der Woche müssen sich Mitarbeiter oder eine andere Komponente der Industrie 4.0 um den Anschluss des StockDroiden® an die Ladestation kümmern.

2.1.2. Geographische Bedingungen

Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich Anforderungen im Indoor- und Outdoor-Bereich drastisch. Dabei muss auf verschiedene Aspekte eingegangen werden, die Objekterkennung und -Handling, aber vor allem Navigationssysteme erheblich beeinträchtigen. Objekterkennung und -Handling bezieht sich hier auf Hindernisse, wie Personen oder auf dem Fahrweg abgestellte Paletten oder Gebinde.

Indoor-Varianten von FTS haben, aufgrund von ebenem Boden im Lager, keine Verwendung für vertikale gyroskopische Sensoren. Es kann stets angenommen werden, dass diese Flurförderfahrzeuge immer senkrecht stehen. Diese Annahme kann im Außenbereich der Firma Miltitz Aromatics GmbH nicht gestützt werden, da viele Lager aufgrund von sicherheitstechnischen Vorschriften geneigt sind. Dies dient dem Ablauf von Chemikalien, falls IBC's (intermediate Bulk container; engl.: Großpackmittel) auf der Lagerfläche durch eine Beschädigung auslaufen. Aufgrund dieser geographischen Anforderungen muss eine Messung der Neigung mittels Gyroskop durchgeführt werden. Im Lageplan (Abbildung 5) sind weitere Eigenschaften des Standortes eingezeichnet, die die genaue Navigation auf dem Gelände beeinträchtigen. Zusätzlich erschwert wird die Aufgabe durch Fugen im Lager 1 (L1), da auf diesen keine Gebinde abgestellt werden dürfen. Zusätzlich wäre es ein Verstoß gegen jene sicherheitstechnischen Verordnungen, die die Neigung begründen.

Eingezeichnet sind Bordsteinkanten (grün), Fahrwege (W; blau), Neigungen in Prozent und mit Richtung (schwarze Pfeile), als auch Anlieferungs- (A), Lager- (L) und Übergabeflächen (Ü). Die Bereitstellungsfläche für Container und Fässer (L1) beinhaltet Neigungen, als auch Gullideckel (Punkte an denen Pfeile aufeinandertreffen). Das Fahrgelände des StockDroid® weist außerdem leichte Schlaglöcher, Abläufe für Wasser und unregelmäßig auftretenden Behinderungen auf (Behälter/ Fahrzeuge/ Menschen, die im Weg stehen), zudem ist W1 durch Einschränkungen auf den Seiten nicht gerade, sodass der StockDroid® auf jeden Fall seinen Weg an die jeweiligen Gegebenheiten anpassen muss. Außerdem variiert die Bodenrauigkeit auf dem Gelände.

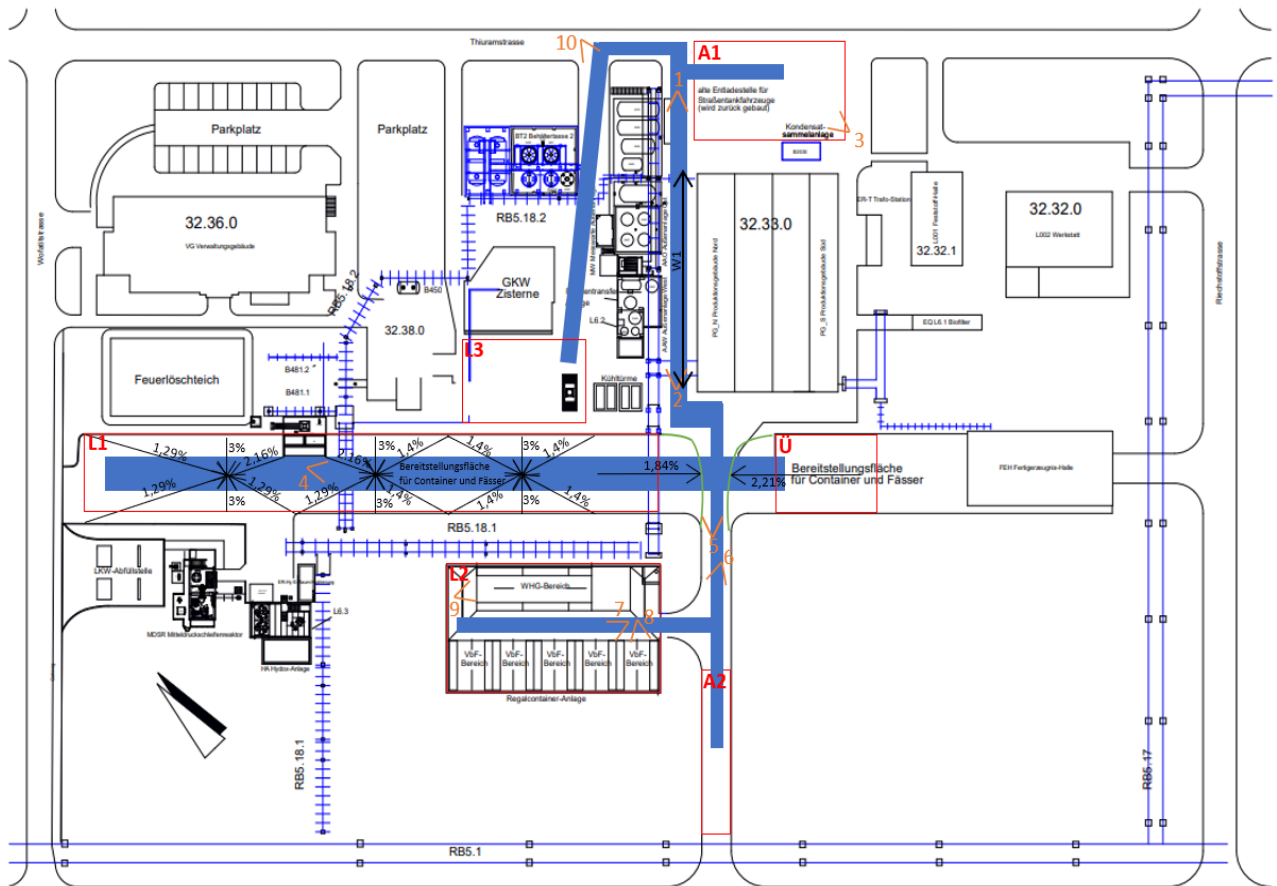


Abbildung 5: Lageplan des Standortes (A4-Lageplan im Anhang)



Abbildung 6: Blickwinkel 1



Abbildung 7: Blickwinkel 2

Blickwinkel 1 und 2 (Abbildung , Abbildung) zeigen den Weg zwischen Abstelllager und Übergabelager, dieser ist geprägt von Brüchen in und Spalten zwischen den Betonplatten. Folge dieser Beschädigung könnte die Entstehung von Ungenauigkeiten im Navigationssystem sein, da es bei dem Fahren über solche Kanten zu ruckartigen Beschleunigungen in vertikaler und/oder horizontaler Richtung kommen kann.



Abbildung 6: Blickwinkel 3



Abbildung 7: Blickwinkel 4

In den Blickwinkeln 3 und 4 (Abbildung 6, Abbildung 7) sind die Abstelllager 1 und Lager 1 zu sehen. Auch hier gibt es leichte Unebenheiten in der Oberfläche, diese werden im Lager 1 durch eine Erneuerung der Betonoberfläche allerdings vermindert. Die Auswirkungen für die Navigationssysteme sind dieselben.



Abbildung 8: Blickwinkel 5



Abbildung 9: Blickwinkel 6



Abbildung 10: Blickwinkel 7



Abbildung 11: Blickwinkel 8



Abbildung 12: Blickwinkel 9



Abbildung 13: Blickwinkel 10

Die Blickwinkel 7 bis 9 (Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12) zeigen das Gefahrenstofflager. Der Unterschied zu den restlichen Lagern, sind die Regale, die die IBCs voneinander isolieren. Im Anwendungsfall stehen IBCs und Paletten nur vereinzelt auf dem Boden des Lagers und werden nicht vom StockDroiden angesteuert. Die Oberfläche des Lagers ist versiegelt und eben, sodass nicht die gleichen Probleme wie auf dem Rest des Betriebsgelände auftreten.

2.1.3. Witterungsbedingungen

Der Einsatz erfolgt ganzjährig, sodass der Betrieb des StockDroid® sowohl bei Niederschlag (Flächen werden von Schnee geräumt), als auch im Temperaturbereich von -10°C bis 50°C gewährleistet sein muss. Vor allem für optoelektronische Sensoren sind die Witterungsbedingungen von großer Bedeutung, da Schwebeteilchen in der Luft wie Schneeflocken, Niederschlag oder Nebel, zur Reflektion der Strahlung und zu falsch gemessenen Entfernungen führen. Die Lagerbereiche sind beleuchtet, wobei die Lichtintensität der Beleuchtung nicht allein für eine optische Erkennung der Behälter ausreicht. Windverhältnisse spielen bei der Einführung des StockDroiden® eine untergeordnete Rolle, da durchschnittliche Geschwindigkeiten bei lediglich 1,5 - 2,8 m/s liegen. [21]

2.1.4. Lokale Lagerinfrastruktur

Es gibt zwei Arten von Lagern am Standort, ein Großteil der IBCs wird in Dreier-Reihe über- und hintereinander gestapelt, eine beispielhafte Darstellung ist in Abbildung 14 gegeben. Durch die Anordnung der Behälter hinter- und übereinander, kann es dazu kommen, dass die IBCs anders gestapelt werden müssen. Falls der gesuchte Behälter in der hintersten und, oder unteren Reihe steht. Diese Anordnung ist (nach Abb.: 1) in den Lagern (L1, L3, A1, A2 Ü) zu finden. Die 2. Art von Lager sind Regallager in denen IBCs und Paletten überdacht und einzeln stehen. Diese Regale sind (nach Abbildung 5) in den Lagern (L2, L3 und A1) zu finden. Die Stellplätze in den Lagern werden Elementen

von Matrizen zugeordnet, wobei drei Dimension für die Lage und weitere Dimensionen für andere Eigenschaften, wie Inhalt und Gewicht des jeweiligen Gebindes gewählt werden.

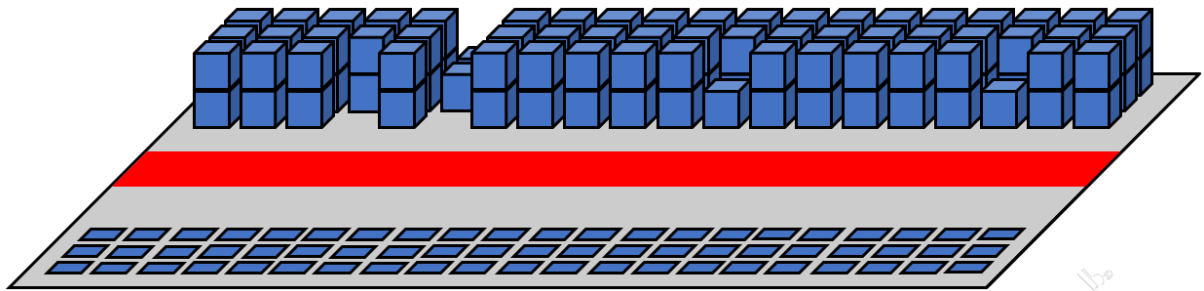


Abbildung 14: Skizze des Lagers L1; blau: Gebinde; rot: Fahrweg

Abbildung 14 zeigt den Aufbau des Lagers 1, wobei zu beachten ist, dass die exakte Anzahl und Position der IBCs erheblich variiert. Die Gebinde stehen auf beiden Seiten des Fahrweges, was mit den blauen Vierecken angedeutet wurde. Es stehen maximal zwei volle Behälter übereinander. Allerdings kann die Ordnung durch das Eingreifen von Menschen leicht verändert werden.

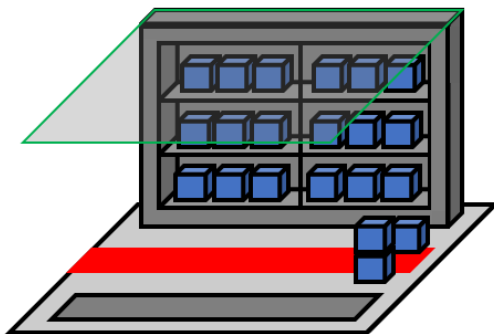


Abbildung 15: Skizze des Gefahrenstofflagers L2; blau: Gebinde; rot: Fahrweg; grün: Überdachung

Abbildung 15 verdeutlicht den Aufbau der Gefahrenstofflager. Das graue Viereck unterhalb des Fahrweges symbolisiert das Regal, welches dem Oberen gegenüber steht. Die Gesamtstruktur ist deswegen als Skizze nochmal in Abbildung 16 dargestellt.

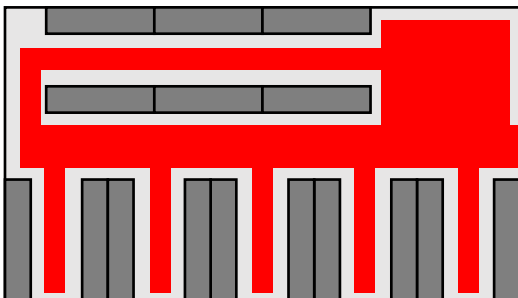


Abbildung 16: schematische Darstellung des Gefahrenstofflagers L2; beige: zusätzliche Stellfläche; rot: Fahrweg; grau: Regale

2.1.5. Technische Infrastruktur

2.1.5.1. Einzusetzender Gabelstapler

Beim auszustattenden Gabelstapler handelt es sich um einen Elektro-Stapler der Firma Linde vom Typ E20PL EVO. Die Steuerung des Staplers ist aufgrund des proprietären, interne Bussystems nicht

möglich. Falls im Rahmen der Entwicklungsarbeiten Zu- und Eingriff auf/ in das Bussystem durch Linde Materialhandling GmbH gestattet wird, ohne Garantieansprüche zu verlieren oder die Verkehrssicherheit einzuschränken, kann dieses genutzt werden. Andernfalls sind die Fahrsteuerung und Hubsteuerung anderweitig zu realisieren und zusätzliche Systeme zur Überwachung dieser Parameter zu installieren. Der Gabelstapler verfügt bereits über das iForks 32-System der Firma Ravas. Dies kann die Masse des aufgenommenen Gebindes erfassen und mit dem im ERP (enterprise resource planning) hinterlegten Wert verglichen werden. Die Konnektivität wird über Bluetooth 4.0 oder WLAN gewährleistet. Das Wiegesystem kann über den RAVAS INTEGRATION SERVER und RESTful API (application program interface) mit dem ERP-System (Solutions2®) kommunizieren. [16]



Abb.: 17: Gabelstapler E20PL EVO

2.1.5.2. WLAN-Versorgung auf Areal/5G-Verfügbarkeit

Das gesamte Betriebsgelände ist mit WLAN versorgt. Darüber hinaus ist Mobilfunk im öffentlichen 5G-Standard verfügbar. Ein privates 5G-Campusnetz existiert nicht, kann aber nach Aussage der Telekom eingerichtet werden.

2.1.5.3. Elektrotankstelle

Zur Versorgung der gesamten Gabelstapler-Flotte sind mehrere Ladepunkte einen zentralen Elektrotankstelle in Planung. Soweit dies für die Realisierung des autonomen Energiemanagements förderlich ist, können Entwicklungsaspekte in die Planung einfließen. [16]

2.1.6. Rechtliche Bedingungen

Es gelten verschiedene Normen und Richtlinien für die Sensorik von autonomen Flurförderfahrzeugen. Für die Gewährleistung der geforderten Sicherheit muss die dafür relevante Sensorik mindestens mit dem SIL2 (Sicherheitsintegrationslevel 2) zertifiziert sein.

Das Sicherheitsintegrationslevel ist in der internationalen Norm IEC 61508/IEC61511 und in der europäischen Norm EN 61508 zu finden. Es beschreibt die mittlere Häufigkeit gefahrbringender Ausfälle der Sicherheitsfunktion. [22]

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

Abbildung 18: Sicherheitsintegrationslevel: Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate [22]

Sicherheits-integrations-level (SIL)	Mittlere Häufigkeit eines gefahrbringenden Ausfalls der Sicherheitsfunktion [h ⁻¹] (PFH)
4	$\geq 10^{-9}$ bis $< 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$

Abbildung 19: Sicherheitsintegrationslevel: Betriebsart mit hoher oder kontinuierlicher Anforderungsrate [22]

Die genaue Definition des SIL beruht auf dem jeweiligen Anwendungsfall, da es sich beim Betrieb des StockDroid® um eine kontinuierliche Anforderungsrate handelt muss der Maßstab aus der Abb. 21 verwendet werden. Dass das SIL2 erfüllt werden muss lässt sich aus der Norm für autonome Trucks und Fahrzeuge (ISO-Norm 26262, DIN EN ISO 3691-4:2020) entnehmen.

2.2. Datenerfassung und -Kommunikation

2.2.1. Zusätzliche Bidirektionale Datenübertragung mit dem ERP

Über den RAVAS INTEGRATION SERVER können nur ID, Masse des Gebindes und die aktuelle Uhrzeit übertragen werden. [23] Mit dem auf der Anzeigerplatine installierten WLAN-Ausgang X-PICO 240 können weitere Daten mit dem ERP ausgetauscht werden. Dafür ist die Installation eines WLAN-Netzwerkes auf dem Betriebsgelände nötig. Falls der Großteil der Datenauswertung auf dem StockDroid® abläuft, müssen lediglich Lagerumbuchungen, Batteriestatus und Betriebszustand angegeben werden. Bei einer zentralen Auswertung der Messdaten mithilfe eines Servers würde hingegen eine bedeutend höhere Datenmenge kommuniziert werden müssen. [24]

2.2.2. Überprüfung der Gebinde

Um die folgenschweren Konsequenzen, die durch die Verwechslung von Gebinden hervorgerufen werden könnten, zu verhindern. Müssen die zu transportierenden Paletten dreifach überprüft werden. Zum einen durch den im ERP hinterlegten Standort und zum anderen durch die ebenso im ERP hinterlegte ID, die beispielsweise aus einem Barcode gelesen werden kann. Diese Überprüfungen kann der StockDroid® autonom vollführen und meldet als 3. Test zudem die jeweils gemessene Masse dem ERP. Durch Regen, also Wasser auf den IBCs kann die Masse um 1-2 kg variieren. Falls die Masse des IBCs also über dem hinterlegten Wert liegt, sollte das, bis zu einer bestimmten Abweichung (ca. 0-3 kg), zu keiner Fehlermeldung führen. Bei einer negativen Abweichung muss hingegen sofort ein Fehler erkannt werden, da eine solche Gewichtsveränderung nur durch eine Leckage des Behälters zustande kommen kann. Eine Fehlermeldung bedeutet in dem Fall eine Meldung an das ERP-System oder an einen eingeteilten Mitarbeiter, der sich um das Problem kümmert. Genau dasselbe Problem gilt auch für falschabgestellte beziehungsweise fehlende Gebinde. Wenn bestimmte Gebinde durch Mitarbeiter umgestellt werden, um dringliche Aufträge zu erledigen. Natürlich können diese Veränderungen im Lager auch im ERP-hinterlegt werden, allerdings kann es bei einem solchen Lager und in einem spezifischen Zeitintervall zu menschlichen Fehlern oder einem Fehler bei der Zuordnung kommen. Ein solches Warnsystem dient dazu, dass der Gabelstapler nicht vor einem falsch zugeordneten, sortierten oder abgestellten Gebinde stehenbleibt und auf das Leerlaufen seiner Batterien wartet.

2.2.3. Anbindung an das Bussystem

Die Anbindung an das interne Bussystem ist, wie oben erwähnt voraussichtlich nicht möglich, da es sich hier um proprietäre Software handelt, die nur für Vertragspartner von Linde zugänglich ist. Diese

Kommunikation ist nicht unbedingt notwendig, da die Steuerung auch über zusätzliche Sensoren und Aktoren gelöst werden kann. Lösung hierfür ist ein PLC-System, dass von Linde vor der Auslieferung eingebaut werden muss, dadurch können Radneigung, und Radumdrehungen ausgegeben werden, und die Steuerungssignale können an den Gabelstapler übertragen werden.

3. Methodik

Zunächst musste ein Überblick über die Anforderungen des Standortes geschaffen werden. Dazu wurden zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten und technische Datenblätter ausgewertet.

Mithilfe des gewonnenen Wissens zu Sensorik und Aktorik, als auch zur benötigten Rechenleistung und den Softwareanforderungen wurde eine Komplettlösung vorgeschlagen. Diese erfüllt aus Sicht des Autors am besten die Anforderungen für eine Komplettlösung am Standort der Miltitz Aromatics GmbH.

4. Lösungsansätze

4.1. Nötige Sensorsysteme

4.1.1. Lokalisierung und Orientierung

Die Lokalisierung und Orientierung von industriellen FTFs ist vor allem für den Indoor-Bereich entwickelt worden. Lediglich die Forschung zu autonomen Fahrzeugen für den Straßenverkehr hat sich mit den Anforderungen des Outdoor-Bereiches befasst. Vor allem Witterungsbedingungen und Standortanforderungen unterscheiden diese beiden Bereiche dramatisch.

Optische oder magnetische Spurführung sind zum Beispiel einfache und verlässliche Navigationssysteme die häufig im Indoor-Bereich eingesetzt werden. Eine Installation unter freiem Himmel ist aufgrund der vorliegenden Standortanforderungen und Witterungsbedingungen problematisch. Voraussetzung für diese Navigationssysteme ist eine am Boden montierte Bahn, anhand welcher das AGV navigieren kann. Durch die unter Punkt 2 angeführten Standortanforderung und Witterungsbedingungen wird die Lebensdauer erheblich reduziert und die Funktionalität eingeschränkt. Ein weiteres Problem der optischen Spurführung ist die Behinderung durch Schnee oder andere visuelle Einschränkungen, wie Dreck an der Kamera. Problematisch ist auch das Anfahren der Gebinde, da das Magnet- oder optische Band nicht über das gesamte Gelände verlegt werden kann, um so alle IBCs einzeln an das System anzubinden. Für die Steuerung zwischen installierter Bahn und den Paletten ist somit ein zusätzliches Navigationssystem notwendig. [25] [26] [27] Gerade im Outdoorbereich werden deshalb vor allem die nachfolgenden Navigationssysteme verwendet.

