

# Erkennung von freistehenden Behältern für die Feinpositionierung eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs

Detection of freestanding containers for the fine positioning of an automated guided vehicle

Heinz Huber<sup>1</sup>  
Mathias Rotgeri<sup>1</sup>  
Guido Follert<sup>1</sup>  
Michael ten Hompel<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Germany  
<sup>2</sup> Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund, Germany

**I**n modernen und flexiblen Produktionsumgebungen müssen Fahrerlose Transportfahrzeuge für spezifische Aufgaben die Position einzelner Objekte im Raum mit geringen Toleranzen erkennen können. In dieser Studie wird am Beispiel von FLIP<sup>®</sup>, einem Fahrzeug zur infrastrukturlosen dezentralen Behälterlagerung, die Positionserfassung freistehender Behälter untersucht. Dafür werden zwei unterschiedliche Sensorsysteme und Verfahren für die Erfassung der Behälterposition relativ zur momentanen Fahrzeugposition erprobt.

[Schlüsselwörter: Fahrerloses Transportfahrzeug, FTF, Positionierung, Erkennung, Behälter]

**I**n modern and flexible production environments, automated guided vehicles (AGV) must be able to detect the position of individual objects in space with low tolerances for specific tasks. In this study, the position detection of freestanding containers is investigated using the example of FLIP<sup>®</sup>, a vehicle for infrastructure-less decentralized container storage. Two different sensor systems and methods for the detection of the container position relative to the current vehicle position will be tested.

[Keywords: Automated Guided Vehicle, AGV, positioning, detection, bin]

## 1 EINLEITUNG

Der Einsatz infrastrukturloser Logistikkonzepte und insbesondere die Mensch-Maschine-Kollaboration sind zentrale Bestandteile aktueller Forschungsaktivitäten für die Logistik. In infrastrukturlosen Arbeitsumgebungen manipulieren Menschen die Ladungsträger und ordnen sie zur Übergabe an Roboter ohne Fixpunkte und daher mit größeren Toleranzen im Raum an. Die Erkennung der exakten Position dieser Ladungsträger relativ zur Fahrzeugposition

mit einer anwendungsspezifisch hohen Genauigkeit obliegt den Fahrerlosen Transportfahrzeugen in einem System.

Für die Sensorik und Steuerung Fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) bedeutet eine infrastrukturlose Anwendungsumgebung die Entwicklung innovativer anforderungsspezifischer Lösungen.

Diese Studie untersucht am Beispiel von FLIP<sup>®</sup>, einem Fahrzeug zur infrastrukturlosen dezentralen Behälterlagerung, die Möglichkeiten zur Positionserfassung freistehender Behälter und bewertet die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle.

Das Fahrerlose Transportfahrzeug FLIP<sup>®</sup> (*Flexible Lifter for Intralogistics and Production*) nimmt Behälter und Behälterstapel direkt vom Boden auf, indem er sie während des Fahrens mit seinen verstellbaren Radarmen beidseitig umschließt. Die Verstellung der beiden Radarme besteht jeweils aus einem Koppelgetriebe mit Spindeltrieb, das die Radbasis verkürzt und dabei über einen Hebel den Behälter zentriert und anhebt. Dadurch wird eine sehr kompakte Bauweise erreicht und es können Übergabepositionen auch bei engen Platzverhältnissen realisiert werden. FLIP<sup>®</sup> benötigt keine Übergabestation und kann Behälter jederzeit an beliebiger Position absetzen und aufnehmen.

Für eine zuverlässige Lastaufnahme muss FLIP<sup>®</sup> einen auf dem Hallenboden freistehenden Behälter oder Behälterstapel erkennen und anschließend an diesen heranfahren. Durch die kompakte Bauform mit Fokus auf eine möglichst geringe Breite des Fahrzeugs sind bei der Zielfahrt nur geringe Abstände zwischen Lastaufnahmemittel und Behälter vorhanden. Daher ist eine präzise Detektion der Verschiebung sowie Drehung des Behälters von einer erwarteten Sollposition notwendig.

