DOI: 10.2195/lj_proc_boerold_de_202510_01

Konzept für eine Nachrüstlösung für die autonome Palettenverladung durch Flurförderzeuge

Axel Börold[1]***,***
Jannik Liebchen[1]***,***
Nils Hoppe[1]***,***
Burak Vur[2]***,***
Michael Freitag[1,2]

1 *BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH, Bremen*
2 *Universität Bremen, Fachbereich Produktionstechnik, Bremen*

Dieser Beitrag beschreibt ein Konzept für ein nachrüstbares System, um herkömmliche elektrisch angetriebene FFZ für eine autonome Heckverladung von Trailern zu befähigen. Das Nachrüstsystem besteht aus einem externen Sensormodul zur Grobnavigation sowie in das Fahrzeug integrierbare Nahbereichssensorik und Steuerungsmodule. Das entwickelte Konzept zeigt, dass durch den Ansatz der Nachrüstbarkeit existierender FFZ und den damit einhergehenden geringen Investitionskosten insbesondere KMU die wirtschaftlichen Potentiale einer automatisierten Palettenverladung erschließen können.

[Keywords: Logistik, Automatisierung, Retrofit, LKW-Beladung, FFZ]

1 Einleitung

Nach wie vor wird der Warenumschlag größtenteils durch menschliche Arbeitskräfte mittels Handgabelhubwagen oder Gabelstaplern durchgeführt. Diese personal- und damit auch kostenintensive Prozesse stellen Unternehmen angesichts steigender Gütertransporte sowie der damit einhergehenden Zunahme von Verladeaktivitäten bei gleichzeitig zunehmenden Fachkräftemangel immer mehr vor eine große Herausforderung. Besonders kleine und mittlere Unternehmen (KMU) streben verstärkt nach Maßnahmen zur Automatisierung, um diesem Mangel zu begegnen [1]. Die Motivation hinter diesen Bemühungen beinhaltet auch die Verkürzung von Verlade- und Wartezeiten, potenzielle Erleichterungen für die Arbeitskräfte sowie Minimierung von Fehlern. Aktuelle Bestrebungen zur Automatisierung des Beladevorganges sind die Einführung stationärer Beladesysteme oder der Einsatz fahrerloser Transportsysteme (FTS) [2].

Durch proprietäre Schnittstellen der FTS werden jedoch Integration, Erweiterung und Interoperabilität erschwert [3]. Zudem sind oft bauliche Veränderungen an Aufliegern oder Laderampen nötig. Manuelle Flurförderfahrzeuge (FFZ) sind dagegen bereits integraler Bestandteil der betrieblichen Abläufe und verfügen über eine etablierte Präsenz in den bestehenden Logistikstrukturen. Dabei nehmen besonders personengeführte Gabelstapler oder Handgabelhubwagen aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und Flexibilität eine dominierende Rolle ein [2]. Im Gegensatz zur Neuanschaffung von vollautomatischen Beladesystemen ist eine Nachrüstlösung für bestehende FTS eine wirtschaftliche Alternative [4]. In diesem Beitrag wird ein neues Konzept für eine Nachrüstlösung vorgestellt.

Nachfolgend wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik zu bestehenden Automatisierungslösungen, der Forschung in dem Bereich sowie für Automatisierungen verwendete Sensortechnologien dargelegt. In Kapitel 3 werden die Anforderungen an eine Nachrüstlösung aus der Industrie und Praxis zu Beladeprozessen dargestellt. Die ermittelten Möglichkeiten zur Nachrüstung bestehender FFZ werden im Kapitel 4 vorgestellt und verglichen, woraufhin das finale Gesamtkonzept in Kapitel 5 vorgestellt wird.

2 Stand der Technik

Nachfolgend wird der Stand der Technik erläutert. Hierbei werden zunächst die aktuellen Automatisierungbestrebungen der vollautomatische Beladesysteme, fahrerlose Transportsysteme und autonome Gabelstabler vorgestellt. Abschließend werden die Sensortechnologien erläutert, die für eine Nachrüstlösung in Betracht kommen.

2.1 Vollautomatische Beladesysteme

Statische Belade- und Entladesysteme, wie automatisierte Förderbänder und Rollbahnen, zeigen durch ihre starre Konstruktion ein geringes dynamisches Verhalten beim Be- und Entladen. Automatisierte Förderbänder und Rollbahnen erfordern weniger komplexe Sensorik und Steuerung als beispielsweise autonome FFZ. Sie können so konfiguriert werden, dass sie optimal an die spezifischen Anforderungen

© 2025 Logistics Journal: Proceedings – ISSN 2192-9084
Article is protected by German copyright law

der Verladeprozesse angepasst sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die Implementierung solcher statischen Systeme oft mit erheblichen Infrastrukturmaßnahmen verbunden ist. Dies umfasst bauliche Anpassungen, wie die Installation von festen Förderanlagen und die Integration in bestehende Logistikprozesse, was sowohl zeitaufwendig als auch kostspielig sein kann. Ein weiterer Nachteil dieser Systeme ist ihre mangelnde Flexibilität. Statische Belade- und Entladesysteme können nicht dynamisch auf Veränderungen im Arbeitsumfeld oder auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren, was ihre Einsatzmöglichkeiten einschränken kann.

Für den Einsatz von automatischen Beladesystemen ist besonders die Heckverladung geeignet, für die verschiedene Lösungen entwickelt wurden, um Güter präzise und schnell in LKWs zu verladen [5]. Solche Systeme können äußerst vielseitig ausgelegt sein und kombinieren herkömmliche Fördertechnik mit Robotik- und Sensortechnologien. Sie erfassen die Güter, befördern sie mittels Fördertechnik in den LKW und positionieren sie anschließend im Laderaum. Dadurch wird nicht nur die Effizienz gesteigert, sondern auch das Risiko von Transportschäden und Unfällen reduziert. Die Grundvoraussetzungen für den Einsatz solcher Beladesysteme sind formstabile Förderhilfsmittel, sowie Ladeeinheiten (z. B. Europaletten). Bei automatischen Beladesystemen gibt es verschiedene standardisierte Systeme, die je nach Anwendungsfall und den spezifischen Anforderungen ausgewählt werden [6]. In Abbildung 1 sind fünf standardisierte Beladesysteme dargestellt, die in der Industrie häufig für die automatische Verladung von LKWs verwendet werden. Die Vorteile und Nachteile automatischer Beladesysteme sind nach [1] in Tabelle 1 aufgelistet.