4.1.1.1. Navigation mit Satelliten / GNSS

Eine Möglichkeit zur sicheren Navigation im Outdoor-Bereich ist die Positionskontrolle über GPS. Dafür empfängt das GPS-Modul (Sensor) von mindestens 4 verschiedenen GPS-Satelliten ein Signal. [28] Dieses Signal beinhaltet die Position und die Zeit des Satelliten. Mit diesen Daten kann die Position des Sensors berechnet werden. Da der gesuchte Ort 4 unbekannte Größen besitzt: geographische Höhe, geographische Breite, geographische Länge und die Differenz zwischen Satelliten- und Empfängerzeit sind mindestens 4 Bedingungen (Daten von 4 Satelliten) zur Lösung des Gleichungssystems mit einem Freiheitsgrad von Nöten. Eine Überbestimmung durch mehr Daten führt zu der gegenseitigen Korrektur der Daten durch den Algorithmus. Wären die verwendeten Uhren synchronisiert, würden 3 GPS-Satelliten reichen. Für die Berechnung und die Korrektur der Abweichung ist allerdings ein zusätzliches Signal von Nöten. Das System basiert darauf, dass sich drei oder mehr Kugeln im Raum nur in einem Punkt schneiden, der Lage/ dem Ort des GPS-Sensors. [29] Seit 1997 sind solche Systeme erstmals kommerziell nutzbar gemacht worden. [30] [31]

Ein AGV, welches mit einem solchen GPS-Sensor ausgestattet ist, kann die Position bis auf wenige Meter genau bestimmen. Diese Präzision erfüllt allerdings nicht die Aufgabe, da die Breite eines IBC's

bei 1,2 m liegt. Es muss ein zusätzlicher Schritt für eine ausreichende Genauigkeit durchgeführt werden. Auch eine Postprocessing-Methode wie EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) der European Space Agency (ESA) bringt nur eine Genauigkeit von 1,5 m [32], was nicht für eine genau Positionierung reicht. [33]

Eine andere Möglichkeit zur Erhöhung der Präzision ist auch hier die Verwendung eines Kalman-Filters, um statistische Fehler bei GPS-Messwerten auszufiltern. In der angesprochenen Quelle wurde neben dem Kalman-Filter auch Odometrie verwendet. [34]

Bei der Verwendung ist in fast jedem Anwendungsfall anzunehmen, dass das GPS-Signal teilweise ausfällt. Somit sind zusätzliche Systeme unverzichtbar. In Tabelle 2 sind die Genauigkeiten verschiedener Systeme basierend auf dem Differentielle Globale Positionierungs-System (DGPS) verglichen. Augenmerk wurde auf Fahrzeugsensoren (VS), und INS und Odometrie gelegt. Der Unterschied der 3 zusätzlichen Systeme liegt in der Installation der Sensoren. Das Inertial-Navigation-System beruht auf der Verwendung von Gyroskopen zur Bestimmung der Rotation und Beschleunigungssensoren für die Geschwindigkeit und Beschleunigung. Fahrzeugsensoren (VS) hingegen messen die Drehzahl der Räder und deren Auslenkung, um auf die Bewegung des Fahrzeugs zu schließen. Die Quellen [35] und [36] verwenden einerseits einen Kompass für einen zusätzlichen Wert für die Ausrichtung und andererseits zusätzliche Odometrie-Sensoren. [37]

Quelle	Sensoren	GPS-Genauigkeit [m] und Aktualisierungsrate [Hz]		GPS-Ausfall	Resultat [m]
[37]	DGPS + VS	0,3 m	5 Hz	Mit	<1
[35]	DGPS + VS + Kompass	0,05 m	2 Hz	ohne	0,02
[36]	DGPS + VS	0,05 m	1 Hz	ohne	<0,02
[38]	DGPS + VS	0,05 m	1 Hz	ohne	<0,5
[39]	DGPS + INS + Odometrie	0,3 m	10 Hz	ohne, simuliert	<1
[40]	DGPS + INS	1 m	1 Hz	ohne	<1
[41]	DGPS + INS	1 m	1 Hz	ohne	<2

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Sensorkombinationen mit GPS-Navigation [37]

Die Abweichungen der resultierenden absoluten Genauigkeiten beruhen auf den unterschiedlichen Genauigkeiten der verwendeten GPS, aber auch an den verwendeten Kalman-Filtern. Es lassen sich schwer Aussagen zur Qualität der verwendeten Filter treffen, da die Berechnung ähnlich, aber die benutzten Parameter variieren. Die demnach beste Lösung ist ein integrierter Lernprozess für den verwendeten Kalman-Filter. Durch manuelle Auswertung und Kontrolle der Arbeit des Kalman-Filters, können die Parameter so eingestellt werden, dass eine möglichst hohe Genauigkeit zustande kommt. [31]

Mithilfe einer zusätzlichen stationären Antenne kann die gewünschte Genauigkeit erreicht werden. Zwei mögliche Systeme sind das DGPS [42] und / oder Echtzeitkinematik (RTK). [43]

Differentielles globales Positionierungssystem

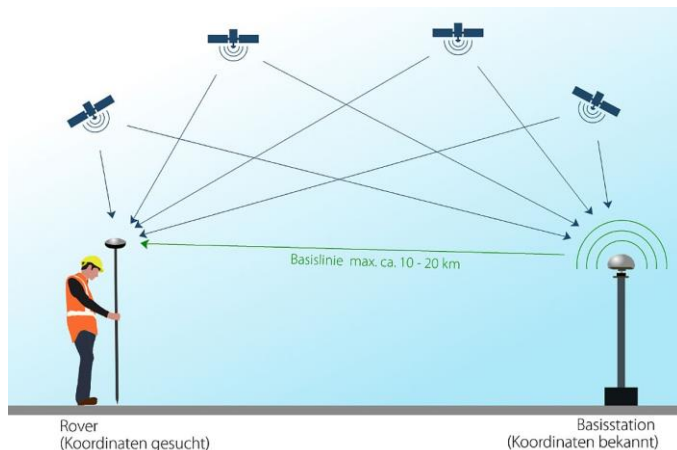


Abbildung 21: Funktionsweise der Positionierung mit GPS und Korrekturdaten [44] (Abb.: 2)



Abbildung 20: Referenzstationen für SAPOS in Sachsen-Anhalt [108] (Abb.: 3)

Die Basis für ein solches Navigationssystem ist eine GPS-Station deren exakte Position bekannt ist. Sie sollte maximal 20 km vom eigentlichen GPS-Sensor (AGV) entfernt werden. In Abbildung 21 ist das Funktionsprinzip des Differentiellen globalen Positionierungssystems in den Grundzügen dargestellt. Abbildung 20 zeigt, die in Sachsen-Anhalt befindlichen Basisstationen des SAPOS eingezeichnet. Die Basisstation liefert Korrekturdaten aus dem Vergleich von exakter Position und eigenem Messwert. Die GPS-Daten des FTFs werden, mithilfe der Korrekturdaten korrigiert. Die erhaltene Genauigkeit liegt horizontal bei 2 m bis zu 0,3 m und vertikal bei 5 m bis zu 0,2 m. [44] Diese bodenbasierten Systeme werden zum einen im Rahmen der Landesvermessung SAPOS betrieben, zu anderen beschäftigen sich auch Unternehmen mit Bereitstellung solcher Korrekturdaten. In der Tabelle 1 sind die Preise, sowie Genauigkeit für die Korrekturdaten von SAPOS dargestellt [45], in Tabelle 4 sind Preise und Genauigkeiten kommerzieller Anbieter aufgelistet. Ein ähnliches System wird für die Navigation von Flugzeugen vorgeschlagen, bei dem sich diese gegenseitig Positionsdaten in Form von Korrekturdaten zuschicken. Dieses System findet Verwendung, wenn DGPS nicht angewendet werden kann. [46]

Echtzeitkinematik

Diese hochpräzise Methode ist in der Lage die Position bis auf wenige Centimeter genau zu bestimmen. Dazu muss der GPS-Empfänger mit mindestens 5 oder 6 Satelliten in Verbindung stehen. Die Distanz der Satelliten wird in dem Fall nicht mehr durch die Daten der Satelliten, sondern durch die Korrelation der Phasen miteinander. Wenn das System einen stabilen Zustand erreicht hat, kann die Position zuverlässig auf 1-2 cm bestimmen. Für die hohe Genauigkeit muss ein spezifischer RTK-fähiger Empfänger benutzt werden, der einerseits Daten senden, aber auch Korrekturdaten über eine andere Schnittstelle empfangen kann.

Name	Genauigkeit[cm]		Takttrate	Preis [€]	pro	€/Jahr
	Lage	Höhe				
EPS ¹	30- 80	50 - 150	1 s	150,00	Jahr	150
HEPS ^{1 2}	1 - 2	2 - 3	1 s	0,10	Messung; Einwahl; Minute	51.480
GPPS ^{1 3}	≤ 1	1 - 2	15 s	0,20	benutzter Referenzstation; Minute	103.680
			≤ 1 Hz	0,20		103.680
			> 1 Hz	0,80		414.680
GPPS ³ -PrO	≤ 1	1 - 2	beliebig	0,20		103.680

Tabelle 3: Kosten für Korrekturdaten der SAPOS ^[1]

Die Korrekturdaten der SAPOS dienen nicht zur Positionsbestimmung von AGVs sondern zur Vermessung von Landschaften, Straßen oder Gebäuden. Da für diese Arbeiten nur Korrekturdaten während eines kleinen Zeitabschnittes benötigt werden, liegt der Endpreis in annehmbaren Größen. Allerdings sind in Tabelle 3 die bei einer ganzjährigen Überwachung resultierenden Kosten zu sehen. Da es sich hierbei um Betriebskosten handelt, die neben den Kosten für die Anschaffung des Positionierungssensors auftreten, sind die Preise nicht akzeptierbar.

Methode	Genauigkeit [±cm]	Anbieter	Preis [€/Jahr]
GPS ohne Korrektursignal	50 – 100	alle	kostenfrei
RTK Mobilfunk	2,5	John Deere, Trimble	800
John Deere SF3	3	John Deere	850
Trimble CenterPoint VRS	2,5	Trimble	995
John Deere SF2	5	John Deere	1050
OmniSTAR G2	8 - 10	Trimble	1380
Trimble CenterPoint RTX	3,8	Trimble	1450
NTRIP	2	DTC GmbH	2500
OmniSTAR XP	8 - 10	Trimble	2560
OmniSTAR HP	5 - 10	Trimble	3440

Tabelle 4: Kosten und Genauigkeit kommerzieller Anbieter

Die Kosten der industriell angebotenen Korrekturdaten variieren aufgrund der verwendeten Technik und aufgrund der erreichbaren Genauigkeit sehr und sind im Allgemeinen eher für die Vermessung gedacht.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination aus GPS- und LIDAR-Daten, dabei wird das GPS-Signal zur groben Bestimmung der Position verwendet und LIDAR-Daten zur genauen Abschätzung der Entfernung zu signifikanten Punkten in der Umgebung. Durch die Zusammenfassung der Daten wird der durchschnittliche absolute Fehler halbiert. [47]

4.1.1.2. Extended-Lokalisations-System

Basis eines solchen Systems ist ein Industrie-PC, der die Daten von verschiedenen Sensoren auswerten kann und daraus eine virtuelle Repräsentation der Umgebung herstellt. Diese Methode der

¹ Abk.: Echtzeitpositionierungsservice

² Abk.: hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice

³ Abk.: Geodätischer Postprocessing Positionierungs-Service

Umgebungswahrnehmung ist äußerst rechenintensiv, da die Daten mehrerer Systeme ständig verglichen und korrigiert werden müssen. Das System besteht grundlegend aus folgenden Sensoren: Lidar-Sensoren (Light detection and ranging), Sicherheitslaserscanner und Odometrie. Weiterhin können auch Radarsensoren für die Erstellung eines solchen Systems benutzt werden, allerdings nur in Kombination mit anderen Sensoren wie LIDAR oder Kameras. Alleinstehend liefert der Einsatz von Radartechnik keine zuverlässigen Ergebnisse, auch wenn Untersuchungen in diesem Feld und Entwicklungen zur Verbesserung der Empfänger durchgeführt wurden. [48]

Das System kann vorteilhaft für sich ändernde Umgebungen sein, da vor der Inbetriebnahme ein virtuelle 3D-Karte des zu befahrenden Geländes geschaffen wird. Veränderung bei den Lidar-Daten (umgestapelte Gebinde) werden mit den Odometrie-Daten verglichen und die 3D-Karte wird aktualisiert.

Die Komplexität dieses Lokalisierungssystems ist ein Grund dafür, dass diese Systeme als Komplettpaket angeboten werden. Neben der verwendeten Hardware muss auch spezifisch abgestimmte Software verwendet werden. Beispielsweise SLAM- oder MOT- Algorithmen (simultaneous localization and mapping; multiple objekt tracking), um sinnvolle Ergebnisse aus den Daten zu generieren. [49] [50] [51] [52] [53]

Lidar-Sensoren

Zur Aufnahme werden verschiedene Detektoren verwendet deren Genauigkeit mit dem Preis steigt. Halbleiterdetektorenfelder haben ca. ein Hundertstel der Sensitivität eines APD-Sensors (avalanche photodiodes) , welche wiederum ein 10000stel der Genauigkeit der SPAD-Sensoren (single photon avalanche diode) besitzen. Zusätzlich gibt es noch SiPM-Sensoren (Silicium photo multiplier) , diese kombinieren die Technik der SPADs mit eng gepackten Mikrozellen, sodass Aussagen zur Intensität der Strahlung getroffen werden können.

Zum einen werden augenschonende 2D- oder 3D-Lidar verwendet, die die Entfernung zu Objekten in der Umgebung messen. Für die Realisierung der bis zu 360°-Überwachung gibt es weitere Unterscheidungsmöglichkeiten. Vier hauptsächlich verwendete Systeme sind in Abbildung 22 dargestellt. Es handelt sich um mechanisches Drehen(a), Verschiebung der Spiegelebene mittels MEMS (b), Flash (c) und OPA (optical phase array).

Die Variante a ist sehr weit verbreitet und wird in den meisten Lidar-Modellen verbaut. Ein Nachteil folgt aus der Funktionsweise. Durch die konstante Rotation des Sensors leidet die durchschnittliche Betriebsdauer und die Systeme sind anfälliger gegenüber Vibrationen. Diese Mängel belasten vor allem alte Systeme. Neuentwickelte versprechen durch nahezu reibungslose Lager sehr geringen Verschleiß und durch eigenständige Korrektur der Vibration, verlässliche Ergebnisse. [54]

Bei Variante b handelt es sich um ein fast statisches System. Durch die Zusammenarbeit von Lorentzkraft und einem elastischen, elektrostatischen Momentstab kann die Spiegelebene gekippt und

eine Fläche abgetastet werden. In Kombination mit ToF-Daten (time of flight) kann eine 3D-Punktwolke errechnet werden.

Flash-Lidar-Sensoren (c) waren zu Beginn ihrer Entwicklung nur für die autonome Rauffahrt gedacht, heute entpuppt sich diese Methode als eine der vielversprechendsten im Gebiet. Großer Nachteil und Grund für seltene Anwendungen sind die Detektionsentfernung von mindestens 100 Metern, da nach der Augensicherheitsverordnung nur geringe Intensitäten ausgestrahlt werden dürfen. Hier wird das Licht zur Vermessung des 2-dimensionalen Ausschnittes gleichzeitig ausgestrahlt. Aus den ToF-Daten der Strahlung kann wieder die 3D-Punktwolke errechnet werden. Vorteil dieser Technik ist, dass die Geschwindigkeit des Fahrzeuges keinen Unterschied macht, da das gesamte Licht zeitgleich ausgesendet wird. Zu bedenken ist allerdings, dass dies kein Nachteil der anderen Varianten ist, da die Software selbständig die durch Fahrzeuggeschwindigkeit entstehenden Fehler korrigiert. [55]

Die letzte, vorgestellte Variante (d) bedient sich einem optical phase array. Sie beruht auf minimaler Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Lasern, wodurch die resultierende Wellenfront in einem Winkel von dem Sensor ausgesendet wird. In Abbildung 22 ist nur eine eindimensionale Anordnung zu sehen. Mithilfe einer 2-dimensionalen Matrix (array) kann auch hier ein 2-dimensionaler Ausschnitt abgetastet werden und in eine 3D-punktwolke umgerechnet werden. Die Methode hat bis dato kaum Zuspruch erfahren, was zum Beispiel an der Anfälligkeit (der Ausfall eines Lasers führt zu erheblichen Ungenauigkeiten) und dem Preis liegt.

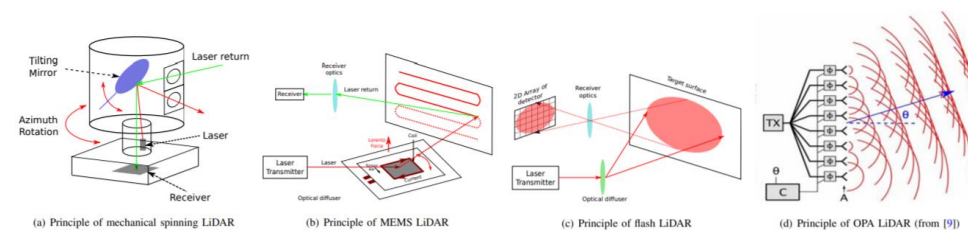


Abbildung 22: 4 Herangehensweisen an die Aufnahme von 3D-Lidar-Daten [55] (Abb.: 4)

Typ	IR-Bereich	Technik			
		Mechanisches Drehen	MEMS	Flash	OPA
ToF Lidar	NIR	Velodyne, Ouster,* Hesai, and Robosense	Innoviz Robosense	Continental Xenomatrix	Quanergy
	SWIR	Luminar	AEye and Hesai	Argo* (Princeton Lightwave)	
FMCW Lidar	variiert				Cruise (Strobe)

Tabelle 5: Hersteller von Lidar-Sensoren und deren angewendete Technik [55] (Tab.:1)

Die Datenpunkte werden meist über Ethernet übertragen und enthalten Koordinaten, Zeitstempel und die Intensität des Signals [56] [57] [58]. Zusätzlich ist das AGV mit Sicherheitslaserscannern ausgerüstet, um Hindernisse auf geringer Entfernung zu lokalisieren. Auch diese Technik sendet Licht im Wellenlängenbereich des nahen infraroten Bereichs (NIR), also bei ca. 750-1000 nm. Der SWIR-Bereich (short wave infrared) liegt zwischen 1000 und 2500 nm. Aus den erhaltenen Remissionswerten

kann geschlossen werden, ob sich ein Objekt im Messbereich (Schutzfeldreichweite) befindet und ob ein Stopp des FTFs eingeleitet werden muss. Der dritte Sensor oder „Sensorgruppe“ besteht aus Beschleunigungs- und gyroskopischen Sensoren. Deren Daten dienen der Berechnung des zurückgelegten Weges und der Überwachung der ausgeführten Bewegung. Durch die Kombination dieser Messsysteme kann eine Genauigkeit von bis zu ± 20 mm garantiert werden. [59]

Preise und technische Daten der Lidarsensoren sind angehängt unter Anhang 1. Die Preise variieren unter den Anbietern, und zwischen den verschiedenen Modellen massiv, das teuerste Modell liegt beispielsweise bei 60.000€ (Ultrapuck der Firma Velodyne). Die benötigten Sensoren liegen allerdings im Preisbereich zwischen 3.000€ und 8.000€, da Modelle dieser Preisklasse die nötige Winkelgenauigkeit aufweisen, um Objekte zu identifizieren und daraus eine sich selbständig aktualisierende Karte zu erzeugen. [60]

Odometrie, gyroskopische und Beschleunigungs-Sensoren

Für Kontrolle der Bewegung des FTFs kann die Beschleunigung oder die Drehzahl der Antriebsachse überwacht werden. Wenn, durch schlechte Witterung oder Ähnliches Schlupf (engl. Slip; Abweichung zwischen Radumdrehung und zurückgelegter Strecke) zwischen Rädern und Boden auftritt, sinkt die Genauigkeit der Drehzahlüberwachung drastisch. Grund dafür ist, dass lediglich Durchmesser der Antriebsräder und Drehzahl in die Berechnung der zurückgelegten Entfernung eingehen. Anders sieht das bei der Entfernungsüberwachung mittels Beschleunigungsmessern aus. Diese detektieren jede Form von Beschleunigung (negativ oder positiv). Da diese Abweichung einen Einfluss auf die Geschwindigkeit hat und da der Beschleunigungsmesser diesen messen kann, entsteht kein Fehler. Die Rechenleistung für die zuverlässigere Messung und Berechnung ist etwas höher, da die Beschleunigung, die gemessen wird über die Zeit integriert werden muss, um eine zurückgelegte Strecke zu erhalten. [61]

Um die Auslenkung des AGVs nachzuvollziehen, werden außerdem gyroskopische Sensoren eingesetzt. Die Anwendung dieser Sensoren dient der Überwachung von Drehung und Neigung eines Fahrzeuges. Dabei ist zu beachten, dass diese Sensoren teilweise nur in einer Richtung funktionieren, was bedeutet, dass 2 solcher Sensoren für die Berechnung der horizontalen und vertikalen Ausrichtung notwendig sind. Gyroskopische Sensoren messen die Winkelgeschwindigkeit, indem eine Resonanzmasse durch die Corioliskraft ausgelenkt wird. [62] [63] Die Genauigkeit dieser ist durch verschiedene Entwicklungen sehr erhöht wurden. [64]

Der größte Schritt für die Etablierung von Odometrie für AGVs ist die Erfindung von mikroelektrischen mechanischen Systemen (MEMS). Über eine oder mehrere bewegliche Plattformen, die mit festen Bauteilen der Platine über Federn verbunden sind, können sich elektrische Widerstände durch die Verschiebung der beweglichen Teile verändern. Diese Veränderungen können spezifischen Winkelbeschleunigungen oder Beschleunigungen zugeordnet werden. Aus diesen Korrelationen

können in einem aktiven, geprüften System, Rotation und zurückgelegte Entfernung berechnet werden. [61] [65]

gyroskopische Sensoren

Vorteile dieser MEMS sind geringe Produktionskosten, Größe und Stromverbrauch. Außerdem können diese Sensoren (Beschleunigungsmesser und Gyroskop) auf der Platine mit Steuerungs- und Korrekturereinheiten verbaut werden, sodass moderne Odometrie-Einheiten als kompaktes Komplettpaket angeboten werden. Es wurde außerdem intensiv geforscht, um Temperatureinflüsse durch zunehmende Symmetrie einzuschränken. [66] [67] Um andere Einflüsse wie die Viskosität der Luft zu vermindern werden moderne System mit Vakuum gefertigt. [64] Da die entstehenden Sensoren in Mikrometer-Größe angefertigt werden, können bereits minimale Abweichungen im Fertigungsprozess zu groben Fehlern führen. Aus diesem Grund wurden Resonanzmassensysteme eingeführt, die mit einem höheren Freiheitsgrad (DOF) arbeiten, in der nachfolgenden Tabelle sind Systeme mit 2 verschiedenen Freiheitsgraden (DOF) gegenübergestellt und nach ihrer Störanfälligkeit verglichen.

Freiheitsgrad (Anzahl Schwingkörper)		2 (1)	4 (3)
		Sensitivitätsverlust	Sensitivitätsverlust
Resonanzfrequenzverschiebung	0,1%	59%	
	1%	94%	3 %
Druckerhöhung in Verpackung	10%	14%	0,1 %

Tabelle 6: Resultierender Genauigkeitsverlust physikalischer Verstärkungsverlust (gain drop) in Klammern [64]

Durch zusätzliche Freiheitsgrade steigen die Fertigungskosten, da die Komplexität der Architektur in den Chips steigt. Die in Tabelle 6 angeführten MEMS unterscheiden sich durch die Anzahl der Schwingkörper die durch eine Drehung oder Beschleunigung zum Schwingen angeregt werden. [64]

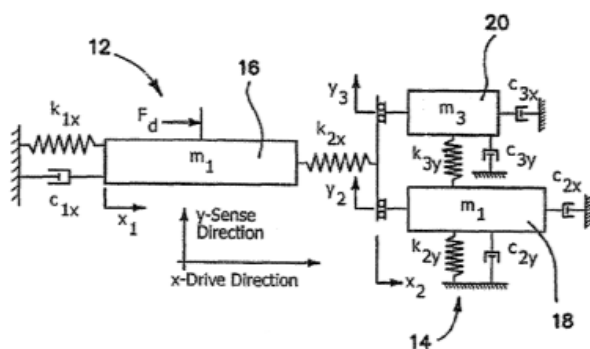


Abbildung 23: Skizze der Funktionsweise des MEMS [64]

In Abbildung 23 ist das MEMS, welches sich durch 4 Freiheitsgrade auszeichnet, dargestellt. m1 ist für die Messung in x-Richtung zuständig und schwingt unabhängig von der Bewegung von m2 und m3. Dasselbe gilt für die Schwingmassen m2 und m3 in Bezug auf m1, mit dem Unterschied, dass m2 und m3 in y-Richtung schwingen. Über die Abhängigkeiten der elektrischen Widerstände c_{1x} , c_{2x} , c_{2y} , c_{3x} und c_{3y} von der Dehnung und über die Federkonstanten der Spannungsfedern k_{1x} , k_{2x} , k_{2y} , k_{3y} kann

auf die wirkende Kraft geschlossen werden. Nach der Berechnung der Kraft und weiteren Informationen zu Ausrichtung und Position des MEMS auf dem StockDroiden kann auf dessen Neigung geschlossen werden. [64]

4.1.1.3. Transponder-Positionierung

Bei der Navigation mittels Transponder-Positionierung werden 2 wesentliche Systeme eingesetzt. Zum einen können die ausgerüsteten AGVs entlang einer Linie von RFID-Tags geführt werden. Zum anderen kann, aus in der Umgebung befindlichen Tags, eine virtuelle Spur definiert werden. Innerhalb der Reichweite eines Tags aktiviert sich das Lesegerät und erfasst die zentimeter- bzw. millimetergenaue Position des Tags. Daraus kann das Positioniergerät den Ort des AGVs mit ähnlicher Genauigkeit bestimmen. [68] Eine ähnliche Funktionsweise weist die Positionierung mittels magnetischer Marker auf. Sie können ebenfalls in die Fahrbahn eingebracht werden, um auf die Position des FTFs zu schließen. [69]

RFID - Radio-Frequenz-Identifikation

Zur Lagebestimmung oder Identifizierung bestimmter Produkte ist die Verwendung von Radiowellen ein häufig eingesetztes System. Es wird hierbei in passive, semi-aktive bzw. semi-passive und aktive Tags unterschieden. Passive Tags nutzen die Energie des Ausgangssignals, indem sie diese durch Induktion aufnehmen und als Signal ausgeben. Dadurch ist die Reichweite dieser Chips auf wenige Meter begrenzt. Die letzten beiden benötigen Strom, wobei der semi-aktive diesen nur für die Modulation seines Signals verbraucht. Trotz der Sparsamkeit resultiert ein Signal, welches teilweise bis 100 m empfangen werden kann. Die Gruppe der aktiven RFID-Tags verwendet den Strom für Mikroprozessor und die Modulation des Signals. Durch den zusätzlichen Energieaufwand ergibt sich eine Reichweite von Kilometern. Zusätzlich kommt es auf die verwendete Frequenz an, Hochfrequente Strahlung lässt hohe Datenraten zu, aber keine lange Reichweite, niedrig-frequente Strahlung kann kilometerweit empfangen werden, allerdings leidet die Datenübertragung daran.[71]

Die Lokalisierung und Orientierung anhand von RFID-Tags wird vor allem im Indoor-Bereich eingesetzt, da die Dichte der RFID-Tags relativ hoch sein muss, um akkurate Bewegung zu garantieren. Durch verschiedene Verbesserungen im Bereich der Antennen [16], als auch der Verteilung und Anordnung [17], sowie Entwicklungen bei der Informationsmenge [18] die übertragen werden können, kann es für eine Orientierung im Innenbereich, sehr überzeugen. Nichtsdestotrotz ist die Anzahl der einzubringenden RFID-Tags zu groß, um eine nachträgliche Installation zu verantworten. Ein weiteres Einsatzgebiet der RFID-Technik ist die Identifizierung von Produkten. Mit passiven Tags lassen sich Produkte einmalig kennzeichnen und wiedererkennen, mithilfe der anderen beiden Versionen (semi-aktiv, aktiv) können die enthaltenen Informationen auch neu beschrieben werden. [70]

Inzwischen ist das Angebot an verschiedenen Tags gestiegen, allein die Firma L-mobile bietet über 8.000 verschiedene Varianten an. Vorteile sind die vielseitige und parallele Einsetzbarkeit (Navigation

und Produktidentifikation) der Technik. Durch die Einbringung im Boden und durch robuste Gehäuse besitzen speziell die passiven Tags (aktive und semiaktive benötigen eine Stromquelle) sehr lange Lebensdauer.