Diese Studie bietet einen Überblick über die Anforderungsdefinition allgemeiner Anwendungsfälle in der infrastrukturlosen Logistik. Aus den allgemeinen und konkreten

Anforderungen an die Behältererkennung (Abmessungen, Abstand und Winkel der Behälterkanten relativ zum Fahrzeug) werden zunächst die relevanten Koordinaten extrahiert und dann Sensorsysteme vorgestellt, die zu deren Bestimmung geeignet sind. Die Entwicklung der Software für die Fahrzeugsteuerung berücksichtigt die spezielle Kinematik des FLIP<sup>®</sup> mit einem kompakten *Fahr-/Lenk-Modul* und die daraus resultierende Bahnplanung mit differenzierten Bewegungsphasen. Die Schnittstellen zur Sensorik einerseits und zu den Fahr-/Lenkantrieben andererseits werden als Software-Module in die Fahrzeugsteuerung implementiert. Die Messdaten der Positionier-Sensorik und der allgemeinen Lokalisierung werden fusioniert, um in Versuchsreihen die Genauigkeit der prototypischen Realisierung zu validieren.



Abbildung 1. Prototyp von FLIP<sup>®</sup>

Aus den dokumentierten Versuchsergebnissen werden Maßnahmen zur Optimierung sowie Erkenntnisse für weitere Anwendungsfälle abgeleitet.

## 2 ANFORDERUNGEN AN FTF IN INFRASTRUKTURLOSER EINSATZUMGEBUNG

Die Vielfalt und schnelle Veränderung moderner Supply-Chain Netzwerke erfordern flexible Lösungen in Produktion und Logistik. Fahrerlose Transportfahrzeuge nehmen daher stark an Bedeutung für den innerbetrieblichen Materialfluss zu.

Ein geringer Umfang an benötigter Infrastruktur für den Betrieb eines Systems ein wesentlicher Faktor für seine Flexibilität. Treiber für eine solche Infrastrukturreduktion können allgemeine Flexibilitätsanforderungen bzw. die Wandelbarkeit eines Transportsystems, die temporäre Nutzung von Immobilien, schneller Auf- und Abbau und eine bessere Skalierbarkeit sein [BF17]. Fahrerlose Transportfahrzeuge haben hier gegenüber fest installierter Förder-technik deutliche Vorteile, da insbesondere die Skalierbarkeit des Transportsystems in einem größeren Maße gegeben ist.

In solchen infrastrukturreduzierten Arbeitsumgebungen manipulieren Menschen Objekte ohne Fixpunkte und

ordnen sie daher mit größeren Toleranzen im Raum an. Insbesondere bei Objekten, die eine direkte Interaktion mit Robotern oder FTF erfahren, benötigt die Maschine die Fähigkeit, diese zu sicher zu erkennen. Die Erkennung der exakten Position der Objekte relativ zur eigenen Position in einer anwendungsspezifisch hohen Genauigkeit obliegt den Fahrerlosen Transportfahrzeugen in einem System.

## 3 AUFGABENSTELLUNG

FLIP<sup>®</sup> ist ein Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) für den Transport einzelner oder mehrerer senkrecht aufeinander gestapelter Behälter. Im Folgenden wird der Begriff *Behälter* synonym für einzelne oder mehrere, gestapelte Kleinladungsträger (KLT) verwendet. Das FTF kann mit seinem Lastaufnahmemittel (LAM) den Behälter bzw. Behälterstapel direkt vom Boden aufnehmen und am Zielpunkt wieder absetzen.

Zur Lastaufnahme muss FLIP<sup>®</sup> mit einer geeigneten Sensorik einen auf dem Hallenboden freistehenden Behälter erkennen und anschließend an diesen heranfahren. Durch die kompakte Bauform des Fahrzeugs sind nur geringe Abstände zwischen Lastaufnahmemittel und Behälter vorhanden. Daher ist eine präzise Detektion der seitlichen *Verschiebung* sowie der *Drehung* des Behälters von einer erwarteten *Sollposition* notwendig.

Zur Spezifikation der Anforderungen an diese Sensorik und an die Auswertung der Sensor-Signale durch die Fahrzeugsteuerung werden zunächst die zu erfassenden physikalischen Größen und die Randbedingungen des Einsatzszenarios beschrieben.

### 3.1 KOORDINATENSYSTEME

#### 3.1.1 ABSOLUTES KOORDINATENSYSTEM

Die Koordinaten der Aufnahme- und Abgabepositionen sowie die Fahrtroute von der Quell- zur Zielposition - ggf. mit Zwischenpositionen - werden durch ein überlageretes Transportleitsystem an die Fahrzeugsteuerung übertragen.