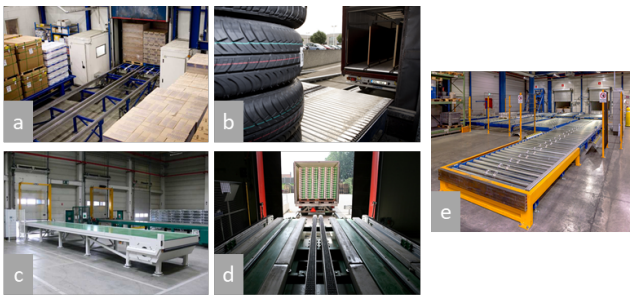

Abbildung 1: Standardisierte Beladesysteme, die in der Industrie häufig für die automatische Verladung von LKWs verwendet werden; a) Kettenförderersystem, b) Lamellenbahnsystem, c) Förderbandsystem, d) Skatesystem, e) Rollenbahnen

Weiterhin wird unterschieden, ob die Fördertechnik direkt auf die Ladefläche des LKWs installiert wird. Diese Technik umfasst beispielsweise Förderbänder, Rollenbahnen oder andere Mechanismen, die die Ladung von der Verladestation oder dem Lager automatisch auf die Ladefläche des LKWs befördern. Dabei wird die Fördertechnik entweder fest in die LKW-Struktur integriert oder auf speziellen Aufbauten oder Rampen platziert, um eine reibungslose und effiziente Verladung zu ermöglichen.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile automatischer Beladesysteme nach [1]

Vorteile
• Personaleinsparungen • Reduktion von Verladezeiten • Weniger Beschädigungen der Ware • Anbindung an Lagerverwaltungssysteme • Erhöhung der Handhabungskapazität • Erelichtert die Verladung außerhalb der regulären Arbeitszeiten, da weniger Personal benötigt wird • Manuelle Verladung trotzdem möglich • Keine Arbeitsunfälle mit FFZ im Verladeprozess • Einsparungen in der Bautechnik (weniger Rampen notwendig)
Nachteile
• Hohe Erstinvestition • Modifikationen am Auflieger erforderlich > weniger Flexibilität • Modifikationen an der Rampe erforderlich • Schwer zu bewegen, abzumontieren oder modifizieren

Vorarbeiten im Feld automatischer Be- und Entladesysteme beinhalten die automatische Entladung von Paketen aus Seecontainern [7] sowie die Befähigung von bereits automatisierten Beladesystemen für die Anforderungen von Planauflieger [8].

2.2 Fahrerlose Transportsysteme

Eine Verladung ohne auf der Ladefläche installierter Fördertechnik umfasst alle Verladesysteme, deren Einrichtungen sich außerhalb der LKW-Ladefläche befinden. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von autonomen FFZs oder roboterbasierten Systemen erfolgen. Als Alternative zu automatischen stationären Beladesystemen stellen FTS (engl. Automated Guided Vehicle - AGV) oder autonome FFZ eine fortschrittliche und zunehmend wichtige Technologie in der Intralogistik dar [2]. Dabei handelt es sich um eine eigenständige Technologie, die klar von automatischen Beladesystemen zu unterscheiden ist. Im Wesentlichen sind FTS autonome, computergestützte FFZ, die über eigenständige Navigationssysteme verfügen [9]. Mit einer Vielzahl von FTS auf dem Markt bieten Unternehmen auch eine breite Auswahl an Lösungen für autonome Gabelstaplersysteme an, von denen einige exemplarisch in der Abbildung 2 dargestellt sind.

Article is protected by German copyright law

Abbildung 2: Industriell eingesetzte autonome Gabelstaplersysteme

Durch den Einsatz moderner Technologien wie Sensoren, Kameras und künstlicher Intelligenz können solche Systeme Aufgaben in Lagerhäusern und Produktionsstätten autonom ausführen und effizient erledigen. Sie nehmen Ihre Umgebung präzise wahr und erkennen Hindernisse und Personen. Auf diese Erkennungen wird mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit reagiert und bei Bedarf ein automatischer Sicherheitsstopp initiiert, und potenzielle Kollisionen zu verhindern. Die Integration solcher autonomen Gabelstapler in den innerbetrieblichen Materialfluss ermöglicht eine Steigerung der Effizienz und Effektivität und trägt damit dazu bei, Logistikprozesse zukunftsfähig zu gestalten.

