

# Integration von 3D-Kamerasystemen am Gabelstapler

## Integration of 3D Camera Systems on Forklift Trucks

Steffen Kleinert  
Ludger Overmeyer

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik,  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

**D**ieser Beitrag beschreibt die Integration von lauffzeitmessenden 3D-Kamerasystemen in die Gabelzinkenspitzen eines Flurförderzeugs. Mit Hilfe der integrierten Kameras und deren ausgewerteter Aufnahmen wurde ein Assistenzsystem für die Handhabung von Ladungsträgern realisiert, das dem Fahrer des Flurförderzeugs Verfahrensempfehlungen für die Optimierung der Relativposition zwischen Gabelzinken und Ladungsträger bzw. Lagerplatz ausgibt. Neben der Vorstellung der verwendeten Kamera-Hardware und der Integration am Fahrzeug wird auch der Ablauf der Bildverarbeitung beschrieben.

[Schlüsselwörter: 3D-Bildverarbeitung, Flurförderzeuge, Maschinelles Sehen, Fahrerassistenzsysteme]

**A**bstract: This paper explains the integration of a 3D camera system into the fork-tips of a forklift truck. The cameras and the processed 3D images are used to create a driver assistance system to guide the forklift truck driver to the optimal position in front of a pallet or a storage place. The paper describes the developed hardware, the integration into the forklift truck and the image processing algorithm.

[Keywords: 3D image processing, forklift trucks, vision technology, driver assistance systems]

### 1 EINLEITUNG

Während der staplerbasierten Ein- und Auslagerung von Ladungsträgern in einem Hochregallager muss der Gabelstaplerfahrer sein Fahrzeug exakt vor der Zielpalette bzw. dem Ziellagerplatz positionieren. Erschwert wird dieser Vorgang durch Gabelstaplerkomponenten und Beladung, welche die Sicht einschränken sowie durch die vertikale Distanz zwischen Fahrer und Ziel, welche bis zu 12 Meter betragen kann. Unterstützung erhält der Fahrer bei seiner Arbeit durch bestehende Assistenzsysteme, wie z. B. Gabelzinkenkameras. Hierbei muss der Fahrer die Aufnahmen der Kameras selbstständig interpretieren und die relative Fahrzeugposition anhand seiner individuellen Erfahrung abschätzen. Zudem wird die Sicht von an den Gabelzinkeninnenseiten montierten Kameras während der Einlagerung einer aufgenommenen Palette versperrt und

stellt somit für den Einlagerungsvorgang keine Hilfe dar. Um diesen Einschränkungen entgegen zu wirken und dem Fahrer eines Gabelstaplers sowohl bei der Ein- als auch bei der Auslagerung leicht verständliche Unterstützung zukommen zu lassen, wurde ein Assistenzsystem entwickelt, das mit Hilfe von automatisch ausgewerteten 3D-Aufnahmen Verfahrensempfehlungen an den Gabelstaplerfahrer ausgibt. [OvK11, OvK12]

### 2 FUNKTIONSPRINZIPIEN OPTISCHER 3D-MESSTECHNIK

Zur optischen Erfassung dreidimensionaler Objekte im industriellen Umfeld werden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Grundprinzipien angewendet, die geometrische Messung über Triangulation (trigonometrische Erfassung) und die Entfernungsmessung anhand der Signallaufzeit. [Sil11, Pie12]

Weitere Prinzipien, wie beispielsweise „Shape from Shader“ oder interferometrische Messverfahren, sind für Anwendungen in der Logistik aufgrund ihrer geringen Reichweite und methodischer Einschränkungen der Verfahren nur von geringem Interesse und somit nicht Inhalt dieses Beitrags. [Fle03]

#### 2.1 TRIGONOMETRISCHE MESSVERFAHREN

Bei Verfahren, die anhand geometrischer Berechnungen Tiefeninformationen ermitteln, werden Aufnahmen des zu vermessenden Objekts aus verschiedenen Blickrichtungen (z. B. Stereovision) oder Aufnahmen mit einer speziellen Projektionslichtquelle (z. B. strukturiertes Licht) verwendet (Abbildung 1). Die dreidimensionalen Informationen werden aus der Verzerrung der projizierten Lichtstruktur oder den Unterschieden zwischen Aufnahmen verschiedener Blickrichtungen bestimmt. [Alt10]

