

Sicherheitsbezogenes Sensorsystem für fahrerlose Transportfahrzeuge

Safety related sensor system for automated guided vehicles

David Korte

Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

Die Einsatzbedingungen fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) werden zunehmend dynamischer und deren Anzahl in Umgebungen, in denen sich auch Personen aufhalten nimmt stetig zu. Um eine sichere Zusammenarbeit zwischen FTF und Personen zu gewährleisten, bedarf es Sensorsysteme, die eine explizite Erkennung von Personen ermöglichen. In diesem Beitrag soll ein solches sicherheitsbezogenes Sensorsystem anhand eines Konzeptes und eines Demonstrators vorgestellt werden.

[Schlüsselwörter: Fahrerloses Transportfahrzeug, FTF, Personenerkennung, Sensorik]

The operating conditions of Automated Guided Vehicles (AGVs) are becoming increasingly dynamic and their number in environments where people are present is constantly increasing. In order to ensure safe cooperation between AGVs and people, sensor systems are required that enable the explicit recognition of people. In this paper such a safety related sensor system will be presented by means of a concept and a demonstrator.

[Automated Guided Vehicles, AGV, People Detection, Sensor]

1 EINLEITUNG

Mit der Einführung des Fließbandes im Jahre 1908 revolutionierte Henry Ford die damalige Automobilfertigung. Zwar wurden im Lauf der letzten 100 Jahre die Fließbandssysteme weiterentwickelt, Arbeitsplätze wurden ergonomischer, Werkzeuge und kraftaufwendige Vorgänge wurden mechanisiert, doch an diesem grundlegenden Produktionsprinzip hat sich nicht viel verändert [Lot12]. Ein großer Nachteil des starren Montagebandes ist die nicht realisierbare Resequenzierung der zu fertigenden Fahrzeuge. Werden beispielsweise fehlerhafte Bauteile im Montageprozess bereitgestellt, ist ein Ausschleusen des betroffenen Fahrzeugs in der Regel nicht möglich. Dies bedeutet, dass Fahrzeuge mit fehlerhaften oder fehlenden Bauteilen weiter montiert und am Ende des Montagebereichs für die Fehlerbehebung wieder aufwendig demontiert werden müssen. Insbesondere in der Endmontage

kommt es bei einer hohen Anzahl an Fahrzeugen zu diesen Fehlern [Kra00]. Die feste Verkettung der einzelnen Montagestationen führt darüber hinaus zu einer Störanfälligkeit der Gesamtanlage und erschwert die regelmäßig durchzuführenden notwendigen Instandhaltungsarbeiten.

In den letzten Jahren veränderte sich die Automobilfertigung dahingehend, dass durch neue Antriebskonzepte, weitere Derivate, einer Zunahme an Ausstattungsvarianten sowie kürzeren Produktlebenszyklen neue Anforderungen an die Montagesysteme gestellt wurden.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden bereits neue Produktionsprinzipien entwickelt, in denen immer häufiger FTF zum Einsatz kommen. Bisher wurden diese seit den 1960ern vor allem zur Materialversorgung in der Automobilindustrie eingesetzt [Ull19]. Untersuchungen zeigen, dass sie auch als Ersatz für das klassische Montageband genutzt werden können, wodurch die oben genannten Schwächen reduziert werden können. Vergleicht man FTF mit anderen klassischen Fördermitteln in der Automobilproduktion hinsichtlich der Wandlungstreiber (Kompatibilität, Mobilität, Modularität, Neutralität, Skalierbarkeit, Universalität), sticht das FTF deutlich hervor [Kir20].

Im Rahmen des Forschungsprojektes ARENA2036 wurde am Stuttgarter Institut für Fördertechnik und Logistik ein Montage- und Logistik-FTF entwickelt, welches als Alternative für das klassische Montageband genutzt werden kann [Hof20]. Dieses FTF vereint viele Funktionen, die bisher durch ein Montageband und zusätzliche Handhabungseinrichtungen durchgeführt werden mussten und ermöglicht darüber hinaus die Aufnahme unterschiedlichster Fahrzeuge – vom Kleinwagen bis zum Oberklasse-SUV. Auf der umlaufenden Arbeitsplattform können Montagemitarbeiter auch während der Fahrt Tätigkeiten am zu montierenden Fahrzeug unter Berücksichtigung ergonomischer Aspekte durchführen. Das FTF wird dadurch zu einer mobilen Montageinsel, die eine flexible Gestaltung der Montageanlage und somit die Weiterentwicklung hin zu einer wandlungsfähigen Automobilproduktion ermöglicht. Zur Versorgung der mobilen Montageinsel wurden unterschiedliche Materialbereitstellungskonzepte entwickelt, die allesamt auf FTF basieren [Pop18]. Die

folgende Abbildung zeigt das Zusammenspiel der mobilen Montageinsel und den drei Materialbereitstellungskonzepten „Einzel-FTF“, „Warenkorb“ und „Riegelkonzept“.