Es gibt drei verschiedene Frequenzbereiche, die für die Anwendung eingesetzt werden können.

engl. Abk.	englische Bezeichnung	deutsche Bezeichnung (Abk.)	Frequenzbereich	Wellenlänge
HF	High Frequency	Kurzwellen (KW)	3–30 MHz	100–10 m
VHF	Very High Frequency	Ultrakurzwellen (UKW)	30–300 MHz	10–1 m
UHF	Ultra High Frequency	UHF-Frequenzband (μ W)	0,3–3 GHz	1–0,1 m

Tabella 7: Eigenschaften der Radiofrequenzbereiche [71]

Für die Navigation werden meist Tags im HF-Bereich verwendet. Um die Präzision dieser Methode zu erhöhen, gab es bedeutende Weiterentwicklungen bei der Lesetechnik. Einen hohen Einfluss nimmt jedoch auch der Abstand der eingebrachten Tags zueinander. [70]

Positionierungsmethode	Abstand der Tags [cm]	Radius der Detektionsfläche [cm]	durchschnittlicher Fehler [cm]	Verbesserung [%]
Sunhong's [72]	34	17	8,22	52
Choi [73] wiederholt in [74]	50	30	10,52	65
Ahmad und Mohan [70]	130	19,7	4,05	79

Tabella 8: Vergleich von Positionierungsmethoden basierend auf RFID

Durch die falsche Konzipierung kann es schnell zu Fehlern kommen, Probleme einzelner Tag-Sorten in verschiedenen Umgebungen (beispielsweise Signalverzerrung durch Stahlregale/-beton) resultieren in der Notwendigkeit einer großen Produktvielfalt. Aus diesem Grund und zur Verbesserung der Robustheit wird RFID-Navigation meist in Kombination mit einem oder 2 anderen Navigationssystemen verwendet. Für die Anwendung wurde als mögliches Raster ein 20 cm mal 20 cm bzw. 25 cm mal 25 cm Raster vorgeschlagen und verglichen, die erzielte Genauigkeit variiert zwischen 70% - 99%. [75]

Diese Genauigkeit reicht nicht für die Positionierung vor einer Palette, allerdings ist dieses System für die grundlegende Navigation auf dem Firmengelände gut geeignet. [76]

Magnetische Spurführung

Beim Einsatz von magnetischen Markern für die Navigation wird ein ähnliches Funktionsprinzip, wie bei der Navigation mittels RFID Tags angewendet. Das FTF wird mit einem Lesegerät ausgerüstet, dass an der Unterseite angebracht wird. Es kann die Polarität und die Position des Markers unter dem Lesegerät erkennen und an die Auswerteeinheit weitergeben. Die Abstände zwischen den Markern ergeben sich aus der Komplexität der Fahrbahn. In Tabelle 9 sind die Eigenschaften des in der Quelle erprobten Systems zusammengestellt. Die Genauigkeit des Systems wurde durch den zusätzlichen Einsatz von Odometrie verbessert. Im Beispiel ist jede Achse mit Auslenkungssensoren und Drehzahlmesser ausgestattet, zudem ist ein Gyroskop zu Kontrolle der Ausrichtung angebracht.

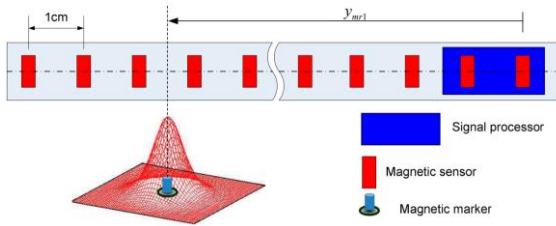


Abbildung 24: Schema eines magnetischen Lesegerätes [69]

Abstand zwischen Sensoren	1 cm
horizontale Messreichweite	32 bis 256 cm
vertikale Messreichweite	5 bis 40 cm (vom Boden)
Genauigkeit	± 2 cm (H 20 cm, Geschwindigkeit 10 m/s)
Betriebstemperatur	-20 bis 70 °C
maximale Geschwindigkeit	25 m/s (90 km/h)

Tabelle 9: Eigenschaften des behandelten Navigationssystems [69]

Nachfolgend ist eine Abbildung der in die Fahrbahn eingebrachten Marker zu sehen. Es ist zu erkennen,

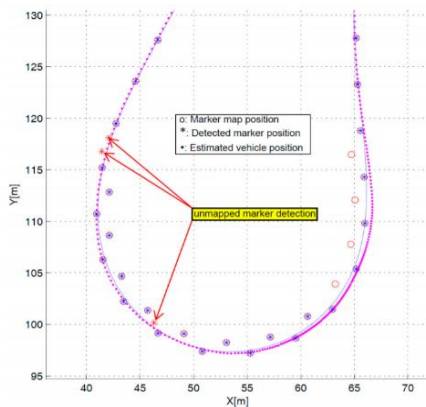


Abbildung 25: tatsächliche und gemessene Marker-Positionen und berechnete Fahrbahn in U-Kurve [69]

dass manche Marker nicht identifiziert wurden und dass zudem Phantom-Signale durch nicht vorhandene Marker auftreten. Für eine genaue und zuverlässige Navigation muss im Beispiel zusätzlich auf den Einsatz von GPS-Technik zurückgegriffen werden. Da GPS in Kombination mit Odometrie ausreichende Ergebnisse liefert, ist der Einsatz dieses Navigationssystems obsolet. Ein weiterer negativer Aspekt, ist die Betriebsdauer eines solchen Systems. Über längere Zeiträume (Jahre/ Jahrzehnte) verlieren die magnetischen Marker ihre Signalstärke, sodass früher oder später geringer Grenzwerte für die Detektion eines Markers

festgelegt werden müssen. Dadurch wird es zu immer mehr falsch identifizierten Markern kommen und die Präzision des Systems würde abnehmen. [69]

4.1.2. Gebinde-Identifikation

RFID-Tags

Zur Identifikation, Kontrolle und Erhöhung der Transparenz bei Wareneingang, Kommissionierung und Warenausgang kann RFID-Technologie eingesetzt werden. Die Nachfrage nach Industrie 4.0-Produkten ist in der Zeit der Automatisierung stark gestiegen, weswegen auch die Objektidentifikation durch IoT-Produkte wichtiger geworden ist. Dasselbe gilt auch für die Sicherheit der RFID Identifikation. Vergleiche und Analysen haben ergeben, dass diese bei ca. 95% in einer dichten Matrix liegt. Für die Verwirklichung dieser Genauigkeit werden ein GSPN (Generalized Stochastic Petri Nets) und ein Anti-Kollisions-Protokoll eingesetzt. [77]

Die Funktionsweise dieser RFID-Technik ähnelt der der Navigation. Der Unterschied zwischen beiden besteht in den verwendeten Tags. Für die Identifizierung von Gebinden müssen aktive oder semi-aktive RFID-Tags verwendet werden, damit die Daten von IBCs oder von Fässern auf Paletten festgehalten werden und wieder überschrieben werden können. Der Preisunterschied (ca. das 200-fache) zwischen den beiden Tag-Varianten ist neben der unterschiedlichen Speicherkapazität nicht zu vernachlässigen. Genauer zu untersuchen ist die Einsatzmöglichkeit von passiven RFID-Tags. Die Limitation für diese sind die Speicherkapazität und die Leseentfernung. Für eine Identifizierung der einzelnen Gebinde wird lediglich eine ein-eindeutige Zuordnung zwischen einer ID und einem Behälter benötigt. Die Gesamtzahl an Gebinden auf dem Gelände lässt sich mit einem oberen Limit von 10.000 begrenzen. Benutzte Gebinde werden nach ihrem Verbrauch wieder „recycelt“, indem die ID im ERP wieder neu zugewiesen wird und wieder verwendet wird. Da die Leseentfernung von passiven Tags in der Regel unter 50 cm liegt muss das Lesegerät in der Gabel des Gabelstaplers verbaut werden.

Lesegeräte und Tag-Preise sind für diese Anwendung nicht besonders hoch. Die Firma Proudtek vertreibt RFID-Tags mit integrierten wiederverwendbaren Kabelbinder für 0.35\$/Tag. Mit einem Lesegerät für 200\$ und ca. 1.000 Tags würden bereits 600\$ (ca. 550€) zur Ausstattung ausreichen.

Barcode-Identifizierung

Barcodes bieten sich aufgrund der Einfachheit der Technik an. Barcodescanner sind günstig in der Anschaffung und die gedruckten Codes können zusätzlich mit schriftlichen Informationen versehen werden, um menschliche Fehler bei der Anbringung zu verhindern. Es gibt bereits Programme, die in der Lage sind aus Bildabschnitten von Kameras Barcodes zu extrahieren. Auch wenn diese etwas verwischt, bedeckt, gekrümmt sind oder nicht senkrecht zur Kamera stehen. Die Anschaffungs- und Betriebskosten für Barcodes sind außerdem sehr gering.

Die Verwendung dieser Technik würde außerdem keine zusätzlichen Sensoren verlangen. Industrielle Kameras können mit mitgelieferten Programmen oder durch eine Datenauswertung durch eine externe Firma ausgelesen werden. während die gleiche Kamera auch zur Lokalisierung und Identifizierung der Gebinde dient. Preise für eine solche Auswertungssoftware variieren zwischen 500€ und 2.000€. Zusätzlich müsste allerdings eine „dumme“ Kamera (ohne integrierte Software) eingekauft werden. Preise für Industriekameras der verlangten Genauigkeit liegen bei 200€ -1.000€. Die teuersten Modelle besitzen für die Rechtfertigung des Preises allerdings Alleinstellungsmerkmale wie Witterungsresistenz, hohe Langlebigkeit und genannte Programme.

Deshalb und durch die Probleme mit der Lesbarkeit in engen Rastern bei RFID-Tags sind Bar-Codes offensichtlich die bessere Technik für diese Anwendung.

4.1.3. Objekterkennung

4.1.3.1. Lidar-Sensoren

Dieselben Sensoren, die für das E.L.S. verwendet werden, können auch zur Erkennung von Hindernissen und Personen genutzt werden. Es gilt dasselbe Prinzip, da auch hier über ToF die Distanz zu Objekten berechnet wird. Durch SLAM- und oder MOT-Algorithmen kann die Relativgeschwindigkeit erfasst werden und zwischen stillstehenden und sich bewegendem Objekten unterschieden werden. Sensoren, die als Sicherheitslaserscanner klassifiziert werden, basieren auf demselben Prinzip. Lediglich die Genauigkeit und Menge der Datenpunkte unterscheidet sich stark. Meist liefern die Sensoren nur die Information ob sich in den Feldern ein Hindernis befindet oder nicht. Aus diesem Grund werden diese Sensoren für die Überwachung der unmittelbaren Umgebung eines FTF verwendet durch die geringeren technischen Anforderungen, liegen auch die Preise unterhalb des Durchschnitts für Lidar-Sensoren. Beispiele für diese Sensoren, Preise und technische Details sind in Anhang 2 tabellarisch dargestellt. Günstige Modelle mit geringem Sicherheitswarnfeld sind für die vorliegende Anwendung bestens geeignet. Da ein Bremsweg von 2- 3 Metern reicht, um das FTF von der Maximalgeschwindigkeit zum Stillstand zu bringen. [79]

4.1.3.2. Radarsensoren

Radarsensoren dienen der allgemeinen Detektion von Hindernissen wie Menschen oder Objekten. Sie können Lidarsensoren ersetzen, falls keine genaue Distanzbestimmung notwendig ist. Sie arbeiten meist mit FMCW-(frequency modulated continuous wave) Radar.

Ein Vorteil ist der im Vergleich zum Lidar geringe Preis, da keine einzelnen Datenpunkte, sondern die gesamte rückgeworfene Strahlung gemessen und ausgewertet wird. Weiterhin lassen sich für die durchschnittliche "Sicht"-weite von 0,5 oder 1 m bis 4 oder 10 m verschiedene Felder einrichten. So kann eingerichtet werden, dass es bei Hindernissen im äußeren Warnfeldbereich zu einer Entschleunigung des FTF kommt und dass ein Hindernis im inneren Bereich zu einem endgültigen Stopp des FTF führt. Ein weiterer großer Vorteil von Radarsensoren ist, dass sie sich kaum von Witterungseinflüssen oder Betriebsbedingungen stören lassen. So verhindern sie auch im Falle von Nebel, Regen, Schnee, Staub oder anderen Sichteinschränkungen Kollisionen mit Hindernissen. Nachteilig ist das kleinere Sichtfeld von oft nur 70 -110°, dadurch ist die Installation von mehreren Sensoren notwendig.

4.1.4. Überwachung der Motorik des StockDroiden

Wie in den Anforderungen erwähnt, kann nicht in das proprietäre Bussystem des Gabelstaplers EVO E20PL eingegriffen werden. Es müssen also die Bewegungen des Gabelstaplers überwacht werden um sie, durch ein Lenksystem kontrolliert zu steuern. In den folgenden Abbildungen sind die verschiedenen Gabelbewegungen des StockDroiden® dargestellt. Es gibt verschiedenen Möglichkeiten der Überwachung dieser Bewegung. Sie werden in den nachfolgenden Abschnitten verglichen und

bewertet. Es können jeweils verschiedene Sensorgruppen eingesetzt werden. Vor- und Nachteile leiten sich aus der Funktionsweise der verschiedenen, eingesetzten Systeme ab. Es kann eine photoelektrische, aber auch eine mechanische Überwachung der Distanz stattfinden.

4.1.4.1. Gabelneigung

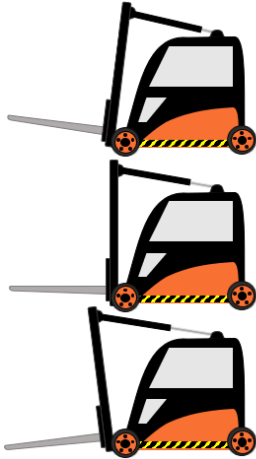


Abbildung 26: Darstellung der Gabelneigung

In Abbildung 26 ist die Gabelneigung des StockDroiden[®] dargestellt. Für die Überwachung der Neigung gibt es zwei wesentliche Systeme, die in Frage kommen. Bei beiden Systemen wird die Neigung indirekt gemessen, indem sie aus der Strecke, die der Zylinder ausgefahren ist, berechnet wird.

Linear-Encoder

Zum einen mittels eines Linearencoders, der direkt im Hydraulikzylinder angebracht werden kann. Durch die Installation im Zylinder, werden diese Sensoren nicht von Witterungseinflüssen angegriffen und bieten damit eine langlebige Lösung. Ein weiterer Vorteil dieser Sensoren ist die hohe Genauigkeit von bis zu 0,1 mm. Aus dem maximalen Neigungswinkel von 7,5° errechnet sich die Hublänge von knapp unter 600 mm.

Nachteil dieser Sensoren ist die aufwendige Installation und damit verbunden eine lange Ausfallzeit im Fehler- bzw. Wartungsfall.

Seilzuggeber

Seilzuggeber sind Sensoren, die auf einem mechanischen Prinzip beruhen. Über ein geflochtenes Stahlseil ist der Sensor mit dem Messpunkt verbunden und kann die Entfernung über die Länge des Seils ausgeben. Der Vorteil dieser Sensoren sind die hohe Genauigkeit und die geringe Störanfälligkeit. Außerdem sind Seilzuggeber durch die Verwendung von Edelstahl für den Großteil der Bauteile und des Gehäuses witterungsresistent und relativ langlebig. Falls dieser Sensor ausfällt, kann er zudem unproblematisch und schnell ausgetauscht werden.

4.1.4.2. horizontale Gabelverschiebung

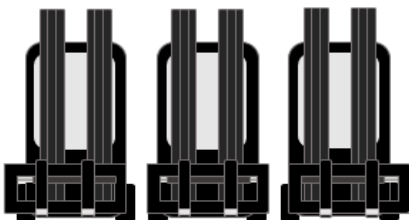


Abbildung 27: seitliche Verschiebung des Gabelstaplers

Die seitliche Verschiebung der Gabel lässt sich unkompliziert mit Laserdistanzsensoren messen. Hierfür können Sensoren, die auf der Basis von Reflektoren oder durch einfaches Messen der Reflexion funktionieren, verwendet werden. Da die Reichweite unterhalb von 1m liegt, sind Laserdistanzsensoren ohne Reflektoren völlig ausreichend. Zudem kann die Genauigkeit unter der Verschmutzung

der Reflektoren leiden. Folglich sind die Distanzsensoren ohne Reflektoren die besser geeignete Wahl. Radarsensoren oder Seilzuggeber sind für die kurze Distanz nicht geeignet. Für Seilzuggeber ist der Messbereich und der Platz für die Installation der Sensoren zu gering. Radarsensoren sind für die Überwachung von längeren Strecken gedacht.

Ultraschallsensoren bilden eine nennenswerte Alternative, da sie auf dem gleichen Messprinzip (ToF) beruhen und ähnliche Genauigkeiten auf kurze Entfernungen vorweisen können. Der Nachteil der Ultraschallsensoren liegt in der Ausbreitung der Wellen als Kegel. Unter Last (mit IBC beladen) könnten diese Wellen durch die Ladung reflektiert werden was zu einer Verfälschung der Messung führen würde. Im Gegensatz dazu können die Laserdistanzsensoren auf einen Punkt kalibriert werden und so fehlerfreie Messungen liefern. Bei einem Hindernis innerhalb des Strahls des Lasers würde es zur plötzlichen Änderung der gemessenen Entfernung kommen. Diese ruckartige Änderung kann detektiert werden und eine Fehlermeldung kann ausgegeben werden.

4.1.4.3. Vertikale Gabelverschiebung



Abbildung 28: vertikale Verschiebung der Gabel

Abbildung 29: Ausfahren des Mastes

Um kurze und lange Distanzen präzise zu überwachen, müssen vor allem optoelektronische Sensoren in Betracht gezogen werden. Ultraschall- und Radarsensoren entfallen, da die Entfernungsmessung durch den sich in einem Kegel ausbreitenden Schall zu einfach gestört werden kann.

Die eindeutige Wahl sind damit auch hier Laserdistanzsensoren. Die Hubhöhe beim Ausfahren des Triplex-Mastes beträgt 4,625 Meter. [80] Somit kommen von Der Messweite auch Seilzuggeber in Frage, allerdings führt die schnelle Bewegung ($> 1 \text{ m/s}$) der Gabel zu möglichen Fehlern bei der genauen Messung. Abhilfe könnte die Beschränkung der maximalen Hubgeschwindigkeit, die standardmäßig bei 0,5 bis 0,6 m/s liegt, schaffen. Dies bedeutet eine Senkung der Effizienz, weshalb von diesen Sensoren abgeraten werden muss.

Eine zusätzliche Alternative bilden Ultraschallsensoren, da sie außen einsetzbar und relativ klein sind, sodass damit gut die Höhe des Hubs der Gabel gemessen werden kann. Auch hier stellt die kegelförmige Ausbreitung der Schallwellen einen Nachteil dar, da sie durch Hindernisse zurückgeworfen werden könnten und die Messung verfälschen würden.

4.2. Software:

4.2.1. Level der Automatisierung

Die erste Stufe des autonomen Fahrens liegt in vielen KFZ bereits vor, Beispiele dafür sind Tempomat oder Einpark-Hilfen. Bei solchen Systemen wird die Steuerung oder die Beschleunigung des Fahrzeugs kontinuierlich vom Fahrzeugführer übernommen und es kann immer interveniert werden. Die Quer- oder Längsführung des Fahrzeugs wird in diesem Fall vom Programm übernommen.

Bei der zweiten Stufe des automatisierten Fahrens wird die Längs- und Querführung übernommen, auch hier findet eine ständige Überwachung des Fahrzeuges durch den Fahrzeugführer statt. Selbst

diese Stufe des autonomen Fahrens findet bereits zahlreiche Anwendung, zum Beispiel Stauassistenten und Spurhalteassistenten.

Bei der 3. bis 5. Stufe übernimmt das Fahrzeug selbst die Kontrolle. Auf der 3. Stufe ist die Kontrolle begrenzt auf einen bestimmten Zeitraum, ein Beispiel ist die automatische Autobahn-Fahrten. Einfache Manöver werden dabei vom integrierten System übernommen andere Aufgaben wie Baustellen zu umfahren oder von der Autobahn runterzufahren muss der Fahrer übernehmen.

Die 4. Stufe dieser Automatisierung beinhaltet Dienste wie Valet Parking, also dass ausgerüstete Autos mit dem Parkplatz/-haus kommunizieren und selbst in einen Platz entsprechend der Fahrzeuggröße einparken. [81]

Das Ziel der Bachelorarbeit, also die 5. Stufe des autonomen Fahrens sind vollkommen autonome Fahrzeuge, bei denen kein Fahrer mehr benötigt wird. Hier werden alle Probleme durch die installierten Sensorsysteme übernommen, sodass der Mensch nur noch als Passagier teilnimmt. Für Logistiksysteme dieser Art gilt, dass sie ohne menschliche Überwachung Anweisungen erhalten und diese selbständig ausführen können. [5]

4.2.2. Software für automatische Paletten-Erkennung

Die Technik für automatische Paletten-Identifikation wird seit den 90iger Jahren entwickelt. Dabei basieren die meisten Systeme auf der Extraktion von visuellen Merkmalen. Eine der zwei hauptsächlich verwendeten Methoden ist die Lokalisierung im visuellen Feed (Bild) anhand von zusätzlich an den Paletten angebrachten Passermarken. Hierbei ist zu beachten, dass jede Palette mit entsprechenden Marken ausgestattet werden muss. Die zweite Methode beruht auf der Auswertung von auftretenden visuellen Merkmalen der Palette, also durch die Erkennung von Kanten und farblichen Bereichen im Bild. Dafür sind gute Beleuchtung als auch ein Kalibrationsalgorithmus notwendig. [82] [83] [84]

Alle angeführten Quellen benutzen Kalman-Filter zur Reduktion der Datenmenge. In Quelle [84] kommt es bei der Auswertung zudem zu einer vorherigen Zerlegung des Bildes, eine Filterung von Rauschen und einer Hough-Transformation zur Extraktion von Kanten.

Die erste Methode muss nicht weiter betrachtet werden, da es von den Kosten her und aufgrund des zusätzlichen Aufwandes nicht tragbar ist. Es müsste jede angelieferte Palette mit exakt platzierten Passermarken versehen werden. Durch die variierenden Materialien der Paletten (Metall, Holz und Kunststoff) und die leicht unterschiedlichen Maße, kann diese Methode nicht eingesetzt werden.

Die Identifizierung anhand von visuellen Merkmalen, wie Kanten und farbigen Flächen kann fehlerbehaftet sein, wenn die Entfernung oder die Ausrichtung des AGVs nicht stimmt. Außerdem könnten bestimmte „Bilder“ des Betriebsgeländes als Palette identifiziert werden. Um dies zu vermeiden wird die Kombination der Bilddaten mit Lidar-Daten vorgeschlagen. Das Tiefenprofil einer Palette kann mit dem Bildausschnitt verglichen werden, um eine erhöhte Genauigkeit zu erbringen.

Zusätzlich lässt sich aus den Daten des Lidar-Sensors die Entfernung und die Ausrichtung des FTF's gegenüber der Palette errechnen. [82] [83]

In einem weiteren Beispiel wird die Erkennung und die Anfahrt an die Palette beschrieben, dafür wird eine Kombination aus LIDAR und Kamera benutzt. mit den LIDAR-Daten wird das Tiefenprofil der Palette aufgenommen und über das Stereobild der Kamera gelegt. Durch mehrschichtiges Lernen kann der StockDroid[®] Paletten und andere Objekte differenzieren. In der Quelle wird nach dem Training des FTF eine Genauigkeit von 98,3% und 92,7% erreicht. [20]

Die Annäherung des StockDroiden[®] ist ein weiteres technisches Problem, welches lediglich von einem japanischen Forscherteam in Angriff genommen wurde. Die bearbeitete Zielstellung war die Minimierung der Abweichung für die Annäherung an Gebinde. Dazu wurden ein vertikaler und ein horizontaler LiDAR als auch eine Kamera deren Aufnahmen mithilfe eines Rasters übereinander gelegt wurden. In der Arbeit wird formuliert, dass der Fehler bei der Anfahrt nur durch eine klothoide Kurve verringert werden kann, da sie ständige Korrektur unterliegt und mathematisch einfach zu berechnen ist. [20]

4.2.2.1. Mehrschichtiges Lernen

Einen wichtigen Anteil an der korrekten Erkennung von Paletten, spielt zudem der Einsatz von mehrschichtigem oder tiefem Lernen eine große Rolle, für die Verbesserung des Algorithmus wird das Zielobjekt in verschiedenen Bildern manuell markiert. Mit einer Datenbank an Bildern kann das neuronale Netzwerk trainiert werden. Im Wesentlichen basiert die Funktionsweise auf der Findung von bestimmten Eigenschaften in den Daten, die bei allen positiven Beispielen vorhanden sind. Die Mathematik dahinter ist sehr kompliziert und versteckt sich in sogenannten Hidden-Layers. Spezifische Werte werden den Bildern im Input-Layer zugeordnet, anschließend werden die Werte an einige oder alle Nodes des ersten Hidden-Layers weitergegeben. Dieser Vorgang wird wiederholt. Schließlich werden mit dem letzten Hidden-Layer Outputs erzeugt, denen bestimmten Eigenschaften zugeordnet werden können. Ein Output könnte das Vorhanden- oder Nichtvorhandensein einer Palette im ausgewerteten Bild sein. Wenn der Wert auf 1 aufzurunden ist, dann ist laut dem neuronalen Netzwerk eine Palette vorhanden. Wenn der Wert eher null ähnelt, deutet das auf das Fehlen einer Palette im Bild hin. Beispiele der Datenbank, die mit dem Wert 0,5 bemessen werden, können durch eine manuelle Auswertung zum weiteren Lehren des Netzwerkes verwendet werden. Ein beispielhafter Aufbau des neuronalen Netzwerkes ist in Abbildung 30 zu sehen. [85]

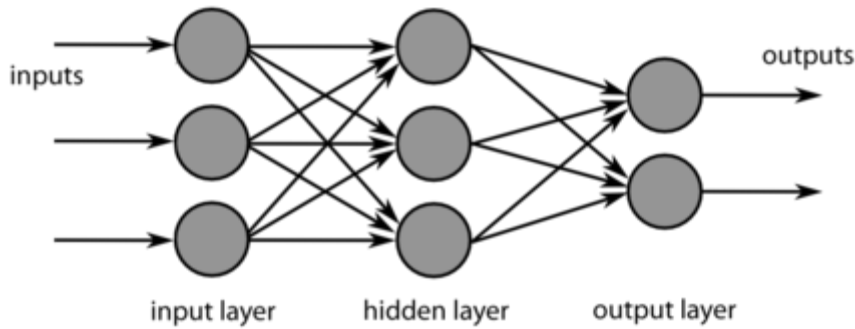


Abbildung 30: Aufbau eines neuronalen Netzwerkes für mehrschichtiges Lernen [85]

4.2.3. SLAM-Algorithmen:

4.2.3.1. Visuelles SLAM

Für die Abstands- und Ausrichtungsberechnung des StockDroid® wird nach dem Positionieren vor dem Gebäude, eine Fläche aus der erhaltenen Punktwolke berechnet. Aus dieser kann eine Fläche interpoliert werden. Hierfür ist keinen Lidarsensor mit 360° Blickfeld nötig es würde auch ein Lidar basierend auf Flashtechnik ausreichen.

