

Optimierung eines automatisierten LKW-Beladesystems für Planenaufleger unter Verwendung sensorgestützter Umfelderkennung und einer adaptiven Schutzvorrichtung

Optimization of an automated truck loading system for curtain trailers using sensor-based environmental perception and adaptive protection guard system

Burak Vur¹
Lennart Rolfs²
Diego Concheso Calvo³
Oscar Toyos Gonzalez³
Sunil Bhosle⁴
Michael Freitag^{1,2}

¹Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik
²BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH
³Duro Felguera, S.A., Spanien
⁴Procter & Gamble Manufacturing, Belgien

Die Automatisierung im Transport- und Logistiksektor gewinnt aufgrund von Effizienz- und Sicherheitsanforderungen sowie dem zunehmenden Fachkräftemangel immer mehr an Bedeutung. Insbesondere in der Distributions- und Lagerlogistik optimieren Automatisierte Verladensysteme, wie Automated Truck Loading Systems (ATLS) zukünftige Logistikprozesse. Jedoch stellen verschiedene LKW-Aufliegertypen mit unterschiedlichen Bauweisen eine Herausforderung für solche Verladensysteme dar. Besonders bei Planenaufleger erschweren die Bauweise und die nachgiebige Rahmenkonstruktion den Einsatz statischer Verladensysteme, da Asymmetrien und schräge Seitenwände im Innenraum vorhanden sind. In diesem Beitrag wird ein LKW-Beladesystem vorgestellt, welches diverse Aufliegertypen automatisiert beladen kann. Da das LKW-Beladesystem den begrenzten Platz nutzen und gleichzeitig Kollisionen mit Seitenwänden verhindern muss, wird in diesem Beitrag die Entwicklung und Evaluation eines sensorischen Umfelderkennungssystems für das LKW-Beladesystem präsentiert. Das Ziel dieses Systems ist die Steigerung der Sicherheit und Effizienz von Beladevorgängen durch präzise Echtzeit-Abstandsmessungen und Kollisionserkennung im Innenraum vom Planenaufleger. Die Ergebnisse des Feldexperiments zeigen, dass eine zuverlässige und genaue Umfelderkennung möglich ist. Die praxisnahe Evaluation des Systems in einem realen betrieblichen Kontext verdeutlicht seine Fähigkeit zur vorausschauenden Kollisionserkennung und Abstandsmessung während des Beladevorgangs.

[Schlüsselwörter: Verladensysteme, LKW-Entladung, FTS, Sensorik]

In response to rising demands for efficiency, safety, and the growing shortage of skilled labor, automation in the transportation and logistics sector has gained significant importance. Automated Truck Loading Systems (ATLS) are being increasingly utilized to optimize distribution and warehouse logistics. However, the presence of various truck trailer types with distinct designs poses challenges for loading systems. Particularly, the flexible construction of curtain-sided trailers complicates the application of static loading systems due to asymmetries and sloping side walls. This article introduces a truck loading system capable of autonomously loading various trailer types. Yet, with curtain-sided trailers, collisions between palletized cargo and side walls are frequently encountered. Addressing this, the article presents the development and evaluation of a sensory environment recognition system for the loading process. The system's objective is to enhance safety and efficiency by enabling precise real-time distance measurements and collision detection within the interior of the curtain-sided trailers. Results from field studies demonstrate the system's capability for reliable and accurate environment recognition. Practically evaluated within an operational context, the system showcases its ability for predictive collision detection and distance measurement during the loading process.

[Keywords: Autoloading Systems, Trailer unloading, AGV, Sensing]

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren hat die Automatisierung im Transport- und Logistiksektor aufgrund der steigenden An-

forderungen an Effizienz und Sicherheit von Logistikprozessen sowie des zunehmenden Fachkräftemangels immer mehr an Bedeutung gewonnen [1]. So trägt die Integration von Automatisierungslösungen dazu bei, dass Unternehmen ihre betrieblichen Abläufe optimieren und ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern können [2]. Besonders in der Distributions- und Lagerlogistik werden dafür vermehrt Automatisierungslösungen eingesetzt. Als Beispiel für Automatisierungslösungen sind die sogenannten Automated Truck Loading Systems (ATLS) zu nennen, die es ermöglichen, palettierte Ware automatisch in LKW-Anhänger zu verladen [3]. Solche Systeme bieten eine Reihe von Vorteilen, wie die Reduzierung von Arbeitskosten, die Optimierung der Ladekapazität und die Verbesserung der Ladeeffizienz. Dennoch steht eine Herausforderung im Raum: Die Vielfalt der LKW-Anhängertypen mit ihren unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen und Innenraumausgestaltungen. Insbesondere Planenaufleger dominieren den europäischen Markt der LKW-Anhänger [4]. Die Verladung in solche Anhänger gestaltet sich aufgrund ihrer flexiblen Rahmenkonstruktion und schrägen Seitenwände als anspruchsvoll. Herkömmliche, statische Verladensysteme stoßen hier auf Schwierigkeiten, da Asymmetrien und unregelmäßige Innenräume die Beladung komplizieren und sogar zu Kollisionen und Schäden an der Fracht führen können. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird in diesem Beitrag die Weiterentwicklung eines innovativen LKW-Beladesystems beschrieben. Dieses System nutzt einen fahrerlosen Gabelstapler, der an einer Zuführstation Paletten entgegennimmt und sie dann automatisch in die LKW-Anhänger verlädt [5]. Die Schlüsselherausforderung besteht darin, den begrenzten Platz innerhalb verschiedener Aufliedertypen optimal zu nutzen und gleichzeitig Kollisionen mit den Seitenwänden zu vermeiden. Hierfür wird ein zusätzliches Sensorkonzept in das Fahrzeug integriert. Zudem wird das Fahrzeug mit einer elektromechanischen Schutzvorrichtung erweitert, die die Ware bei potenziellen Kollisionen physisch absichert. Diese Schutzvorrichtung wird nur bei Bedarf aktiviert und soll die schrägen Seitenwände durch ein Rollensystem ausgleichen.