Im Gegensatz zu automatischen Beladesystemen, die primär für die Be- und Entladung von Lastkraftwagen ausgelegt sind, kommen FTS in der Industrie hauptsächlich für den internen Materialtransport innerhalb von Betriebsgeländen zum Einsatz. Ihre Hauptfunktion besteht darin, Paletten oder Stückgüter zwischen verschiedenen Stationen im Lager oder in der Produktion zu transportieren. Die FTS bewegen sich dabei in der Regel mit einer kontrollierten Geschwindigkeit, um eine sichere Navigation sicherzustellen. Für die präzise Führung der FTS können verschiedene Techniken wie Leitdraht, Leitband, Leitlinien, RFID-Tags im Boden, 2D, sowie 3D-LiDAR- Sensoren, Radarsysteme oder Kameratechnologie verwendet werden [10]. Die Aufnahme der Ladungsträger auf das FTS erfolgt entweder durch eine Hubeinrichtung oder durch die Anbindung an vorhandene Förderer wie Rollenbahnen, um eine effiziente Beförderung und Verladung von Gütern zu ermöglichen. Seit vielen Jahrzehnten werden in zahlreichen produzierenden Unternehmen daher FTS eingesetzt, die überwiegend den Materialtransport übernehmen. Angesichts des aufkommenden Trends hin zu einer verstärkten Automatisierung der Prozesse rücken auch FTS in Form von autonomen Robotern verstärkt in den Mittelpunkt [9]. Die Gestaltung eines FTS wird stets an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst, beispielsweise durch die Integration einer Rollenbahn, um Transportkisten effizient aufnehmen zu können. Die Vorteile und Nachteile von FTS nach [9] sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Autonome Gabelstapler werden derzeit zwar für den internen Materialtransport innerhalb von Betriebsgeländen eingesetzt, sind jedoch nicht für die direkte Be- und Entladung von LKWs einsetzbar. Die direkte Integration von autonomen Gabelstaplern in den Verladevorgang erfordert zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen und komplexe Steuerungssysteme. Dies umfasst Aspekte wie die präzise Positionierung innerhalb des Aufliegers, das sichere Bewegen von Lasten in engen Räumen sowie die Einhaltung der LKW-Ladekapazität und -stabilität. Daher werden in der Praxis für diesen Anwendungsfall bislang keine frei agierenden, autonomen Gabelstaplersysteme verwendet. Durch proprietäre Schnittstellen der FTS werden jedoch Integration, Erweiterung und Interoperabilität erschwert. Zudem wären oft bauliche Veränderungen an Aufliegern oder Laderampen nötig.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von FTS

Vorteile
• Personaleinsparungen • Geringfügige Infrastrukturmaßnahmen (Auflieger oder Laderampen müssen nicht angepasst werden) • Hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit • Hohe Flexibilität und Skalierbarkeit
Nachteile
• Hohe Anschaffungskosten • Eventuelle Anpassung bereits bestehender Prozesse • Erschwerte Integration in bestehende Infrastruktur • Schulungsbedarf für Mitarbeiter • Komplexität der Wartung, da Expertenwissen nötig ist • Abhängigkeit vom Hersteller

2.3 Nachrüstung von FFZ durch Sensortechnologien

Manuelle FFZ sind bereits integraler Bestandteil der betrieblichen Abläufe und verfügen über eine etablierte Präsenz in den bestehenden Logistikstrukturen. Dabei nehmen besonders personengeführte Gabelstapler oder Handhubwagen aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und Flexibilität eine dominierende Rolle ein [2].

Bestehende Nachrüstlösungen, die bestehenden Flotten zur autonomen Verladung von Containern und Trailern befähigen, wurden im internationalen Stand der Forschung und Technik nicht identifiziert. Es gibt jedoch Nachrüstlösungen für den Einsatz von FFZ als Transportsystem innerhalb der Halle, vergleichbar mit den bereits bestehenden autonomen Systemen. Die Positionsbestimmung kann für eine Nachrüstlösung als die wichtigste Kernaufgabe bezeichnet werden. Hierfür kommen verschiedene Sensortechnologien in Frage, von denen die relevantesten nachfolgend kurz beschrieben werden.

Article is protected by German copyright law

LiDAR-Sensoren: Diese Sensoren verwenden Laserstrahlen zur präzisen Erstellung von zwei- bzw. dreidimensionalen Karten der Umgebung. Sie sind besonders gut geeignet, um die Position und Entfernung von Objekten und Hindernissen genau zu bestimmen, wodurch sie sich ideal für den Einsatz in autonomen FFZ eignen. Die Genauigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung ab, zudem besitzen die Sensoren eine technisch festgelegte, minimale Winkelauflösung sowie eine maximale Reichweite. Die Erkennung von logistischen Objekten mit wenig Rückstrahlfläche, insbesondere Europaletten, ist auf größere Entferung anspuchsvoll bis unmöglich.

Ultraschallsensoren: Diese Sensoren nutzen Schallwellen, um Entfernungen zu messen. Sie können zur Erkennung von Hindernissen und zur Bestimmung der Anwesenheit von Paletten und anderen Ladungen verwendet werden, können aber weniger zur Klassifikation der Objekte beitragen.

Bildverarbeitungssysteme: Diese Systeme erfassen Bilder der Umgebung mithilfe von Kameras, die dann durch eine Bildverarbeitungssoftware analysiert werden, um die Anwesenheit von logistischen Objekten bzw. des FFZ zu bestimmen. Die Erkennung wird dabei markerlos ermöglicht, zur präziseren Vermessung der Positionen müssen jedoch spezielle optische Marker in Form von 2D-Tags oder reflektierenden Kugeln eingesetzt werden, was deren Verwendung nur für die FFZ ermöglicht. Nachteilig an der Verwendung von Markern ist auch, dass diese im Betrieb intakt und sauber gehalten werden müssen, was zusätzlichen Wartungsaufwand bedeutet.

Radar-Sensoren: Diese Sensoren verwenden Radarwellen zur Erfassung von Objekten in der Umgebung. Radar-Sensoren sind in der Lage, Entfernungen, Geschwindigkeiten und Richtungen präzise zu messen. In autonomen Gabelstaplern können Radar-Sensoren eingesetzt werden, um eine zuverlässige Erkennung von Hindernissen und anderen Fahrzeugen in Echtzeit zu ermöglichen. Ihre Fähigkeit, unabhängig von Lichtverhältnissen zu arbeiten, macht sie besonders robust und vielseitig einsetzbar.

Time-of-Flight (ToF), Structured-Light (SL) und Stereovision: In der Robotik werden ebenfalls 3D-Sensoren auf Basis von strukturiertem Licht, ToF sowie im Bereich des autonomen Fahrens aus dem Bereich der Stereovision verwendet. Die SL und ToF Sensoren können aufgrund ihrer Funktionsweise im direkten Sonnenlicht nur eingeschränkt eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu benötigen Stereovisionsverfahren eine gute Beleuchtung und bieten für die Fernortung nur eine geringe Genauigkeit.