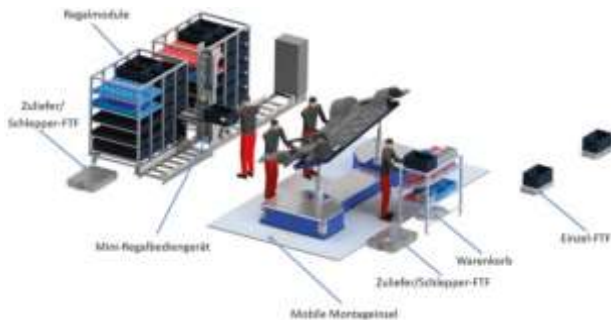


Abbildung 1: Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten im Umfeld der mobilen Montageinsel [Hof20]

Es ist zu erkennen, dass Personen und mobile Maschinen sehr eng miteinander kooperieren und FTF den Werkern direkt Material andienen [Pop18]. So ist beispielsweise vorgesehen, Personen auch während der Fahrt auf die mobile Montageinsel aufsteigen zu lassen.

Eingebettet werden können diese Logistik-Komponenten und –Konzepte beispielsweise in die Matrixproduktion oder die Fluide Produktion. Bei der Matrixproduktion sind die einzelnen Arbeitsstationen flexibel miteinander verbunden, sodass unterschiedliche Fahrzeuge und Derivate, die verschiedene Arbeitsschritte erfordern, in einer gemeinsamen Anlage montiert werden können [Foi17]. Die Fluide Produktion hingegen zeichnet sich zusätzlich durch eine Flexibilität der Standorte sowie der durchführbaren Arbeitsschritte der einzelnen Stationen aus [Fri19].

Auch in der Praxis wurden neue Produktionskonzepte bereits umgesetzt. In den Montagewerken von Porsche in Stuttgart, Lamborghini in Sant'Agata Bolognese, Mercedes-Benz in Sindelfingen sowie Audi in Neckarsulm kommen verglichen mit klassischen Produktionswerken im großen Stil FTF zum Einsatz, die dadurch zu einer gesteigerten Flexibilität beitragen.

Sowohl in der Forschung als auch in der Praxis spielt der Mensch im Kontext der Montage weiterhin eine bedeutende Rolle. Die Koexistenz und auch die Kollaboration zwischen Mensch und FTF führt zu einem gesteigerten Gefahrenpotential. Die Anforderungen zur Absicherung von FTF sowie die dafür verwendete Sensorik stellen ein Hemmnis bei der Realisierung der neuen Produktions- und Logistikkonzepte dar [Weh18], [Kor19].

2 ABSICHERUNG FAHRERLOSER TRANSPORTFAHRZEUGE

Die Anforderungen an die Absicherung von FTF sind in produktspezifischen C-Normen definiert, müssen sich aber auch weiterentwickeln.

2.1 NORMATIVE ANFORDERUNGEN

Hinsichtlich der Erkennung von Personen legt die DIN EN 1525 fest, dass FTF mit Sensoren ausgestattet werden müssen, die Personen im Fahrweg erkennen können und dabei die gesamte Breite des FTF samt Ladung überwachen müssen. Die Sensoren müssen dazu in der Lage sein, ein Haltesignal auszulösen, welches zu einem Stopp des Fahrzeugs führt, bevor es zu einem Kontakt mit schwerwiegenden Folgen zwischen dem Fahrzeug und der Person kommt. Zur Positionierung der Sensoren am FTF sowie zur Prüfung der richtigen Funktion der Sensoren wurden zwei zylindrische Prüfkörper definiert, die mit ihren Abmessungen den Unterschenkel einer stehenden Person (siehe Abbildung 2) und eine liegende Person (siehe Abbildung 3) im Fahrweg des FTF repräsentieren sollen [DIN97].



Abbildung 2: Stehende Person und der dazugehörige Prüfkörper



Abbildung 3: Liegende Person und der dazugehörige Prüfkörper

Eine explizite Erkennung von Personen bzw. eine Differenzierung zwischen Personen und Objekten ist bisher nicht gefordert. Hinsichtlich der Einsatzumgebung sind in dieser Norm seitliche starre Mindestabstände zwischen den FTF und festen Einrichtungen entlang des Fahrwegs vorgeschrieben.

Die Folgenorm, die DIN EN ISO 3691-4 unterscheidet sich hinsichtlich der Erkennung von Personen nicht von der DIN EN 1525. Auch die einzuhaltenden Sicherheitsabstände sind identisch [DIN18]. Weitreichender hin-

sichtlich des Umgangs mit den oben genannten Prüfkörpern ist die für den US-amerikanischen Markt relevante Norm ANSI/ITSDF B56.5. Darin sind neben definierten Relativgeschwindigkeiten, mit denen auf die Prüfkörper zuzufahren ist, die zusätzliche schräge Ausrichtung des horizontalen Prüfkörpers sowie ein weiterer Prüfkörper, der beliebige Hindernisse abbilden soll, definiert [ANS19].