Charakteristisch für diese Messmethoden ist, dass 3D-Informationen ausschließlich an Stellen bestimmt werden können, an denen Merkmalsunterschiede erkennbar sind. Stereokamerasysteme können daher beispielsweise keine Flächen erfassen, solange keine eindeutig identifizierbaren Merkmale (Verfärbungen, Strukturen etc.) zugeordnet werden können. Verfahren, die mit strukturiertem Licht arbeiten, können zudem bei einer ungüns-

tigen Farbgestaltung der Messobjekte nur erschwert zwischen formbedingter Verzerrung und farblicher Abweichung der Objektoberfläche unterscheiden. [Pie12]

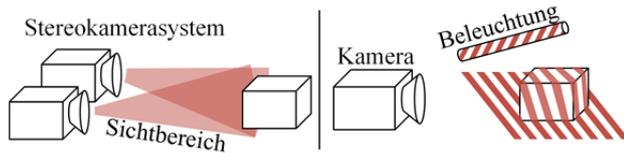


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Stereokameraprinzips (links) und der strukturierten Beleuchtung (rechts)

Durch Verbesserungen der Messverfahren wurden einige konzeptionelle Nachteile trigonometrischer Messungen reduziert, so dass, beispielsweise durch Interpolation zwischen erfassten Messwerten, zusätzliche Entfernungswerte auch an Stellen ermittelt werden können, die keine eindeutigen Merkmalsunterschiede aufweisen.

Neben den konzeptionellen Einschränkungen trigonometrischer Verfahren besteht eine gemeinsame Einschränkung, welche insbesondere für die industrielle Anwendung von Relevanz ist: Um Entfernungen erfassen zu können, ist eine fest definierte Ausrichtung der Messsystemkomponenten zueinander erforderlich (Kamera zu Kamera bei Stereovision, Kamera zu Beleuchtung bei strukturiertem Licht). Wird diese Ausrichtung verändert, sind die entfernungsbedingten Unterschiede bei den Aufnahmen durch systembedingte Unterschiede überlagert und eine korrekte Entfernungsmessung ist in diesem Fall nicht möglich. [OvK12]

## 2.2 LAUFZEITMESSENDE VERFAHREN

Das Prinzip der Laufzeitmessung basiert auf der aktiven Aussendung eines Messsignals und der Erfassung der Zeit bis zum Eintreffen der Reflexion. Dabei ist es unerheblich, ob es sich bei dem ausgesendeten Signal um Licht-, Schall- oder Radarwellen handelt, entscheidend für die Auswahl der Signalquelle sind das Übertragungsmedium und die Anwendung. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals in Luft als konstant angenommen werden kann, ist die Entfernung eines angestrahlten Objekts direkt proportional zur Laufzeit des Messsignals.

Verfahren der optischen Laufzeitmessung verwenden i. d. R. nicht sichtbares Licht im infraroten Spektralbereich. Neben Laserscannern, welche mit einer Laserstrahlquelle Lichtimpulse auf einen einzelnen Oberflächenpunkt aussenden und eine Szenerie somit sequentiell vermessen, werden zunehmend so genannte Time-Of-Flight (ToF)-Kameras verwendet (Abbildung 2). ToF-Kameras senden ein flächendeckendes, moduliertes Signal aus und erfassen sämtliche Messpunkte zeitgleich, wodurch insbesondere in Bewegung befindliche Objekte im Bild besser aufgenommen werden können. [Sil11, FDW06]

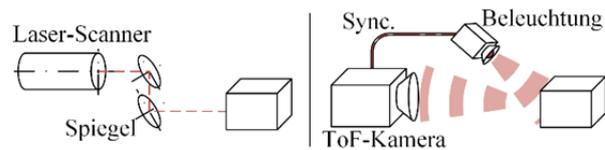


Abbildung 2. Schematische Darstellung der punktuellen Rasterung durch einen Laserscanner und der flächigen Beleuchtung durch eine ToF-Kamera

Im Gegensatz zu trigonometrischen Messverfahren sind ToF-Kameras toleranter hinsichtlich der Ausrichtung ihrer Sensorkomponenten. Eine geringfügige Änderung der Beleuchtungsrichtung hat nur geringen Einfluss auf die Entfernungsmessung. Zudem sind Kamerasysteme nach dem ToF-Prinzip kompakter und robuster als alternative 3D-Messsysteme, da sie nicht auf bewegliche Komponenten, wie Spiegel, die beispielsweise bei Laserscannern verwendet werden, angewiesen sind. [Bux02]

## 2.3 ANWENDUNGSBEREICHE UND VERGLEICH DER MESSVERFAHREN

In der industriellen Anwendung sind Laserscanner weit verbreitet, wodurch auf umfangreiche Erfahrungswerte zurückgegriffen werden kann. Weitere Vorteile dieser Technologie sind die hohe Genauigkeit, wodurch sie sich insbesondere für Vermessungsaufgaben größerer Objekte und Gebäude eignet und die Verfügbarkeit von sicherheitszertifizierten Systemen. Nachteilig ist die zumeist aufwendige Bauweise, verbunden mit einer vergleichsweise großen Anfälligkeit gegenüber Stößen und Erschütterungen.