Dieser Beitrag gliedert sich wie folgt: Zunächst werden bestehende Systeme zur automatischen Beladung von LKWs vorgestellt und speziell die Herausforderung bei der Beladung von Planenauflegern näher erläutert. Danach folgt eine Ausführung über die entwickelten Konzepte, um Planenaufleger mit flexiblen Seitenwänden beladen zu können. Im vierten Kapitel wird auf die Integration des zuvor vorgestellten Umfelderkennungssystems eingegangen. In Kapitel fünf werden die Ergebnisse aus einem Feldexperiment präsentiert. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung und Ausblick auf weitere Entwicklungs- und Forschungsbedarfe.

2 STAND DER TECHNIK

Dieses Kapitel beginnt mit einer Betrachtung automatischer Beladesysteme sowie verschiedener Methoden der Güterverladung in LKWs. Im Anschluss daran wird das vorliegende LKW-Beladesystem detailliert beschrieben, gefolgt von einer Darstellung aktueller Probleme, Herausforderungen und Weiterentwicklungsbedarfen bei der Beladung von Planenauflegern.

2.1 AUTOMATISCHE BELADESYSTEME

Im Bereich der automatischen LKW-Beladesysteme, auch als *Automated Truck Loading System* (ATLS) bekannt, stehen verschiedene standardisierte Systeme zur Auswahl, die je nach Anwendung und spezifischen Anforderungen ausgewählt werden [6]. In der Industrie werden üblicherweise folgende fünf Systeme für die automatische Verladung von LKWs eingesetzt [7][8]:

- *Kettenförderersystem*: Bei diesem System werden Güter auf Standard-Palettenformate mithilfe eines Kettensystems in den LKW verladen.
- *Lamellenbahnsystem*: Mit diesem System können gemischte Paletten oder nichtpalettierte Ladung mithilfe aneinander angeschlossenen Lamellenprofilen in den LKW verladen werden. Die elektrisch angetriebenen Lamellenbahnen bilden eine flache, geschlossene Fläche.
- *Förderbandsystem*: Mit diesem System werden lose Güter (z.B. in Kisten) mithilfe von traditioneller Förderbandtechnik in den Laderaum vom LKW verladen.
- *Skatesystem*: Bei diesem System werden sogenannte „Skates“ (Rollenwagen) verwendet, um die Ladung auf der Ladefläche des LKWs zu bewegen und zu positionieren. Ein Skatesystem wird häufig in Bereichen eingesetzt, in denen schwere oder unhandliche Güter auf Paletten verladen werden müssen.
- *Rollenbahnen*: Ein Rollenbahnsystem kann entlang der Ladefläche bewegt werden, um die Güter in den LKW zu transportieren. Rollenbahnen sind in der Regel flexibel und eignen sich für verschiedene Verladensituationen.

Bei der automatischen Beladung von LKWs wird auf Basis der Merkmale in Tabelle 1 zwischen folgenden Typen oder Kategorien unterschieden.

Tabelle 1. Merkmale der automatischen LKW-Verladung

Art der Verladung	Art der Fördertechnik auf dem LKW
Heckverladung	Mit auf der Ladefläche installierter Fördertechnik
Seitenverladung	Ohne auf der Ladefläche installierter Fördertechnik

Gemäß [6] gibt es zwei Hauptarten der Güterverladung in LKWs. Bei der Heckverladung erfolgt die Beladung über die Rückseite des LKWs durch die Laderampe. Diese Methode ist für Standard-LKW-Anhänger gebräuchlich und eignet sich besonders für automatische Beladesysteme mit integrierter Fördertechnik auf der Ladefläche. Im Gegensatz dazu erfolgt die Seitenverladung von den seitlichen Öffnungen des LKWs aus. Dies ist bei speziellen LKW-Typen mit seitlichen Ladeklappen oder schrägen Seitenwänden relevant. Die Verladung mit auf der Ladefläche installierter Fördertechnik umfasst automatische Beladesysteme, bei denen spezielle Fördermittel direkt auf der LKW-Ladefläche angebracht sind. Diese Fördermittel, beispielsweise Förderbänder oder Rollenbahnen, transportieren die Ladung von der Verladestation zur Laderaumfläche des LKWs. Alternativ erfolgt die Verladung ohne auf der Ladefläche installierte Fördertechnik, wobei externe Einrichtungen wie autonome Gabelstapler oder roboterbasierte Systeme eingesetzt werden, um die Ladung in den LKW zu befördern. Die Integration von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) als Ergänzung zu herkömmlichen stationären LKW-Beladesystemen eröffnet eine vielversprechende Perspektive in Bezug auf Flexibilität und Effizienzsteigerung [9]. Während herkömmliche stationäre Beladesysteme oft bauliche Veränderungen an Auflieger oder Laderampe erfordern, um ihre Funktionalität zu entfalten, zeichnen sich FTS durch ihre Anpassungsfähigkeit aus [10]. Sie können in bestehende Betriebsstrukturen integriert werden, ohne umfangreiche Infrastrukturanpassungen vorzunehmen [7]. Dies ermöglicht eine schnellere Implementierung und reduziert potenzielle Störungen im laufenden Betrieb. Ein wesentliches Merkmal von FTS ist ihre autonome Navigation. Moderne FTS sind mit fortschrittlichen Sensoren, Kameras und Navigationssystemen ausgestattet, die es ihnen ermöglichen, ihre Umgebung präzise wahrzunehmen [9]. Diese Sensordaten werden in Echtzeit verarbeitet, um Hindernissen auszuweichen, Geschwindigkeiten anzupassen und Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen, um potenzielle Kollisionen zu vermeiden. Dadurch wird nicht nur die Sicherheit, sondern auch die Effizienz des Materialtransports erhöht. Im Unterschied zu stationären Beladesystemen, die vornehmlich für die Beladung und Entladung von Lastkraftwagen entwickelt wurden, kommen FTS vorrangig in der Intralogistik zum Einsatz, um den internen Materialtransport auf Betriebsgeländen zu erleichtern [3]. Ihre primäre Aufgabe besteht darin, Paletten oder Stückgüter zwischen verschiedenen Stationen im Lager oder in der Produktion zu befördern. Diese FTS können ebenso erfolgreich für die Beladung von LKWs verwendet werden, da nur minimale Infrastrukturanpassungen erforderlich sind [11][12]. Darüber hinaus zeichnen sich diese Systeme durch eine erhöhte Flexibilität und Skalierbarkeit aus. Die Aufnahme der Ladung erfolgt entweder durch Hebeeinrichtungen oder durch die Integration in bestehende Förderanlagen wie Rollenbahnen [3]. Die Gestaltung eines fahrerlosen Transportfahrzeugs für die automatische Beladung von LKWs wird stets an den individuellen

Anwendungsfall angepasst, beispielsweise durch die Integration von Rollenbahnen zur effizienten Aufnahme von Waren oder palettierten Gütern.