2.2 WEITERENTWICKLUNG NORMATIVER ANFORDERUNGEN

Bisher wird in den Normen nur die Anwesenheit von Personen im Warn- bzw. Schutzfeld des Sensors berücksichtigt. Die Autoren Bostelman et al. empfehlen in zukünftigen ANSI-Normen auch die Erkennung von Personen außerhalb des Warnfeldes zu berücksichtigen, um so das Verhalten eines FTF an die Anwesenheit von Personen anpassen zu können. So lässt sich durch die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit das potentielle Risiko einer Kollision zwischen der Person und dem FTF verringern. Auf diesem Weg ließen sich auch flexiblere Fahrwege gestalten, da der bisher erforderliche Mindestabstand zum Schutz von Personen zwischen FTF und fester Einrichtung entfallen, bzw. durch den Einsatz neuer Sensoren dynamisch reduziert werden könnte. So wäre dieser Abstand nur noch dann einzuhalten, sofern sich erwießenermaßen Personen im Umfeld des FTF befinden [Bos13]. Berücksichtigung sollen außerdem unterschiedliche Körperhaltungen der Personen finden. Die bisher statisch stehenden und liegenden Personen sollen nach Ansicht der Autoren um weitere Körperhaltungen wie u.a. Knien, Sitzen und Hocken erweitert werden [Bos14]. Neben der expliziten Erkennung von Personen, auch außerhalb des Schutzfeldes, empfehlen die Autoren außerdem die Aufnahme der Erkennung hängender und in den Fahrweg reichender Objekte in die relevanten Normen. Auch Hedenberg empfiehlt zur Erreichung eines sicheren Betriebs von FTF die Berücksichtigung weiterer Hindernisse und daraus abgeleiteter Prüfkörper bei der Entwicklung und Zertifizierung von Sensoren zur Absicherung von FTF [Hed14].

3 SYSTEME ZUR ERKENNUNG VON PERSONEN

Die Erkennung von Personen im Umfeld von FTF wurde bereits von zahlreichen Autoren untersucht. Angefangen bei einem Ansatz zur Erkennung von Personen und zur Bedienung des FTF „FiFi“ mittels Gesten und Sprachbefehlen [Tre13] bis hin zu sicherheitsbezogenen Anwendungen. So stellten die Autoren Indri et al. einen Ansatz zur Erkennung von Personen im Umfeld von FTF auf Basis einer Kombination aus RGB-Monokamera und Laserscanner vor [Ind19]. Sie nutzen dazu kostengünstige Sensoren aus dem Bereich der Unterhaltungselektronik und ein vortrainiertes neuronales Netz, das auf die Erkennung von Personen ausgelegt ist. Die RGB-Monokamera übernimmt dabei die Erkennung der Person, der La-

scanners misst den dazugehörigen Abstand. Unter Berücksichtigung einer zweikanaligen Gestaltung eines Personenschutzsystems entwickelten die Autoren Bell et al. einen Ansatz zur Erkennung von Personen im Umfeld von im landwirtschaftlichen Bereich eingesetzten FTF [Bel18]. Sie kombinierten zwei Lidar-Sensoren und nutzen ebenfalls ein neuronales Netz, um in der von einem der Sensoren generierten Punktwolke Personen zu erkennen. Der zweite Sensor wertet die gemessene Reflektivität der Hindernisse aus. Personen, die im Umfeld der FTF eingesetzt werden, müssen in diesem Anwendungsfall eine reflektierende Schutzweste tragen. Dadurch ist eine zuverlässige Erkennung der reflektierenden Personen gegeben. Der von Lang vorgestellte Ansatz basiert auf einer an einem Gabelstapler angebrachten Time-of-Flight-Kamera, die mit Hilfe von Methoden des Maschinellen Lernens Personen im Umfeld erkennen kann und dies dem Fahrer des Gabelstaplers signalisiert [Lan18]. Mit Hilfe dieses Assistenzsystems soll der Betrieb von Gabelstaplern im Umfeld von Personen sicherer gemacht werden.

4 KONZEPT DES SICHERHEITSBEZOGENEN SENSORSYSTEMS

Das in diesem Beitrag vorgestellte Sensorsystem zeichnet sich durch eine spezifische Architektur aus und besteht aus drei verschiedenen Sensoren.

4.1 ARCHITEKTUR UND AUSWAHL DER SENSOREN

Die Architektur eines sicherheitsbezogenen Systems, in diesem Fall des Sensorsystems, kann in Anlehnung an die Maschinenrichtlinie in fünf unterschiedlichen Ausprägungen, den sogenannten Kategorien, realisiert werden.

In der DIN EN 1525 muss bei FTF die Einrichtung zur Erkennung von Personen in Hauptfahrrichtung der Kategorie 3 entsprechen [DIN97].

Der Entwurf der DIN EN ISO 3691-4 enthält nicht mehr die Anforderung an eine bestimmte Kategorie, sondern definiert für Personenerkennungssysteme bei FTF ein Performance Level von mindestens PL_d [DIN18a].

Im Entwurf der Norm für Sicherheitsanforderungen für Robotersysteme im industriellen Umfeld wird ein Performance Level PL_d sowie eine Kategorie 3 bei Sicherheitsfunktionen verlangt [DIN18b].

Die folgende Abbildung 4 zeigt eine für die Kategorie 3 vorgesehene Architektur. Diese ist durch einen redundanten Aufbau gekennzeichnet. Durch den Kreuzvergleich zwischen Logik 1 und Logik 2 findet eine gegenseitige Kontrolle statt.