Strukturiertes Licht und Stereovision sind ebenfalls im Bereich der Robotik verbreitet und werden in unterschiedlichen Varianten, insbesondere bei der Produktprüfung, eingesetzt (z. B. Lichtschnittsensoren) [Alt10]. Zudem werden beide Verfahren im privaten Anwendungsumfeld zum Beispiel bei Spielekonsolen eingesetzt. Der Gesten- und Bewegungssensor Kinect von Microsoft, der für die Spielekonsole Xbox entwickelt wurde, basiert auf strukturiertem Licht und erfasst dreidimensionale Benutzereingaben im Raum [Kho11]. Dieser Sensor wird inzwischen bei zahlreichen Projekten der Robotik eingesetzt. Stereovision ist insbesondere für 3D-Filmproduktionen geeignet, da das Aufnahmeprinzip dem natürlichen menschlichen Sehen entspricht.

ToF-Kamerasysteme werden zunehmend sowohl im industriellen als auch im privaten Anwenderbereich eingesetzt. ToF-Systeme finden insbesondere im Bereich Robotik und Fahrzeugtechnik Anwendung sowie bei der Mensch-Maschine-Interaktion (z.B. Microsoft Xbox One). Für die Anwendung in der Prüf- und Messtechnik sind aktuelle Systeme nur bedingt einsetzbar, da die derzeit verfügbare Auflösung mit 200 x 200 Pixel noch zu gering ist, um mit hochauflösenden Stereosystemen oder Laserscannern zu konkurrieren.

### 3 RECHNERGESTÜTZTE AUSWERTUNG VON 3D-AUFNAHMEN

Die rechnergestützte Auswertung und Verarbeitung von 2D-Kamerabildern ist heute Stand der Technik. Neben frei verfügbaren Funktionsbibliotheken (z. B. OpenCV) und „open-source“-Programmen, bieten kommerzielle Anbieter leistungsoptimierte Algorithmen für industrielle Anwendungen an.

Für den Bereich der 3D-Bildverarbeitung werden kontinuierlich neue Methoden und Algorithmen entwickelt und publiziert. Mit dem Start der Point Cloud Library (PCL) im November 2011 steht Entwicklern eine Open Source Bibliothek für 3D-Bildverarbeitungsalgorithmen zur Verfügung [RuC11]. Die PCL stellt jedoch bislang keine funktionell abgestimmte Sammlung von Methoden dar, mit der sich 3D-Bildverarbeitungsprozesse bausteinartig zusammensetzen lassen. Daher sind für neue Anwendungen i.d.R. zumindest Anpassungen an den Methoden, bis hin zu vollständigen Neuimplementierungen der Konzepte erforderlich.

Handelt es sich bei den 3D-Aufnahmen um so genannte organisierten Aufnahmen, wie sie beispielsweise von ToF-Kameras erstellt werden, ist zudem die Anwendung zahlreicher Auswertungsmethoden aus der konventionellen 2D-Bildverarbeitung möglich.

Kommerzielle Bildverarbeitungsbibliotheken enthalten in den aktuellen Programmversionen erste leistungsfähige 3D-Algorithmen, die z. B. Volumen- und Oberflächenanalysen ermöglichen [MVT13]. Mit diesen Methoden können eindeutig definierte Objekte anhand eines digitalen Modells innerhalb von 3D-Aufnahmen gefunden und deren Position bestimmt werden, um beispielsweise die Ausrichtung eines Objekts für eine Roboterhandhabung zu bestimmen.

#### 3.1 EXTRAKTION DER OBERFLÄCHENAUSRICHTUNG ALS LOKALES MERKMAL

In konventionellen 2D-Aufnahmen werden überwiegend Farb- bzw. Intensitätsunterschiede herangezogen, um für jeden Bildpunkt (Pixel) so genannte lokale Merkmale (Kanten, Ecken, Strukturen) zu identifizieren, die wiederum gesuchten Objekten und Formen innerhalb der Aufnahme zugeordnet werden.