Hierzu wird ein *Absolutes Koordinatensystem* verwendet, das auf dem Grundriss des Einsatzbereichs des FTF basiert. In der Regel ist dies ein kartesisches Koordinatensystem mit dem Ursprung  $O_W$  in dem die  $xy$ -Ebene die Hauptfahrfläche darstellt. Zur Bestimmung der absoluten Position ist FLIP<sup>®</sup> mit einem *Navigationsensor* ausgerüstet, der die erfassten Positionsdaten an die Fahrzeugsteuerung überträgt. Das Navigationsensor-System wird in dieser Studie nicht näher betrachtet.

Die Position des Fahrzeugs im absoluten Koordinatensystem wird durch die Pose  $P_{v,w}$  mit den Komponenten  $x_{v,w}$ ,  $y_{v,w}$ , und  $p_{v,w}$  beschrieben. Dabei stellt  $p_{v,w}$  die Orientierung um die senkrechte Rotationsachse ( $z$ -Achse) dar.

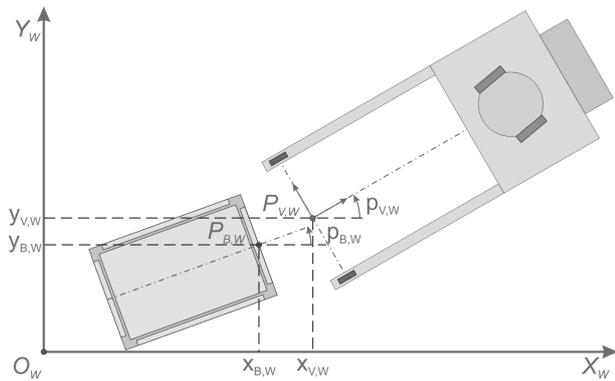


Abbildung 2. Pose des Fahrzeugs  $P_{V,W}$  und Pose eines Behälters  $P_{B,W}$  im absoluten Koordinatensystem mit dem Ursprung  $O_W$

Die Position des aufzunehmenden Behälters wird analog dazu durch die Pose  $P_{B,W} = (x_{B,W}, y_{B,W}, p_{B,W})$  beschrieben. Dabei wird als Bezugspunkt am Behälter die Mitte der dem Fahrzeug zugewandten Schmalseite gewählt.

Beide Posen sind mit einer Toleranz  $\Delta P_{V,W}$  bzw.  $\Delta P_{B,W}$  behaftet. Die tatsächliche Position des Fahrzeugs kann aufgrund von Messfehlern des Navigationssensors von der Ist-Position abweichen, die von der Fahrzeugsteuerung ermittelt und ggf. an ein Transportsystem gemeldet wird.

Die tatsächliche Position des Behälters kann von der Sollposition abweichen, wenn der Behälter z.B. händisch auf dem Boden abgesetzt wurde oder wenn er nachträglich – z.B. durch Anstoßen – verschoben wurde.

### 3.1.2 LOKALES (FAHRZEUG-BEZOGENES) KOORDINATENSYSTEM

Jeder am Fahrzeug montierte Sensor zur Erkennung und Positionsbestimmung eines Behälters liefert seine Messwerte in Bezug auf die aktuelle Position des Fahrzeugs.

Zur Auswertung z.B. von Entfernungsmesswerten wird daher ein *lokales*, auf das Fahrzeug bezogenes Koordinatensystem definiert. In Anlehnung an [ISO9787] ist dies ebenfalls ein kartesisches Koordinatensystem, dessen  $xy$ -Ebene parallel zur  $xy$ -Ebene des absoluten Koordinatensystems orientiert ist.

Die  $x$ -Achse weist in die Hauptfahrrichtung des Fahrzeugs, die  $y$ -Achse in Fahrrichtung nach links und die  $z$ -Achse senkrecht nach oben. Der Ursprung des lokalen Koordinatensystems liegt in der Mitte der Verbindungslinie der beiden Hinterräder (s. Abbildung 4).