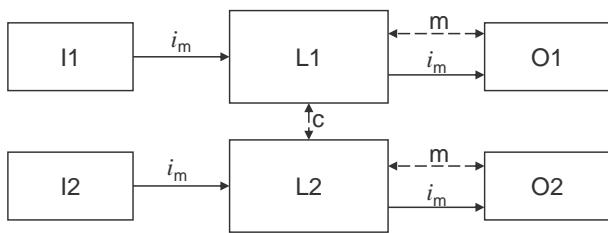


Abbildung 4: Für die Kategorie 3 vorgesehene Architektur [DIN16]

Legende	
i_m	Verbindungsmittel
c	Kreuzvergleich
I1, I2	Eingabeeinheiten, z.B. Sensor
L1, L2	Logik
m	Überwachung
O1, O2	Ausgabeeinheiten, z.B. Hauptschütze

Die Kategorie 3 muss neben den Anforderungen der Kategorie B aus bewährten Bauteilen bestehen. Darunter versteht man Bauteile, die entweder in ähnlichen Anwendungen mit erfolgreichen Ergebnissen weit verbreitet eingesetzt wurden oder unter Einhaltung von Prinzipien hergestellt und verifiziert wurden, welche die Eignung und Zuverlässigkeit für den Einsatz dieser Bauteile in sicherheitsbezogenen Anwendungen aufzeigen [DIN16].

Sicherheitseinrichtungen der Kategorie 3 sind dadurch gekennzeichnet, dass ein einzelner Fehler beispielsweise bei einem der Sensoren nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion des gesamten Systems führt. Außerdem werden auftretende Fehler möglichst als solche erkannt. Erreicht werden kann dies durch eine entsprechende Architektur [DIN16].

Die beiden Funktionen, die das sicherheitsbezogene Sensorsystem erbringen soll, sind wie in Abbildung 5 dargestellt, die Personenerkennung und die Messung von Abständen zu Hindernissen.

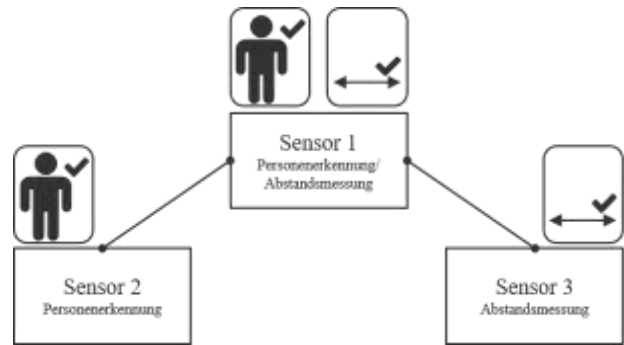


Abbildung 5: Die Funktionen des Sensorsystems und die konzeptionelle Architektur

Der zentral dargestellte Sensor 1 soll beide Funktionen erbringen können. D.h. er soll im Stande sein, sowohl Personen zu erkennen als auch Abstände (zu ihnen) zu messen. Zur redundanten und diversitären Durchführung der beiden Funktionen soll er um den Sensor 2, der ebenfalls Personen erkennen kann sowie den Sensor 3, der Abstände messen kann, ergänzt werden.

Im Rahmen einer ausführlichen Recherche des Standes der Technik und Forschung wurden verschiedenste Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien untersucht. In einem ersten Schritt wurde untersucht, ob induktive oder kapazitive Näherungsschalter, Laserscanner, Lidar-Sensoren, Radarsensoren, Reflexionslichttaster, RGB-Mono- und Stereokameras, taktile Näherungsschalter, Time-of-Flight-Kameras, Ultraschallsensoren oder Wärmebildkameras zur expliziten Erkennung von Personen bzw. zur Messung der für diesen Anwendungsfall relevanten Abstände geeignet sind.

Nach dieser Vorauswahl wurden 16 Sensorkombinationen einer umfangreichen Nutzwertanalyse unterzogen. Die Bewertung der Sensorkombinationen erfolgte anhand verschiedener Kriterien, die in der folgenden Abbildung 6 dargestellt sind.

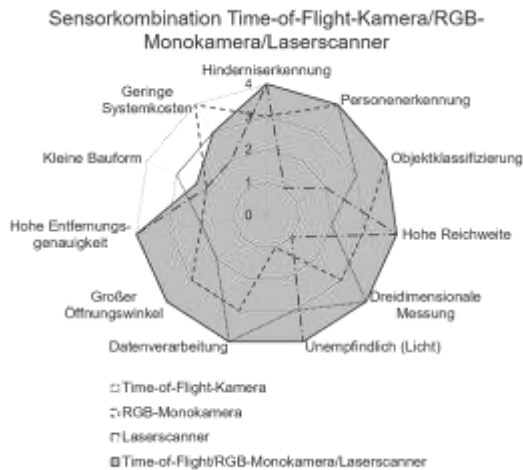


Abbildung 6: Erfüllung der Anforderungen

Das dargestellte Netzdiagramm der Sensorkombination Time-of-Flight-Kamera/RGB-Monokamera/Laserscanner zeigt die Erfüllung der Anforderungen bzw. der Bewertungskriterien. Es wird ersichtlich, dass durch die Kombination der Sensoren, die jeweils über verschiedene Vor- und Nachteile verfügen, die Nachteile des einen mit den Vorteilen des anderen ausgeglichen werden können.

Zusätzlich zu diesen Kriterien wurde die Integrationsfähigkeit der Sensorkombinationen bewertet. Berücksichtigt wurde dabei, ob bereits Sensoren der jeweiligen Kombination an eingesetzten Fahrzeugen verbaut sind. So lässt sich das Sensorsystem beispielsweise auch mit geringem Aufwand an bestehenden FTF nachrüsten.

In Anlehnung an die Kategorie 3 und mit Verweis auf [Bel18] wurde die in der Abbildung 7 dargestellte Architektur gewählt. Die redundante und diversitäre Personenerkennung wird mittels Time-of-Flight-Kamera und RGB-Monokamera realisiert, die Abstandsmessung zu Hindernissen aus einer Kombination aus der zentralen Time-of-Flight-Kamera und einem Laserscanner.