Vergleich	Navigation mit INS; GNSS	Navigation mit SLAM
Vorteile	hohe Genauigkeit ohne Signalstörung	geringe Anschaffungskosten
	Lösung in globalem Koordinatensystem	niedrige Komplexität der Algorithmen
	gute Einbindung mehrerer Sensoren	Lokalisierung in unbekanntem Umgebungen
Nachteile	strikter Kalibrierungsvorgang	lokales Koordinatensystem
	hohe Komplexität des Algorithmus	Genauigkeit sinkt bei weiten Strecken
	hohe Anschaffungskosten	Schleifen-Schließung problematisch
	GPS sehr wichtig	globales Lokalisationsproblem

Tabelle 10: Vor- und Nachteile von GNSS und SLAM [78]

Tabelle 10 vergleicht zwei Methoden der Navigation bzw. Lokalisierung. Beide haben Vor und Nachteile. Eine Kombination der Methoden könnte die Nachteile überwinden und eine bessere Lösung bieten.

Ein wichtiger Bestandteil von SLAM-Software für fahrerlose Transportsysteme ist die Lokalisierung von Objekten und die Bestimmung deren Relativgeschwindigkeit. Daraus erzeugt das Programm eine Karte der Struktur der Objekte und Personen in der Umgebung. Dabei können verschiedene Systeme implementiert werden. [86] Die meisten Lösungen verwenden Lidar-Sensoren, da sie die Entfernungen

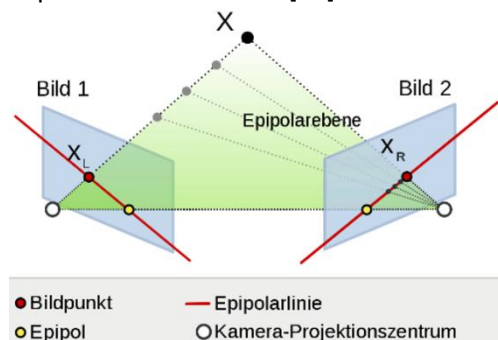


Abbildung 31: Begriffe der Epipolargeometrie [119]

zu den Messpunkten als Messdaten mitliefern. Für bekannte Umgebungen gibt es auch Lösungen mit einzelnen oder mehreren Kameras. Für einzelne Kameras werden allerdings Passermarken benötigt, sodass aus deren Größe die Entfernung, und damit die Position des FTF's berechnet werden kann. Aus der Größenänderung der erkannten Objekte und der eigenen

Relativgeschwindigkeit kann auf die Entfernung von diesen Objekten geschlossen werden. Die Erkennung von Objekten ist ein zusätzliches Problem, das beim Einsatz von Kameras auftritt. Hindernisse und Personen müssen anhand von Kanten und Farbunterschieden erkannt werden. Auch bewegte Objekte stellen ein Problem dar, da durch die Verschiebung der Objekte zwischen der Erzeugung der Bilder die berechnete Position verfälscht werden kann. Diese Fehlerquelle kann durch visuelle Daten von mehreren Kameras eingeschränkt werden. Es können erkannte Objekte verglichen werden und aus deren Größe im jeweiligen Bild und aus der Position der Kameras Entfernungen berechnet werden. Um die Bilder auszuwerten, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine ist die Verwendung epipolarer Geometrie, mit ihrer Hilfe kann die benötigte Leistung für die Berechnung von Entfernungen und Position minimiert werden. Dazu werden anhand der Position der Kameras Epipolarlinien und -punkte zugewiesen. Die Epipolarlinie des einen Bildes entspricht dabei einem Bildpunkt aus dem anderen Bild und umgekehrt. Eine genaue Darstellung findet sich in Abbildung 31 wieder. Über Daten zur Ausrichtung und Position der Kameras können Rückschlüsse zu den Objekten im Bild gezogen werden. Für die Verbesserung der Sicherheit und genauere Messwerte wird in verschiedenen Quellen eine Rotation der Kameras vorgeschlagen. Die Ergebnisse 4 verschiedener Methoden sind in Tabelle 11 zusammengestellt und anhand ihrer Orthogonalität und ihren Seitenverhältnissen verglichen wurden.

Proben:	Methode	Orthogonalität [°]		Seitenverhältnis		Abweichung	
		H	H'	H	H'	mittlere	standard
Kisten, Bogen, Laufwerk, Gebäude, Turm, Cournot	Proposed	89.83	89.82	1.00	1.00	0.28	0.27
	Hartley	89.75	90.00	1.00	1.00	9.72	2.02
	Fusiello	90.00	90.00	1.00	1.00	1.24	0.93
	Mallon	89.90	90.15	1.00	1.00	0.28	0.52

Tabelle 11: Vergleich der Auswertung durch unterschiedliche Methoden von verschiedenen Objekten (Rechtwinkligkeit und Größenverhältnis; Ziel 90 und 1) [87]

In einer weiteren Quelle wird gezeigt, dass die Daten zweier Stereo-Kameras mit einem Intel NUC mit einem I7 Prozessor ausgewertet werden können. Die Arbeit beschreibt allerdings einen kleinen Roboter, bei welchem es lediglich um die selbständige Orientierung und Bewegung geht. Da die Ausarbeitung aus dem Jahr 2017 stammt, ist die verwendete Technik veraltet. moderne NUCs von Intel sind in der Lage alle Softwareanforderungen zu bewältigen. Andere Optionen stellen Systeme basierend auf ARM-Architektur (Advanced RISC Machines) dar. Beispiele hierfür sind die Odroid und Nvidia Jetson Familie. [88]

Für die Minimierung der Datenmenge von Stereo-Kameras gibt es verschiedene Filter, die auf die Tiefenbilder angewendet werden können. Tiefenbilder bestehen dabei nicht aus dem Farbwert des jeweiligen Pixels, sondern aus einem durch die Auswertung der Bilder zugeordnetem Tiefenwert.

„Sub-Sampling-Filter“ – Unter-Abtast-Filter [89]

Das reduzierte Bild besteht aus Pixeln, die den Durchschnitt der 8 umliegenden Pixel bilden. Dadurch resultiert ein Bild mit einem neuntel der Auflösung des ursprünglichen Bildes.

„Depth-Threshold Filter“ – Tiefen-Ausschluss-Filter [89]

Je weiter entfernt, der Ursprung eines jeweiligen Bildpunktes ist, desto größer ist das Rauschen für diesen Messwert. Durch einen solchen Filter werden alle Werte, die über einem festgelegten Schwellenwert für die Tiefe liegen aussortiert, indem ihnen der Wert 0 zugeordnet wird.

„Edge-preserving Filter“ - Kantenerhaltungsfiler [89]

Wände und große Hindernisse sind durch ihre Ecken und Kanten ausgeprägt. Die Kanten werden durch den Vergleich der Pixel in einem ein-dimensionalen bewegenden Durchschnitt erkannt. Verschiedene Punkte die ähnliche Entfernungswerte aufweisen bilden bei diesem Vergleich eine Linie. Somit werden die Kanten detektiert und können erhalten werden.

Um die Präzision von Stereo-Kamera-Lokalisation weiter zu verbessern, werden auch hier verschiedene Systeme kombiniert, in einem Beispiel werden von Kameras erhaltene Daten mit GPS-Informationen verrechnet. So kann eine genaue Navigation auch für den Ausfall des GPS-Signals garantiert werden. Neben der Korrektur von Stereo-Kameras und GPS-Sensoren werden in der Methode auch Echtzeitkinematik und Kalman-Filter benutzt. [90]

Tabelle 12 zeigt die Abweichung von 4 verschiedenen Methoden zur Positionsbestimmung in verschiedenen Testumgebungen. Zum einen wird damit der Einfluss von bestimmten Umgebungsfaktoren auf die Genauigkeit von GPS-Daten getestet. Zum anderen bietet die Tabelle ein Abbild an, wie sehr zusätzliche Systeme die Genauigkeit erhöhen können. Die Kombination aus GPS (bzw. DGPS), IMU und CAN dient als Basis für die Berechnung des Fehlers und hat somit immer einen RMSE-Wert von 0 Metern. Besondere Hindernisse für die Messung mit GPS im Experiment stellten hohe Gebäude oder Überbrückungen dar, dies belegen die außerordentlich hohen Abweichungen in Beispiel (1), (2), (3). Grund dafür ist der Abbruch des GPS-Signals in diesen Beispielen. Weiterhin ist die Genauigkeit abhängig von der Dauer des Signalverlust. Der zusätzliche Einsatz von Odometrie (CAN) um die zurückgelegten Wege besser überprüfen zu können, vermindert den Fehler erheblich. Eine Verbesserung ist vor allem in Beispielen (2) und (3) zu sehen. Das liegt an der kurzen Unterbrechung des GPS-Signals. Das Problem von IMU-Sensoren ist das graduelle Eischleichen von Ungenauigkeiten, diese nehmen über eine lange Strecke ohne GPS-Signal weiter zu. Die Kombination aus GPS, IMU und CAN liefert mithilfe der genauen Überwachung der Reifen so exakte Daten, da die zurückgelegte Strecke nicht nur über die Anzahl der Umdrehungen und die Ausrichtung der Reifen, sondern auch der Schlupf (s. Glossar) der Reifen zur Berechnung ausgewertet wird. Trotzdem ist anzunehmen, dass ein minimaler Fehler (<0,5 m) auftritt. [91]

Beispiel (Nr.)	Dauer [s]	Methode	Zurückgelegte Entfernung [m]	RMSE [m]
Tunnel (1)	264.796	GPS	1685.755	13.137
		GPS + IMU	1582.86	4.88
		GPS + IMU + CAN	1589.76	0
		vorgeschlagene Methode	1570.616	1.564
Brückenkreuzung (2)	158.069	GPS	1066.827	73.16
		GPS+IMU	1045.851	1.765
		GPS+IMU+CAN	1044.588	0
		vorgeschlagene Methode	1038.825	1.229
Indoor-Parkhaus (3)	76.105	GPS	218.94	7.105
		GPS + IMU	216.019	4.657
		GPS + IMU + CAN	218.946	0
		vorgeschlagene Methode	213.382	2.341
unebene Straße (4)	60.885	GPS	136.538	1.491
		GPS + IMU	142.303	1.139
		GPS + IMU + CAN	131.749	0
		vorgeschlagene Methode	130.997	0.941

Tabelle 12: Vergleich der Genauigkeit von verschiedenen auf GPS-basierenden Systemen [91]

Für die vorgeschlagene Methode werden neben GPS, IMU und CAN zusätzliche Algorithmen zur Normierung und Regulierung der Daten angewendet.

ISVD-Algorithmus [91]

Dieser Algorithmus dient dem Erkennen und Ausschließen von unscharfen Frames bei der Berechnung. Dazu wird das Bild in Graustufen konvertiert. Bei einem unscharfen Bild sind die Grautöne des gesamten Bildes ähnlich. Je nach der Ähnlichkeit aller Pixel eines Bildausschnittes kann dem Bild ein Wert für die Unschärfe zugeordnet werden. Für den Ausschluss bestimmter Bilder muss zudem ein Grenzwert für „zu unscharfe“ Bilder festgelegt werden.

SFFSD-Algorithmus [91]

Die Verteilung von Ausreißer-Werten beim Vergleich von verfolgten Bildpunkten folgt einer La-Place-Verteilung. Für den Ausschluss der Ausreißer werden die x- und y-Abweichungen der zugeordneten Bildpunkte in einem 2D-Diagramm eingeordnet und eine La-Place-Verteilung wird daran gefittet. Ausreißer werden von der Zuordnung der Bilder ausgeschlossen.

Die genannten Filter können auch für LiDaR-Daten verwendet werden, allerdings bringt die zusätzliche Dimension einen höheren Bedarf an Rechenleistung. Neuere Modelle dieser Reihe bringen eine erheblich höhere Rechenleistung mit sich, wie in der nachfolgenden Tabelle zu sehen ist. Dadurch können alle Filter und Algorithmen berechnet und die Daten ohne Probleme ausgewertet werden.

JETSON		NANO	TX2i	XAVIER NX	AGX XAVIER
KI-Leistung Tflops		0,472	1,26	21	32
GPU	Typ	NVIDIA Maxwell	NVIDIA Pascal	nVIDIA Volta	nNVIDIA Volta
	Kerne (Tensorkerne)	128	256	384 (48)	512 (48)
Arbeitspeicher	[GB]	4	4	8	32
	[GB/s]	25,6	51,2	51,2	136,5
Datenspeicher eMMC 5.1		16 GB	32 GB	16 GB	32 GB
DL-Beschleuniger				2x NVDLA-Engines	
Vision-Beschleuniger				7-Wege-VLIW-Vision-Prozessor	
CSI-Kameras (virt. Kanäle)		4 (12) 1,5 Gbit/s	6 (12), 30 Gbit/s	6 (24), 30 Gbit/s	6 (36), 40 Gbit/s bis 91 Gbit/s
Betriebstemperatur:			-40°C bis 85°C		-25 ° C bis 80°C.
Lagertemperatur:			-40°C bis 85°C		-25 ° C bis 105°C
Luftfeuchtigkeit:			95% RH		95% RH
Schock:			140 G		50 G
Vibration:			10 bis 500 Hz		10 bis 500 Hz
Preis [€]		82.16	387.93	326.00	820.00

Tabella 13: wichtige Eigenschaften und Preise der Nvidia JETSON-Reihe

4.2.3.2. LIDAR-Daten als Basis

Nachfolgend sind Opensource SLAM- Algorithmen tabellarisch gegenüber gestellt und anhand ihrer Berechnungsart (CPU, GPU, GPU+NORM) verglichen. NORM steht für den Einsatz eines Normierungsalgorithmus bei der Berechnung. Es wird zudem die durchschnittliche und die absolute Laufbahnabweichung genannt.

	Alg.	ORB-SLAM2	LIBVISO2	SPTAM	RTAB-MAP	ZED-VO
	Method	SLAM	VO	SLAM	SLAM	VO (wie getestet)
	Loop-Schließung	Yes	Nein	Yes	Yes	Nein (wie getestet)
CPU	daLa ⁴ [m]	0.28	-3.02	-1.22	-0.18	–
	faLa ⁵ [m]	0.09	-5.99	-8.73	-3.75	–
GPU	daLa [m]	0.54	-2.73	-0.45	0.12	0.34
	faLa [m]	0.09	-4.8	-13.07	0.06	0.49
GPU + NORM	daLa [m]	0.1	-5.28	0.37	0.15	–
	faLa [m]	0.08	-8.19	0.82	0.06	–
Quelle		https://github.com/raulm/ORB_SLAM2	https://github.com/srv/viso2	https://github.com/lrse/sptam	https://introlab.github.io/rtabmap/	https://github.com/stereolabs/zed-ros-wrapper

Tabella 14: Vergleich der absoluten Genauigkeiten der SLAM-Algorithmen [89]

Wie in der Tabelle zu sehen ist, sind die Abweichungen der Algorithmen klein, und können durch eine Einlern-Phase verbessert werden. Nach einigen Wiederholungen (Loops) werden markante und

⁴ Abk.: durchschnittliche absolute Laufbahnabweichung

⁵ Abk.: finale absolute Laufbahnabweichung

konstante Flächen identifiziert und zur Verbesserung der Genauigkeit verwendet. „ORB-SLAM2“, „LIBVISO“, „SPATM“ und „ZED“-Algorithmen werden ausschließlich für die Auswertung von Stereo- und RGB- Kameras verwendet. Der Code, der hier verwendet wird, bedient sich der Programmiersprache C++. Die Anwendungen sind zusätzlich an den Einsatz eines kompatiblen robot operating systemgeknüpft. Vorteile dieser Algorithmen sind die geringeren Anschaffungskosten, da die hierfür benötigten Kameras ein kleineres Budget verlangen als die Ausrüstung des Gabelstaplers mit LIDAR-Sensoren.

Für industrielle Zwecke und für die Verwendung in unbekanntem Umgebungen werden Lidar-Sensoren jedoch bevorzugt. Durch die Erzeugung von Punktwolken ist zum einen die Erkennung von Objekten einfacher und zum anderen müssen keine Entfernungen berechnet werden. Dies erhöht die Menge an zu verarbeitenden Daten, als auch die benötigte Rechenleistung. Für moderne Systeme ist diese nicht problematisch ist. Ein großer Teil der Algorithmen besteht aus zwei Schritten. Zuerst die Detektion der Objekte im Sichtfeld, und eine anschließende Auswertung der Positionen über Zeit, um die Bewegung der erkannten Objekte zu interpretieren und vorausszusagen. [92] Die Objekterkennung beruht auch hier auf der Findung von Kanten und Flächen in der 3D-Punktwolke. Aus diesem Grund ist der „RTAB MAP“- Algorithmus der best-geeignete, da er in der Lage ist alle Arten von visuellen Daten in die Berechnung zu integrieren. Andere LiDaR-SLAM-Algorithmen, wie „hdl_graph_slam“ [93], „LaserSLAM“ [94], „LINS“ [95] oder „lidar_slam_3d“ [96], sind aktueller und bringen damit eine höhere Genauigkeit für die Lokalisation und Orientierung. „hdl_graph_slam“ und „LINS“ funktionieren auf der Basis von 3D-LiDaR-Daten, zur Erhöhung der Präzision können Daten eines inertial measurement unit von magnetischen oder Beschleunigungssensoren benutzt werden. Für die Anwendung dieses Algorithmus sind bisher nur die LiDaR-Sensoren Velodyne HDL32e und VLP16 erprobt, sodass andere Sensoren dafür nicht in Frage kommen. Dasselbe gilt für „lidar_slam_3d“, wobei hier keine IMU-Daten für die Berechnung verwendet werden können. Der „LaserSLAM“-Algorithmus dient der Auswertung von 2D-LiDaR-Daten, allerdings ist dieser OpenSource-Code, aufgrund fehlender LOOP-Optimierung und der Kartenerstellung in nur 2 Dimensionen. [89]

SLAM-Algorithmen werden meist mit anderen Sensorsystemen kombiniert, um höhere Genauigkeiten zu erzielen. Bei der Zusammenführung der Daten zu einer einheitlichen Ausrichtung und Position werden dieselben erst für die Systeme unabhängig berechnet und dann gemittelt. Problematisch dabei ist die Rotation oder Bewegung des FTFs während der Lidarmessung, was im Anwendungsfall allerdings unvermeidlich ist. Um die Verzerrung der 3D-Punktwolke zu verhindern, werden die Ergebnisse der Sensorsysteme ständig miteinander verglichen und gegenseitig für die Auswertung zu Hilfe genommen, beispielsweise bei der Kombination aus LIDAR und Gyroskop. [97]

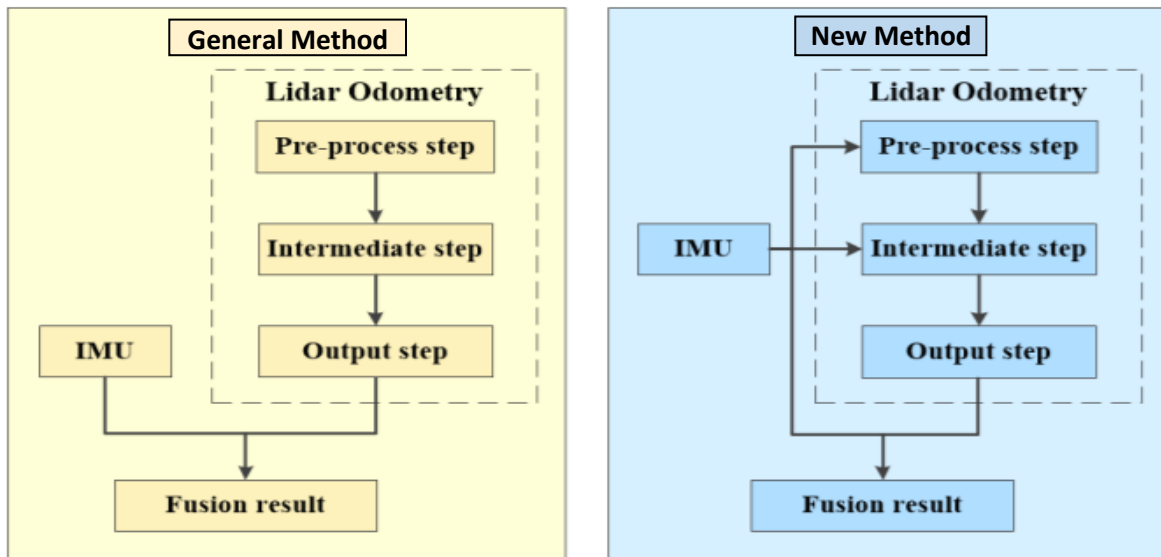


Abbildung 32: Vergleich von herkömmlicher und neuer Methode für das Zusammenfügen von Lidar- und IMU-Daten [97]

Es können verschiedene Methoden angewendet werden, um die Datenmenge, die bei der Messung mit LIDAR-Sensoren entsteht, zu reduzieren. Folgend werden Dezimierungs-Algorithmen vorgestellt. Dabei geht es um die Reduktion der Daten durch die Verbindung von Punkten zu Flächen, wenn diese in der gleichen Ebene liegen.

Algorithmische Datendezimierung

Für den Fall, dass ein Punkt in einer Ebene mit allen ihn umgebenden Punkten liegt oder er keinen signifikanten Mehrwert für die Generierung der Fläche mitbringt, kann er außen vor gelassen werden. Ähnlich verläuft der Prozess für die anderen beiden Varianten. Ursprünglich kommen diese Algorithmen aus der Kartographierung von großflächigen Landgebieten. Alerdings ist die Genauigkeit der LiDaR-Sensoren und die damit zusammenhängende Menge an Daten über die letzten Jahre gestiegen, somit können diese Algorithmen auch für den Anwendungsfall, besonders für Boden- und Gebäudeflächen benutzt werden. [98]

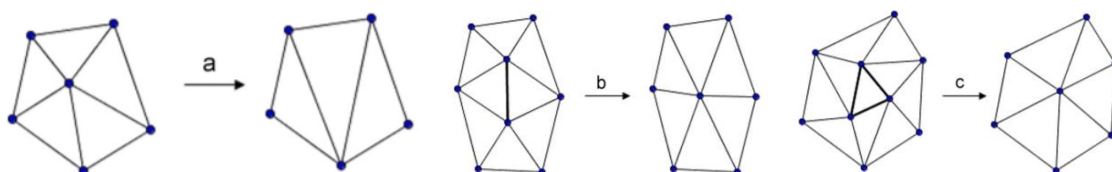


Abbildung 33: Skizzen von 3 Dezimierungsfunktionen: (a) Vektor-, (b) Kanten- und (c) Dreiecks-Reduktion [98]

Für das bessere Verständnis ist die Reduktion der Datenpunkte in Abbildung 34 am Beispiel eines Gebirges dargestellt. Schritt 1, 2 und 3 zeigen die Abnahme der Datenpunkte. Dabei bilden die schwarzen Linien Grenzen zwischen Flächen unterschiedlicher Neigung.

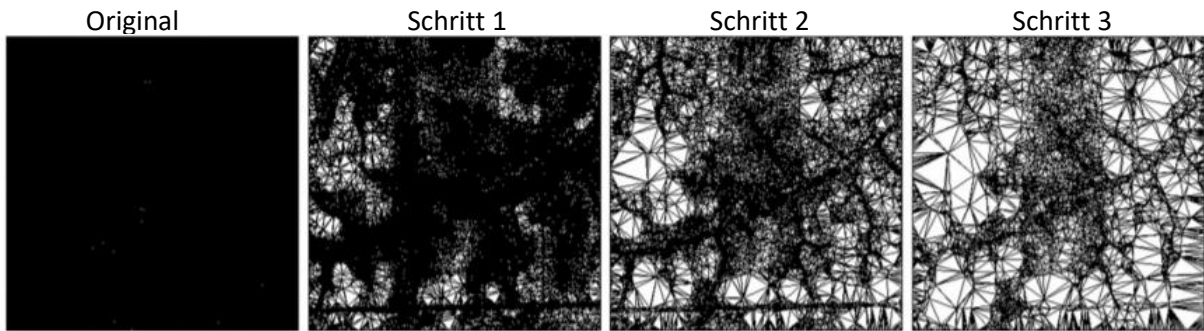


Abbildung 34: Reduktion der Datenpunkte am Beispiel eines Gebirges (d) [98]

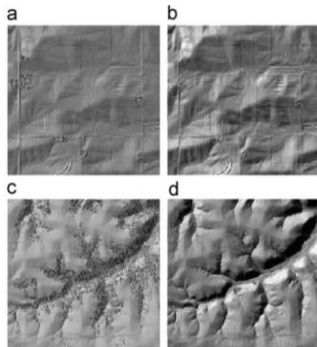


Abbildung 35: Profildraufsicht der 4 Beispiele

Die genauen Winkel für die 4 untersuchten Beispiele sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Sie geben die Ergebnisse nach 20 durchgeführten Iterationen des Algorithmus an. Die Felder b und d sind dabei die Ergebnisse der Reduktion von a und b. Die Restmenge an Daten bezieht sich auf die Anfangsmenge. Ergebnis ist somit eine Reduktion von einmal 95% - 99,5% und zum anderen mal von 75%- 98,5%.