2.2 BESCHREIBUNG DES BETRACHTETEN LKW-BELADESYSTEMS

Das vorliegende System ist sowohl als Lösung für die automatische Beladung, als auch die automatische Entladung von LKWs und Containern konzipiert worden [5]. Die Kernkomponenten dieses Systems umfassen einen fahrerlosen Gabelstapler, der in der Lage ist, drei Paletten gleichzeitig aufzunehmen, wodurch zwar schnelle Beladeprozesse realisiert werden können, jedoch nur noch ein begrenzter Freiraum zwischen palettierter Ware und den Seitenwänden des LKW-Anhänger gegeben ist. Dieser Gabelstapler arbeitet in einer koordinierten Weise mit einer eigens entwickelten Zuführstation, welche die palettierten Waren gezielt dem Fahrzeug zur Verfügung stellt. Das System kann mit maximal 3.000 kg beladen werden. Dies ermöglicht eine effektive Verarbeitung von bis zu 150 Paletten pro Stunde. Die Geschwindigkeit des Systems variiert entsprechend des Zustands: Wenn der Gabelstapler nicht beladen ist, bewegt er sich mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s, während diese Geschwindigkeit bei beladener Fahrt 0,5 m/s beträgt. Abbildung 1 illustriert das vorliegende LKW-Beladesystem, das den fahrerlosen Gabelstapler in Kombination mit der dazugehörigen Zuführstation zeigt.

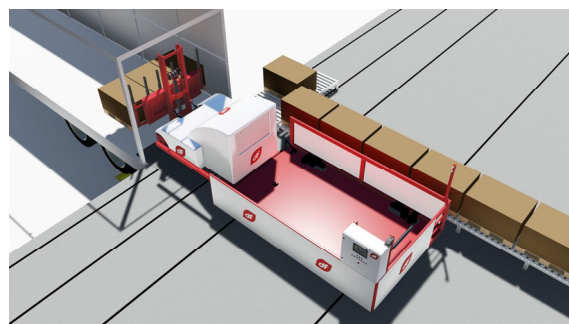


Abbildung 1. Das vorliegende LKW-Beladesystem mit Fahrerloses Fahrzeug und entsprechender Zuführstation [13]

Das Fahrzeug ist mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet, die insbesondere bei Verlade- bzw. Entladevorgängen im Laderaum des Aufliegers zum Einsatz kommen. Auf diese Weise soll das System dynamisch auf Umgebungsänderungen reagieren, um auch bei unterschiedlichen Aufliegern eine fehlerfreie Beladung bzw. Entladung zu gewährleisten. Es ist anzumerken, dass das Fahrzeug sein Gabelsystem dynamisch zur Seite verstellen kann, diese Funktion ist für die anschließende Lösungsfindung von großer Bedeutung.

2.3 HERAUSFORDERUNGEN BEI PLANENAUFLEIGERN

Die zentrale Herausforderung bei der automatischen Beladung von Planenaufliegern besteht in dem begrenzten

Freiraum zwischen der palettierten Ware und den Seitenwänden. Ein typischer Planenaufleger weist eine Breite von 2,44 m - 2,50 m auf [4]. Bei der gleichzeitigen Verladung von drei Europaletten mit einer Einzelbreite von 0,8m ergibt sich eine enge Anordnung. Die geringfügig überstehenden Waren führen zu einem Freiraum von 2-5 cm zu den Seitenwänden. Zusätzlich erschwert wird die Situation durch die Bauweise der Innenräume von Planenauflegern, bei der aufgrund der nachgiebigen Rahmenkonstruktion die Seitenwände nicht mehr gerade nach oben verlaufen, sondern in einem leichten Winkel schräg nach links oder rechts abweichen können. Aufgrund der Flexibilität dieser Wände, verringert sich dieser Abstand entlang der Höhe. Insbesondere an den Stellen, wo vertikale Verstrebungen (siehe Abbildung 2) vorhanden sind, besteht das Risiko von Kollisionen zwischen der Ware und den Verstrebungen.



Abbildung 2. Innenraum eines Planenauflegers

2.4 PROBLEMSTELLUNG

Obwohl das bestehende Fahrzeug mit Sensoren ausgestattet, die den Innenraum und auch die Entfernungen zu den Seitenwänden messen, sind besonders bei Planenauflegern in der Praxis vermehrt Kollision zwischen palettierter Ware und den Seitenwänden zu verzeichnen. Diese Problematik resultiert aus dem aktuellen Sensorkonzept, bei der keine präventiven Messungen über die bereits palettierte Ware hinweg durchgeführt werden. Stattdessen erfolgen die sensorischen Messungen erst hinter der palettierten Ware, wodurch potenzielle Kollisionen besonders bei Beladevorgängen nicht rechtzeitig identifiziert werden können. Im Falle einer Kollision wird das Fahrzeug in einen Sicherheitsstopp überführt und ein audiovisuelles Signal informiert die umliegenden Mitarbeiter über die aufgetretene Kollision. Um das Fahrzeug wieder in den Betriebszustand zu versetzen, ist ein manueller Eingriff erforderlich. Dies geschieht durch die Fernsteuerung des Fahrzeugs, mit der ein Mitarbeiter das Fahrzeug aus dem Kollisionsbereich im Aufleger bewegen muss. Dieser Sicherheitsstopp wird zwar durch die seitlichen Distanzsensoren am Fahrzeug initiiert, jedoch geschieht dies nur bei einer tatsächlichen Kollision. Infolgedessen lässt sich keine

präventive Strategie zur Vermeidung von Kollisionen zwischen palettierter Ware und Aufleger durch die gegenwärtige Sensorkonfiguration verfolgen.