Bildpunkte in 3D-Aufnahmen werden analog zu 2D-Bildpunkten als Voxel (Kunstwort für „volumic pixel“) bezeichnet. Bei 3D-Aufnahmen werden zu den Farb- und

Intensitätsunterschieden zusätzlich Entfernungsinformationen als aussagefähiges lokales Merkmal für jeden Voxel generiert. Anstelle der Kanten in einem 2D-Bild werden in 3D-Bildern üblicherweise zusammenhängende Flächen gesucht und analysiert. Um jedoch Flächen erfassen zu können, die sich schräg gegenüber der Kamera im Raum befinden, reichen die Entfernungswerte als alleiniges Merkmal nicht aus. Daher wird die Ausrichtung einer lokalen Fläche, bestehend aus einem Voxel und dessen Nachbarn, für jeden Voxel der Aufnahme bestimmt. Voxel mit vergleichbaren Oberflächenausrichtungen werden anschließend als zusammenhängende Oberfläche betrachtet. Mit Hilfe weiterführender Analysen können zudem dreidimensionale Kanten und Konturen anhand der Oberflächenausrichtungen sowie zusammenhängende, gewölbte oder strukturierte Flächen erfasst werden. [VGS04]

### 4 SYSTEMINTEGRATION AM FLURFÖRDERZEUG

Für die Integration eines 3D-Kamerasystems an einem Gabelstapler eignet sich das ToF-Kameraprincip aufgrund der robusten und kompakten Bauweise der Kameras besser als trigonometrische Verfahren oder Laserscanner. Der Einbau an einem Gabelstapler ist durch die Einsatzbedingungen im industriellen Umfeld geprägt, welche vergleichbare Alternativsysteme durch Stöße und Vibrationen beeinträchtigen würden.

#### 4.1 AUSWAHL DER KAMERA-EINBAUPOSITION

Entscheidend für die Funktionalität des Fahrerassistenzsystems ist die Einbauposition der Kamerasysteme am Gabelstapler. Ein Einbau beispielsweise am Gabelrücken oder der Gabelinnenseite, wie in Abbildung 3 links dargestellt, kann zwar das System schützen, der Sichtbereich der Kameras wird durch aufgenommene Ladungsträger jedoch verdeckt (vgl. Abbildung 3, rechts). Anbauten ober- oder unterhalb des Gabelrückens (Abbildung 3, links, untere Kameraposition) sowie seitlich der Lastaufnahmemittel würden konstruktive Änderungen am Gabelstapler erfordern und die Integration bei Standardsystemen erschweren. Der optimale Sichtbereich, sowohl bei einem aufgenommenen Ladungsträger als auch ohne Last und ohne umfangreiche konstruktive Änderungen am Fahrzeug, wird bei einem Einbau in die Gabelzinkenspitze erreicht (Abbildung 3, rechts). Die potentiellen mechanischen Belastungen auf die Kamera sind an dieser Einbauposition allerdings deutlich größer als an den genannten Alternativpositionen, so dass auf den geschützten Einbau des Systems besonderer Wert gelegt wurde.



Abbildung 3. Potentielle Einbaupositionen der 3D-Kamera am Gabelstapler, Links: Situation ohne Last mit Kamerapositionen in der Nähe des Gabelrückens, Rechts: Situation mit aufgenommener Last und in die Gabelzinkenspitzen integrierter Kamera

#### 4.2 KONZEPTION DES KAMERASYSTEMS

Das Standardanwendungsszenario für das Assistenzsystem sieht einen Gabelstapler im Hochregallager vor, der vom Fahrer soweit vorpositioniert wird, dass eine Ausrichtung vor der Zielpalette bzw. dem Ziellagerplatz mit einer Toleranz von bis zu 100 mm vertikalem und horizontalem Versatz sowie einer maximalen Schrägstellung von 10° gegeben ist. Die Entfernung des Gabelstaplers zur Zielposition beträgt dabei realistisch maximal 250 mm, da die Gangbreite in einem Hochregallager i.d.R. keine größeren Abstände ermöglicht. Aus diesem Anwendungsszenario und dem Einbau der 3D-Kamera in der Gabelzinkenspitze folgt, dass eine einzelne Kamera zur Erfassung des vollständigen Gabelzinkenvorfeldes nicht ausreichend ist. Daher werden zwei Kameras mit jeweils einem Öffnungswinkel von 120° integriert, so dass ein möglichst großer Bereich der Zielpalette erfasst werden kann.