3 Anforderungen an eine Nachrüstlösung

Es wird für die Anforderungsermittlung die in der Praxis dominierende heckseitige Beladesituation für KMUs durch personengeführte Gabelstapler oder Handgabelhubwagen angenommen [4]. Die Güter durch die Heckklappe der Fahrzeuge (z.B. Kofferauflieger) oder Container über die Ladefläche hinweg verladen. Für eine ebenerdige Beladung wird das Fahrzeug rücklings an einer Verladerampe positioniert. Ist diese nicht vorhanden, muss das Fahrzeug mit einer Hubladebühne ausgerüstet sein. Das Szenario ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Oft ist dort ein überdachter Außenbereich enthalten. Dieser schützt vor Niederschlag, allerdings nicht immer vor direkter Sonneneinstrahlung. Desweiteren befinden sich im Bereich der Vorstaufläche oft überlagernde Wege, sodass hier besondere Anforderungen an den Schutz vor Personenschäden entstehen. Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit für ein Konzept ermittelt sich aus der Anzahl der ausgerüsteten Gates und FFZs. Dieser Aspekt wird in der Konzeptentwicklung im Sinne der Skalierbarkeit aufgegriffen. Die optimale Anzahl an gleichzeitig operierenden Fahrzeugen in einem Gate ist dabei jedoch nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung. Für das oben beschriebene Szenario ergeben sich Funktionalitäten, die vom Konzept umgesetzt werden müssen damit ein sinnvoller Einsatz in der Industrie und Praxis möglich ist. Diese sich daraus ergebenen Anforderungen wurden im Rahmen von Prozessaufnahmen und Expertengesprächen ermittelt und werden nachfolgend kurz beschrieben.

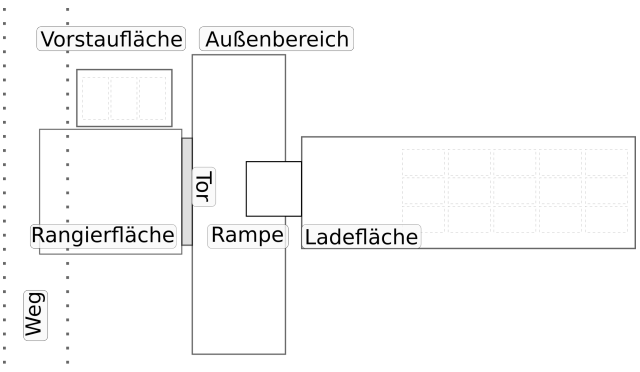

Abbildung 3: Beispielszenario aus der Praxis

Kommunikation mit dem FFZ und der FFZ-Elektronik: Allgemein müssen sowohl die drahtlose Kommunikation mit dem FFZ, als auch die Kommunikation der Steuerungsbox mit der FFZ-eigenen Elektronik sehr sicher ausgelegt werden. Zudem muss die Anbindung an verschiedene Hersteller möglich sein.

- Unterstützung von FFZ mehrerer Hersteller
- Kommunikation mit FFZ-Steuerung via Steckverbindung

Article is protected by German copyright law

- Kommunikation mit dem Fahrzeug: Latenz $<$ 100 ms, Reichweite $>$ 20 m, Ermöglichung sicherheitsgerichteter Kommunikation
- Hohe Ausfall und Störsicherheit

Prozesssteuerung und Kommunikation mit übergeordneten ERP-Systemen: In der KMU-Praxis werden verschiedene ERP Systeme für die Prozesssteuerung verwendet. Einige Systeme bieten bereits eine komplette Beladungsplanung an, während andere lediglich Listen von verladenenen Paletten bereit stellen. Ein automatisiertes Beladesystem benötigt in jedem Fall definierte Fahraufträge und je nach Anordnung eine sich nachfüllende Vorstaufläche.

- Plattformunabhängigkeit bezüglich der ERP-Systeme
- Stauraumplanung notwendig, da ERP Systeme auf verschiedenen Ebenen arbeiten

Positionsbestimmung: Die Nachrüstlösung muss zur Navigation und Fahrzeugsteuerung die Positionen der FFZs erfassen. Dafür müssen sowohl Sensoren, als auf ggf. visuelle Marker zur Unterstützung installiert werden. Weiterhin müssen die Sensordaten verarbeitet werden. Insbesondere für die Verringerung der Datenströme ist eine möglichst sensornahe Positionierung der notwendigen Recheneinheit sinnvoll. Beide Systeme können unabhängig voneinander im FFZ, als externe Einheit als auch in beiden Orten gleichzeitig integriert werden werden. (extern/intern/kombiniert)

- Reichweite min. 20 m (Arbeitsbereich und maximale Aufliegerlänge)
- Genauigkeit $\pm$ 1 cm
- Betrieb im direkten Sonnenlicht

Navigation und Abarbeitung der Fahraufträge: Die autonomen FFZ müssen die Fahraufträge abarbeiten, durch die Halle und Ladefläche navigieren sowie Ladungsträger aufnehmen und abladen können.

Definierte Palettenaufnahme: Die Positionierung der Palette auf der Gabel muss für das exakte Abladen der Palette entweder bekannt sein oder durch eine mechanische Zwangsführung definierten werden.

- Genauigkeit der Palettenpose $\pm$ 0.5 cm, $\pm$ 1 Grad
- Dauer $<$ 1 s

Kommunikation mit dem Nutzer: Für die Prozessüberwachung sollten Informationen zum Stand der Verladung sowie den allgemeinen Betriebszustand des Systems zur Verfügung gestellt werden.

Ausschließen von Personenschäden: FFZs sind schwere, starre Fahrzeuge und bieten daher ein großes Verletzungspotential, es muss daher eine Absperrung der automatisierten Fahrzone durch Sicherheitstechnik stattfinden.

- Ausschließen von Personenschäden durch Sicherheitstechnik

Laderaumvermessung: Der Laderaum des Aufliegers sollte vor der Beladung in seiner Anwesenheit, seiner Geometrie sowie seiner genaueren Position automatisch überprüft werden.