Beispiel-Fläche	Winkel	restlicher Anteil	RMSE	Datenmenge
a	150°	17.12 %	0.77	19.60 MB
	160°	25.77 %	0.51	29.50 MB
	170°	41.64 %	0.15	47.80 MB
b	150°	0.24 %	0.99	0.17 MB
	160°	0.86 %	0.77	0.59 MB
	170°	4.35 %	0.19	2.97 MB
c	150°	57.83 %	1.44	72.00 MB
	160°	69.39 %	1.02	86.40 MB
	170°	79.23 %	0.71	98.60 MB
d	150°	1.55 %	3.41	0.78 MB
	160°	5.27 %	1.20	2.64 MB
	170°	25.07 %	0.32	12.50 MB

Tabelle 15: Datenreduktion für 4 verschiedene Oberflächen [98]

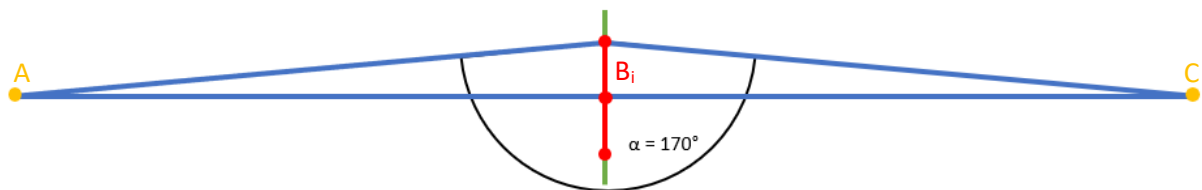


Abbildung 36: schematische Darstellung der Auswahl von Punkten die gelöscht werden

Zwischen den Punkten A und C kann ein Punkt B liegen, der entweder auf der grünen oder auf der roten Linie liegt. Punkte B_i die auf der grünen Linie liegen, also außerhalb des Zielwinkels, werden beibehalten, Punkte B_i , die auf der roten Linie liegen liefern laut dem Algorithmus kaum zusätzliche Informationen und werden somit aus dem Datensatz entfernt. [98]

Kalman-Filter

Für die weitere Reduzierung der nötigen Rechenleistung und die bessere Vorhersage der Bewegung von Hindernissen werden Kalman-Filter verwendet. Grundsätzlich basieren diese Filter auf einem Update- und einem Vorhersage-Schritt für n Fahrzeuge in der Umgebung. Dabei werden Hindernissen Werte für die momentane Entfernung zum FTF und die momentane Geschwindigkeit zugeordnet. Aus diesen Parametern und deren zeitlichen Änderungen können Aussagen zu den Positionen von anderen Fahrzeugen getroffen werden, zu denen noch keine Messwerte existieren. Diese dienen dann nicht nur zur Objektidentifikation, sondern auch zur Kontrolle der vorhergesagten Daten. Weiterhin werden nicht kollidierende und interaktionsabhängige Vorhersagen zur Berechnung der Bewegung verwendet. Die 3. Aufgabe, des in der Quelle vorgestellten Kalman-Filters, ist die Zerlegung der resultierenden Probleme, wie anstehende Fahrspurwechsel oder Überholmanöver in kleinere „Einzel-Fahrzeug-Probleme“. [99]

Zusätzlich kann der Ungarische-Algorithmus angewendet werden um den Speicherplatz, der für die Verfolgung der erkannten Objekte verwendet wird, zu minimieren. [83]

Solche Filter sind für das Projekt von geringer Bedeutung, da es sich nicht um Autos bei einer Geschwindigkeit von 29,4 m/s . [99], sondern um einen Gabelstapler handelt. Dessen Höchstgeschwindigkeit liegt bei ca. 16 km/h (4,44 m/s) [80] und die Zielgeschwindigkeit bei knapp 10 km/h (2,78 m/s). Durch die geringe Geschwindigkeit reichen Messdaten zur Vermeidung von Kollisionen und es sind keine Daten zur besseren Vorhersage notwendig. [100]

Boden-Filter

Weitere Optimierungen kommen durch den Einsatz solcher Filter. Bei konventionellen Methoden ist die Einschätzung des Profils des Bodens teilweise fehlerhaft, da es „nahen Boden“ als Objekt erkennt. Es werden hierfür aus den 3-dimensionalen Daten 2-dimensionale Matrizen erzeugt, die die Messwerte beinhalten. Jedem Scanwinkel (vertikal) kombiniert mit dem Rotationswinkel (horizontal) wird pro Matrix ein Datenpunkt zugewiesen. Mit den Werten für Intensität, Reichweite und Höhe kann für jeden Rotationswinkel ein erwartetes Höhenprofil des Bodens erzeugt werden. Durch die Erkennung der Punktwolken, die vom vorhergesagten Bodenprofil abweichen, können Hindernisse einfacher detektiert werden. Die Datenpunkte die dem Boden zugeordnet werden, können mit einer Ebenengleichung zusammengefasst werden. [101]

4.2.4. Steueralgorithmen für Spurfindung

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Spurfindung und -kontrolle. Um die zuverlässige Navigation zu garantieren, werden Algorithmen, die die Vor- und Rückwärtsbewegung und andere, die die Ausrichtung kontrollieren, verwendet. Ziel ist es, die Fahrspur und -richtung zu stabilisieren. LPV-MPC ist ein Kontrollalgorithmus zur Vorhersage der Bewegung. Gleichzeitig berechnet dieser darauf beruhend nötige Aktionen, die eine sichere Navigation und fehlerfreie Lokalisation gewährleisten.

Dieser Controller wird vor allem für hoch dynamische Systeme verwendet. ADRC, verwendet Beschleunigungsdaten, um auf das zukünftige Beschleunigungsprofil zu schließen. Dadurch ist der Controller in der Lage selbst bei schlechtem Wetter und hohen Beschleunigungen/ Geschwindigkeiten genaue Daten zu liefern. Diese Methode erfordert eine hohe Rechenleistung und eine solche Anforderung liegt im Anwendungsfall nicht vor, weshalb auf einfachere Varianten zurückgegriffen werden kann. Beim Pure Pursuit Modus (PPM) wird der Weg nur mithilfe des Lenkradius überwacht, bei hohen Geschwindigkeiten kommt es dadurch zu Fehlern, allerdings nur für den Bereich ab 10 m/s -15 m/s. [102]

Kontroller	Vorteile	Nachteile
LPV-MPC	ausnutzbar in der Vorschau	benötigt Echtzeitberechnung
	leicht handelbare Einschränkungen	genauerer Modell nötig
	sehr gute Kontrollgenauigkeit	sensitive Parameterunsicherheiten
ADRC	Robust gegenüber Parameterunsicherheiten	Kontrollerverstärkungen müssen präzise sein für hohe Genauigkeiten
	einfach zu implementieren	
PPM	einfach genug	nicht verwendbar bei hohen Beschleunigungen
	gute Performance bei geringen Geschwindigkeiten	Fehler bei zu hohen Geschwindigkeiten

Tabelle 16: Vor- und Nachteile der Kontrollalgorithmen [102]

Test Nr.	erwünschte Geschwindigkeit	Kontroller-Design	Positionierungsfehler		Ausrichtungsfehler	
			Maximum	RMSE	Maximum	RMSE
1	5 m/s	MPC	0.61 %	0.24 %	7.76 %	3.02 %
2	5 m/s	ADRC	11.27 %	5.20 %	9.41 %	3.55 %
3	5 m/s	PPM	11.07 %	4.03 %	9.66 %	3.45 %
4	10 m/s	MPC	3.72 %	1.64 %	7.35 %	2.75 %
5	10 m/s	ADRC	08.72 %	4.30 %	8.33 %	3.05 %
6	10 m/s	PPM	21.86 %	9.21 %	10.80 %	3.98 %
7	15 m/s	MPC	13.12 %	5.04 %	8.06 %	2.93 %
8	15 m/s	ADRC	10.33%	4.56 %	7.96 %	2.72 %
9	15 m/s	PPM	72.58 %	32.18 %	17.93 %	8.19 %

Tabelle 17: Genauigkeiten der Kontrollalgorithmen für verschiedene Geschwindigkeiten [102]

In Tabelle 17 ist zu sehen, dass die anspruchsvolleren Algorithmen (MPC, ADRC) bei den niedrigen Geschwindigkeiten ähnlich abschneiden, sodass es in Kombination mit der geringen Rechenleistung zur Auswahl des PPM-Algorithmus führt. [83]

Eine weitere Quelle belegt die Berechnung der angularen und horizontalen Ausrichtung mit Vektoren. Für diese Art von Algorithmus werden Zielen und Hindernissen abhängig von ihrer Größe, Anziehungs- oder Abstoßungskräfte zugewiesen. Die Summe ergibt eine Richtung, in die sich das FTF bewegt. Durch die wiederholte Berechnung dieser Gleichungen entsteht ein geglätteter Vektor, der sich umgebungsabhängig verändert. Im Beispiel wird der entwickelte Algorithmus für die Verfolgung eines beweglichen Zieles konzipiert. Eine Ersetzung des „Zieles“ mit RFID Markern oder Passermarken ist

durchaus möglich. Aufgrund dessen und da die Methode außerordentliche Ergebnisse für unbekannte Umgebungen liefert, ist sie eine qualitativer Fit für den StockDroid®. [103]

benötigter Datenspeicher

Für das 3D-Mapping werden die Daten von Kameras und von LiDaR-Sensoren kombiniert und zusammen ausgewertet, in der vorliegenden Quelle wird zudem die Größe der Datenmenge mit Arbeitsspeicherverbrauch und Berechnungszeit verglichen. Die nachfolgenden Zeiten sind Gesamtzeiten und teilen sich prozentual auf verschiedene Prozesse auf.

Datensatzgröße [Punkte]	Berechnungszeit [s]	Arbeitsspeicher Auslastung[MB]
249062	75.9	429.2
158071	49.2	339.8
72669	18.3	221.2
15487	4.9	162.2

Tabelle 18: Arbeitsspeicher und benötigte Rechenleistung für verschieden große Datensätze [104]

Die Rechenleistung teilt sich Datentransformation (8%), Punktwolken Flächen-generation (23%), Daten-Regulierung, Hintergrundsenkung (Denoising) und Datenklassifikation (29%), 3D-Oberflächen-Rekonstruktion und Aufbau von OBJ-Modellen (51%; OBJ: Formatierungsart der Daten) und Konvertierung des rekonstruierten Netzes in B3DM-Format (12%). Bei der Auftragung der Daten in einem kartesischen Koordinatensystem fällt zudem eine eindeutige lineare Abhängigkeit auf, wie in Abbildung 37 zu sehen. [104]

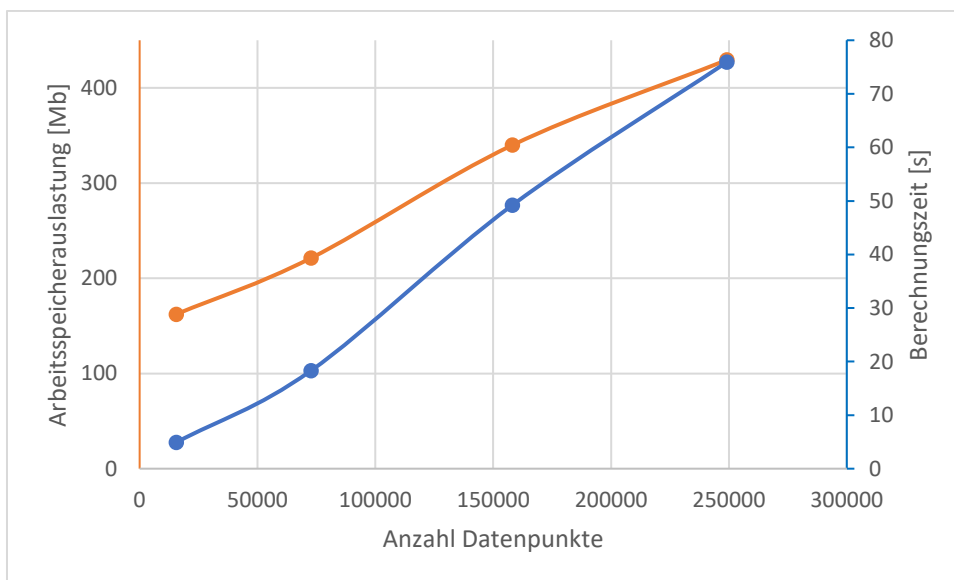


Abbildung 37: Arbeitsspeicherauslastung und Berechnungszeit über Datensatzgröße [104]

Die erhaltenen Daten basieren auf dem Computer-Setup, das einen Intel i7 8700K 6-Kern-CPU mit 32 GB RAM und acht TB RAID-5 ausgestattet ist. [104] Die Darstellung der Daten wurde anhand von 3 verschiedenen Setups getestet, diese sind in Tabelle 19 gegenübergestellt. Es ist hier zu erkennen, dass die älteren Setups geringere FPS-Werte aufweisen. Der Intel Core i7 8700K, der für die Berechnung der 3D-Bilder zuständig war, ist hier nicht in den Vergleich einbezogen. Es ist trotzdem sehr plausibel, dass

er die Leistung der Alternativen übertroffen hätte. Die 1., als auch die 2. Maschine weisen hohe FPS-Werte auf und die Belastung des Arbeitsspeichers ist gering. Die Anzeige von 3D-Matrizen, die drehbar und zoombar sind, ist selbst für ältere Desktop-PCs kein Problem. Nur bei der Verwendung des Smartphones in der 3. Zeile, kam es zu einer Überlastung des CPUs als auch zu einer höheren Belastung des Arbeitsspeichers. Grund dafür ist das Fehlen eines GPUs. CPUs der mittleren Klasse wie der Snapdragon 835 können diese Datenmengen nicht schnell in einer solchen Form verarbeiten, deshalb kommt es zu Framedrops und einer Überlastung der anderen Bauteile. [104]

CPU	GPU	FPS	RAM Auslastung	CPU Use
Intel Core i5 2500K quad core CPU	Nvidia GeForce RTX 2080 Ti GPU	60	175 MB	15% (60% bei 1 Kern)
Intel Core i7 3630QM quad core CPU	Intel HD Graphics 4000 integrated; GPU, Nvidia GeForce GTX 660M GPU	15; 55	176 MB	7% (60% bei 1 Kern)
Snapdragon 835	System-on-Chip	25	298 MB	28% (100% bei 1 Kern)

Tabelle 19: Computer-Setups zur Ausgabe der Punktwolkendaten mit Auslastungsprofi [104]

5. Vorstellung einer Komplettlösung

Für die Lösung der beschriebenen Aufgabe stehen Mittel in Höhe von 625.000€ zur Verfügung. Dabei sind für Personal- und Dienstleistungskosten 325.000€ vorgesehen. Die Ausrüstung mit Sensorik und das Budget auf, das sich in den nächsten Absätzen bezogen wird, beträgt 300.000€.

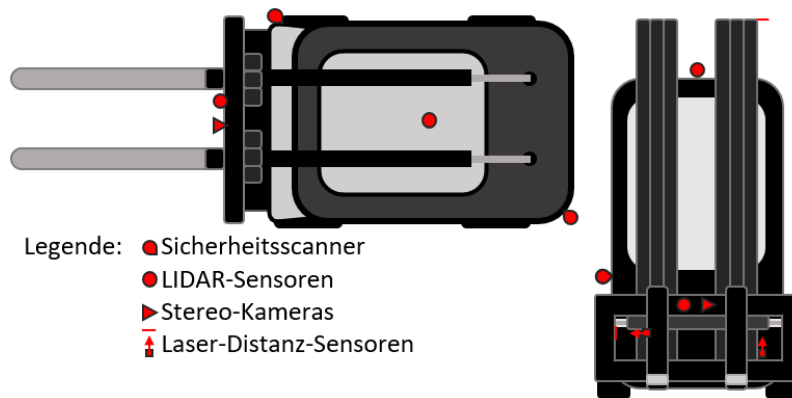


Abbildung 38: Orte für Sensoren-Installation

5.1. Navigation von FTFs

Für die Navigation des StockDroiden wurden verschiedene Systeme untersucht, dabei haben sich bestimmte Methoden als klare Favoriten herausgestellt. Es wurden unter anderem GPS-Systeme, Transpondersteuerung und LIDAR- beziehungsweise Stereokamera-basierte Systeme vorgestellt. Weiterhin wurde auf mögliche Kombinationen der Systeme eingegangen.

Für die Ausrüstung des StockDroiden wird eine Kombination aus LIDAR-Sensoren, Odometrie zur Lokalisation und RFID-Tags zur Navigation auf dem Firmengelände vorgeschlagen.

5.1.1. Odometrie und LIDAR-SLAM

Die Orientierung auf dem Firmengelände ist eine komplexe Angelegenheit, da das Lager aus hunderten Gebinden besteht. Für jedes gibt es theoretisch einen gesonderten Anfahrtsweg. Durch den Aufschwung der Automatisierung von PKWs und der Notwendigkeit von weitreichender Objekterkennung für diese Anwendungen gibt es zahlreiche Sensoren, die eingesetzt werden können. Je nach der benötigten Genauigkeit und Reichweite variieren die Preise stark. Aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit reicht für die Anwendung allerdings ein LIDAR-Sensor der mittleren bzw. niederen Preisklasse. Diese Sensoren sind immer in Verbindung mit der eingesetzten Software zu betrachten. Es wurden verschiedene OpenSource-Programme für eine solche Anwendung vorgestellt, allerdings ist ein verantwortlicher Ansprechpartner im Falle der Addition von Funktionen unerlässlich. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle die Firma Göttingen KG empfohlen, da sie bereits Projekte mit solchen Lokalisationssysteme ausgerüstet hat. Der wichtigste Punkt, der bei der Implementierung beachtet werden muss, ist, dass dieses Navigationssystem vor allem für die Anfahrt zu einzelnen Gebinden, die Lokalisation von Hindernissen und zur Bestimmung deren Relativgeschwindigkeit genutzt werden soll.

Preislich liegt das E.L.S der Firma Göttingen KG mit sensorischer Ausstattung bei 60.000€ (variiert stark durch vorliegende Standortbedingungen). Das liegt vor allem an der selbstständigen Entwicklung der zugehörigen Software als auch die Gewährleistung der Sicherheit. Also dass Softwarefehler nicht zu schwerwiegenden Komplikationen führen können. Da die Technik allerdings nur der Objekterkennung und der einfachen Navigation dient, kommt der Komplexität der Software keine hohe Bedeutung zu. Basiskomponenten des Codes können bereits die geforderten Anforderungen erfüllen. Wodurch der Preis um ca. 25% fallen wird, bestätigen konnte Göttingen KG das nicht. Die Preisklasse anderer Systeme liegt jedoch in diesem Bereich.

5.1.2. RFID-basierte Navigation

Um die Komplexität der Navigation einzuschränken und da viele Wege grundsätzlich gleich sind, wird die Einbringung von passiven RFID-Tags in das Firmengelände zur Orientierung empfohlen. Für die Umsetzung müssen die Tags auf den „Standardwegen“, wie sie auf dem Lageplan des Firmengeländes eingezeichnet sind, eingebracht werden. Die Installation des Lesegeräts und die Einbringung der Tags muss von Fachpersonal vorgenommen werden, da wie die Recherche ergeben hat, jedes System unterschiedliche Abstände zwischen den Tags voraussetzt. Da Göttingen KG schon für die Installation des einen Teils des Navigationssystems vorgeschlagen wurde, ist es kostengünstiger sie auch mit der Ausstattung des Firmengeländes mit RFID zu beauftragen. So muss kein anderes Unternehmen eingreifen. Dadurch muss nicht jede Software einzeln bezahlt werden, sondern ein Preis für die Kombination der beiden ausgehandelt werden. Laut verschiedenen Mitarbeitern kann der Preisnachlass nicht genau beziffert werden. Wie erwähnt liegt er bei ca. 25%. Das RFID-System kostet laut eigenen Angaben 30.000€ mit ca. 6€ pro RFID-Tag und Installation bei 1Tags/m² ergibt das auf einer Wegfläche von aufgerundet 903 m² (Anhang 11) einen Gesamtpreis von 5.400€ + Lesegerät für ca. 5.000€. Die Installationskosten sind durch die Einlernphase des FTFs mit 20.000€ bemessen wurden. Es wurde zusätzlich über die Kommunikation gesprochen, die zusammen mit den Navigationssystemen installiert werden soll. Die Antenne mit nötigen Schnittstellen und ausreichender Reichweite liegt preislich bei 3.000€

5.2. Lokalisation und Identifikation von Gebinden

Dieses Aufgabenfeld des StockDroiden wird durch dieselben Sensoren gemeistert. Empfohlen werden auch hierfür Stereokameras und LiDaR-Sensoren.

5.2.1. Lokalisierung

Für die Lokalisierung wird tiefes Lernen vorgeschlagen. Dafür können Bilder der verschiedenen Arten von Paletten verwendet werden. Eine Datenbank aus ca. 1.000 Bildern sollte reichen, um das neuronale Netzwerk ausreichend auszubilden. Über die Position der Kamera und des LiDaR-Sensors an der Gabel und die Position der Gabel kann die Position der Palette berechnet werden. Dabei dient der LiDaR-Sensor für die Berechnung des Abstandes bis zum Gebinde (x-Richtung) und die Kombination

aus LIDAR und Kamera für die y- und z-Richtung (siehe Abbildung 44). Zur weiteren Senkung des Gesamtpreises, sollte auch hier ein LiDaR-Sensor der Firma Velodyne (vertrieben durch Göttingen KG) eingesetzt werden. Für eine ausreichend genaue Messung der durch Gebinde entstehenden 3D-Punktwolke sollte hier das Modell PUCK von Velodyne (preis 6.500€) eingesetzt werden. Industriekameras, deren Bilder scharf genug sind werden auch von SICK GmbH verkauft. Da es sich um eine „dumme“ Kamera handelt, liegt der Preis bei ca. 1.700€.

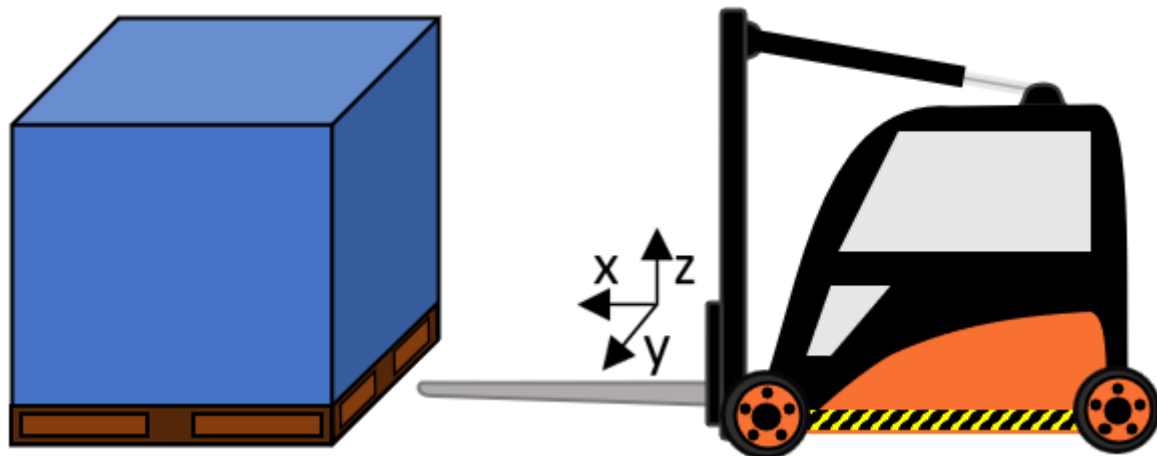


Abbildung 39 Abstand zwischen Gebinde und Gabelstapler

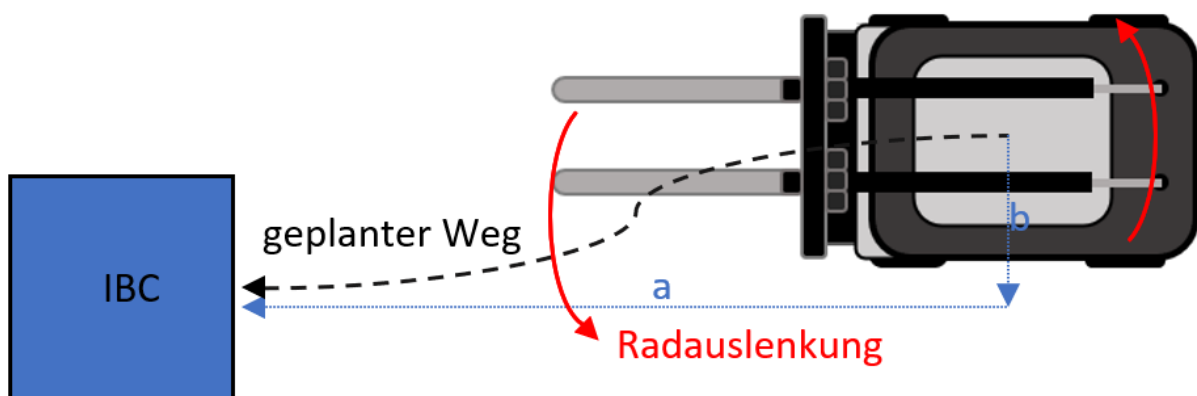


Abbildung 40: Anfahrt an einen IBC

Um die Löcher der Palette zu „treffen“, wird zunächst die Relativposition bestimmt. Für die exakte Positionierung des Gabelstaplers wird auch hier eine Einlernphase nötig sein. Für jeden Versatz b und Entfernung a muss eine bestimmte Radauslenkung durchgeführt werden. Diese Steuerungsabfolge kann manuell durchgeführt werden, und als Programm, welchem der StockDroid im Anwendungsfall folgt, eingestellt werden.

5.2.2. Identifikation

Im letzten Jahrzehnt hat sich das Angebot und die Fähigkeiten von Stereo-Kameras maßgeblich weiterentwickelt. Durch die gestiegene Genauigkeit können moderne Kameras kombiniert mit entsprechender Auswertungssoftware ohne Probleme Text und Symbole oder auch Barcodes bis einem Meter Entfernung erkennen und lesen. Geeignete Firmen sind Partner von Zebra Technologies

oder COGNEX GmbH beide Firmen bieten vielversprechenden Software an und sie liegen preislich in derselben Kategorie (600€-800€ für die Software). Intelligente Kameras wurden nicht in Betracht gezogen, da der visuelle Feed dann nur durch die proprietäre Software der Kamera ausgewertet werden kann und demnach 2 Kameras nötig sind.

5.3. Sicherheitstechnik

Um die Sicherheit der Mitarbeiter zu gewährleisten und Kollisionen zu vermeiden, werden Radarsensoren benötigt. Diese dienen der Überwachung des unmittelbaren Umfelds. Die Daten der Lidarsensoren zusammen mit SLAM-Algorithmen können für die Erkennung von weiter entfernten Objekten und zur Bestimmung deren Relativbewegung eingesetzt werden. Die Installation dieser wurde bereits in 5.2 abgehandelt. Die Radarsensoren sollten hingegen wie in Abbildung 38 zu sehen am StockDroiden® angebracht werden.