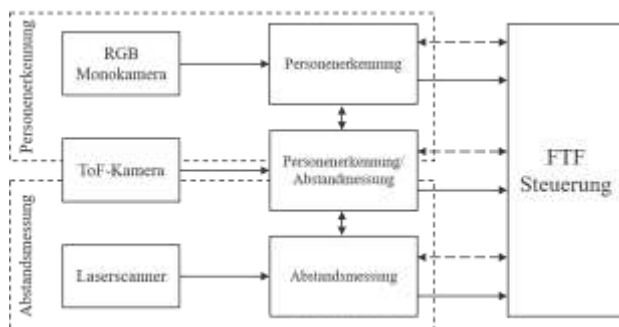


Abbildung 7: Architektur des Sensorsystems

Zwischen den Auswerteeinheiten findet eine abgleichende Kommunikation statt, über die der Ausfall einer der Sensoren detektiert werden kann.

4.2 DEMONSTRATOR

Zur Validierung des entwickelten Konzeptes des sicherheitsbezogenen Sensorsystems wurde ein mobil einsetzbarer und modular gestalteter Demonstrator aufgebaut (siehe Abbildung 8). Dieser besteht aus den drei Sensormodulen sowie einem Basismodul. Alle vier Module basieren auf standardisierten Kleinladungsträgern.

Das Basismodul (1) besteht aus einem KLT der Größe 400x600 mm und beinhaltet die Stromversorgung des gesamten Demonstrators in Form zweier Bleigel-Akkus, einen vollständigen PC inklusive Touchdisplay zur Aufzeichnung und Auswertung der Sensordaten sowie einen Netzwerkschwitch zur Vernetzung aller eingesetzter Module.

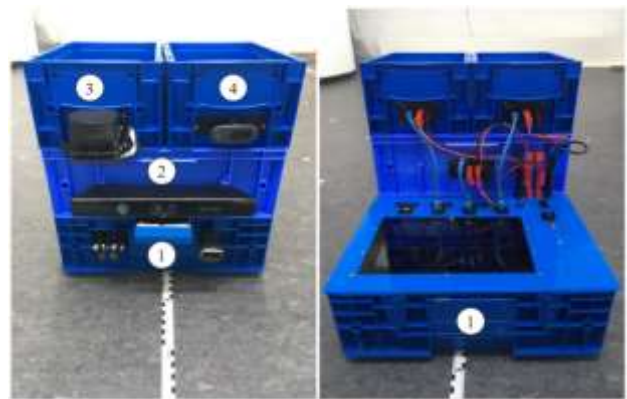


Abbildung 8: Aufgebauter Demonstrator

Zusätzlich befindet sich an der Frontseite des Basismoduls eine Kamera zur Aufzeichnung und späteren Plausibilisierung der durchgeführten Versuche.

Das Time-of-Flight-Kamera-Sensormodul (2) basiert auf einem KLT der Größe 400x300 mm und enthält die Microsoft Kinect-Kamera sowie einen Einplatinencomputer zur sensornahen Auswertung der Daten. Die Kinect-Kamera wurde stellvertretend für eine Time-of-Flight-Kamera ausgewählt, da die Funktionsweise vergleichbar ist und das Modell aufgrund seiner Popularität im Bereich der Forschung sehr umfangreich dokumentiert ist.

Das Laserscanner-Sensormodul (3) basiert auf einem KLT der Größe 300x200 mm und beinhaltet einen RPLIDAR A1 sowie ebenfalls einen Einplatinencomputer zur Verarbeitung der Messdaten. Der hier verwendete Laserscanner bietet eine ähnliche Funktion wie ein konventioneller Laserscanner und erwies sich für den Demonstrator als ausreichend.

Das RGB-Monokamera-Sensormodul (4) basiert ebenfalls auf einem KLT der Größe 300x200 mm und besteht aus einer Logitech Webcam sowie einem weiteren Einplatinencomputer.

Alle Sensormodule verfügen einheitlich an der Rückseite über einen Ethernet-Port für die Datenübertragung sowie Bananenstecker-Buchsen für die Stromversorgung. Durch den Einbau der Sensoren und der dazugehörigen Auswerteeinheiten in die stapelfähigen Kleinladungsträger sowie der Verwendung vereinheitlichter Schnittstellen ist eine hohe Kompatibilität gegeben. Einzelne Sensormodule können auf diese Art einfach getauscht aber auch unabhängig vom Demonstrator, beispielsweise zur Fehlerbehebung, betrieben werden.

Durch die Kombination der drei Sensoren ergibt sich der in der Abbildung 9 dargestellte schematische Erfassungsbereich. Die Halbkreisscheibe stellt den charakteristischen Erfassungsbereich des hier verwendeten Laserscanners dar. Der äußere große Volumenkörper entspricht dem Erfassungsbereich der RGB-Monokamera, der innere Volumenkörper dem der hier verwendeten Alternative zur Time-of-Flight-Kamera.