3 KONZEPT

Im Rahmen eines Design Thinking Workshops wurde eine eingehende Untersuchung der Problematik durchgeführt. Die zentrale Fragestellung des Workshops lautete:

- *"Wie können wir mithilfe einer Maschine drei Paletten nebeneinander in einem Anhänger mit instabilen, schrägen Wänden platzieren, ohne die Ware zu beschädigen?"*

Die bewusst allgemein formulierte Fragestellung wurde gewählt, um jegliche Voreingenommenheit in Bezug auf das vorliegende LKW-Beladesystem zu vermeiden. Die Teilnehmer des Workshops analysierten die Herausforderungen und erarbeiteten sowohl sensorische, als auch eine hardwaretechnische Ansätze zur Lösung des Problems. Die Erkenntnisse und Ideen aus dem Workshop flossen in die Entwicklung eines neuen Konzepts ein, das eine effiziente und sichere Lösung für die Beladung von Planenauflegern bieten soll. Um die palettierten Güter vor Schäden bei einer Kollision mit den Seitenwänden des Trailers zu schützen, wurden zwei unabhängige Konzepte entwickelt. Ein elektromechanisches System, das die Güter vor physischer Einwirkung der Seitenwände besonders den vertikalen Verstrebungen schützt, indem es durch mechanische Führungen die Güter vor direktem Kontakt mit diesen bewahrt. Als zweites wurde ein Konzept für eine Umfelderkennung entwickelt, das die Wände des Trailers vermessen soll, damit die Gabel entsprechend zu den Seiten verfahren werden kann, um den Wänden auszuweichen.

3.1 KONZEPT DER ADAPTIVEN SCHUTZVORRICHTUNG

Die adaptive Schutzvorrichtung stellt eine entscheidende Komponente im Rahmen der Entwicklung dar. Sie wurde konzipiert, um die Sicherheit der geladenen Fracht während der Beladung zu gewährleisten und potenzielle Schäden bei Kollisionen zu verhindern. Dabei soll das elektromechanische System so konstruiert sein, dass es die palettierte Ware nach Aufnahme von oben adaptiv in der Höhe umspannen soll. Dadurch soll ein seitliches Überhängen der Paletten verringert und der Freiraum zu den Wänden leicht erhöht werden. In Situation, in denen die Seitenwände zu schräg sind, um ein Ausweichmanöver durchzuführen, soll die Schutzvorrichtung die palettierte Ware vor direktem Kontakt mit den Wänden schützen. Hierdurch wird nicht nur die Gefahr von Kollisionen zwischen der Schutzvorrichtung und der Rahmenkonstruktion minimiert, sondern auch die Integrität der geladenen Ware gewährleistet.

3.2 ANFORDERUNGEN UND KONZEPT DER UMFELDERKENNUNG

Die Anforderungen an die sensorgestützte Umfelderkennung sind vielfältig und zielen auf eine präzise, zuverlässige und eine effiziente Hinderniserfassung beim Beladevorgang ab. Dabei sind Präzision und Genauigkeit der Sensoren entscheidend, um kleine Abstände und Bewegungen präzise zu erkennen, da der verfügbare Freiraum zwischen palettierter Ware und Seitenwände auf wenige Zentimeter begrenzt ist. Gleichzeitig ist die Echtzeitfähigkeit der Sensoren von großer Relevanz. Sie ermöglicht prompte Anpassungen und schnelle Reaktionen während des laufenden Beladevorgangs. Hierbei müssen Verzögerungen bei der Datenerfassung und -verarbeitung auf ein absolutes Minimum reduziert werden, um eine effiziente und nahtlose Steuerung zu gewährleisten. Die Kommunikationsschnittstelle spielt hierbei eine bedeutende Rolle, da sie die reibungslose Integration des Sensors in das Fahrzeug und die Steuerungseinheit sicherstellt. Die Reichweite und Abdeckung der Sensoren sind ebenfalls von großer Bedeutung, da sie das gesamte Beladeumfeld erfassen müssen. Dies schließt verschiedene Höhen und Winkel ein, um Hindernisse in allen Dimensionen zu erkennen und angemessen zu reagieren. Dazu können Sensoren, wie beispielsweise 2D-LiDAR-Sensoren eingesetzt werden, die kontinuierlich und präzise die Umgebung und den Innenraum des LKW-Anhängers überwachen. Das Kernkonzept der Umfelderkennung basiert darauf, über die palettierte Ware hinweg die Abstände vom Sensor jeweils zur linken und rechten Seitenwand auszumessen und damit frühzeitig zu erkennen, ob eine Kollision zu erwarten ist. In Abbildung 3 ist schematisch das Konzept der avisierten Umfelderkennung dargestellt.