### 3.2 BEHÄLTERERKENNUNG

Für die zu erkennenden Behälter werden folgende Kennzahlen und Randbedingungen angenommen:

- KLT mit einer Länge  $L_B = 600$  mm und Breite  $W_B = 400$  mm (Nennmaß)
- Höhe mindestens 200 mm  
FLIP® kann Stapel von bis zu 3 Behältern aufnehmen und transportieren, es wird aber stets die Position des untersten Behälters bestimmt
- Abgerundete Außenkanten, Radius ca. 15 mm
- An den Stirnseiten je eine Griffmulde, Tiefe  $L_R = 25 - 30$  mm, Breite  $W_R = 280$  mm
- Einzug an der Unterseite, Tiefe 15 mm, Höhe 10 mm, zum Unterfassen des LAM
- Material Polypropylen, unterschiedliche Farben nach [VDA4500]
- Eine Identifizierung der Behälter durch optische Kennzeichnung (Barcode / 2D-Code) oder z.B. RFID wurde im Rahmen dieser Studie nicht gefordert.

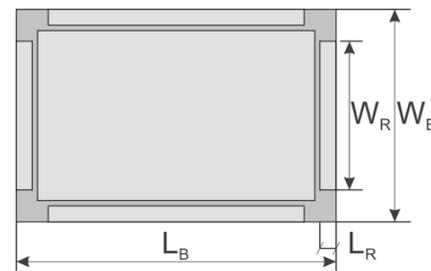


Abbildung 3. KLT mit Griffmulde (Draufsicht)

Die Sensorik zur Behältererkennung muss beim Anfahren eines aufzunehmenden Behälters die relative Pose dieses Behälters  $P_{B,V}$  in Bezug auf das Fahrzeug in dessen lokalem Koordinatensystem bestimmen.

Die Pose  $P_{B,V}$  besteht aus den Komponenten

- $x_{B,V}$  Abstand der Behältervorderseite zum Fahrzeug-Bezugspunkt in Längsrichtung
- $y_{B,V}$  Seitlicher Versatz der Behältervorderseite zur Fahrzeug-Längsachse
- $p_{B,V}$  Verdrehwinkel der Behälterlängsseiten zur Fahrzeug-Längsachse

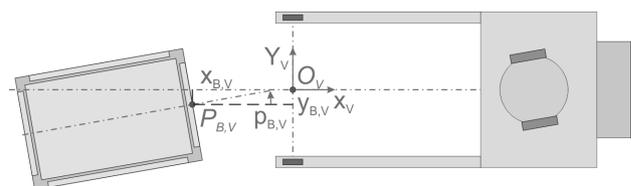


Abbildung 4. Relative Pose  $P_{B,V}$  des Behälters im lokalen Koordinatensystem mit dem Ursprung  $O_V$

## 4 DAS FAHRERLOSE TRANSPORTFAHRZEUG FLIP®

### 4.1 FAHRWERK

Das Fahrwerk des FLIP® besteht aus zwei angetriebenen Vorderrädern und zwei nicht angetriebenen Hinterrädern. Die Vorderräder sind mit einem geringen seitlichen Abstand in einem kompakten *Fahr-/Lenk-Modul (FLM)* angeordnet, das um eine vertikale Achse (Drehpunkt  $C_P$ ) rotieren kann. Die Winkelausrichtung des FLM gegenüber dem Fahrzeugrahmen wird als *Lenkwinkel  $P_S$*  bezeichnet. Für die Bewegung des Fahrzeugs verhält sich das FLM wie ein einzelnes, angetriebenes Vorderrad, d.h. das Fahrwerk des FLIP® kann bei der Kategorisierung nach [VDI2510] als *Dreirad* betrachtet werden.

Die Anordnung der zwei angetriebenen Vorderräder in dem Fahr-/Lenk-Modul bildet einen *Differentialantrieb*, d.h. der Lenkwinkel wird durch eine Drehzahldifferenz der beiden Antriebsmotoren verändert.