- Genauigkeit der Aufliegerpose $\pm$ 0.5 cm, $\pm$ 1 Grad
- Dauer $<$ 20 s

4 Konzeptentwicklung

Die Mehrzahl der beschriebenen, umzusetzenden Funktionalitäten weisen keine größeren Abhängigkeiten voneinander auf. Dagegen beeinflusst die Umsetzung der zuverlässigen Positionsbestimmung als Grundlage der Navigation der FFZ als zentrale Funktionalität die gesamte Skalierbarkeit, den erwarteten Integrationsaufwand sowie die definierte Aufnahme der Paletten. Aus diesem Grund wurden die drei nachfolgend vorgestellten Konzeptvarianten entwickelt, die sich in der Positionierung der Sensorik und Rechenhardware unterscheiden.

4.1 Konzeptvarianten

Insbesondere bezüglich der Positionierung der Sensorik und Berechnungshardware zur Positionsbestimmung gibt es mehrere Konzeptvarianten. Allen Konzeptvarianten gemein ist die Navigation sowie die technischen Maßnahmen für die Vermeidung von Personenschäden. Diese werden daher nicht in der Auswahl als Kriterien hinzugezogen. Die drei Varianten werden nachfolgend qualitativ anhand der zusammengefassten Kriterien beschrieben und bewertet. Das Kriterium Sensorik umfasst in Summe die technischen Anforderungen sowie die geschätzten Kosten. Die Skalierbarkeit beschreibt die zusätzlich entstehenden Kosten und grundsätzliche Fähigkeit, das System auf weitere FFZs oder Gates zu erweitern. Der Integrationsaufwand orientiert sich an die Umbaumaßnahmen an Infrastruktur und FFZ. In Tabelle 3 sind die Erfüllngsgrade der einzelnnen Konzeptvarianten dargestellt.

Konzeptvariante 1 - Interne Sensorik: Die nachgerüstete Sensorik und Berechnungshardware zur Positionsbestimmung sind komplett auf dem zu automatisierenden Fahrzeug verbaut. Die Genauigkeitsanforderungen an die interne Sensorik sind durch die relative Nähe innerhalb des Containers und im Vorstauflächenbereich gering, jedoch ist weiterhin eine Reichweite von 20 m sowie eine hohe Punktdichte für die Erkennung des gesamten Aufliegers und der Navigation im Hallenbereich erforderlich. Die Umgebung der Vorstaufläche und Rampe werden durch passive visuelle Marker ergänzt. Eine extern verbaute Recheneinheit ist weiterhin für die Kommunikation mit dem übergeordneten ERP System notwendig. Die Palettenposition auf der Gabel

Article is protected by German copyright law

kann vom FFZ nicht genau erfasst werden, hierfür ist eine zusätzliche mechanische Lösung zur definierten Positionierung der Palette notwendig.

Konzeptvariante 2 - Externe Sensorik: Die nachgerüstete Sensorik und Berechnungshardware zur Positionsbestimmung wird in einer externen Sensoreinheit verbaut. Auf dem FFZ wird ledigleich ein gesichertes Steuermodul installiert, welches die übermittelten Fahrbefehle ausführt und bei Verbindungsabbruch automatisch stoppt. Um die erforderliche Genauigkeit zur Positionsbestimmung für die gesamte Reichweite zu realisieren, ist eine entsprechend hochpreisige externe Sensorik notwendig. Auf dem FFZ werden für die genauere Positionsbestimmung, insbesondere bei größerer Entfernung, durch visuelle Marker auf allen Seiten des Fahrzeuges notwendig. Die externe Sensoreinheit übernimmt die Kommunikation mit dem übergeordneten ERP System. Die Palettenposition auf der Gabel des FFZ kann durch die externe Sensorik erfasst werden. Im Sinne der Skalierbarkeit ist die Steurerung beim Einsatz mehrerer FFZ innerhalb des Aufliegers technisch anspruchsvoll, da die FFZ sich gegenseitig verdecken. Hier sollte das verdeckte Fahrzeug stoppen und nur das verdeckende bewegt werden.

Konzeptvariante 3 - Hybride Sensorik: Es werden sowohl auf dem FFZ, als auch in einer externen Sensoreinheit Sensoren zur Positionsermittlung eingesetzt. Die Berechnungshardware wird ebenfalls auf beide Systeme aufgeteilt, sodass ingesamt ein höherer Entwicklungsaufwand zu erwarten ist. Da die interne Sensorik lediglich im Nahfeld eingesetzt wird, sind die Anforderungen bezüglich der Genauigkeit, Punktdichte und Reichweite als gering einzustufen. Die externe Sensorik benötigt zwar eine höhere Reichweite, da jedoch nur eine externe Grobpositionierung durchgeführt wird nur eine geringe Punktdichte und Genauigkeit. Durch die geringeren Sensoranforderungen sind keine visuellen Marker im Hallenbereich oder auf dem FFZ notwendig. Die extern verbaute Recheneinheit ist die Kommunikation mit dem übergeordneten ERP System verantwortlich. Die Palettenposition auf der Gabel kann je nach ausgewählter externer Sensorik durch diese durchgeführt werden, oder von einem mechanischem System. Die gleichzeitige Steurung mehrerer FFZ wird ohne Unterbrechung durch eine Sensorfusion der einzelnen FFZ-Sensoren sowie der externen Sensorik ermöglicht.