Der hierfür vorgeschlagene Sensor ist der OutdoorScan3 von SICK GmbH. Er überzeugt zum einen durch hohe Genauigkeit und viele Möglichkeiten zur Einrichtung der Schutzfelder, zum anderen ist er einer der wenigen Sensoren, die für den Außenbereich zugelassen sind. In Tests der Produktionsfirma liefert dieser Sensor auch bei Nebel, Schnee oder Regen sichere Ergebnisse. Weiterhin erfüllt er das nötige Sicherheitsintegrationslevel (SIL2). Außerdem reichen, durch den Öffnungswinkel von 275° 2 Sensoren zur gesamten Sicherheitsüberwachung in unmittelbarer Entfernung. Der Listenpreis für dieses Modell beträgt 6.429€, was es zu einem der teuersten Modelle auf dem Markt macht. Grund dafür ist das Alleinstellungsmerkmal der garantiert sicheren Outdoorbetriebsüberwachung.

5.4. Überwachung der Gabelbewegung

Für die Überwachung der Gabelbewegung wird eine Kombination aus Seilzuggebern und Laserdistanzsensoren empfohlen. Für die Überwachung der Neigung kann die Distanz gemessen werden, um die der hydraulische Kolben ausgefahren ist. Seilzuggeber eignen sich dafür, da sie auch bei kleinen Distanzen genaue Messwerte liefern und witterungsresistent sind. Laser-Distanzsensoren eignen sich für die Überwachung der seitlichen und vertikalen Gabelverschiebung, da sie nicht von Witterung beeinflusst werden. Zudem ist es einfache und zuverlässige Technik, bei welcher kein Mindestabstand für die Überwachung eingehalten werden muss. Laser-Distanzsensoren der Firma Sick GmbH kosten 405€ (siehe Anhang 8).

5.5. Aktorik und PC

Um die Steuerung des Gabelstaplers zu automatisieren, muss einer der lizenzierten Vertragspartner von Linde Material Handling GmbH beauftragt werden, da das Bussystem proprietär ist. Und nur durch Linde verifizierte Händler eingreifen können.

Die Installation des gesamten Systems sollte dabei auf einem KI-fähigen PC passieren. Diese eignen sich besonders gut, da auf Ihnen neuronale Netzwerke energieeffizient betrieben werden können. Als

klare Favoriten haben sich dabei die Produkte der Nvidia JETSON-Reihe herausgestellt, sie werden in verschiedenen Arbeiten verwendet, um ähnlich komplexe Aufgaben zu lösen. Teilweise werden in den angesprochenen Beispielen Modelle älterer Generationen, wie JETSON Tx2 oder JETSON Nano verwendet. Um eine Überlastung der Recheneinheit und damit verbundenes Versagen des StockDroiden zu verhindern, sollte hierfür definitiv auf das neuste Modell, den JETSON Xavier AGX zurückgegriffen werden. Dieses bietet laut Angaben des Anbieters genug Rechenleistung, um alle angestrebten Prozesse zu meistern. Preis für einen PC mit diesen Spezifikationen liegt bei 820€.

5.6. Bilanz

Der Gesamtpreis für alle Sensoren kann um ca. 20% variieren, da viele Anbieter in den geführten Kundengesprächenangaben, Mengenrabatte zu vergeben. Diese gelten dabei nicht nur für die Anzahl der bestellten Sensoren, sondern auch für die Bestellung unterschiedlicher Sensorgruppen beim gleichen Hersteller. Rabatte sind vor allem bei der Ausrüstung durch SICK GmbH und Göttingen KG zu erwarten. Dies ist ein weiterer Grund für die Entscheidung für Sensoren dieses Anbieters.

Sensor/Hardware/Software	Hersteller	Typ	Preis [€]
Laserdistanzsensor	SICK GmbH	UC30	415*2
Seilzuggeber	SICK GmbH	PFG19-P1AM10PP	570
Lidar	Göttingen KG	PUCK	6.500
Kamera	Sick GmbH	Visionary B	15.080
Sicherheitsscanner	SICK GmbH	OutdoorScan3D	6.429 *2
Recheneinheit	Nvidia	Jetson Xavier AGX	820
ELS- Navigation	Göttingen KG		60.000
RFID-Navigation	Göttingen KG		33.400
Gesamtpreis [€]			116.370

Tabelle 20: Zusammenstellung der erwarteten Kosten für die Ausstattung des Stockdroid®

6. Fazit

Die Automatisierung des Gabelstaplers E20PL Evo von Linde material handling wurde in der Bachelorarbeit eingehend betrachtet. Dabei wurde zunächst ein Überblick über andere in der Industrie verwendete FTFs geschaffen. Dieses zeigte, dass ein Anforderungsprofil mit der Komplexität des Stockdroiden[®] vorher noch nicht bewältigt wurde. Vor allem die Bodenrauigkeit und die Frequenz mit welcher Hindernisse auftreten werden, ist nicht mit anderen Anwendungen vergleichbar.

Die Anzahl und Art der Sensoren, die nach ausgiebiger Recherche empfohlen wurden, liegen von den Kosten her im Budget.

Die 2. große Herausforderung liegt in der Anbindung und konstanten Kommunikation mit dem gegebenen ERP-System solutions2[®]. Es kann nicht garantiert werden, dass nur der Stockdroid[®] mit den Gebinden arbeitet. Das heißt, dass das FTF zusätzlich sich ändernde Bedingungen in den verschiedenen Lagern erkennen und sich daran anpassen muss. Die resultierende Software muss daher äußerst komplex sein. Die Kosten für die Entwicklung und Kalibrierung der nötigen Software könnten den finanziellen Rahmen sprengen. Bewiesen ist diese Annahme jedoch nicht. Die Menge an frei zugänglichen Quellcodes für die Verwertung von LiDaR-Daten und Ähnlichem kann genauso zu dem Schluss führen, dass eine Einhaltung des Budgets sehr wohl möglich ist.

Daher ist das Ergebnis, dass der Stockdroid[®] auf dem aktuellen technischen Stand umsetzbar ist. Es ist erwiesen, dass das Budget für die Ausstattung mit Hardware reicht. Nicht bewiesen ist das für die Ausstattung mit Software.

Moderne Effektivitätssteigerung in Industrie und Alltag wird durch Roboter bewirkt. Es wird eine Umstellung des Arbeitsmarktes stattfinden müssen, da Arbeitsplätze als Resultat zunehmend wegrationalisiert werden. [105]

7. Glossar

- gain drop engl. Verstärkungsabfall. Abfall der Verstärkung des Messsignals.
- Gebinde: Überbegriff für Paletten und IBCs
- klothoid: Ebene, spiralförmige Kurve deren Krümmung an jeder Stelle proportional zur Bogenlänge ist. Eine andere Bezeichnung ist "Cornu-Spirale".
- Odometrie: Berechnung der zurückgelegten Entfernung über die Messung um Umrechnung von Radumdrehungen.
- Schlupf: Der Anteil der Raddrehung, der nicht zur Fortbewegung des FTF's beiträgt. In der Technik steht es für die Abweichung der Geschwindigkeit zweier tangential belasteter Bauteile.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt, „Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2019 gegenüber dem 1. Januar 2018,“ 01 01 2019. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrebilanz_Bestand/2019/2019_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 26 04 2021].
- [2] Kraftfahrt-Bundesamt, „Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2020 gegenüber dem 1. Januar 2019,“ 1 1 2020. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrebilanz_Bestand/2020/2020_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 26 4 2021].
- [3] Kraftfahrt Bundesamt, „Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2021 gegenüber dem 1. Januar 2020,“ 1 1 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrebilanz_Bestand/2021/2021_b_ueberblick_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1. [Zugriff am 26 04 2021].
- [4] M. Kords, „Carsharing-Fahrzeuge in Deutschland bis 2021,“ 22 2 2021. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/324695/umfrage/carsharing-fahrzeuge-in-deutschland/>. [Zugriff am 28 4 2021].
- [5] W. Utschick und M. Botsch, Fahrzeugsicherheit und automatisiertes Fahren, München: Carl hanser Verlag, 2020, p. 10.
- [6] DAMBACH Lagersysteme GmbH & Co. KG, „Modernisierung: Bestehende Lager und Anlagen optimieren,“ [Online]. Available: <https://www.dambach-lagersysteme.de/produkte/modernisierung.html>. [Zugriff am 6 1 2021].
- [7] BITO-Lagertechnik Bittmann GmbH, „The System: LEO Locative,“ BITO-Lagertechnik Bittmann GmbH, [Online]. Available: <https://www.leo-locative.com/en-gb/the-system/>. [Zugriff am 05 1 2020].
- [8] Emm! solutions GmbH, „Fahrerlose Transportsysteme,“ Emm! solutions GmbH, [Online]. Available: <https://www.emm-solutions.de/fahrerlose-transportsysteme/>. [Zugriff am 07 01 2021].
- [9] STILL GmbH, „Neuestes Mitglied der STILL iGo Familie: Eine automatisierte Routenzuglösung,“ STILL GmbH, 14 03 2017. [Online]. Available: <https://www.still.de/unternehmen/news-presse/news/detail/neuestes-mitglied-der-still-igo-familie-eine-automatisierte-routenzugloesung.html>. [Zugriff am 05 01 2021].
- [10] Linde Material Handling GmbH, „Neufahrzeuge: automatisierte Stapler,“ Linde Material Handling GmbH, [Online]. Available: [https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting\[field\]=productType&sorting\[direction\]=ASC&productTypes\[\]=2368](https://www.linde-mh.de/de/Produktfinder/?offerType=new&sorting[field]=productType&sorting[direction]=ASC&productTypes[]=2368). [Zugriff am 6 1 2021].

- [11] Jungheinrich AG, „systeme/automatische-lagersysteme,“ Jungheinrich AG, [Online]. Available: <https://www.jungheinrich.de/systeme/automatische-lagersysteme>. [Zugriff am 05 01 2021].
- [12] Toyota Material Handling Deutschland GmbH, „Automatisierung,“ Toyota Material Handling Deutschland GmbH, [Online]. Available: <https://toyota-forklifts.de/automatisierung/automatisierung/#truck>. [Zugriff am 7 1 2021].
- [13] E&K AUTOMATION GMBH, „Outdoor,“ E&K AUTOMATION GMBH, [Online]. Available: <https://ek-automation.com/loesungen/outdoor/>. [Zugriff am 8 1 2021].
- [14] Miltitz Aromatics GmbH, „Produktüberblick,“ Miltitz Aromatics GmbH, [Online]. Available: <https://miltitz-aromatics.com/produkte/produkteuebersicht/#>. [Zugriff am 23 1 2021].
- [15] Miltitz Aromatics GmbH, „Produktdatenbank,“ Miltitz Aromatics GmbH, [Online]. Available: <https://miltitz-aromatics.com/produkte/produktdatenbank/>. [Zugriff am 23 1 2021].
- [16] S. Müller, „Vorhabensbeschreibung Stockdroid,“ Miltitz Aromatics GmbH, Bitterfeld-Wolfen, 2020.
- [17] HUSS-VERLAG, „FTS-Einsatz im Outdoor-Bereich,“ *Technische Logistik*, 03 2021.
- [18] D. Clauer und J. Fottner, *Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände - Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf*, Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2019.
- [19] O. Schumacher, „Erste autonome Buslinie Deutschlands,“ Deutsche Bahn AG, Berlin, Deutschland, 2018.
- [20] R. Iinuma, Y. Kojima, H. Onoyama und T. Fukao, „Pallet Handling System with an Autonomous Forklift,“ *Journal of Robotics and Mechatronics*, Bd. No.5, pp. 1071-1079, 16 7 2020.
- [21] Deutscher Wetterdienst, „Windkarten zur mittleren Windgeschwindigkeit,“ [Online]. Available: https://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html. [Zugriff am 6 1 2021].
- [22] QMT Ingenieurbüro, „DIN EN IEC 61508: Funktionale Sicherheit, SIL-Anforderung, -Nachweis,“ 4 1 2021. [Online]. Available: <http://www.qmti.de/sil/61508.htm>. [Zugriff am 21 04 25].
- [23] D. Klönne, Interviewee, *Beratungs-/Kundengespräch zum RAVAS Integration Server (RIS)*. [Interview]. 13 1 2021.
- [24] P. Wolf, *Fahrzeuglieferschein E20PL EVO*, Leipzig, 2020, p. 6.
- [25] Göttingen KG, „Magnetband-Spurführung,“ Göttingen KG, [Online]. Available: <https://www.goetting.de/komponenten/19600>. [Zugriff am 10 1 2021].
- [26] Göttingen KG, „Optische Spurführung,“ Göttingen KG, [Online]. Available: <https://www.goetting-agv.com/components/optical>. [Zugriff am 10 1 2021].
- [27] Y. Yu, L. Guo und M. Yang, „Graph-based SLAM based Magnet Map Generation for Magnetic Guidance,“ in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (2014)*, Bali, Indonesia, 2014.
- [28] A. Yadava, A. Gaura, S. M. Jainb, R. Sharmac und D. K. Chaturvedia, „Development Navigation, Guidance & Control Program for GPS based Autonomous Ground Vehicle (AGV) using Soft Computing Techniques,“ *Materials Today: Proceedings*, Bd. Volume 29, Nr. Part 2, pp. Pages 530-535, 31 8 2020.
- [29] J.-M. Zogg, *GPS und GNSS: Grundlagen der Ortung mit Satelliten*, Thalwil: u-blox, 2009.
- [30] H. Dijksterhuis, L. Van Willigenburg und R. Van Zuydam, „Centimetre-precision guidance of moving in the open field: a simulation based on GPS measurements,“ *Computers and Electronics in Agriculture*, Bd. Volume 20, Nr. Issue 3, p. 185–197, August 1998.
- [31] Y.-K. Kim, S.-H. Choi und J.-M. Lee, „Enhanced Outdoor Localization of Multi-GPS/INS Fusion System,“ in *10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Jeju, Korea, 2013.
- [32] ESA, „What is EGNOS?,“ [Online]. Available: http://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS/What_is_EGNOS. [Zugriff am 11 1 2021].
- [33] Göttingen KG, „Navigation mit Satelliten / GNSS,“ Göttingen KG, [Online]. Available: <https://www.goetting.de/komponenten/satellit>. [Zugriff am 12 1 2021].
- [34] W. Hongyu, Z. Xiaoxia, L. Xiaolin, H. Liuzhu und Z. Jincheng, „GPS/DR Information Fusion for AGV Navigation,“ *World Automation Congress 2012*, pp. 1-4, 4 10 2012.

- [35] D. Hohman, T. Murdock, E. Westerfield, T. Hattox und T. Kusterer, „GPS roadside integrated precision positioning system,“ in *Proc. IEEE Position Location Navig. Symp.*, 2000.
- [36] J. Farrell, „Real-time differential carrier phase GPS-aided INS,“ *Trans. Contr. Syst. Technol.*, Bd. no. 4, p. 709–721, 7 2000.
- [37] R. Sengupta und S. Rezaei, „Kalman Filter-Based Integration of DGPS and Vehicle Sensors for Localization,“ *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, Bd. 6, 11 2007.
- [38] R. M. R. a. J. S. Wit, „Integrated INU/DGPS for autonomous vehicle navigation,“ in *Proc. IEEE Position Location Navig. Symp.*, 1996.
- [39] F. N. C. L. a. M. C. I. Abuhadrous, „Multisensor data fusion for land vehicle localization using RTMAPS,“ in *Proc. IEEE Intell. Veh. Symp.*, 2003.
- [40] W. F. T. a. Z. H. J. J. P. Wang, „Study on integrated micro inertial navigation system/GPS for land vehicles,“ in *Proc. IEEE Intell. Transport. Syst.*, 2003.
- [41] T. K. a. U. O. K. A. Redmill, „DGPS/INS integrated positioning for control of automated vehicle,“ in *Proc. IEEE Intell. Transport. Syst.*, 2001.
- [42] Wikipedia, „Differential Global Positioning System,“ 30 January 1 2021. [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Differential_Global_Positioning_System. [Zugriff am 1 3 2021].
- [43] Wikipedia, „Echtzeitkinematik,“ 14 10 2016. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Echtzeitkinematik>. [Zugriff am 1 3 2021].
- [44] MagicMaps eine Marke der Schrode AG, „Präzise GPS-Messungen mit Hilfe von DGPS und RTK,“ Schrode AG, [Online]. Available: <https://www.magicmaps.de/gnss-wissen/praezise-gps-messungen-mit-hilfe-von-dgps-und-rtk/?L=0>. [Zugriff am 18 3 2021].
- [45] Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt, „SAPOS in Sachsen-Anhalt,“ Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt, [Online]. Available: <https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/sapos-in-sachsen-anhalt/sapos-in-sachsen-anhalt.html>. [Zugriff am 19 3 2021].
- [46] X. Zhao, W. Gang und S. S. Ge, „Cooperative Localization Based on Robust GPS and Radar Fusion for Multiple Aerial Vehicles,“ *2017 International Journal of Control Automation and Systems*, Bd. 3, pp. 732-742, 3 2021.
- [47] K. W. Chiang, G. J. Tsai und N. El-Sheimy, „Seamless navigation and mapping using an INS/GNSS/grid-based SLAM semi-tightly coupled integration scheme,“ *Information Fusion 50 (2019)*, p. 181–196, 28 1 2019.
- [48] W. Winkler, „Hoch integriertes Kamera-Radar-Modul als Grundlage für Autonomes Fahren,“ Silicon Radar GmbH, Frankfurt (Oder), 2020.
- [49] M. Filipenko und I. Afanasyev, „Comparison of Various SLAM Systems for Mobile,“ *2018 International Conference on Intelligent Systems*, pp. 400-407, September 2018.
- [50] Z. Xuexi, L. Guokun, F. Genping und X. Donglian, „SLAM Algorithm Analysis of Mobile Robot Based on Lidar,“ *Proceedings of the 38th Chinese Control Conference*, pp. 4739-4745, 27-30 July 2019.
- [51] T. Sharma, „Comparative analysis of ROS based 2D and 3D SLAM algorithms for Autonomous Ground Vehicles,“ *2020 International Conference for Emerging Technology (INCET)*, pp. 1-6, 5-7 June 2020.
- [52] A. Moldoveanu, A. Morar, I. Mocanu, F. Moldoveanu, I. E. Radoi, V. Asavei, A. Gradinaru und A. Butean, „A Comprehensive Survey of Indoor Localization Methods Based on Computer Vision,“ *Sensors20*, pp. 1-36, 6 May 2020.
- [53] A. Poulouse und D. S. Han, „Hybrid Indoor Localization Using IMU Sensors and Smartphone Camera,“ *Sensors19*, p. 17, 21 11 2019.
- [54] S. A. Ahmed, A. V. Topalov, N. G. Shakev und V. L. Popov, „Model-Free Detection and Following of Moving Objects by an Omnidirectional Mobile Robot using 2D Range Data,“ in *IFAC (international Federation of Automatic Control)*, Plodiv, Bulgaria, 2018.
- [55] J. Ibanez-Guzman und Y. Li, „Lidar for Autonomous Driving,“ *IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE*, pp. 50-61, 26 June 2020.
- [56] Pepperl+Fuchs, „R2000-2-D-LIDAR-Sensor,“ 12 09 2014. [Online]. Available: <https://www.pepperl-fuchs.com/germany/de/26085.htm>. [Zugriff am 13 2 2021].
- [57] Robosense, „RS-Ruby,“ 23 07 2020. [Online]. Available: <https://www.robosense.ai/en/resources-19>. [Zugriff am 13 2 2021].

- [58] SICK GmbH, „Sicherheits-Laserscanner,“ 12 9 2020. [Online]. Available: <https://www.sick.com/de/de/p/p603544>. [Zugriff am 2021 2 13].
- [59] Göttingen KG, „Extended Localization System,“ Göttingen KG, 05 12 2019. [Online]. Available: <https://www.goetting.de/els>. [Zugriff am 2021 3 20].
- [60] J. Li, Y. Xu, H. Macrander, L. Atkinson, T. Thomas und M. A. Lopez, „GPU-based lightweight parallel processing toolset for LiDAR data for terrain analysis,“ *Environmental Modelling & Software*, pp. 55-68, 22 2 2019.
- [61] Z. Shaojiang, Y. Guo, Z. Qiang und Z. Liu, „Lidar-IMU and Wheel Odometer Based Autonomous Vehicle Localization System,“ *2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, pp. 4950-4955.
- [62] H. Chang, L. Xue, W. Qin und G. Yua, „An Integrated MEMS Gyroscope Array with Higher Accuracy Output,“ *Sensors 2008*, pp. 2886-2899, 28 4 2008.
- [63] C. Jiang, L. Xue, H. Chang, G. Yuan und W. Yuan, „Signal Processing of MEMS Gyroscope Arrays to Improve Accuracy Using a 1st Order Markov for Rate Signal Modeling,“ *Sensors 2012*, pp. 1720-1737, 7 2 2012.
- [64] C. Acar und A. M. Shkel, „Nonresonant Micromachined Gyroscopes With Structural Mode-Decoupling,“ *SENSORS JOURNAL*, Bd. NO. 4, pp. 497-506, 8 2003.
- [65] K. Cho, H. Lee, J. Jung, H. Myung und J. Park, „Fuzzy-logic-assisted interacting multiple model (FLAIMM) for mobile robot localization,“ Bd. 12, pp. 1592-1606, 12 2012.
- [66] Y. Hong, J. Lee und S. Kim, „Laterally driven symmetric micro-resonator for gyroscopic applications,“ *Journal of Micromechanics and Microengineering 10(3):452*, p. 452, 10 8 2000.
- [67] S. E. Alper und A. Tayfun, „A symmetric surface micromachined gyroscope with decoupled oscillation modes,“ *Sensors and Actuators A: Physical*, Bd. 97-98, pp. 347-358, 20 1 2002.
- [68] Göttingen KG, „Einführung Transponder-Positionierung,“ Göttingen KG, 12 06 2015. [Online]. Available: <https://www.goetting.de/komponenten/transponder/einfuehrung>. [Zugriff am 19 4 2021].
- [69] Y. S. Byun und Y. C. Kim, „Localization Based on Magnetic Markers for an All-Wheel Steering Vehicle,“ *sensors 2016*, Bd. 16, pp. 1-16, 29 11 2016.
- [70] M. Yazed, M. Y. Ahmad und A. S. Mohan, „Novel Bridge-Loop Reader for Positioning With HF RFID Under Sparse Tag Grid,“ *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Bd. 1, pp. 555-560, 1 1 2014.
- [71] Wikipedia, „Frequenzband,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzband>. [Zugriff am 21 4 2021].
- [72] S. Park und S. Hashimoto, „An intelligent localization algorithm using read time of RFID system,“ *Adv. Eng. Informat.*, Bd. no. 4, p. 490-497, 11 2010.
- [73] B.-S. Choi, J.-W. Lee und J.-J. Lee, „Localization and map-building of mobile robot based on RFID sensor fusion system,“ in *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Informat.*, 2008.
- [74] B.-S. Choi, J.-W. Lee, J.-J. Lee und K.-T. Park, „A hierarchical algorithm for indoor mobile robot localization using RFID sensor fusion,“ *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Bd. no. 6, p. 2226-2235, 6 2011.
- [75] M. Hossain, M. Rashid, M. A. Bhuiyan und S. Ahmed, „A Qualitative Approach to Mobile Robot Navigation Using RFID,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 53 (2013)*, pp. 1-11, 11 2013.
- [76] F. M. Al-Naima und H. Al-Any, „Vehicle Location System Based on RFID,“ in *2011 Developments in E-systems Engineering*, Baghdad, Iraq, 2011.
- [77] I. E. de Barros Filho, I. Silva, D. G. Costa, C. M. Viegas und P. Ferrari, „A reliability and performance GSPN-Based model for anti-collision RFID algorithms under noisy channels in industrial internet of things,“ *Computers in Industry*, pp. 1-16, 25 12 2020.
- [78] J. Zhang, Z. Yu, X. Wang, Y. Lyu, S. Mao, S. C. Periaswamy, J. Patton und X. Wang, „RFHUI-an-RFID-based-humanunmanned-aerial-vehicle-interaction-system-in-an-indoor-environment,“ *Digital Communications and Networks*, Bd. 1, pp. 14-22, 13 5 2019.
- [79] C. W. Bater und . N. C. Coops, „Evaluating error associated with lidar-derived DEM interpolation,“ *Computers & Geosciences*, Bd. 2, pp. 289-300, 05 11 2008.