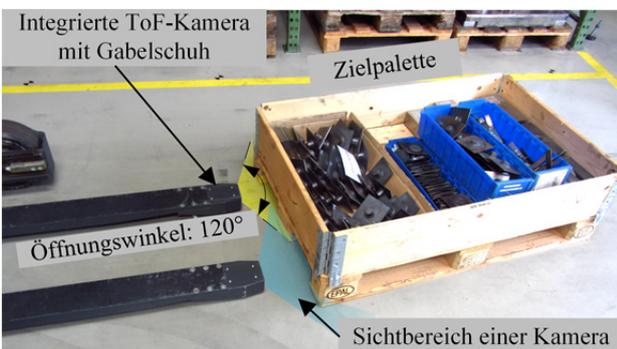


Abbildung 4. Darstellung der Sichtbereiche der in die Gabelzinken integrierten ToF-Kameras

Als Folge der Integration der Kameras in der Gabelzinkenspitze ist eine Erfassung der Einfahrtiefe in die Pa-

lette bzw. den Lagerplatz anhand der Kameraaufnahmen nicht zielführend. Daher wird ein zusätzlicher 1D-Sensor am Gabelrücken verwendet, der die Entfernung zur Regaltraverse bestimmt und somit die Einfahrtiefe erfasst.

#### 4.3 KONZEPTION DER KAMERAHARDWARE

Die Integration der Kameras in die Gabelzinkenspitze muss derart gestaltet sein, dass die Gabelzinke in ihrer Funktion nicht eingeschränkt und die Querschnittsfläche der Zinke nicht unzulässig groß wird. Zudem muss die Elektronik gegen mechanische Beschädigungen geschützt werden. Um das zu ermöglichen wurde die Kamerahardware auf mehrere Platinen verteilt, so dass das Kameragehäuse möglichst flach ist und an der Frontfläche bzw. der Gabelzinkenspitze lediglich die Optik mit dem Kamerachip und die Beleuchtung positioniert werden (Abbildung 5).

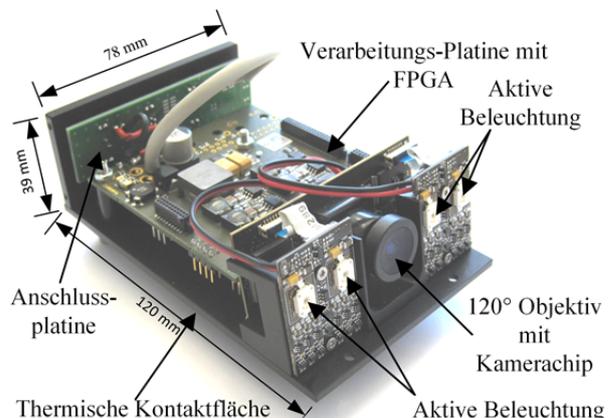


Abbildung 5. Aufbau der Kamerahardware

Die insbesondere durch die aktive Beleuchtung erzeugte Wärme wird passiv abgeleitet, wobei die Gabelzinken als Kühlkörper fungieren. Das Schutzgehäuse der Kameras ist als Gabelschuh ausgeführt (Abbildung 6), wodurch eine Demontage der Komponenten zu Test- und Präsentationszwecken mit geringem Aufwand möglich ist.

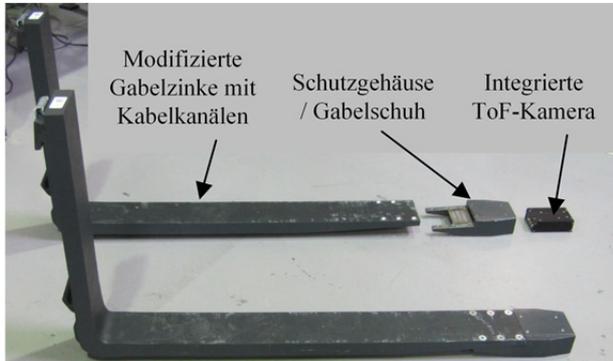


Abbildung 6. Modifizierte Gabelzinken mit Gabelschuhen als mechanisches Schutzgehäuse

Für die Aufbereitung der Rohdaten der Aufnahme ist ein zusätzlicher FPGA in die Kamera integriert, welcher die Rohdaten in Entfernungswerte umrechnet und somit den nachgeschalteten Auswertungsrechner entlastet.