4.2 Auswahl des umgesetzten Konzeptes

Die hybride Lösung für die Sensorik und Rechenhardware bietet sich als Grundlage für die weitere Konzeptentwicklung an. Auch wenn diese Variante den größten geschätzten Entwicklungsaufwand aufweist, sind nur geringe Infrastrukturmaßnahmen sowie im Vergleich zu den anderen Varianten geringsten Anforderungen an die eingesetzte Sensorik notwendig. Zudem weist das System eine hohe Flexibilität auf und in Summe die beste Skalierbarkeit, wenn die Anzahl der Gates oder Fahrzeuge erhöht wird. Die Kriterien und deren Erfüllung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Kriterien	Intern	Hybrid	Extern
Sensorik	◑	●	○
Skalierbarkeit Gates	●	◕	○
Skalierbarkeit Fahrzeuge	○	◕	●
Integrationsaufwand	○	◑	●

Tabelle 3: Erfüllungen der Kriteriern der Konzeptvarianten

5 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept basiert auf der ausgewählten hybriden Konzeptvariante aus Kapitel 4.1 und ist in Teilkonzepte aufgeteilt, die die Erfüllung der in Kapitel 4 dargestellten Funktionen umsetzen. Das Konzept zur Steuerung des Systems ist in Abbildung 4 dargestellt und wird nachfolgend beschrieben.

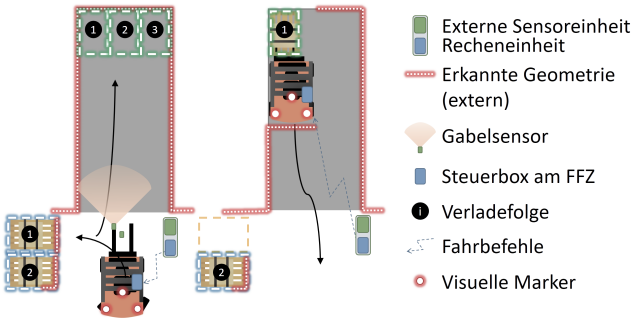

Abbildung 4: Konzept zur Steuerung des Systems

5.1 Sensorik und Positionsbestimmung

Die Erkennung, Grobpositionierung und Verfolgung der FFZ werden durch bildbasierte 2D-Sensorik und KI-Objekterkennungsalgorithmen realisiert. Obwohl diese Fernortung auch ohne visuelle Marker möglich ist, werden an ausgewählte, unkritische Stellen Marker auf das FFZ installiert. Dies ermöglicht den zudem gleichzeitigen Einsatz mehrerer FFZs. Mit Kenntnis des Aufenthaltsortes wird eine genauere Vermessung der aktuellen Position durch einen externen Laserscanner durchgeführt, welche für die Grobnavigation ausreichend ist. Die Detektion von Ladungsträgern mit 2D-LiDAR Technik gestaltet sich aus größerer Entfernung, über die gesamte Länge des Sattelaufliegers schwierig. Der Grund dafür ist die geringe Punktedichte im Bereich der Palettenblöcke und in der Praxis nebeneinander positionierten Paletten. Sofern die Punkte einem Ladungsträger zugeordnet werden können, ist deren Vermessung

Article is protected by German copyright law

für eine Lokalisierung ausreichend genau. Daher wird die Detektion ebenfalls über 2D-Bildverarbeitungsalgorithmen durchgeführt. Auf dem FFZ selbst wird ein spezieller 2D-LiDAR in die Gabel installiert. Dieser sorgt auch bei aufgenommenen Ladungsträger für die freie Sicht nach vorne, ermöglicht die Feinnavigation sowie Kollisionsvermeidung in beengten Verhältnissen. Dieser Sensor wird dabei lediglich im Nahfeld eingesetzt, ist dort ausreichend genau, benötigen nur eine geringe Winkelauflösung, wenig Bauraum und ist demenstsprechend wirtschaftlich. Zur Kollissionsvermeidung und zum Manövrieren werden weitere Nahfeldsensoren um das FFZ angebracht.

Die primäre Rechenhardware wird in die externe Sensorbox installiert. Dort wird die Prozesssteuerung, die Verarbeitung der 2D-Bilddaten sowie das in der Sensorbox installierten LiDARs ausgeführt. Die Verarbeitung der Daten der FFZ internen Sensorik wird im Rahmen der Kollissionsvermeidung auf dem Fahrzeug selbst durchgeführt. Für die Feinnavigation in beengten Verhältnissen werden die Sensordaten an die Sensorbox übertragen, um dort entsprechende Fahrbefehle zu erzeugen. Im Konzept wird die Detektion und Erkennung von logistischen Objekten durch 2D-Sensorik durchgeführt, während die Vermessung und sowie Verifizierung mittels 2D-LiDAR-Technik stattfindet. Es wird im Projekt demnach ein sogenannter Late-Fusion Ansatz verfolgt.

5.2 Prozesssteuerung, Beladeplanung und Kommunikation mit übergeordneten ERP-Systemen

Ein automatisiertes Beladesystem benötigt definierte Fahraufträge. Einige vorhandene ERP-Systeme bieten bereits eine komplette Beladungsplanung an, während andere lediglich Listen von zu verladenenen Paletten bereit stellen. Das Konzept für die Steuerung des Beladeprozesses sieht daher drei mögliche Anknüpfungspunkte der Anwendungsschnittstelle (API) auf verschiedenen Ebenen der Beladeplanung vor (siehe Abbildung 5). Für die Einordnung der Ladehilfsmittel ist dabei die DIN 30781 als Grundlage zu nehmen. Gleichzeitig variiert in der Praxis das Vorhandensein und Größe der Vorstauflächen, welche im maximalen Fall die gesamte Beladung eines Sattelaufliegers umfasst. Im Konzept wird von einer variablen Vorstaufläche von 5 bis 10 Ladungsträgern ausgegangen. Deren initiale Befüllung und Auffüllung ist ebenfalls durch durch Prozesssteuerung durchzuführen.

Die erste API-Ebene erhält eine Liste von Ladungsträgern inkl. Kundenzuordnung/Priorisierung sowie weiterer Attribute, für die eine komplette Beladungsplanung durchgeführt wird. Als Ergebnis wird eine Verladeplanliste erstellt. Als Staumuster für die Ladeeinheiten werden zunächst die die Querstauung und Längsstauung berücksichtigt. Die Lastverteilung orientiert sich an der VDI 2700.