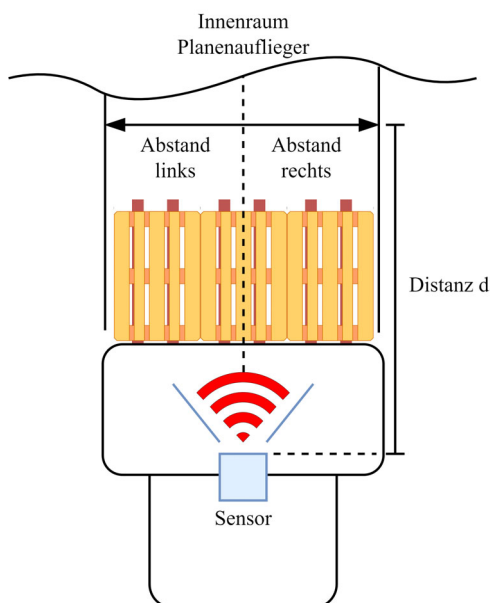


Abbildung 3. Konzept der sensorbasierten Umfelderkennung

3.3 SYSTEMARCHITEKTUR

Basierend auf der gewählten Lösungsvariante zeigt Abbildung 4 die konzeptionelle Funktionsstruktur der sensorischen Umfelderkennung. Diese Struktur umfasst eine zentrale Steuereinheit die innerhalb eines separaten Computersystems den Sensor ansteuert. Die erfassten Sensordaten durchlaufen einen Filterprozess und werden über eine Schnittstelle an den Programmable Logic Controller (PLC) des LKW-Beladesystems übertragen. Dieser PLC nutzt die Daten aus den Sensoren, um entsprechende Kontrollsignale zur Anpassung des Gabelsystems zu generieren. Zusätzlich ermöglicht der PLC die Einstellung verschiedener Eingabeparameter für das sensorische System innerhalb einer speziellen PLC Routine. Diese Flexibilität ermöglicht eine Anpassung an unterschiedliche Betriebsbedingungen und Beladeszenarien. Die gefilterten Daten dienen nicht nur der Steuerung des Systems, sondern werden auch in einem Dashboard visualisiert. Dieses Dashboard stellt eine interaktive Schnittstelle zwischen dem Sensorsystem und dem Bedienpersonal dar. Hier haben Benutzer die Möglichkeit, Sensorparameter anzupassen und die Mensch-Maschine-Interaktion zu erleichtern. Dies schafft eine einfache Methode, um das Sensorsystem nach den Anforderungen anzupassen und die Umfelderkennung effektiv zu steuern, sowie weitere Informationen über das LKW-Beladesystem bereitzustellen.

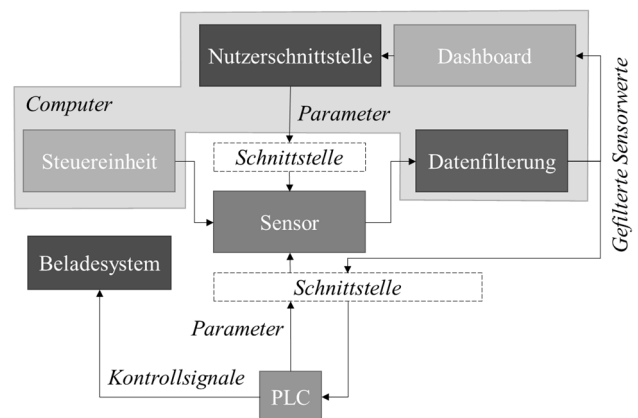


Abbildung 4. Systemarchitektur der sensorbasierten Umfelderkennung

4 INTEGRATION

Nachdem das Sensorkonzept im vorherigen Abschnitt erläutert wurde, liegt der Fokus nun auf der Integration dieses Konzepts in das LKW-Beladesystem. Dieser Abschnitt beleuchtet die sensorbasierte Umfelderkennung. Während die adaptive Schutzvorrichtung noch in der Entwicklungsphase verbleibt und nicht vollständig in das Fahrzeug integriert wurde, wird die Integration der sensorgestützten Umfelderkennung detailliert beschrieben.

4.1 SENSORBASIERTE UMFELDERKENNUNG

In Abbildung 5 ist die Integration der sensorischen Umfelderkennung in das LKW-Beladesystem dargestellt. Die Integration setzt sich dabei aus drei Hauptkomponenten zusammen. Innerhalb des Schaltschranks sind diverse Spannungswandler verbaut, die die benötigte Energieversorgung für den Sensor und weiteren Komponenten aus dem Fahrzeugstromnetz bereitstellen. Zudem ist ein Industriecomputer im Schaltschrank integriert, der den Sensor ansteuert, sowie die Datenverarbeitung und -filterung durchführt. Hierbei erfolgt die Steuerung des Sensors durch das Robot Operating System (ROS) [14], [15]. Mithilfe einer ADS-Schnittstelle stellt der Industriecomputer den Datenaustausch zwischen dem sensorischen System und dem Programmable Logic Controller des LKW-Beladesystems sicher [16]. Weiterhin werden das Dashboard und die interaktive Benutzerschnittstelle ebenfalls über den Industriecomputer bereitgestellt. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Systemen wird durch einen Netzwerkrouter ermöglicht, der einen standardisierten Informationsaustausch gewährleistet. Als Sensor wird ein 2D-LiDAR Sensor vom Sensorhersteller Sick® verwendet, der einen statischen Fehler von 1.5 mm in einem Bereich von 0,7 m bis 3 m und 9 mm in einem Bereich 3 m – 5,5 m aufweist [17]. Die Scanfrequenz wird mit einem Wert von 600 Hz angegeben, was eine schnelle und präzise Erfassung der Umgebung ermöglicht. Um auch bei unterschiedlichen Auflieger und Beladeszenarien eine Flexibilität zu gewährleisten, ist der Sensor auf einer höhenverstellbaren Halterung montiert.

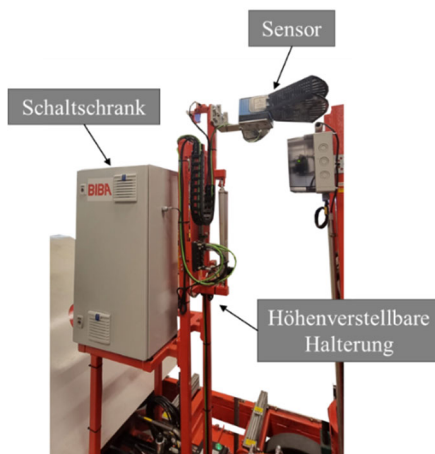


Abbildung 5. Integration der sensorischen Umfelderkennung in das LKW-Beladesystem

4.1.1 EINGABEPARAMETER

Die Tabelle 2 stellt die Eingabeparameter für das Sensorsystem dar, die zur Konfiguration und Anpassung der Umfelderkennung verwendet werden. Der Parameter *distance_front* ermöglicht die Einstellung des Wertes für die Distanz *d* und ist zwischen 0,5 m bis auf maximal 5,5 m begrenzt. Diese Begrenzung entspricht dem empfohlenen

Arbeitsbereich des Sensors vom Hersteller. Der Eingabeparameter *filter_type* repräsentiert die gewählte Art der Filterung und kann die Werte 0, 1 oder 2 annehmen. Dabei entspricht jeder Wert einem Filter, in der die Zuweisung wie folgt aussieht: 0: Rohdaten, 1: Mittelwertfilter, 2: Medianfilter. Die Anzahl der Messpunkte für den Filter wird durch den Parameter *sample_size* gesteuert und kann Werte im Bereich von 1 bis 512 annehmen.