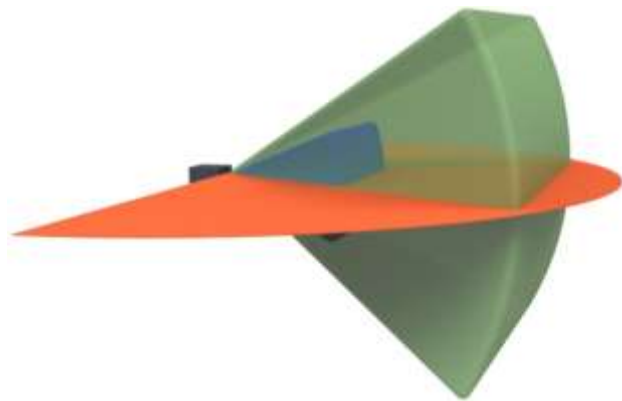


Abbildung 9: Erfassungsbereich des Sensorsystems

Für den softwareseitigen Aufbau des Demonstrators wurde das auf Linux basierende Open Source Framework Robot-Operating-System (ROS) genutzt. ROS zeichnet sich durch ein modulares Konzept aus und verfügt über zahlreiche Hard- und Softwareschnittstellen, wodurch sich sehr einfach verschiedenste Komponenten kombinieren und integrieren lassen. Für den Aufbau und den Betrieb des Demonstrators eignet sich ROS sehr gut, für sicherheitsrelevante Anwendungen in der Praxis ist ROS nach heutigem Stand aber nicht geeignet.

4.3 VALIDIERUNG

Die Durchführung der Versuche zur Validierung des entwickelten Konzeptes erfolgte mit Hilfe des Demonstrators in einem definierten Versuchsfeld, dessen Abmessungen sich auf den Erfassungsbereich der verwendeten Sensoren zurückführen lassen. Innerhalb des Versuchsfeld wurde, wie in Abbildung 10 dargestellt, ein Raster mit 70 Feldern und Abständen von jeweils einem Meter markiert, in dem die vom Sensorsystem zu erkennenden Personen positioniert wurden.

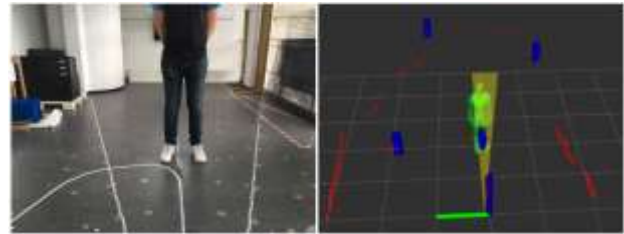


Abbildung 10: Versuchsfeld und Visualisierung unter ROS

Die Abbildung zeigt in der linken Hälfte das Versuchsfeld mit einer stehenden Person. Rechts ist die Visualisierung der erfassten Umgebung und erkannten Objekte unter ROS dargestellt. Die erfassten Informationen (Abstände, Winkel, Art des Objektes) werden bei jeder Versuchsdurchführung zur späteren Auswertung in eine CSV-Datei geschrieben.

Die Erkennung von Personen wird wie oben beschrieben, mittels vortrainierter neuronaler Netze realisiert. Im Zuge der Objekterkennung wird mittels eines Score-Wertes angegeben, wie hoch die Wahrscheinlichkeit (prozentual) ist, dass es sich bei dem erkannten Objekt beispielsweise um eine Person handelt. Zur Abgrenzung eines Bereiches, in dem die Personen zuverlässig erkannt werden können, wurde eine erste Versuchsreihe mit 15 Versuchsdurchführungen mit Messungen der Erkennungswahrscheinlichkeiten an allen 70 Rasterpunkten durchgeführt. Ab einer Erkennungswahrscheinlichkeit von 65% wird die Person als erkannt definiert. Die folgenden Abbildungen stellen dar, in welcher Häufigkeit Personen an den jeweiligen Koordinaten vom Time-of-Flight-Kamera-Sensormodul (Abbildung 11) und dem RGB-Monokamera-Sensormodul (Abbildung 12) richtig erkannt wurden.

5,0 m	67%	87%	33%	53%	7%	73%	60%
4,5 m	87%	93%	33%	73%	60%	73%	67%
4,0 m	47%	80%	67%	73%	100%	67%	53%
3,5 m	27%	93%	93%	60%	100%	40%	73%
3,0 m	7%	100%	73%	60%	87%	80%	87%
2,5 m	20%	87%	80%	73%	87%	93%	40%
2,0 m	20%	7%	87%	100%	93%	80%	13%
1,5 m	7%	0%	93%	100%	93%	13%	0%
1,0 m	13%	0%	60%	100%	60%	7%	0%
0,5 m	0%	0%	0%	100%	7%	0%	0%
	-1.5 m	-1.0 m	-0.5 m	0.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m

Abbildung 11: Erkennungsrate von Personen mittels Time-of-Flight-Kamera-Sensormodul

5,0 m	53%	47%	40%	7%	20%	27%	7%
4,5 m	40%	73%	60%	33%	47%	53%	0%
4,0 m	67%	73%	67%	80%	73%	53%	7%
3,5 m	20%	67%	93%	93%	67%	67%	0%
3,0 m	20%	93%	93%	93%	87%	13%	0%
2,5 m	13%	87%	93%	93%	87%	0%	7%
2,0 m	13%	0%	67%	93%	67%	13%	0%
1,5 m	7%	0%	80%	87%	13%	0%	0%
1,0 m	7%	0%	33%	87%	13%	0%	0%
0,5 m	0%	0%	0%	27%	0%	0%	0%
	-1.5 m	-1.0 m	-0.5 m	0.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m

Abbildung 12: Erkennungsrate von Personen mittels RGB-Monokamera-Sensormodul

Daraus abgeleitet wurden in Anlehnung an konventionelle Laserscanner, die zum Personenschutz eingesetzt werden, ein Warn- und ein Schutzfeld (siehe Abbildung 13). In diesen Bereichen verfügt das Sensorsystem über ein verhältnismäßig hohes Detektionsvermögen von Personen.