Die zweite Zugriffsmöglichkeit setzt als Eingang eine von einem externen ERP-System festgelegte Verladeplanliste voraus, wodurch Fahraufträge an die Flurförderfahrzeuge generiert werden. Die Steuerung des Beladeprozesses berücksichtigt die Verladungen vom Lager zur Vorstaufläche, als auch die Verladung von der Vorstaufläche in den Auflieger/Container.

In der dritten Ebene werden einzelne Fahraufträge abgearbeitet, es besteht über die API die Möglichkeit direkt Fahraufträge an das FFZ zu senden.

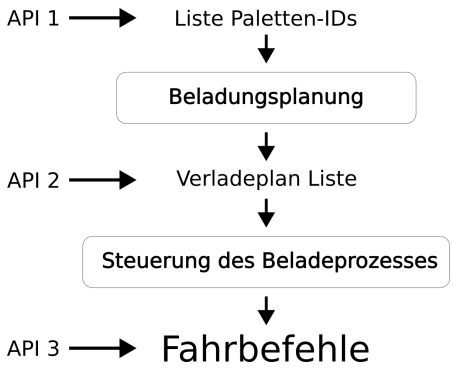

Abbildung 5: Konzept zur Beladungsplanung und Steuerung des Ladeprozesses

5.3 Navigation und Abarbeitung der Fahraufträge

Das FFZ soll Fahraufträge ausführen, durch die Halle und Ladefläche navigieren sowie Ladungsträger aufnehmen und abladen können. Die Abarbeitung der durch die Prozesssteuerung ausgehändigten Fahraufträge erfolgt im Fernsteuerungsmodus über ein in die in der Sensorbox installiertes Robotik-Betriebssystem. In diesem wird die Pfadplanung durchgeführt und Beschleunigungs- und Lenkkommandos erzeugt. Hierbei wird ein parametrisches Modell eines generischen FFZ verwendet, welches sich auf gänginge FFZ adaptieren lässt. In dem FFZ wird vorrangig eine Steuerungsbox mit einer Sicherheits-SPS installiert, welche eine NOT-Stop Funktion bei Verbindungsabbruch zur Sensorbox, bei Kollisionserkennung oder dem bestätigen eines Not-Aus Schalters bereit stellt. Die Kommunikation der Steuerungsbox zur Fahrzeugelektronik erfolgt über das Bussystem des FFZ, mit der Sensorbox über eine gesicherte Funkverbindung.

5.4 Definierte Palettenaufnahme

Die Position des Ladungsträgers auf der Gabel des FFZ wird über die externe LiDAR-Sensorik durchgeführt. Hierbei stoppt das Fahrzeug in der Nähe der Sensorbox, es werden das Fahrzeug sowie die Palette vermessen. Dadurch wird ein Abladen des Ladungsträgers mit der notwendigen Präzission ermöglicht.

Article is protected by German copyright law

5.5 Ausschließen von Personenschäden

Sobald das System in Betrieb ist, wird der entsprechende Arbeitsbereich durch Lichtschranken gesichtert. Im Falle von sich kreuzenden Wegen im Bereich der Vorstaufläche wird der Arbeitsbereich in mehrere Zonen unterteilt. Das System wird nur gestoppt, sobald sich das automatisierte FFZ im Bereich der Weges befindet. Die Freischaltung des Systemes, d.h. Verifizierung das sich keine Person im abgegrenzten Bereich befindet, erfolgt in diesem Konzept zunächst manuell.

5.6 Laderaumvermessung

Sobald das System für die Beladung aktiviert wird, wird das automatisierte FFZ in den Auflieger fahren und dessen genaue Pose und Geometrie ermitteln.

5.7 Kommunikation mit dem Nutzer

Das Konzept für die Benutzerschnittstelle ermöglicht es, den gesamten Beladeprozess zu starten, zu stoppen und zu beobachten. Zusätzlich können Live-Sensordaten und Fahraufträge angezeigt werden, um bei möglichen Störungen manuell einzugreifen. Die Schnittstelle soll dabei auf wurde auf Basis eines Touch-Interfaces in der Nähe der Anlage sowie als Website für die Fernüberwachung einsetzbar sein. Es sollen im Normalbetrieb nur notwendige Informationen

Abbildung 6: Konzept für die UI, Hauptansicht

zum System dargestellt werden. Das UI Konzept umfasst daher neben einem separaten Login-System drei Ansichten, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Hauptansicht: Diese beinhaltet eine optionale die 3D-Systemansicht des Gesamtsystems in Form eines digitalen Zwillings. Inbegriffen sind die aktuellen Fahrvektoren und Route des autonomen FFZ, dem Abdeckbereich der Sensorik sowie weiterer Systemkonponenten wie Lichtschranken. Weiterhin werden Daten zur System- und Prozesssteuerung symbolisch dargestellt, die generelle Zustandsanzeige (Aktiv / Inaktiv / Startend), der Fortschrittsanzeige des Gesamtbeladeprozesses (0-100%), der symbolische Darstellung der Lagerplätze der Vorstau- und Ladefläche sowie aktuellen Fahraufträge durch farbliche Markierung der jeweiligen Lagerplätze. Das Konzept zur Hauptansicht ist in Abbildung 6 dargestellt.

3D-Ladeflächengeometrie: Hier wird die 3D-Geometrie und Pose des durch einen initialen Vermessung erfasseten Trailers dargestellt und dient lediglich zur manuellen Kontrolle.

Störfall: Im Falle einer Störung wird über ein eingeblendetes bzw. überlagerndes Fenster umfassend über den Status sämtlicher Subsysteme, aktuelle Sensordaten und Logeinträge informiert. Zusätzlich werden Eingriffsmöglichkeiten (Start / Stopp / Manuelle Steuerung) angeboten.