## 5 AUSWERTUNG DER KAMERAUFNAHMEN

Aufgrund der Integration der Kameras in den Gabelzinkenspitzen befinden sich die Kameras bei einer auszuwertenden Aufnahme unmittelbar vor der Zielpalette und sind gewissermaßen in die Palette hinein gerichtet. Die Kontur des Ladungsträgers ist daher in den Aufnahmen nicht oder nur sehr eingeschränkt zu erkennen und kann somit nicht als Orientierungsmerkmal verwendet werden. Für die Positionserkennung werden daher die Seitenflächen der Ladungsträgeröffnungen verwendet und für beide Kameras jeweils eine Relativposition in horizontaler und vertikaler Richtung sowie die relative Schrägstellung berechnet. [KIO12, OKR13]

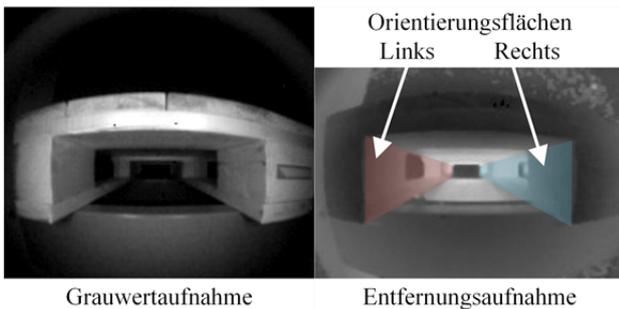


Abbildung 7. Aufnahme der linken Öffnung einer Palette durch eine integrierte Kamera. Entfernungswerte (dunkle Pixel sind Näher) mit eingefärbten Orientierungsflächen

Der Auswertungsablauf (Abbildung 8) beginnt mit der Minimierung von Messwertstreuungen indem mehrere

Aufnahmen zu einer kombiniert und über eine Mittelwertbildung angeglichen werden.

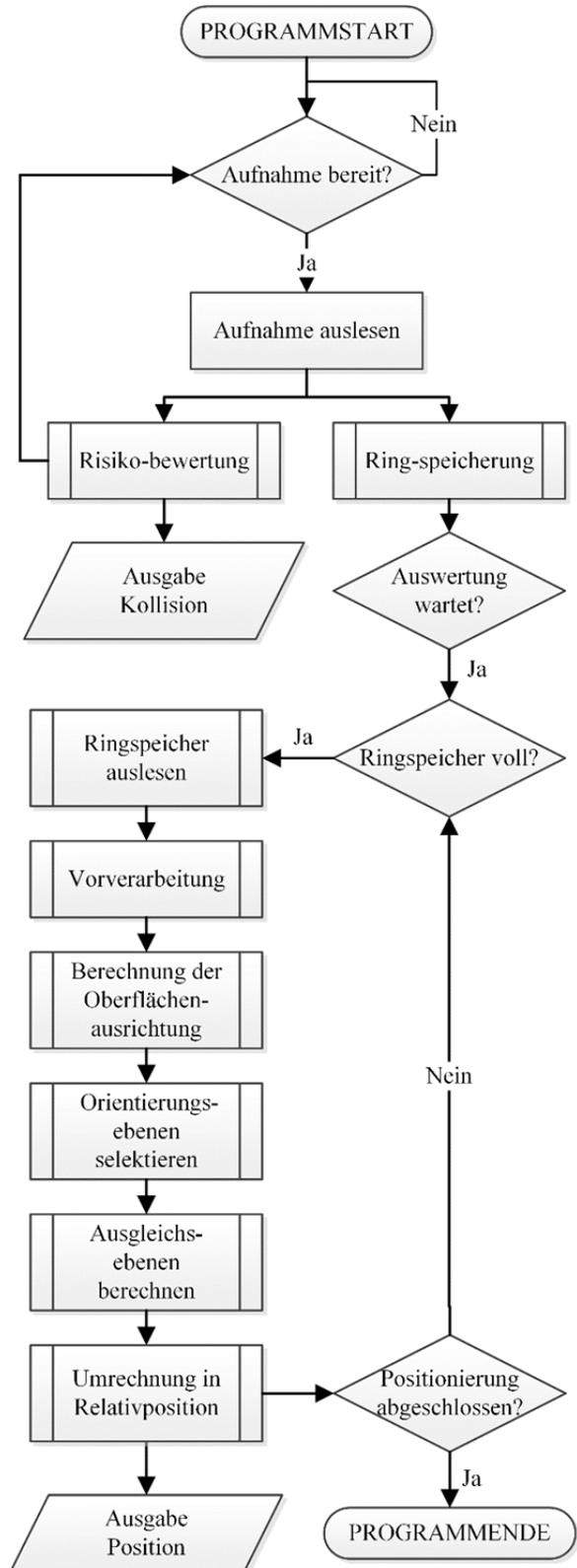


Abbildung 8. Ablaufdiagramm des Auswertungsalgorithmus

Durch konventionelle 2D-Filter werden die Aufnahmen zusätzlich geglättet und das Messrauschen verringert.