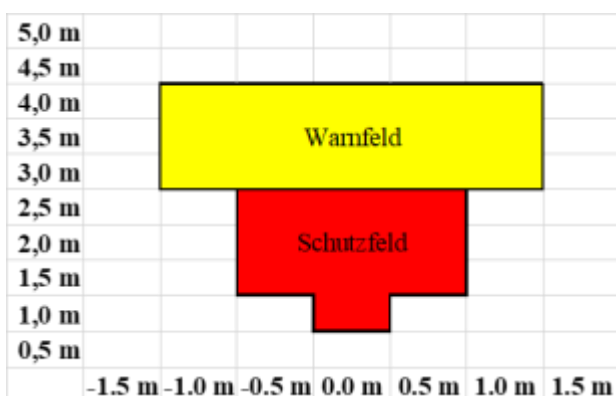


Abbildung 13: Warn- und Schutzfeld des Sensorsystems

Die Durchschnittliche Erkennungswahrscheinlichkeit des RGB-Monokamera-Sensormoduls betrug im Warnfeld 57,34%, und im Schutzfeld 65,03%. Das Time-of-Flight-Kamera-Sensormodul erkannte Personen im Warn-

feld mit einer Wahrscheinlichkeit von 57,47% und 79,75% im Schutzfeld.

Durch die redundante und diversitäre Architektur und die Verwendung zweier Sensoren kann die Erkennungswahrscheinlichkeit im Warnfeld auf 83,26% und im Schutzfeld auf 93,77% gesteigert werden.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Erkennung weiterer Objekte, wie beispielsweise Tische oder Stühle. Dieser Ansatz würde eine Ergänzung zu dem von Huber et al. [Hub19] vorgestellten Ansatz zur Erkennung von zu transportierenden Ladungsträgern im Umfeld von FTF darstellen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Anforderungen an die Absicherung von FTF steigen durch den Wunsch nach einem flexibleren Einsatz der Fahrzeuge im Umfeld von Personen. Insbesondere im Automobilbereich nimmt der Einsatz von FTF kontinuierlich zu und auch die im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelten zukünftigen Produktionssysteme machen den verstärkten Einsatz von FTF deutlich. Bisherige Sensoren zur Absicherung von FTF sind nicht im Stande, Personen als solche zu erkennen und dadurch ein situatives Verhalten der FTF zu ermöglichen. Das hier vorgestellte Konzept eines sicherheitsbezogenen Sensorsystems soll einen Ansatz aufzeigen, wie eine sichere Erkennung von Personen im Umfeld von FTF realisiert werden kann. Neben der Erkennung von Personen oder nahezu beliebigen Objekten erfolgt deren Positionsbestimmung (Abstand und Winkel). Die Personenerkennung wird in diesem Ansatz nicht wie bisher anhand der Erkennung zweier einfacher Zylinder umgesetzt, sondern nutzt Methoden der Künstlichen Intelligenz.

Die Nutzung von Künstlicher Intelligenz im Bereich der Sicherheitstechnik stellt für sich ein eigenes umfangreiches Forschungsfeld dar, in dem in naher Zukunft Fortschritte erwartet werden. Gemäß [DIN17] kann bei sicherheitsbezogenen Sensorsystemen differenziert werden zwischen sicherheitsbezogenen und automatisierungsbezogenen Informationen. Die explizite Personenerkennung des hier vorgestellten Ansatzes stellt bis Methoden der Künstlichen Intelligenz im Bereich der Sicherheitstechnik Einzug gefunden haben, eine automatisierungsbezogene Ergänzung zu bestehenden Sicherheitssensoren dar. Die vorgestellte Architektur lässt eine spätere sicherheitsbezogene Nutzung zu. Eine Interaktion zwischen Mensch und FTF ermöglicht der hier vorgestellte Ansatz jedoch auch schon in dieser Stufe. Die Sicherheitsfunktion übernimmt die bestehende Sensorik.

Für die im ersten Abschnitt vorgestellte Mobile Montageinsel eignet sich dieses Sensorsystem, um auf die Plattform steigende Personen zu erkennen und das Verhalten des Fahrzeugs entsprechend anzupassen.

Der vorgestellte Ansatz besteht aus der Kombination einer Time-of-Flight-Kamera, eines Laserscanners und einer RGB-Monokamera. Es werden bereits erste FTF angeboten, die neben einem Laserscanner eine Time-of-Flight-Kamera zur Objekterkennung bzw. zum ergänzenden Kollisionsschutz einsetzen. Bei dieser Konstellation lässt sich der hier vorgestellte Ansatz aufwandsarm auch nachträglich integrieren.

Im Rahmen weiterer Versuche soll die Erkennung von Personen mit unterschiedlichen Körperhaltungen, sowie einer partiellen Verdeckung der Personen untersucht werden.