6 Ergebnis und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein Konzept für ein nachrüstbares System, um herkömmliche elektrisch angetriebene FFZ (Nieder- und Hochhubwagen) für eine autonome Palettenverladung zu befähigen, dargestellt. Hier steht die für automatische Beladungssysteme besonders geeignete Heckverladung im Fokus [11]. Das Nachrüstsystem besteht aus einem externen Sensormodul zur Grobnavigation sowie in das Fahrzeug integrierbare Nahbereichssensorik und Steuerungsmodule. Das externe Multisensorsystem detektiert und ortet die logistischen Objekte, prüft die Anwesenheit des Containers/Aufliegers und navigiert das FFZ während des Beladevorgangs. Über eine Nutzerschnittstelle kann der Beladeprozess überwacht und Beladungsmuster eingegeben werden, aus denen mit den Messdaten Zielkoordinaten berechnet werden. Diese Daten werden drahtlos an die Nachrüststeuerung des Fahrzeugs übertragen. Auf Grundlage dieser Informationen werden Fahrwege berechnet und Steuersignale für das FFZ erzeugt.

Das entwickelte Konzept zeigt, dass durch den Ansatz der Nachrüstbarkeit existierender FFZ und den damit einhergehenden geringen Investitionskosten insbesondere KMU die wirtschaftlichen Potentiale einer automatisierten Palettenverladung erschließen können. Darüber hinaus kann personellen Engpässen bei Staplerfahrern begegnet werden.

In der weiteren Forschung wird in einer prototypischen Umsetzung ein Gate und eine elektrische Ameise durch ein Steuermodul und interne Sensorik nachgerüstet. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf bedarf besteht in der Erweiterung des konzeptionierten Systems auf weitere Gates mit einer gemeinsamen Einsatzplanung und Steuerung des gemeinsamen Fahrzeugpools über alle Gates. Zusätzlich sollte, für einen breiteren Einsatzbereich, eine automatische Freischaltung des Systems bei Wegekreuzungen entwi-

Article is protected by German copyright law

ckelt werden und die Verladung von Nicht-Standardpaletten berücksichtigt werden.

7 Danksagung

Teile dieses Beitrags entstanden im Rahmen des Projekts ForkLoad, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) unter dem Kennzeichen KK5082920LL4 gefördert wird.

LITERATUR

[1] W. A. G. und G. Freudl, "Automatisierter stückgutumschlag - welche möglichkeiten bietet der markt dem verlader?" 1999. [Online]. Available: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1188209/fml_20131230_400_export.pdf

[2] D. Paulus, V. Seib, and J. Pellenz, "Service-roboter," in *Kundenbindung durch kosteneffiziente Service Excellence*. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, 2016, pp. 107–122. [Online]. Available: https://www.nomos-elibrary.de/document/download/pdf/uuid/0ec88f1a-7b37-389e-93ff-f631c9ef0e67

[3] L. Rolfs, D. Schweers, N. H. Hoppe, C. Petzoldt, Z. Shahwar, and M. Freitag, "Integration eines omnidirektionalen ftf in eine produktionsprozesssteuerung: Evaluierung der industriellen iot-plattform opil," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 116, no. 3, pp. 161–165, 2021. [Online]. Available: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/zwf-2021-0032/html

[4] M. Ten Hompel, T. Schmidt, and J. Dregger, *Materialflusssysteme: Förder-und Lagertechnik*. Springer-Verlag, 2018. [Online]. Available: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-56181-2

[5] A. Sochaczewski, "Technologieinformation: Automatische lkw be- und entladesysteme: Wie automatische lkw-verladung zur optimierung der logistikkette beitragen kann," 2010. [Online]. Available: https://www.ancra.nl/upload/docs/whitepaper-technologieinformation-atls-ancra-systems.pdf

[6] W. A. Günthner and G. Freudl, "Automatisierter stückgutumschlag: welche möglichkeiten bietet der markt dem verlader?" *Distribution*, no. 1-2, pp. 44–47, 1999.

[7] N. Hoppe, J. Wilhelm, C. Petzoldt, R. M. Ernits, L. Rolfs, B. Thies, and M. Freitag, "Design eines robotiksystems zur entleerung von seecontainern," *Logistics Journal: Proceedings*, no. 16, 2020. [Online]. Available: https://proc.logistics-journal.de/article/view/976/952

[8] B. Vur, L. Rolfs, D. Concheso Calvo, G. Oscar Toyos, S. Bhosle, and M. Freitag, "Optimierung eines automatisierten lkw-beladesystems für planenauflieger unter verwendung sensorgestützter umfelderkennung und einer adaptiven schutzvorrichtung," *Logistics Journal: Proceedings*, vol. 2023, no. 1, 2023. [Online]. Available: https://proc.logistics-journal.de/article/view/1077/1046

[9] T. Albrecht and G. Ullrich, "Fahrerlose transportsysteme, eine fibel mit praxisanwendungen zur technik für die planung," 2019.

[10] M. Aizat, A. Azmin, and W. Rahiman, "A survey on navigation approaches for automated guided vehicle robots in dynamic surrounding," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 33 934–33 955, 2023. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10091098

[11] J. Weber, *Logistikkostenrechnung: Kosten-, Leistungs- und Erlösinformationen zur erfolgsorientierten Steuerung der Logistik*. Springer-Verlag, 2012.

Axel Börold, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen. Addresse: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Telefon: +49 421 218-50 182,
E-Mail: bor@biba.uni-bremen.de

Jannik Liebchen, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen. Addresse: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Telefon: +49 421 218-50 111,
E-Mail: lie@biba.uni-bremen.de

Nils Hoppe, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen. Addresse: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Telefon: +49 421 218-50 181,
E-Mail: hpp@biba.uni-bremen.de

Burak Vur, M.Sc., wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen. Addresse: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Telefon: +49 421 218-50 054,
E-Mail: vur@biba.uni-bremen.de

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag, Professor im Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und geschäftsführender Direktor des BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH Addresse: Hochschulring 20, 28359 Bremen, Germany, Telefon: +49 421 218-50 001,
E-Mail: fre@biba.uni-bremen.de

Article is protected by German copyright law