Tabelle 2. Einabeparameter für das sensorische System

Parameter	Bezeichnung	Wertebereich
<i>distance_front</i>	Wert für die Distanz <i>d</i>	[0,5...5,5] in m
<i>filter_type</i>	Art der Filterung	[0, 1, 2]
<i>sample_size</i>	Anzahl der Messpunkte für den Filter	[1 ... 512]

4.1.2 AUSGABEPARAMETER

Die Tabelle 3 präsentiert die Ausgabewerte, die vom Sensorsystem übergeben werden. Der Parameter *distance_front* gibt den eingestellten Wert für die Distanz *d* wieder (siehe Abbildung 3), ausgehend von dieser Distanz werden die Abstände jeweils zur linken und rechten Seitenwand ermittelt. Dafür geben die Werte *distance_left* und *distance_right* geben die gemessenen Abstände zwischen dem Sensor und den linken bzw. rechten Seitenwänden an. Die Variable *collision_flag* dient dem Schutz des Sensors und gibt an, ob vor dem Sensor ein Objekt befindet oder nicht. Diese Variable ermöglicht eine schnelle und präzise Erkennung von potenziellen Kollisionen im Umfeld des Sensors. Durch die Auswertung des Werts kann das LKW-Beladesystem entsprechende Sicherheitsmaßnahmen oder Reaktionen einleiten, um mögliche Schäden zu verhindern und die Sicherheit des Sensors während des Betriebs zu gewährleisten. Dieser Wert wird wie folgt zugewiesen: 0: Keine Kollision, 1: Kollision.

Tabelle 3. Ausgabewerte der sensorischen Umfelderkennung

Parameter	Bezeichnung
<i>distance_front</i>	Gesetzter Wert für die Distanz <i>d</i>
<i>distance_left</i>	Abstand vom Sensor zur linken Seitenwand
<i>distance_right</i>	Abstand vom Sensor zur rechten Seitenwand
<i>collision_flag</i>	Kollisionsstatus im Sichtfeld des Sensors

5 ERGEBNISSE

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des durchgeführten Feldexperiments präsentiert. Die praktische Anwendung des Sensorsystems erfolgt innerhalb eines Planenauflegers, um die Umfelderkennung unter realistischen Bedingungen zu testen und Erkenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit des Sensorsystems zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Tests dienen als Grundlage für die Beurteilung seiner Eignung für den praktischen Einsatz im Betriebsumfeld.

5.1 DASHBOARD ALS INTERAKTIVE BENUTZERSCHNITTSTELLE

Das Dashboard ermöglicht eine intuitive und übersichtliche Darstellung der erfassten Daten und Informationen. Es bietet dem Bedienpersonal die Möglichkeit, die Ausgabe der sensorischen Umfelderkennung in Echtzeit zu überwachen und zu analysieren. Abbildung 6 veranschaulicht einen Ausschnitt des Dashboards, auf dem exemplarisch eine Messung innerhalb eines Planenauflegers dargestellt ist. Das Dashboard bietet aber nicht nur eine passive Anzeige der Daten, sondern ermöglicht auch interaktive Aktionen. Die zuvor erwähnten Eingabeparameter können in Echtzeit angepasst werden, und die direkte Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des Sensorsystems beobachtet werden. Dies erlaubt eine flexible Konfiguration des Systems entsprechend den aktuellen Anforderungen.

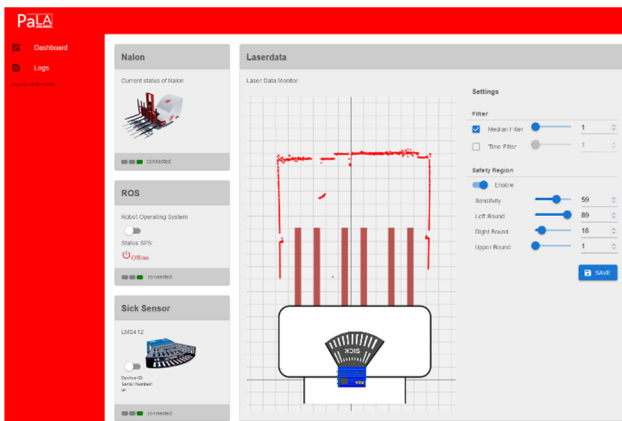


Abbildung 6. Ausschnitt aus dem Dashboard

5.2 ERMITTLUNG DER EINGABEPARAMETER

Ein entscheidender Schritt in der Konfiguration des Sensorsystems bestand darin, die optimalen Eingabeparameter zu bestimmen. Dafür wurden die Parameter gemäß Tabelle 2 während des Feldexperiments gezielt angepasst, um eine Vielzahl von Szenarien und Beladungskonfigurationen abzudecken. Die Eingabeparameter, die während des Feldexperiments eruiert wurden, sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der Distanzparameter *distance_front* spielt bei der Feinabstimmung des Sensorsystems eine bedeutende Rolle. Durch eine Variation dieses Parameters konnte ein

optimaler Wert von 2,0 m für die robuste Erkennung der Abstände zu den Seitenwänden vor der palettierten Ware ermittelt werden. Die Wahl des Filtertyps *filter_type* sowie die Anzahl der Messpunkte für den Filter *sample_size* beeinflussten die Qualität der erfassten Daten. Durch eine Variation der Filtereinstellungen konnte eine ausgewogene Balance zwischen Rauschunterdrückung und Detailgenauigkeit gefunden werden. Hierbei zeigte sich, dass der Medianfilter mit 128 Messpunkten die besten Ergebnisse erzielte. Eine optimale Einstellung ermöglichte eine zuverlässige Bestimmung der Abstände ohne starke Ausreißer. Die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Anpassung der Eingabeparameter sind für die praxisgerechte Nutzung des Sensorsystems von entscheidender Bedeutung, da sie das System effektiv an unterschiedliche Situationen anzupassen und somit eine robuste Nutzung in realen Betriebsszenarien gewährleisten.