LITERATUR

- [ANS19] ANSI American National Standards Institute ANSI/ITSDF B56.5, 12.08.2019: Safety Standard for Driverless, Automatic Guided Industrial Vehicles and Automated Functions of Manned Industrial Vehicles. Washington: Industrial Truck Standards Development Foundation.
- [Bel18] Bell, J.; MacDonald, B. A.; Seok Ahn, H. (2018): Diversity in Pedestrian Safety for Industrial Environments Using 3D Lidar Sensors and Neural Networks. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 7743–7749.
- [Bos13] Bostelman, Roger; Norcross, Richard; Falco, Joe; Marvel, Jeremy (2013): Development of standard test methods for unmanned and manned industrial vehicles used near humans. In: Multisensor, Multisource Information Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications 2013. SPIE Defense, Security, and Sensing. Baltimore, Maryland, USA, Monday 29 April 2013 (SPIE Proceedings). SPIE, 87560P.
- [Bos14] Bostelman, Roger; Hong, Tsai; Eastman, Roger (2014): Safety and Performance Standard Developments for Automated Guided Vehicles. In: Gurvinder S. Virk, Krzysztof Kozlowski und M. O. Tokhi (Hg.): Mobile service robotics. 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Poznan, Poland, 21 – 23 July 2014. World Scientific (Firm). Singapore, Hackensack, N.J: World Scientific Pub. Co, S. 487–494.
- [DIN16] DIN EN ISO 13849-1, 06/2016: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Stand: 11.05.2017.
- [DIN17] DIN 62998-721, 08/2017: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsrelevante Sensoren für den Schutz von Personen - Entwurf. Berlin: VDE Verlag GmbH
- [DIN18a] DIN EN ISO 3691-4 - Entwurf, 05/2018: Flurförderzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN18b] DIN EN ISO 10218-1, 01/2012: Industrieroboter-Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [DIN97] DIN 1525, 12/1997: Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [Foi17] Foith-Förster, Petra; Eising, Jan-Hendrik; Bauernhansl, Thomas (2017): Effiziente Montagesysteme ohne Band und Takt. Sind modulare Produktionsstrukturen eine konkurrenzfähige Alternative zur abgetakteten Linie? In: wt Werkstattstechnik online 107 (3), S. 169–175.
- [Fri19] Fries, Christian; Al Assadi, Anwar; Fechter, Manuel; Bauernhansl, Thomas et al. (2019): Fluide Fahrzeugproduktion. BMBF-geförderter Forschungscampus für die Mobilität der Zukunft. In: VDI-Z integrierte Produktion 161 (12), S. 78–81.
- [Hed14] Hedenberg, Klas (2014): Obstacle detection for driverless trucks in industrial environments (Halmstad University Dissertations, 7). Halmstad: Halmstad University Press.
- [Hof20] Hofmann, Matthias; Korte, David (2020): Neuartiges Logistikkonzept für die automobile Endmontage ohne Band und Takt. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): Entwicklung, Aufbau und De-

- monstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. 1. Auflage 2020 (ARENA2036). Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, S. 85–100.
- [Hub19] Huber, Heinz; Rotgeri, Mathias, Follert, Guido; ten Hompel, Michael (2019): Erkennung von freistehenden Behältern für die Feinpositionierung eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs. In: *Logistics Journal* 2019, S. 51–61.
- [Ind19] Indri, M.; Sibona, F.; Cheng, P. David Cen (2019): Sensor data fusion for smart AMRs in human-shared industrial workspaces. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Bd. 1, S. 738–743.
- [Kir20] Kirmse, Philip; Bär, Ralf (2020): FTF als universelle, wandlungsfähige Mittel zur Verkettung der zukünftigen Automobilfertigung. In: Thomas Bauernhansl, Manuel Fechter und Thomas Dietz (Hg.): *Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion*. 1. Auflage 2020 (ARENA2036). Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg, S. 69–84.
- [Kor19] Korte, David (2019): Neue Sensorkonzepte für die Automobilproduktion der Zukunft. 28. Deutscher Materialflusskongress 2019. VDI Wissensforum. München, 21.03.2019.
- [Kra00] Kratzsch, Sabine (2000): *Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2000 (Schriftenreihe des IWF). Essen: Vulkan-Verl.
- [Lan18] Lang, Armin; Günthner, Willibald A. (2017): Evaluation of the Usage of Support Vector Machines for People Detection for a Collision Warning System on a Forklift. In: Fiona Fui-Hoon Nah und Chuan-Hoo Tan (Hg.): *HCI in Business, Government and Organizations. Interacting with Information Systems*. Cham, 2017. Cham: Springer International Publishing, S. 322–337.
- [Lot12] Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (2012): *Montage in der industriellen Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [Pop18] Popp, Julian (2018): *Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. URL: <http://d-nb.info/1165574519/34>.
- [Tre13] Trenkle, Andreas; Seibold, Zäzilia; Stoll, Thomas; Furmans, Kai (2013): FiFi – Steuerung eines FTF durch Gesten- und Personenerkennung. In: *Logistics Journal* 2013, S. 1–10.
- [Ull19] Ullrich, Günter; Albrecht, Thomas (2019): *Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung*. 3., vollst. überarb. Auflage 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg.
- [Weh19] Wehking, Karl-Heinz; Korte, D.; Hagg, M. (2018): Challenges of a safe value-added production logistics of the future. In: Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann (Hg.): *18. Internationales Stuttgarter Symposium*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 179–187.

Dipl.-Ing. David Korte, Akademischer Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart.

Adresse: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15B, 70174 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 83656
E-Mail: david.korte@ift.uni-stuttgart.de