- [80] Linde Material Handling GmbH, „Stabiler Leistungsträger,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.linde-mh.de/de/Produkte/E-Stapler/E16-E20-EVO/>. [Zugriff am 24 1 2021].
- [81] Robert Bosch GmbH, „Automated Valet Parking,“ Robert Bosch GmbH, [Online]. Available: <https://www.bosch.com/stories/automated-valet-parking/>. [Zugriff am 9 1 2021].
- [82] G. Chen, R. Peng, Z. Wang und W. Zhao, „Pallet recognition and localization method for vision guided forklift,“ *8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (2012)*, pp. 1-4, 14 3 2013 .
- [83] J. Steinkamp, M. Scholz, M. Zwingel, F. Hefner und J. Franke, „Distributed Camera Architecture for Seamless Detection and Tracking of Dynamic Obstacles,“ *Procedia CIRP*, pp. 342-347, 2020.
- [84] Z.-h. Hu, Z.-d. He, G.-z. Cui , L.-S. Lu, L.-n. Yao, Z.-h. Hu und B.-Y. Huang, „A robust autonomous mobile forklift pallet recognition,“ *2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010)*, pp. 286-290, 29 04 2010.
- [85] Wikipedia, „Deep Learning,“ Wikipedia, [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Deep_Learning. [Zugriff am 4 23 2020].
- [86] R. Giubilato, S. Chiodini, M. Pertile und S. Debei, „An evaluation of ROS-compatible stereo visual SLAM methods on a nVidia Jetson TX2,“ *Measurement*, pp. 161-170, 7 2019.
- [87] P. Monasse, J.-M. Morel und Z. Tang, „Three-step image rectification,“ in *Proceedings of the British Machine Vision Conference, pages 89.1-89.10. BMVA Press, Frédéric Labrosse, 2010*.
- [88] M. Bjelonic, T. Homberger, N. Kottege, P. Borges, M. Chli und P. Beckerle, „Autonomous Navigation of Hexapod Robots With Vision-based Controller Adaptation,“ in *The 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, 2017.
- [89] J. Manhed, *Investigating simultaneous localization and mapping for an automated ground vehicle*, Department of Electrical Engineering, Linköping University, : Copyright © 2019 Joar Manhed, 2019.
- [90] L. Wei, C. Cappelle, R. Yassine und F. Zann, „Intelligent Vehicle Localization in Urban Environments Using EKF-based Visual Odometry and GPS Fusion,“ *Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pp. 13776-13781, 2 9 2011.
- [91] H. Min, X. Wu, C. Cheng und X. Zhao, „Kinematic and Dynamic Vehicle Model-Assisted Global Positioning Method for Autonomous Vehicles with Low-Cost GPS/Camera/In-Vehicle Sensors,“ *Sensors 2019*, p. 24, 9 12 2019.
- [92] S. Wang, J. Zhang, J. Han, . Y. Liao und P. Li, „Real Time Obstacle Detection Method Based on Lidar and Wireless Sensor,“ *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 5951-5955, 1 1 2018.
- [93] K. Koide, „hdl_graph_slam,“ 25 3 2021. [Online]. Available: https://github.com/koide3/hdl_graph_slam#hdl_graph_slam. [Zugriff am 28 4 2021].
- [94] meyiao, „LaserSLAM,“ 13 6 2017. [Online]. Available: <https://github.com/meyiao/LaserSLAM>. [Zugriff am 28 4 2021].
- [95] C. Qin, H. Ye und C. Pranata, „A Lidar-Inertial State Estimator for Robust and Efficient Navigation,“ in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2020.
- [96] ningwang1028, „lidar_slam_3d,“ 16 10 2018. [Online]. Available: https://github.com/ningwang1028/lidar_slam_3d#lidar_slam_3d. [Zugriff am 4 28 2021].
- [97] . B. Dai, H. Xue und H. Fu, „IMU-Aided High-Frequency Lidar Odometry for Autonomous Driving,“ *Appl. Sci. 2019*, p. 20, 11 4 2019.
- [98] D. Oryspayev, D. John, P. Gray und R. Sugumara, „LiDAR data reduction using vertex decimation and processing with GPGPU and multicore CPU technology,“ *Computers & Geosciences (2012)*, p. 118–125, 10 10 2011.
- [99] V. Lefkopoulos, M. Menner, A. Domahidi und M. N. Zeilinger, „Interaction-Aware Motion Prediction for Autonomous Driving: A Multiple Model Kalman Filtering Scheme,“ *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*, Bd. 1, pp. 80-87, 2 1 2021.
- [100] G. Dominique, S. Glaser und A. N. Ndjeng, „Improvement of the Proprioceptive-Sensors based EKF and IMM Localization,“ *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 900-905, 30 12 2008.
- [101] M. Spanel, M. Velas, M. Hradis und . A. Herout, „CNN for Very Fast Ground Segmentation in Velodyne LiDAR Data,“ *18th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)* , pp. 97-103, April 2018.
- [102] X. Yang , L. Xiong, B. Leng , D. Zeng und G. Zhuo, „Design, Validation and Comparison of Path Following Controllers for Autonomous Vehicles,“ *Sensors 2020*, Bd. 21, pp. 1-23, 24 10 2020.

- [103] F. Ribeiro, I. Moutinho, N. Pereira, F. Oliveira, J. Fernandes, N. Peixoto und A. Salgado, „High Accuracy Navigation in Unknown Environment Using Adaptive Control,“ in *RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI*, Atlanta, GA, USA, 2007.
- [104] M. Kulawiak, M. Kulawiak und Z. Lubniewski, „Integration, Processing and Dissemination of LiDAR Data in a 3D Web-GIS,“ *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Bd. 3, Nr. 144, p. 18, 19 3 2019.
- [105] „Roboter auf dem Vormarsch,“ 16 01 2017. [Online]. Available: <https://cdn.statcdn.com/Infographic/images/normal/7590.jpeg>. [Zugriff am 28 04 2021].
- [106] M. Bargende und et al., Future of multi-modal mobility, Bd. 20. Internationales Stuttgarter Symposium, S. Nature, Hrsg., Stuttgart: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2020.
- [107] A. Brück und T. Leimbach, „Roberta-Experiment: Sichere Architektur autonomer mobiler Systeme,“ Fraunhofer Academy, 2011.
- [108] LVerGeo, „Satellitenpositionierungsdienst in Sachsen-Anhalt SAPOS®,“ LVerGeo, 09 2020. [Online]. Available: https://www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de/de/datei/anzeigen/id/3790,501/faltblatt_sapos.pdf. [Zugriff am 25 04 2021].
- [109] K. W. Chiang, G. J. Tsai, N. El-Sheimy und H. J. Chu, „Performance Enhancement of INS/GNSS/Refreshed-SLAM Integration for Acceptable Lane-Level Navigation Accuracy,“ *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*, Bd. 69, pp. 2463-2476, 15 01 2020.
- [110] U. Sendler, M. Broy, B. . Holger, B. Gerhard, M. Eigner, A. S. Huber, H. K. Kohler, M. Stümpfle und S. Russwurm, Industrie 4.0 - Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM, Bd. Xpert.press, U. Sendler, Hrsg., Berlin Heidelberg, Berlin: Springer Vieweg, 2013, p. 144.
- [111] J. G. Erdmann, V. Hummel, K. von Leipzig und J. Schuhmacher, „Development and implementation of an autonomous control system for target-optimised use of intralogistics transport systems in the Learning Factory Werk 150 at Reutlingen University,“ in *Procedia Manufacturing 10th Conference on Learning Factories, CLF2020*, Reutlingen, Deutschland, 2020.
- [112] J. Hertzberg, K. Lingemann und A. Nüchter, Mobile Roboter, Osnabrück, Deutschland: Springer Verlag, 2012.
- [113] M. Haun, Handbuch Robotik - Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter, 2 Hrsg., Altrip, Deutschland: Springer Verlag, 2013.
- [114] K. Reif, Sensoren im Kraftfahrzeug, Bd. 3, K. Reif, Hrsg., Friedrichshafen, Deutschland: Springer Verlag, 2016.
- [115] S. Hesse und G. Schnell, Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion – Ausführung – Anwendung, Bd. 7, Wiesbaden, Deutschland: Springer Verlag, 2018.
- [116] E. Hering und G. Schönfelder, Sensoren in Wissenschaft und Technik Funktionsweise und Einsatzgebiete, Bd. 2, G. Schönfelder, Hrsg., Wiesbaden, Deutschland: Springer Verlag, 2018.
- [117] R. Voßwinkel , Systematische Analyse und Entwurf von Regelungseinrichtungen auf Basis von Lyapunov's direkter Methode, Wiesbaden, Deutschland: Springer Verlag, 2019.
- [118] E. A. Hartmann, Digitalisierung souverän gestalten - Innovative Impulse im Maschinenbau, Bd. 1, Berlin, Deutschland: Springer Verlag, 2021.
- [119] C. Newton, „Epipolargeometrie,“ Wikipedia, 4 11 2020. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Epipolargeometrie>. [Zugriff am 4 5 2021].
- [120] M. Maurer, C. J. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Autonomes Fahren - Technische, rechtliche gesellschaftliche Aspekte, H. Winner, Hrsg., Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 2015.

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit wurde nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt.

Dannitzsch, 08.04.22

Ort, Datum



Unterschrift

Anhang 1 technische Daten und Preise verschiedenen LIDAR-Sensoren

Unternehmen	Bezeichnung	TYP	Schutzfeldreichweite [m]	Warnfeldreichweite [m]	Scanwinkel (FoV)		Winkelauflösung		Vertikale Auflösung	Messwertausgabe [Messungen/s]		Auflösung Min. Objektbreite [mm]	Drehzahl Scanrate [1/s]		Übertragungsrates [Mbit/s]	Datenschnittstelle			Schutzklasse	Versorgungsspannung Uv [V]	Leistungsaufnahme [W]		Abmessungen [mm]			Gewicht [g]	Betriebsumgeb. temp. [°C]		Lagertemp. [°C]	Wellenlänge	Wasserresistenz	Laserklasse	Preis [€]				
					Horizontal	Vertikal	Min.	Max.		Single	Dual		min	max		Datenausgabe	Protokoll	Datenform			max	min	B	o	d		H	T						min	max	min	max
SICK	OutdoorScan 3D	MICS3-CBUZ40IZ1P01	40	4	275°		0,39°					50	10	50		Distanz/Winkel/Echo/Zeitstempel	EtherNet/IP™, USB 2.0, Mini-USB		III	16,8	30	7	112	151	111	1.450	-25	50	-25	70	845 nm		1M	6.429			
pepperl+fuchs	R2000UHD	OMD10M-R2000-B23-V1V1D-1L	10		360°		0,014°				250000	1	10	50	100				UDP			30		106	116,5	106		-10	50	-25	70			6.000			
pepperl+fuchs	R2000HD	OB30M-R2000-4EP-V1V17-1L	30		360°		0,043°				53999	2	10	50	100			HTTP, TCP/IP und UDP/IP		UDP								-10	50	-20 °C ... +70 °C	70			5.000			
pepperl+fuchs	R2000 Detection	OB30M-R2000-4EP-V1V17-T-1L	30		360°		0,071°	0,2°			54000	1	10	30				HTTP, TCP/IP und UDP/IP		III	10	30	10	106	116,5	106	800	-30	50	-40	70	905 nm		1	5.643		
pepperl+fuchs	R2000B23	OMD10M-R2000-B23-V1V1D	10	0.2	360°		0,014°						10	50				HTTP, TCP/IP und UDP/IP		III	11	30	15			800	-10	50	-20	70	660 nm		1	5.312			
Velodyne		HDL-64E	120		360°	26.9°	0,08°	0,35°	0,4°	1.300.000	2.200.000	20	5	20	100							12	32	60		12.700	-10	60	-40	85	903 nm	IP67	1	4.743			
Velodyne		HDL-32 Puck	100		360°	41.33°	0,08°	0,33°	1,33°	695.000	1.390.000	20	5	20	100			Ethernet				9	18	12		1000	-10	60	-40	105	903 nm	IP67	1	5.900			
Velodyne		Puck	100		360°	30°	0,1°	0,4°	2,0°	300.000	600.000	30	5	20	100			Ethernet				9	18	8		830	-10	60	-40	105	903 nm	IP67	1	6.500			
Velodyne		Puck LITE	100		360°	30°	0,1°	0,4°	2,0°	300.000	600.000	30	5	20	100			Ethernet				9	18	8		590	-10	60	-40	105	903 nm	IP67	1	7.500			
Velodyne		Hi-Res Ultra Puck	200		360°	20°	0,1°	0,4°	1,33°	300.000	600.000	30	5	20	100			Ethernet				10	18	8		830	-10	60	-40	105	903 nm	IP67	1	10.000			
Velodyne		Ultra Puck	250		360°	40°	0,1°	0,4°	0,33°	600.000	1.200.000	30	5	20	100			Ethernet				10,5	18	10		925	-20	60	-40	105	903 nm	IP67	1	20.000			
Velodyne		Alpha Prime	245		360°	40°	0,1°	0,4°	0,11°	2.400.000	4.800.000	30	5	20	1000			Ethernet				9	28	22		3.500	-20	60	-40	105	903 nm	IP67	1	60.000			
Robosense		Rsruby	250	200	360°	40°	0,1°	0,4°	0,1°	2.304.000	4.608.000	30	5	20	100			Ethernet				19	32	18	166	148,5	3.750	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	12.000		
Robosense		RS-LiDAR-32	200	150	360°	40°	0,2°	0,4°	0,33°	600.000	1.200.000	30	5	20	100		Ethernet				9	32	13,5	114	108,73	1130	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	8.000			
Robosense		RS-LiDAR-16	150	80	360°	30°	0,1°	0,4°	2,0°	300.000	600.000	20	5	20	100		Ethernet	UDP packets			9	32	12	109	80,7	870	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	6.500			
Robosense		Rsruby Lite	230	160	360°	40°	0,1°		0,2°	1.440.000	2.880.000	30	10	20	1000		Ethernet				19	32	38	166	148,5	3.750	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	5.000			
Robosense		Rsruby Pro	100	30	360°	90°	2,81°		0,2°	576.000	1.152.000	30	10	20	100		Ethernet				9	32	13	100	111	920	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	7.500			
Robosense		rs helios 5515	150		360°	70°	1,33°		0,2°	576.000	1.152.000		10	20	100		Ethernet				9	32	12	100	100	1.000	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	4.500			
Robosense		rs helios 1615	150		360°	31°	1°		0,2°	576.000	1.152.000		10	20	100		Ethernet				9	32	12	100	100	1.000	-30	60	-40	85	905nm	IP67	1	4.750			
OUSTER	OS1	32 Kanäle	120	40	360	45	0,01°		0,01°	650.360			10	20			Ethernet				22	20	14	85	73,5	455	-20	50	-40	105	865 nm	IP69K	1	3.300			
OUSTER	OS1	64 Kanäle	120	40	360	45	0,01°		0,01°	1.310.720			10	20			Ethernet				22	20	14	85	73,5	455	-20	50	-40	105	865 nm	IP69K	1	8.800			
OUSTER	OS1	128 Kanäle	120	40	360	45	0,01°		0,01°	2.621.440			10				Ethernet				22	20	14	85	73,5	455	-20	50	-40	105	865 nm	IP69K	1	12.000			

Anhang 2 technische Daten und Preise von RFID-Tags zur Identifikation

HID Global		Epoxy Tag			Glass Tag			EM4305			
		LF Disc	LF Disc	HF	UHF	Unique	Mini				
		20 mm	30 mm	Keyfob		12 mm	8 mm	10 mm	12 mm	22 mm	34 mm
Base Model Nr.		624112	601143	6D6140-101	698970, 698970-001	601201	684290	684210	684230	684250	684260
Betriebsfrequenz		125 kHz	125 kHz	13.56 MHz	865-956 MHz	125 kHz	134.2 kHz				
Speicher		2048 bit EEPROM	64 bit	8 KB	96 bit EPC + 64 bit TID + 512 bit	64 bit	512 bit EEPROM	512 bit EEPROM			
Anti-Kollision		Yes			Yes						
Lesereichweite		Abhängig von Lesegerät	NFC Tap	8 m		Abhängig von Lesegerät					
Abmessungen		Ø 20 x 1 mm	Ø 30 x 1 mm	30 x 45 x 1.6 mm	83 x 25 x 1 mm	Ø 2.12 x 12 mm	Ø 1.4 x 8 mm	Ø 1.41 x 10 mm	Ø 2.12 x 12 mm	Ø 4 x 21.7 mm	Ø 4 x 34.4 mm
Lochgröße			Ø 3.2 mm	Ø 5 mm	Ø 3.0 mm						
Gehäuse Material		Epoxy	Epoxy	Epoxy	Epoxy	Bioglass	Bioglass	Bioglass	Bioglass	Bioglass	Bioglass
Wasser		IP68, IP69K				IP68					
Vibration		IEC 68.2.6									
Stoß		IEC 68.2.29				IEC 68.2.29					
Fall Test		100 Fälle 1.8 m									
Lagerung 1000h [°C]	Max	85	85	85	85	90	90	90	90	90	90
	min	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
Betriebstemp. [°C]		85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
		-25	-40	-40	-40	-40	-25	-25	-25	-25	-25
Standards				ISO 14443A	ISO/IEC 18000-6C		ISO 11784, ISO 11785				
Anzahl		1.000	500	250	1.000	2.000	5.000	5.000	2.000	2.000	300
Preis [€]		1.000	1.000	500	2.000	3.000	5.000	5.000	3.000	3.000	500

Anhang 3 technische Daten und Preise von UHF-Tags für Navigation

HID-Global		P2-U Series	F1-U Series	P3-U Series	P3F-U Series	S1-U Series	S2-U Series	S3-U Series	S4-U Series	IR1-U Series	IR2-U Series	IR3-U Series	IR4-U Series	IR5-U Series	IR6-U Series	IR7-U Series	IRF-U Series	IRC-U Series	M1-U Series	WF-U Series
Abmessungen [mm]	L	75	68	95	95	60	65	48	75	116	122	120	140	87	130	60	unterschiedlich		84	55
	B	26	45	36	36	25	25	25	25	28	28	28	28	24	42	19			36	25
	H	3	10	4	4	6	6	6	6	6	12	12	12	15	12	10	5			18
Anbringungsmethode	geschraubt		angebunden, geschraubt				Anhänger	angebunden, geschraubt	geklebt	angebunden, geschraubt	geklebt	angebunden, geschraubt				geklebt, geschraubt	geklebt	magnetisch		
Kompatible Materialien	Alle, außer Metall		Alle	Alle, außer Metall					Alle				Metalle				Magnetische Metalle			
Lesereichweite	6,0 m		6,0 m	6,0 m	6,0 m	2,0 m	2,0 m	2,0 m	2,0 m	5,5 m	5,5 m	5,5 m	11,0 m	6,0 m	11,0 m	3,0 m	600 cm	600 cm	1,5 m	2,5 m
Betriebsfrequenz	860-960 MHz																			
ISO Protokoll	Class1 Gen2 180006C																			
STD Chip	U7/8		U7/8	U7/8	U7/8	U7/R6P	U7/R6P	U7/R6P	U7/R6P	U7/8	U7/8	U7/8	Mz6/P	MR6-P	H3	H4	H3/Mz5	H3/Mz5	U7/8	U7
UID [bits]	128		128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	128	96	128	96	96	128	96/128
Speicher [bits]	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	32	512	128	512	512	0	0
Wasserschutz	IP68		IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68	IP67	IP67	IP68	IP68	IP68	IP68	IP68
Gehäuse Material	ASA+PU Harz			TPE	ABS+PU Harz							Nylon GF +PU Harz	ABS+PU Harz	PC	PC	PPS	Glass Fiber	Keramik	Nylon GF	PUR 200+ 200 microns

Anhang 4 technische Daten und Preise von Sicherheitslaserscannern

Unternehmen	SICK		SICK	SICK	SICK	SICK	SICK	SICK
Bezeichnung	OutdoorScan3		S300 Standard	S300 Advanced	S300 Professional	S3000 PROFINET IO Professional	MicroScan3	TiM-S
TYP	MICS3-CBUZ40IZ1P01		S30B-32011DA	S30B-3011CA	S30B-3011DA	S30A-7111DL	MICS3-CCAZ90PZ1P01	TIM781S-2174104
Schutzfeldreichweite [m]	40		3	3	3	7	9	5
Warnfeldreichweite [m]	4		8	8	8	49	64	25
Anzahl Feldsätze	8		1	4	8	8*2	4	
Anzahl Felder	128		3	12	24	16*2	128	
Anzahl Überwachungsfälle	128		1	4	32	16*2	128	
Scanwinkel [°]	275		270	270	270	190	275	270
Ansprechzeit [ms]	115		80	80	80	60	115	
Schutzfeldzuschlag [mm]	65		100	100	100	100	100	
Winkelauflösung [°]	Min.	0,39	0,5	0,5	0,5	0,25	0,33	
	Max.	50	30	30	30	30		
Typ	Typ 3 (IEC 61496)							
	SIL2 (IEC 61508)							
Sicherheits-Integritätslevel	SILCL2 (EN 62061)							
Kategorie	Kategorie 3 (EN ISO 13849)							
Performance Level	PL d (EN ISO 13849)							
PFHD ¹⁾	8,0 x 10 ⁻⁸ (EN ISO 13849)							
TM (Gebrauchsdauer)	20 Jahre (EN ISO 13849)							
Schutzklasse	III (EN 61140)		III (EN 50178)			III (EN 60950)	III (EN 61140)	
Versorgungsspannung U [V DC]	24		24	24	24	24	24	24
Stromaufnahme [A]			0.33 ... 1.7	0.33 ... 1.7	0.33 ... 1.7	0.8	0.33 ... 1.7	
Leistungsaufnahme [W]	7							4 ... 16
Abmessungen [mm]	B	112	102	102	102	155	112	60
	H	151	152	152	152	185	163.1	60
	T	111	106	106	106	160	111.1	86
Gewicht [g]	1.450		1.200	1.200	1.200	3.300	1.650	250
Gehäusematerial	Aluminium		Aluminiumdruckguss				Aluminium	
Material der Optikhaube	Polycarbonat		Polycarbonat	Polycarbonat	Polycarbonat	Polycarbonat	Polycarbonat	
Schutzart	IP65 (IEC 60529)							IP67 (IEC 60529:1989)
Betriebsumgebungs-temperatur	min [°C]	-25	-10	-10	-25	-10	-25	-25
	max [°C]	50	50	50	50	50	50	50
Lagertemperatur	min [°C]	-25	-25	-25	-25	-25	-25	-40
	max [°C]	70	50	50	70	50	70	75
Schwingfestigkeit	IEC 60068-2-6, IEC 61496-1, IEC 61496-3		IEC 61496, IEC 61496-3				IEC 60068-2-6, IEC 61496-1	
Schockfestigkeit	Dauer-schock	IEC 60068-2-27, IEC 61496-3		IEC 61496, IEC 61496-3			IEC 60068-2-27, IEC 61496-3	
Lichtart	Gepulste Laserdiode						Gepulste Laserdiode	
Wellenlänge [nm]	845		905	905	905	905	845	850
Detektierbare Remission	1,8 % ... > 1.000 %							
Laserklasse	1M (IEC 60825-1)		1 (IEC 60825-1)				1M (IEC 60825-1)	
Preis [€]	6.429		3.531	3.756	4.318,36	7.434.61	2.376	1.169

1) mittlere Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde

zusätzliche Eigenschaften des „OutdoorScan3“ von Sick GmbH:

Umgebungsbedingungen			Schwingfestigkeit	Schockfestigkeit		Fremdlichtunempfindlichkeit	
Regen	Schneefall	Nebel		Dauerschock	EMV	Halogenlicht	Sonnenlicht
10 mm/h	≤ 3 mm/h (SWE, Wasseräquivalent der Schneedecke)	≥ 50 m (MOR, meteorologische Sichtweite)	IEC 60068-2-6, IEC 61496-1	IEC 60068-2-27 IEC 61496-3	IEC 61496-1 IEC 61000-6-2 IEC 61000-6-4	IEC 61496-3	IEC 61496-3

Anhang 6 technische Daten und Preise von Seilzuggebern

	BCG19-L1EM10PP	BCG19-A1AM1007	PFG19-P1AM10PP	BCG13-P1BM0521	BCG13-L1KM05PP	BCG13-A1NM0521	BCG13-K1KM05PP
	Art-Nr.: 6048295	Art-Nr.: 1056983	Art-Nr.: 1075581	Art-Nr.: 1052619	Art-Nr.: 6039750	Art-Nr.: 1068868	Art-Nr.: 6039749
Messbereich	0 m ... 10 m	0 m ... 10 m	0 m ... 10 m	0 m ... 5 m			0 m ... 5 m
Encoder	Absolut-Encoder		Inkremental-Encoder	Absolut-Encoder			Absolut-Encoder
Auflösung (Seilzug + Encoder)	0,04 mm	0,14 mm	0,008 mm	0,05 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,1 mm
Wiederholgenauigkeit	≤ 0,2 mm		≤ 0,2 mm	≤ 0,2 mm			≤ 0,2 mm
Linearität	≤ ± 2 mm		≤ ± 2 mm	≤ ± 2 mm			≤ ± 2 mm
Hysterese	≤ 0,4 mm (Wert bezieht sich auf Seilzug-Mechanik)		≤ 0,4 mm	≤ 0,4 mm			≤ 0,4 mm
Kommunikationsschnittstelle	Analog / Spannung / 0...10 V	SSI	Inkremental / TTL / HTL	PROFIBUS DP	Analog / Spannung / 0...10 V	SSI	Analog / Strom / 4...20 mA
Programmierbar/Parametrierbar			ja	ja	ja		
Werkseinstellung			Werkseitig eingestellter Ausgangspegel TTL				
Anschlussart	Stecker, M12, 5-polig, radial	Stecker, M23, 12-polig, radial		Stecker, 2x, M12, 5-polig, axial Dose, 1x, M12, 5-polig, axial		Leitung, radial, 1,5 m	
Versorgungsspannung	18 V DC ... 33 V DC	4,5 V DC ... 32 V DC	4,5 V ... 32 V	10 V ... 32 V	19 V DC ... 33 V DC	4,5 V DC ... 32 V DC	19 V DC ... 33 V DC
Leistungsaufnahme		≤ 0,7 W (ohne Last)	≤ 0,7 W (ohne Last)	≤ 1,5 W (ohne Last)	≤ 1,5 W (ohne Last)		
Betriebsstrom					≤ 80 mA		≤ 80 mA
MTTFd: Zeit bis zu gefährlichem Ausfall	600 Jahre	250 Jahre	300 Jahre	60 Jahre	850 Jahre	230 Jahre	850 Jahre
Gewicht	2,3 kg	2,2 kg	2,2 kg	1,08 kg	1,2 kg	0,92 kg	1,2 kg
Material, Messseil	Hoch flexible Stahllitze 1.4401 Edelstahl V4A		Hoch flexible Stahllitze 1.4401 Edelstahl V4A				Hoch flexible Stahllitze 1.4401 Edelstahl V4A
Gewicht (Messseil)	7,1 g/m		7,1 g/m	1,2 g/m			1,2 g/m
Material, Gehäuse Seilzugmechanik	Kunststoff, Noryl		Kunststoff, Noryl	Kunststoff, Noryl			Kunststoff, Noryl
Federrückzugskraft	9 N ... 12 N		9 N ... 12 N	4,5 N ... 7 N			4,5 N ... 7 N
Seilauszugslänge pro Umdrehung	555 mm		555 mm	385 mm			385 mm
Lebensdauer Seilzugmechanik	Typ. 1.000.000 Zyklen		Typ. 1.000.000 Zyklen	Typ. 1.000.000 Zyklen			Typ. 1.000.000 Zyklen
Tatsächliche Seilauszugslänge	10,2 m		10,2 m	5,2 m			5,2 m
Seilbeschleunigung	8 m/s ²		8 m/s ²	4 m/s ²			4 m/s ²
Verstellgeschwindigkeit	3 m/s		3 m/s	3 m/s			3 m/s
EMV	Nach EN 61000-6-2 und EN 61000-6-4	Nach EN 61000-6-2 und EN 61000-6-3			Nach EN 61000-6-2 und EN 61000-6-4	Nach EN 61000-6-2 und EN 61000-6-3	Nach EN 61000-6-2 und EN 61000-6-4
Schutzart	IP50		IP50	IP50			IP50
Betriebstemperaturbereich	-30 °C ... +70 °C		-30 °C ... +70 °C	-10 °C ... +70 °C	-30 °C ... +70 °C		-30 °C ... +70 °C
Preis[€]	450	550	570	679	600	560	950