Tabelle 4. Ermittelte Eingabeparameter

Parameter	Wert
<i>distance_front</i>	2,0 m
<i>filter_type</i>	2
<i>sample_size</i>	128

5.3 FELDEXPERIMENT INNERHALB EINES PLANENAUFLEGER

Im Rahmen des Feldexperiments wurde die sensorische Umfelderkennung in einem Logistikprozess eines Großkonzerns evaluiert. Das Feldexperiment wurde durch eine Vielzahl von präzise geplanten Messvorgängen realisiert, die während des Beladevorgangs innerhalb eines Planenauflegers durchgeführt wurden. Eine Messung involvierte eine kontinuierliche Datenaufzeichnung der Abstände zu den Seitenwänden über gesamte Länge des Planenauflegers. Diese Datenerfassung erstreckte sich über den gesamten Verlauf des Beladevorgangs. Die gesammelten Messdaten wurden im Anschluss vom Sensorsystem verarbeitet, durch Filterung optimiert und visualisiert. Es sei angemerkt, dass der verwendete Planenaufleger eine Breite von 2500 mm besitzt. Im Rahmen der Messungen ist im Durchschnitt einen Wert von 2511 mm für die Breite gemessen worden. In Abbildung 7 ist exemplarisch eine Messreihe während eines Beladevorgangs in einem Planenaufleger dargestellt. Aus dieser Grafik geht deutlich hervor, dass die Seitenwände über die Länge des Planenauflegers nicht gerade zulaufen. Dafür sind in der Abbildung die idealisierten, geraden Seitenwände als Referenzlinien dargestellt. Insgesamt können an zwei spezifischen Stellen des Planenauflegers potenzielle Kollisionsgefahren festgestellt werden, in denen Krümmungen der Seitenwände zur linken oder zur rechten Seite beobachtbar sind.

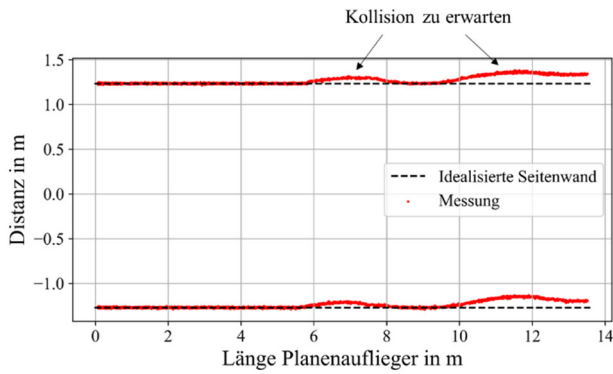


Abbildung 7. Gemessene Seitenwände über die gesamte Länge des Planenauflegers mit Darstellung von idealisierten Seitenwänden als Referenzlinien

Die gemessenen Abstandswerte werden relativ zum Nullpunkt des Sensors ermittelt. Dieser Nullpunkt fällt nicht exakt in die Mitte des Sensorgehäuses, was zu unterschiedlichen Abständen zur linken und rechten Seitenwand führt. Abbildung 8 visualisiert die Position des Sensors mit seinem zugehörigen Nullpunkt zu Beginn der Messung im Planenaufleger. Diese spezifische Eigenschaft ermöglicht die Ermittlung der Abweichungen entlang des Planenauflegers für jede Seitenwand.

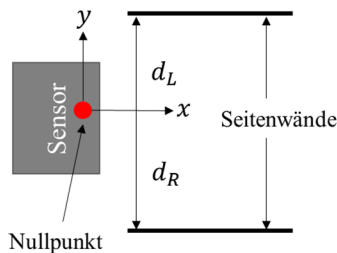


Abbildung 8. Position und Nullpunkt des Sensors zu Beginn der Messung

Um die Abweichungen Δ_L und Δ_R zu quantifizieren, wird die folgende Formel angewendet.

$$\Delta_L = | \text{distance_left} - d_L | \quad (1)$$

$$\Delta_R = | \text{distance_right} - d_R | \quad (2)$$

Aufgrund der symmetrischen Abweichung kann das arithmetische Mittel zwischen Δ_L und Δ_R zur Bestimmung der Gesamtabweichung genutzt werden. In Abbildung 8 ist Gesamtabweichung als Diagramm dargestellt, dadurch können möglichen Kollisionenpunkte noch genauer hervorgehoben werden. Bei Einfahrt des Fahrzeugs in den Planenaufleger zeigt sich bis etwa 6 m eine Gesamtabweichung im Bereich von 0 bis 0,02 m. Anschließend steigt diese Abweichung auf über 0,06 m an und kehrt danach wieder auf fast 0,0 m zurück. Ab etwa 10 m bis zum Abschluss des Beladevorgangs erhöht sich die Gesamtabweichung auf über 0,12 m. An diesen Stellen sind daher mögliche Kollisionenpunkte zu erwarten.

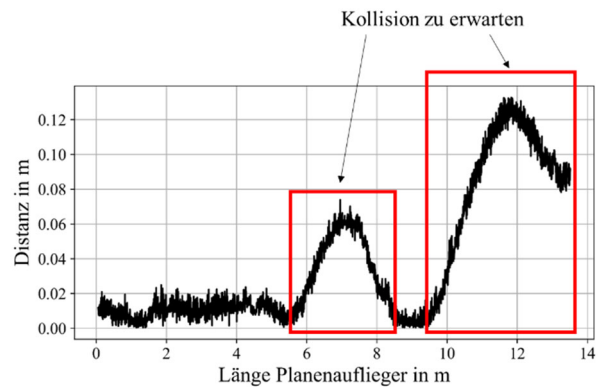


Abbildung 9. Gesamtabweichung der Seitenwände entlang des Planenauflegers

Durch die Messung der Abstände und vor der palettierten Ware und die Bestimmung der Gesamtabweichung kann die Steuerung prädiktiv statt reaktiv gestaltet werden. Die erzielten Ergebnisse und die optimierten Eingabeparameter bestätigen die Eignung des Systems für den praktischen Einsatz in logistischen Prozessen bei Planenauflegern. Die Fähigkeit des Systems, präzise Abstandsmessungen und Kollisionserkennung in Echtzeit durchzuführen, trägt zur Steigerung der Sicherheit und Effizienz beim Beladevorgang bei.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung und Evaluation eines sensorischen Umfelderkennungssystems für ein automatisches LKW-Beladesystem präsentiert. Die vorgestellte Lösung zielt darauf ab, die Sicherheit und Effizienz von Beladevorgängen bei Planenauflegern zu verbessern, indem sie präzise Abstandsmessungen und Kollisionserkennung in Echtzeit ermöglicht. Die Integration des Sensorsystems in den Betriebsablauf eines Planenauflegers wurde detailliert beschrieben. Hierbei spielen die optimalen Eingabeparameter eine entscheidende Rolle, um die Leistungsfähigkeit des Systems zu maximieren. Die Ergebnisse des Feldexperiments zeigen, dass die gewählten Eingabeparameter sowie die Filterung der Messdaten eine zuverlässige und präzise Umfelderkennung ermöglichen. Die Evaluation des Systems in einem realen betrieblichen Kontext verdeutlichte seine Fähigkeit zur prädiktiven Kollisionserkennung und Abstandsmessung während des Beladevorgangs. Dieser Beitrag trägt somit zur Weiterentwicklung des LKW-Beladesystems bei und bietet eine vielversprechende Grundlage für zukünftige Verbesserungen und Anwendungen.