Vor der eigentlichen Auswertung der Aufnahmen zur Positionserkennung folgt zunächst die Überprüfung auf eine Kollisionsgefahr. Zu diesem Zweck werden die Aufnahmen auf Messpunkte überprüft, welche sich in unmittelbarer Nähe zu den Kameras bzw. Gabelzinkenspitzen befinden. Sollten derart riskante Messwerte gefunden werden und sind diese nicht als Messfehler zu betrachten, so wird eine Warnung an den Gabelstaplerfahrer ausgegeben.

### 5.1 BERECHNUNG DER OBERFLÄCHENAUSRICHTUNG

Das aussagefähigste lokale Merkmal ist die Oberflächenausrichtung. Um diese zu bestimmen, wird ein geometrisches Verfahren verwendet, das die besonderen Gegebenheiten der verwendeten ToF-Kamera sowie der gesuchten Flächen berücksichtigt.

Die Kameras liefern so genannte organisierte Aufnahmen, bei denen in der Aufnahme benachbarte Pixel auch in der Realität als benachbart betrachtet werden können. Durch diesen Umstand ist eine rechenintensive Definition von lokalen Nachbarschaften erheblich zeitsparender als bei nicht organisierten Aufnahmen. Zudem werden ebene und zusammenhängende Flächen in horizontaler und vertikaler Orientierung gesucht. Für die Bestimmung der Oberflächenausrichtung zur Selektion von Bildbereichen reicht daher eine Bestimmung der Steigungsunterschiede zwischen benachbarten Pixeln in Zeilen und Spaltenrichtung der Kameraaufnahme aus.

### 5.2 SELEKTION DER ORIENTIERUNGSFLÄCHEN

Die Orientierungsflächen für die Positionsbestimmung zeichnen sich durch gemeinsame Oberflächenrichtungen innerhalb eines zu erwartenden Bereichs (nahezu parallel zur Kamerasichtachse) aus. Anhand einer Häufigkeitsanalyse der Oberflächenausrichtung werden potentielle Bereiche zusammengefasst, anschließend gefiltert und die 3D-Koordinaten aller zur Fläche gehörenden Voxel abgerufen. Die endgültige Bestimmung der räumlichen Lage der jeweiligen Orientierungsfläche ist durch eine Ausgleichsfläche über alle ausgewählten Voxel sowie durch den Schwerpunkt der 3D-Koordinaten gegeben.

### 5.3 AUSGABE ALS VERFAHREMPFEHLUNGEN

Nachdem für beide Ladungsträgeröffnungen die Orientierungsflächen bestimmt und die relative Position der Kameras zur Zielpalette berechnet ist, werden die Verfahrensempfehlungen auf dem Terminal des Gabelstaplers ausgegeben. Bei der Ausgabe werden gezielt grafische Symbole wie Pfeile, Skalen und Signalfarben verwendet, um eine möglichst einfache und intuitive Verständlichkeit zu gewährleisten.

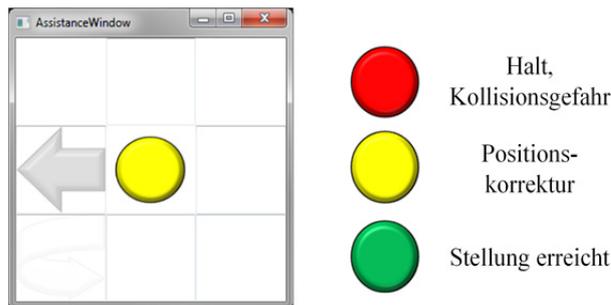


Abbildung 9. Links: Darstellung der Verfahrensempfehlung auf dem Fahrzeugterminal, Aktuelle Empfehlung: Positionskorrektur nach links, Rechts: Statussignale für die Verfahrensempfehlung