Anhang 7 technische Daten und Preis von geeigneten PCs

JETSON	NANO	TX2 NX	TX2 4GB	TX2	TX2i	XAVIER NX	AGX XAVIER 8gb	AGX XAVIER
KI-Leistung	0,472 TFLOPS	1,33 TFLOPS			1,26 TFLOPS	21 TOPS	32 TOPS	32 TOPS
GPU	NVIDIA Maxwell Grafikprozessor mit 128 Cores	NVIDIA Pascal™ Grafikprozessor mit 256 Cores				nVIDIA Volta GPU mit 384 Cores und 48 Tensor-Cores	nNVIDIA Volta GPU mit 512 Cores und 48 Tensor-Cores	nNVIDIA Volta GPU mit 512 Cores und 48 Tensor-Cores
CPU	Quad-Core-ARM A57 mit 1,43 GHz	Dual-core Denver 2 64-bit CPU und quad-core Arm® Cortex®-A57 MPCore				6-core NVIDIA Carmel ARM®v8.2 64-bit CPU 6MB L2 + 4MB L3	6-Core ARM v8.2 64-Bit CPU, 6 MB L2 + 4 MB L3	NVIDIA Carmel ARM®v8.2 mit 8-Core ARM v8.2 64-Bit CPU, 8 MB L2 + 4 MB L3
Arbeitsspeicher	4 GB, 64 Bit-LPDDR4 25,6 GB/s	4x LPDDR mit 4 GB und 128 Bit 51,2 Gbit/s	4x LPDDR mit 8 GB und 128 Bit 59,7 Gbit/s	4x LPDDR mit 8 GB und 128 Bit (ECC Support) 51,2 Gbit/s	8 GB, 128-Bit-LPDDR4x 51,2 GB/s	4x LPDDR mit 32 GB und 256 Bit 136,5 Gbit/s	4x LPDDR mit 32 GB und 256 Bit 136,5 Gbit/s	
Datenspeicher	16 GB eMMC 5,1	16 GB eMMC 5,1	16 GB eMMC 5,1	32 GB eMMC 5,1	32 GB eMMC 5,1	16 GB eMMC 5,1	32 GB eMMC 5.1	32 GB eMMC 5.1
Videokodierung	1x 4K30 (H.265) 2x 1080p60 (H.265)	1x 4K60 (H.265) 3x 4K30 (H.265) 4x 1080p60 (H.265)				2x 4Kp30 6x 1080p60 14x 1080p30 (H.265 & H.264)	2x 4K30 (H.265) 6x 1080p60 (H.265)	4x 4K60 (H.265) 16x 1080p60 (H.265) 32x 1080p30 (H.265)
Videodekodierung	1x 4K60 (H.265) 4x 1080p60 (H.265)	2x 4K60 (H.265) 7x 1080p60 (H.265) 14x 1080p30 (H.265)					2x 8K30 (H.265) 6x 4K60 (H.265) 26x 1080p60 (H.265) 72x 1080p30 (H.265)	
CSI-Kamera	Bis zu 4 Kameras (12 über virtuelle Kanäle) 12 Lanes MIPI CSI-2D-PHY 1.2 (bis zu 1,5 Gbit/s)	Bis zu 5 Kameras (12 über virtuelle Kanäle) 12 Lanes MIPI CSI-2D-PHY 1.2 (bis zu 1,5 Gbit/s)	Bis zu 6 Kameras (12 über virtuelle Kanäle) 12 Lanes MIPI CSI-2 D-PHY 1.2 (bis zu 30 Gbit/s)			Bis zu 6 Kameras (36 über virtuelle Kanäle) 16 Lanes MIPI CSI-2 8 Lanes SLVS-EC D-PHY 1.2 (bis zu 40 Gbit/s) C-PHY 1.1 (bis zu 91 Gbit/s)		
PCI Express	1 x4 (PCIe Gen2)	1 x1 + 1 x2 (PCIe Gen2)	1 x1 + 1 x4 OR 1 x1 + 1 x1 + 1 x2 (PCIe Gen2)			1 x1 (PCIe Gen3) + 1 x4 (PCIe Gen4)	1 x8 + 1 x4 + 1 x2 + 2 x1 (PCIe Gen4, Root-Port und Endpoint)	
Bildschirm	2 Multi-Mode DP 1.2/eDP 1.4/HDMI 2.0 1 x 2 DSI (1,5 Gbit/s/Lane)	2 Multi-Mode DP 1.2/eDP 1.4/HDMI 2.0 1 x 2 DSI (1,5 Gbit/s/Lane)				2 Multi-Mode DP 1.4/eDP 1.4/HDMI 2.0 Keine Unterstützung für DSI	3 Multi-Mode DP 1.4/eDP 1.4/HDMI 2.0 Keine Unterstützung für DSI	3 Multi-Mode DP 1.4/eDP 1.4/HDMI 2.0 Keine Unterstützung für DSI
Netzwerk	10/100/1000 BASE-T Ethernet							10/100/1000 BASE-T Ethernet
Verbindung:	Gigabit-Ethernet, 802.11ac Wireless*	Gigabit Ethernet, 802.11ac WLAN, Bluetooth			Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet, M.2 Key E (WiFi/BT included), M.2 Key M (NVMe)	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
USB:	1x USB 3.0 Typ A, 2x USB 2.0 Typ A, USB 2.0 Micro-B	1x USB 3.1 (5Gbps) 3x USB 2.0	3x USB 3.0, 3x USB 2.0	USB 3.0 + USB 2.0	USB 3.0 + USB 2.0	4x USB 3.1, USB 2.0 Micro-B		
Mechanik	69,6 mm x 45 mm 260-poliger Randstecker	69,6 mm x 45 mm 260-poliger SO-DIMM-Sockel	87 mm x 50 mm 400-poliger Stecker			69,6 mm x 45 mm 260-poliger SO-DIMM-Sockel	100 mm x87 mm 699-poliger Stecker	100 mm x87 mm 699-poliger Stecker
Leistung	5W 10W	7,5W 15W			10W 20W	10W 15W	10W 15W	10W 30W
Betriebstemperatur:			-25°C und 80°C		-40°C bis 85°C		-25 ° C bis 80 ° C.	-25°C to 80°C
Lagertemperatur:			-25°C und 80°C		-40°C bis 85°C		-25 ° C bis 80 ° C.	-40°C to 105°C
Luftfeuchtigkeit:			TBD		95% RH, -10°C to 65°C (non-operational)		TBD	95% RH, -10°C to 65°C (non-operational)
Schock:			TBD		140 G, half sine 11 ms duration		TBD	50 G, half sine 11 ms duration
Vibration:			TBD		5 G RMS 10 bis 500 Hz		TBD	5 G RMS 10 bis 500 Hz
Preis								
arrow electronics [€]	82.50	160.00	703.00	240.00	380.00	399.00	518.82	804.00
siliiconhighway [€]	81.82	166.63	701.65	247.11	395.87	326.00		836.00

Anhang 8 technische Daten und Preise von Laserdistanzsensoren

Hersteller	SICK	SICK	SICK	Baumer	Baumer	Baumer
Typ	UC30	UC30	UC30	RR30	RR30	UNAM
Nummer	UC30-214163	UC30-215163	UC30-21516A	RR30.DAFO-IGPI.9VF/E029		UNAM 70U6131/S14
Versorgungsspannung Uv DC [V]	9	9	9	12	12	15
	30	30	30	30	30	30
Leistungsaufnahme [W]	≤ 1,2	≤ 1,2	≤ 1,2			
Initialisierungszeit [ms]	< 450	< 450	< 450	< 40	< 40	
Gehäusematerial	Kunststoff (PBT/PET)	Kunststoff (PBT/PET)	Kunststoff (PBT/PET)	Stahl rostfrei 1.4404 (V4A)		Messing vernickelt
Ultraschallwandler:	Polyurethanschaum, Epoxidharz mit Glasanteilen					
Anschlussart Stecker:	M12, 5-polig	M12, 5-polig	M12, 5-polig	M12	M12	M12
Anzeige	2 x LED	2 x LED	2 x LED			
Gewicht [g]	180	240	240			
Sendeaustritt	Gerade	Gerade	Gerade			
Abmessungen [mm]	B oder d	62,2	62,2	62,2	30	30
	H	62,2	62,2	62,2	97	97
	T	32,7	36,7	36,7		
Schutzart	IP65 / IP67	IP65 / IP67	IP65 / IP67	IP 68/69K	IP 68/69K	IP 67
Schutzklasse	III	III	III			
Betriebsreichweite, Grenzbereichweite [m]	0.35 ... 3.4 , 5	0.6 ... 6, 8	0.6 ... 6, 8	0.2 ... 6	0.2 ... 6	0.6 ... 6
Auflösung [mm]	≥ 0,18	≥ 0,18	≥ 0,18	< 2	< 2	< 2
Wiederholgenauigkeit [%]	± 0,15	± 0,15	± 0,15			
Genauigkeit [%]	± 1	± 1	± 1			
Ansprechzeit [ms]	180	240	240	< 40	< 40	< 640
Ausgabezeit [ms]	43	60	60	< 40	< 40	< 640
Ultraschallfrequenz (typisch) [kHz]	120	80	80			80
Umgebungstemperatur Betrieb [°C]	-25 ... +70	-25 ... +70	-25 ... +70	-40 ... +65	-40 ... +65	-25 ... +60
Umgebungstemperatur Lager [°C]	-40 ... +85	-40 ... +85	-40 ... +85	-40 ... +85	-40 ... +85	
Anzahl	1	1	1			
Art	Stromausgang / Spannungsausgang					
IO-Link			IO-Link V1.0	IO-Link V1.1	IO-Link V1.1	IO-Link V1.1
Strom [mA] ≤ 500 Ω	4 ... 20	4 ... 20	≤ 100			
Spannung [V] ≥ 100.000 Ω	0 ... 10	0 ... 10		2.5	2.5	2.5
Auflösung [bit]	12	12		208	208	208
Multifunktionseingang (MF)	1 x MF	1 x MF	1 x MF			
Hysterese [mm]			100			
Preis [€]	371	405	208	521	221	311

Anhang 9 Stereokameras für die visuelle Auswertung

Anhang 9.1 Kameras ohne Programme

		V300	V200
Merkmale	TYP	V30W-0101000	V20W-0101000
	Artikelnr.		1042027
		1041542	
Schutzfeldreichweite	20 mm Auflösung	1,41 m	1,41 m
	24 mm Auflösung	1,7 m	1,7 m
	30 mm Auflösung	2,12 m	2,12 m
Schutzfeldgröße	20 mm Auflösung	1 m x 1 m	1 m x 1 m
	24 mm Auflösung	1,2 m x 1,2 m	1,2 m x 1,2 m
	30 mm Auflösung	1,5 m x 1,5 m	1,5 m x 1,5 m
	Seitenverhältnis Schutzfeld	1:1 bis 2:1	1:1 bis 2:2
	Ansprechzeit	20 ms	20 ms
	Lieferumfang	Inklusive Einlernstift, Betriebsanleitung auf CD-ROM und Quickstart (Anleitung zur schnellen Inbetriebnahme)	Inklusive Einlernstift, Betriebsanleitung auf CD-ROM und Quickstart (Anleitung zur schnellen Inbetriebnahme)
Sicherheitstechnische Kenngrößen	Typ	Typ 3 (IEC 61496-1)	Typ 2 (IEC 61496-1)
	Sicherheits-Integritätslevel	SIL2 (IEC 61508) SILCL2 (EN 62061)	SIL1 (IEC 61508) SILCL1 (EN 62061)
	Kategorie	Kategorie 3 (EN ISO 13849)	Kategorie 2 (EN ISO 13849)
	Performance Level	PL d (EN ISO 13849)	PL c (EN ISO 13849)
	PFHD (mittlere Wahrscheinlichkeit eines Gefahr bringenden Ausfalls pro Stunde)	5,6 x 10 ⁻⁹ (EN ISO 13849)	5,6 x 10 ⁻⁹ (EN ISO 13849)
	TM (Gebrauchsdauer)	20 Jahre (EN ISO 13849)	20 Jahre (EN ISO 13849)
		Testrate (interner Test)	50 /s (EN ISO 13849)
		maximale Anforderungsrate	≤ 30 min ⁻¹ (EN ISO 13849) 1)
	Sicherer Zustand im Fehlerfall	Mindestens ein OSSD befindet sich im AUS-Zustand.	Mindestens ein OSSD befindet sich im AUS-Zustand
Anschlussart		Stecker M12, 8-polig	Stecker M12, 8-polig
	Zulässige Leitungslänge	≤ 7,5 m ^1)	≤ 7,5 m 1)
	Statusanzeige	LEDs	LEDs
	Diagnoseanzeige	LEDs	LEDs
Feldbus, industrielles Netzwerk	Integration über Sicherheitssteuerung Flexi Soft	CANopen ^2) DeviceNet™ EtherCAT® EtherNet/IP™ Modbus TCP PROFIBUS DP PROFINET	CANopen ^2) DeviceNet™ EtherCAT® EtherNet/IP™ Modbus TCP PROFIBUS DP PROFINET
	Schutzklasse	III (EN 50178)	III (EN 50178)
	Versorgungsspannung Uv	24 V DC (19,2 V DC ... 28,8 V DC)	24 V DC (19,2 V DC ... 28,8 V DC)
	Stromaufnahme	≤ 165 mA ^1); ≤ 690 mA ^2)	≤ 165 mA ^1); ≤ 690 mA ^2)
Sicherheitsausgänge (OSSDs)	Ausgangsart	2 PNP-Halbleiter, kurzschlussfest, querschlossüberwacht	2 PNP-Halbleiter, kurzschlussfest, querschlossüberwacht
	EIN-Zustand, Schaltspannung HIGH	UV – 2,7 V DC ... UV	UV – 2,7 V DC ... UV
	AUS-Zustand, Schaltspannung LOW	≤ 3,5 V DC	≤ 3,5 V DC
	Strombelastbarkeit je OSSD	6 mA ... 250 mA	6 mA ... 250 mA
Mechanische Daten	Abmessungen (B x H x T)	93,9 mm x 50 mm x 93,9 mm	93,9 mm x 50 mm x 93,9 mm
	Gewicht	355 g	355 g
	Gehäusematerial	Aluminiumdruckguss	Aluminiumdruckguss
Umgebungsdaten	Schutzart	IP54 (EN 60529)	IP54 (EN 60529)
	Luftfeuchtigkeit	15 % ... 95 %, nicht kondensierend	15 % ... 95 %, nicht kondensierend
	Betriebsumgebungstemperatur	0 °C ... +50 °C	0 °C ... +50 °C
	Lagertemperatur	–25 °C ... +70 °C	–25 °C ... +70 °C
Schwingfestigkeit		EN 60068-2-6	EN 60068-2-7
Schockfestigkeit		10 g, 16 ms (EN 60068-2-27)	10 g, 16 ms (EN 60068-2-27)
	Lichtart		
Sonstige Angaben	Wellenlänge	850 nm	850 nm
Preis [€]	1.589	1.785	1.700

	Visionary B										
Typ	V3S153-2BAAAABP01	V3S153-2BAAAAAP02	V3S153-2BAAAAAP01	V3S153-2AAAAABP02	V3S153-2AAAAAAP02	V3S153-2AAAAAAP01	V3S153-2AAAAABP01	V3S153-2BAAAABP02	V3S153-2AAAAABP03	V3S153-2BAAAAAP03	V3S153-2AAAAAAP03
MERKMALE	Art-Nr.: 1091807	Art-Nr.: 1091810	Art-Nr.: 1091806	Art-Nr.: 1091809	Art-Nr.: 1091808	Art-Nr.: 1091804	Art-Nr.: 1091805	Art-Nr.: 1091811	Art-Nr.: 1091813	Art-Nr.: 1091814	Art-Nr.: 1091812
Aufgabenstellung	Messen, 3D Positionieren Kollisionswarnung										
Technologie	3D Snapshot, Bildanalyse										
Produktkategorie	Konfigurierbar, Streaming, vorkalibriert										
Erfassungswinkel	120° x 75°										
Arbeitsabstand	0,5 m ... 7 m										
Lichtquelle ()	Keine interne Beleuchtung nötig, arbeitet ausschließlich mit Umgebungslicht										
Detektionsbereich	6 m x 7 m für Standardkonfiguration										
Weitere Funktionen	2D Kamera integriert										
Vorkalibriert	ja										
Anschlussart	1 x USB (Maus und Tastatur), 2 x Sensorkopf, Monitor (VGA/Sound), Zusätzlicher Alarmausgang, zwei diskrete Ausgänge, Maschine-Maschine-Schnittstelle (reserviert), Ethernet (reserviert), Versorgung der Auswerteeinheit										
Versorgungsspannung	12 V DC, - 10 % 24 V DC, 40 % (Oberwellenfreie Versorgungsspannung gewährleisten)										
Leistungsaufnahme	≤ 60 W, Kit C										
Schutzart	IP69K IP67										
Montage	Höhe 1 m ... 2,4 m, Winkel je nach Detektionsbereich										
Ausgangsstrom	12 V 100 mA (Überstromschutz max. 430 mA)										
Gewicht	1,3 kg, Sensorkopf 3,8 kg, Auswerteeinheit										
Detektierbare Objektform	Siehe HMI und Betriebsanleitung										
Einschaltverzögerung	< 50 ms										
Ansprechzeit	< 200 ms (typisch)										
Integrierte Applikation	3D-Fahrerassistenzsystem zur Kollisionswarnung im Außenbereich, Aufnahmeoption integriert										
Konfigurationssoftware	Via Monitor										
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	EN 55016-2-3:2010 + A1:2011 + A2:2014 (Störfestigkeit) / EN 55012:2008-06 + A1:2009 (Störaussendung)										
Schockbelastung	EN 60068-2-29:1994-01 (50 g / 6 ms)										
Vibrationsbelastung	EN 60068-2-64:2008-11 (5,9 g / 10 Hz - 2 kHz)										
Erfüllte Normen	ISO 13766:2006-05 (Erdbaumaschinen), EN 12895:2015-09 (Flurförderzeuge), EN 13309:2010-09 (Baumaschinen), ISO 14982:2009-02 (Land- und forstwirtschaftliche Maschinen), ISO 7637-2:2011-03, ISO 16750-2:2012-11, ISO16001:2017, EN 62311:2008, FCC PART 15:2006-08										
Betriebsumgebungstemperatur	-40 °C ... +75 °C, Sensorkopf -40 °C ... +50 °C, Auswerteeinheit										
Lichtempfindlichkeit	200 lx ... 80.000 lx										
Preis[€]	6.558	10.961	6.558	11.869	10.169	6.658	7.579	11.189	15.080	13.038	13.038

	Lector65x			
	V2D654R-MEWF6 for Systems	V2D654R-MEWHF6 for Systems	V2D652R-MEWA6	V2D654R-MEBHF6 for Systems
MERKMALE	Art-Nr.: 1081535	Art-Nr.: 1063229	Art-Nr.: 1063405	Art-Nr.: 1070743
Optischer Fokus	Dynamische Fokussteuerung			
Variante	Komplettgerät			
Sensor	CMOS-Matrix-Sensor, Grauwerte			
Sensorauflösung	2.048 px x 2.048 px		2.048 px x 1.088 px	2.048 px x 2.048 px
Lichtquelle (Interne Beleuchtung)	LED, sichtbar, weiß, 6.000 K, ± 500 K			LED, sichtbar, blau, 455 nm, ± 20 nm
Lichtquelle (Feedbackspot)	LED, sichtbar, grün, 525 nm, ± 15 nm			
Lichtquelle (Ausrichthilfe)	Laser, sichtbar, rot, 630 nm ... 680 nm			
LED-Klasse	Risikogruppe 1 (IEC 62471:2006-07, EN 62471:2008-09)			Risikogruppe 2 (IEC 62471:2006-07, EN 62471:2008-09)
Laserklasse	1, entspricht 21 CFR 1040.10 mit Ausnahme der Abweichungen gemäß „Laser Notice No. 50“ vom 24. Juni 2007 (IEC 60825-1:2014, EN 60825-1:2014)			
Scanfrequenz	40 Hz, bei 4 Megapixeln Auflösung		70 Hz, bei 2 Megapixeln Auflösung	40 Hz, bei 4 Megapixeln Auflösung
Codeauflösung	≥ 0,12 mm (abhängig vom Abstand)			
Leseabstand	500 mm ... 2.500 mm		670 mm ... 2.000 mm	
Objektiv (Blende)	f/8			
Objektiv (Brennweite)	40 mm		54 mm	
Versorgungsspannung	24 V DC ... 24 V DC, ± 20 %			
Leistungsaufnahme	Typ. 20 W, ± 20 %			
Gehäuse	Aluminiumdruckguss			
Ausgangsstrom	≤ 100 mA			
Schutzart	IP65 (EN 60529 (1991-10), EN 60529/A2 (2002-02))			
Schutzklasse	III			
Gewicht	963 g			
Abmessungen (L x B x H)	142,8 mm x 90 mm x 106,1 mm			
Elektrische Sicherheit	EN 60950-1 (2011-01)			
Lesbare Codestrukturen	1D-Codes, Stacked, 2D-Codes			
Codequalifikation	In Anlehnung an ISO/IEC 16022, ISO/IEC 15415, ISO/IEC 18004			
Interner Bildspeicher	512 MB			
Ethernet	ja, TCP/IP			
Ethernet (Datenübertragungsrate)	10/100/1.000 Mbit/s			
CAN	ja			
Digitaleingänge	4 („Sensor 1“, „Sensor 2“, 2 Eingänge über optionalen Parameterspeicher CMC600 im CDB650/CDM420)			
Optische Anzeigen	21 LEDs (10 x Statusanzeige, 10 x LED-Bargraph, 1 grüner Feedbackspot)			
CAN (Datenübertragungsrate)	20 kbit/s ... 1 Mbit/s			
Speicherkarte	MicroSD-Speicherkarte (Flash-Card), max. 16 GB, optional			
Bedienelemente	2 Tasten (wählen und starten bzw. beenden von Funktionen)			
Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	EN 61000-6-2:2005-08 / EN 61000-6-3 (2007-01)			
Schwingfestigkeit	EN 60068-2-6:2008-02			
Betriebsumgebungstemperatur	0 °C ... +50 °C			
Lagertemperatur	-20 °C ... +70 °C			
Fremdlichtunempfindlichkeit	2.000 lx, auf Code			
Zulässige relative Luftfeuchte	90 %, nicht kondensierend			
EtherNet/IP™	ja			
EtherNet/IP™ (Datenübertragungsrate)	10/100/1.000 Mbit/s			
Preis [€]	9.270	10.350	8.761	7.812

Anhang 9.4 Kamera mit Software MIDI- und Picocam2

	midiCam2			
	I2D605M-2MCB71	I2D612M-2MCB71	I2D605C-2MCB71	I2D612C-2MCB71
MERKMALE	Art-Nr.: 6071831	Art-Nr.: 6071833	Art-Nr.: 6071832	Art-Nr.: 6071834
Aufgabenstellung	Anwesenheitsinspektion, Qualitätsinspektion, Messen, 2D Positionieren		Anwesenheitsinspektion, Qualitätsinspektion, Farbinspektion, Messen, 2D Positionieren	
Technologie	2D Snapshot		2D Snapshot, Farbe	
Produktkategorie	Streaming, flexibel			
Sensor	CMOS Monochrom		CMOS Color	
Verwendeter Sensor	Sony IMX264	Sony IMX304	Sony IMX264	Sony IMX304
Shutter-Technologie	Global-Shutter			
Lichtquelle (externe Beleuchtung)	Separat als Zubehör zu bestellen			
Weitere Funktionen	Zeilenmodus, area of interest, long exposure			
Objektiv (Optisches Format)	2/3"	1,1	2/3"	1,1
Anschlussart	M12, 8-poliger Stecker, A-kodiert (2 GPIOs, 1 Digitaleingang, 1 Digitalausgang)			
Versorgungsspannung	12 V ... 24 V (oder PoE)			
Leistungsaufnahme	≥ 2,9 W	≥ 3,1 W	≥ 2,9 W	≥ 3,1 W
Schutzart	IP65, IP67			
Gewicht	52 g	170 g	52 g	170 g
Abmessungen (L x B x H)	42,7 mm x 53 mm x 41 mm			
PERFORMANCE				
Sensorauflösung	2.448 px x 2.048 px (5,01 Mpixel)	4.096 px x 3.000 px (12,29 Mpixel)	2.448 px x 2.048 px (5,01 Mpixel)	4.096 px x 3.000 px (12,29 Mpixel)
Scan-/Bildwiederholrate	24 fps, im Freerun-Modus	10 fps, im Freerun-Modus	24 fps, im Freerun-Modus	10 fps, im Freerun-Modus
Sensorgröße	8,446 mm x 7,066 mm	14,132 mm x 10,35 mm	8,446 mm x 7,066 mm	14,132 mm x 10,35 mm
Datenspeicher	128 MB			
Pixelgröße	3,45 µm			
Ethernet				
Ethernet (Datenübertragungsrate)	ja, UDP/IP			
Konfigurationssoftware	1.000 Mbit/s			
UMGEBUNGSDATEN	SICK Vision Suite			
Schockbelastung				
Vibrationsbelastung	80 g, EN 60068-2-27 (1995-03), EN 60068-2-29 (1995-03)			
Betriebsumgebungstemperatur	10 g, 30 Hz ... 500 Hz, EN 60068-2-6 (1996-05)			