Weiterhin können die erfassten Sensorwerte nahtlos an die Fahrzeugsteuerung übergeben werden, um eine dynamische Anpassung des Gabelsystems während des Beladevorgangs zu ermöglichen und Kollisionen zwischen der palettierten Ware und den Seitenwänden des Planenauflegers frühzeitig zu erkennen und zu verhindern. Dadurch

kann die Positionierung des Gabelsystems präzise gesteuert werden, um eine optimale Ausrichtung der Ladung zu gewährleisten. Darüber hinaus könnten weitere Sensoren und Technologien integriert werden, um eine noch umfassendere Umfelderkennung zu ermöglichen, beispielsweise auch im Bereich der vertikalen Ausrichtung der Ladung. Diese Entwicklungen würden das Sensorsystem zu einem noch vielseitigeren und leistungsfähigeren Werkzeug für den Beladevorgang in Planenaufliegern machen

7 DANKSAGUNG

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „PaLA“ - *Palletized Loads Automatic Loading System for unmodified European Trailers to enable a Resilient Supply Chain*, das mit Mitteln aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm EIT Manufacturing der Europäischen Union gefördert wird.

LITERATUR

- [1] P. Wittenbrink, “Transportmanagement - Kosteno-optimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe,” 2014. doi: 10.1007/978-3-8349-3825-1.
- [2] N. Straub, S. Kaczmarek, T. Hegmanns, and S. Niehues, “Technologischer Wandel in Logistiksystemen und deren Einfluss auf die Arbeitswelt in der operativen Logistik,” in *Industrie 4.0 Management*, 2017, vol. 33, no. April 2017, S. 47–51.
- [3] A. Sochaczewski, “Technologieinformation: Automatische LKW Be- und Entladesysteme,” 2010.
- [4] C. Lujan *et al.*, “Bodies and trailers - development of CO2 emissions determination procedure,” 2019.
- [5] D. Felguera, “Automatic loading and unloading of trucks and containers - NALÓN N8.” <https://www.durofelguera.com/en/producto/nalon-n8/>
- [6] G. Freudl, “Planung von Stückgut-Umschlagbereichen mit Hilfe wissensbasierter Bewertungsmethoden,” 2001.
- [7] W. A. Günthner and G. Freudl, “Automatisierter Stückgutumschlag - welche Möglichkeiten bietet der Markt dem Verloader ?”
- [8] M. Freitag *et al.*, “Digitaler Zwilling zur Mensch-Technik-Interaktion: Zugriff auf unterschiedlichen Entscheidungs- und Ausführungsebenen eines autonomen Containerentladesystems,” in *Digitaler Zwilling zur Mensch-Technik-Interaktion*, GITO mbH Verlag, 2020, S. 153–170. [Online]. Available: <https://library.gito.de/wp-content/uploads/2021/06/WGAB-2020-ebook.pdf>
- [9] G. Ullrich and T. Albrecht, *Fahrerlose Transportsysteme*. 2019. doi: 10.1007/978-3-658-27472-6.
- [10] N. Hoppe, J. Wilhelm, C. Petzoldt, L. Rolfs, T. Beinke, and M. Freitag, “Design eines Roboterssystems zur Entleerung von Seecontainern,” *Logist. J. Proc.*, vol. 12, S. 1–12, 2020, doi: 10.2195/lj_Proc_hoppe_de_202012_01.
- [11] J. Fottner, S. Galka, S. Habenicht, E. Klenk, I. Meinhardt, and T. Schmidt, *Planung der innerbetrieblichen Transportsysteme*. 2022. doi: 10.1007/978-3-662-63973-3_5.
- [12] D. Clauer and J. Fottner, “Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf,” 2019.
- [13] VirtualExpo Group, “Unloading loading system NALON N8,” 2022. <https://www.directindustry.com/prod/df-durofelguera/product-156093-1638794.html>

- [14] M. Quigley *et al.*, “ROS: an open-source Robot Operating System,” *ICRA Work. open source Softw.*, vol. 3, 2009.
- [15] M. Lehning, J. Sprickerhof, and M. Günther, “ROS driver for the SICK TiM and SICK MRS series of lidars,” 2022.
http://wiki.ros.org/sick_scan
- [16] Stefan Lehmann, “PyADS - Python Wrapper for TwinCATs ADS library,” 2015.
<https://pyads.readthedocs.io/en/latest/>
- [17] SICK AG, “2D-LiDAR-Sensoren LMS4000 / Indoor,” 2023.
<https://www.sick.com/de/de/p/p665943>

Burak Vur, M.Sc., Research Associate at BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik, Faculty of Production Engineering at the University of Bremen

Address: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany,
Tel.: +49 421 218-50054, E-Mail: vur@biba.uni-bremen.de

Lennart Rolfs, M.Sc., Research Associate at BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH.

Diego Concheso Calvo, M.Sc., Automation Engineer at DF-Duro Felguera, Gijón, Spain.

Oscar Toyos Gonzalez, M.Sc., Technical Manager at DF-Duro Felguera, Gijón, Spain

Sunil Bhsole, M.Sc., Senior Technical Leader at Procter & Gamble, Kronberg, Germany

Michael Freitag, Prof. Dr. -Ing., Director of BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik, Director of the Department Planning and Control of Production and Logistic Systems (PSPS), Faculty of Production Engineering at the University of Bremen