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Artikel beschreibt ein Assistenzsystem für Gabelstapler, welches dem Fahrer bei der Feinpositionierung vor einer Zielpalette oder einem Ziellagerplatz unterstützt. Um eine optimale Kamerasicht sowohl bei einem nicht beladenen Fahrzeug, als auch bei einer aufgenommenen Palette zu ermöglichen, wurden die auf dem Laufzeit-Prinzip basierenden 3D-Kameras in die Spitzen der beiden Gabelzinken integriert. Bei der automatisierten Auswertung der Aufnahmen werden die Innenseiten des Ladungsträgers als Orientierungsflächen für die Bestimmung der relativen Position verwendet und dem Fahrer leicht verständliche Verfahrensempfehlungen für die Positionskorrektur angezeigt. Neben der Position werden auch Kollisionsrisiken erfasst und entsprechende Warnungen ausgegeben.

## FÖRDERHINWEIS

Das Forschungsvorhaben ISI-WALK (Intelligente Schnittstellen in Wandlungsfähigen Lieferketten), auf dessen Ergebnissen dieser Beitrag beruht, wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzepts „Forschung für die Industrie von morgen“ (Förderkennzeichen 02PR2002) gefördert. Die Betreuung des Projektes erfolgt über den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT).

LITERATUR

- [RuC11] Rusu, R. B.; Cousins, S.: "3D is here: Point Cloud Library (PCL)", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, Shanghai, ISSN 1050 4729
- [OvK11] Overmeyer, L.; Kleinert, S.: „3D-Kamerasysteme assistieren bei der Ladungshandhabung“, MM MaschinenMarkt Ausgabe 39/2011 S.42-45, Vogel Business Media Verlag, ISSN 0341-5775
- [OvK12] Overmeyer, L.; Kleinert, S.: „Das Lasthandling verbessern“, f+h Ausgabe 1-2 S.20-22, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz, ISSN 0341-2636
- [KIO12] Kleinert, S.; Overmeyer, L.: "Using 3D camera technology on forklift trucks for detecting pallets", Proceedings of the Distributed Intelligent Systems and Technologies Workshop (DIST), 2012, S. 55-62. St. Petersburg, Russland: Distributed Intelligent Systems Department, St. Petersburg State Polytechnical University
- [Fle03] Fleischer, M.: „Signalverarbeitung in der optischen 3D-Messtechnik“, Dissertation, Hrsg. Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart, ISBN 3-923-560-48-6
- [Bux02] Buxbaum, B.: "Optische Laufzeitentfernungsmessung und CDMA auf Basis der PMD-Technologie mittels phasenvariabler PN-Notation", Dissertation, Shaker Verlag. Aachen 2002, ISBN 3-8265-9805-9
- [MVT13] MVTEC Software GmbH (Hrsg.): „HALCON the Power of Machine Vision“, Produktbroschüre, www.mvtec.com Stand 05.2013
- [Pie12] Piepenburg, B.: „Geometrieunabhängige automatisierte Kommissionierung mithilfe von industrieller Bildverarbeitung und künstlicher Intelligenz“ aus „Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik“, Band 23, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen 2012, ISBN 978-3-8440-0980-4
- [Alt10] Alt, G.; Stadler, E.: „Intelligente optoelektrische Sensoren“ aus „Die Bibliothek der Technik“, Band 328, Süddeutscher Verlag onpact, München 2010, ISBN 978-3-86236-004-8
- [Sil11] Schiller, I.: „Dynamic 3D Scene Analysis and Modeling with a Time-of-Flight Camera“, Dissertation, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2011, ISBN 978-3-8423-7189-7
- [FDW06] Fardi, B. e. a.: "Obstacle detection and Pedestrian Recognition Using A 3D PMD Camera", Intelligent vehicle Symposium 2006, Tokyo, Japan
- [VGS04] Vosselman, G.; Gorte, B. G.; Sithole, G.; u. Rabbani, T.: "Recognising structure in laser scanner point clouds", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 46(8), 33-38.
- [OKR13] Overmeyer L.; Kleinert S.; Radosavac M.; Krühn T.; Heißmeyer S.; Bentlage A.: „Kognitive Transportsysteme durch optische Technologien“ , Wt-online. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2013, Nr. 2, S. 139-145
- [Kho11] Kohshelham, K.: „Accuracy Analysis of kinect depth data“, International Achieves of Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 38, 2011, Calgary Canada

---

**Dipl.-Ing. Steffen Kleinert**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

**Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**, Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Adresse: Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Phone: +49 511 762-18159, Fax: +49 511 762-4007,  
E-Mail: steffen.kleinert@ita.uni-hannover.de