Drehbewegungen des gesamten Fahrzeugs erfolgen somit um einen Drehpunkt  $C_R$ , der auf der geometrischen Verbindungslinie der Hinterräder liegt. Bei einem Lenkwinkel von Null befindet sich dieser *Momentanpol* in unendlicher Entfernung, d.h. das Fahrzeug fährt geradeaus. Bei zunehmendem Lenkwinkel befindet sich der Momentanpol außerhalb der Fahrzeugkontur, d.h. das Fahrzeug befährt einen Kreisbogen mit dem Momentanpol als Mittelpunkt. Bei größerem Lenkwinkel verschiebt sich der Momentanpol zur Fahrzeugmitte hin. Bei einem Lenkwinkel von  $\pm 90^\circ$  befindet sich der Momentanpol genau auf der geometrischen Fahrzeug-Längsachse; das Fahrzeug rotiert dann um den Mittelpunkt der Verbindungslinie der Hinterräder.

Die *Hüllkurve*, d.h. die vom Fahrzeug während der Bewegung überfahrene Fläche, wird durch einen Kreis mit dem Radius  $R_E$  um den jeweiligen Momentanpol begrenzt. Der Radius der Hüllkurve wird durch das am weitesten vom Momentanpol entfernte Bauteil an der Fahrzeugvorderseite bestimmt.

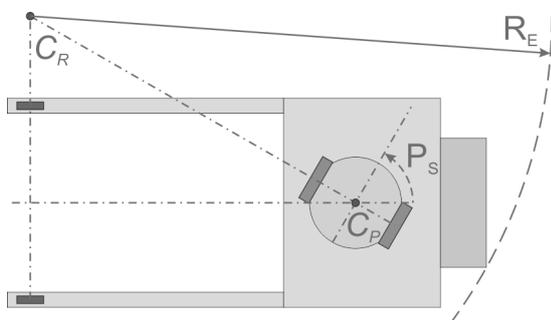


Abbildung 5. Fahr-/Lenk-Modul des FLIP® mit angetriebenen Vorderrädern und Drehpunkt  $C_P$ , Momentanpol  $C_R$  auf der Verbindungslinie der Hinterräder, Hüllkurve mit Radius  $R_E$  um den Momentanpol

### 4.2 LASTAUFNAHMEMITTEL (LAM)

Das LAM des FLIP® besteht aus zwei Radarmen an der Hinterseite des Fahrzeugs mit einer variablen Basislänge. Zum Aufnehmen eines Behälters fährt das Fahrzeug rückwärts auf den Behälter zu, bis beide Radarme den Behälter seitlich umschließen. Anschließend wird die Radbasis verkürzt; durch eine mechanische Vorrichtung wird der Behälter dabei angehoben und zugleich im LAM zentriert.

Bei dieser Hubbewegung wird der Abstand zwischen dem Drehpunkt des Fahr-/Lenk-Moduls und dem kinematischen Mittelpunkt (Radstand  $WB$ ) verkürzt. Zum Absetzen eines Behälters an der Zielposition wird das LAM durch Verlängern der Radbasis wieder abgesenkt; dabei wird auch der Radstand verlängert.

Die Änderung des Radstands bewirkt bei unverändertem Lenkwinkel eine Verschiebung des Momentanpols und damit des Kurvenradius; soll ein gegebener Kurvenradius beibehalten werden, muss die Fahrzeugsteuerung den Lenkwinkel verändern.

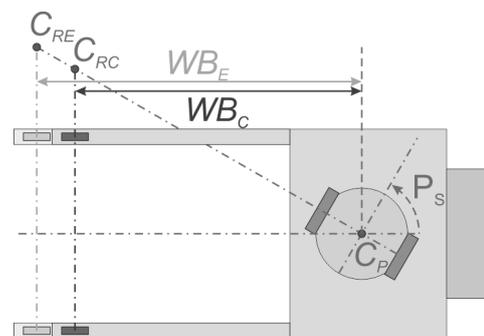


Abbildung 6. Momentanpol  $C_{RC}$  und Radstand  $WB_C$  bei eingezogenem / angehobenem LAM  
 Momentanpol  $C_{RE}$  und Radstand  $WB_E$  bei ausgefahrenem / abgesenktem LAM

### 4.3 FAHRZEUGSTEUERUNG

Die Bewegung des Fahrzeugs wird durch Vorgabe der Geschwindigkeits-Sollwerte für die Antriebe der beiden Vorderräder bestimmt. Die Fahrzeugsteuerung muss dazu die oben genannten Besonderheiten der Kinematik des FLIP® berücksichtigen:

- Die Drehzahl jedes Fahrantriebs wird durch Überlagerung der gewünschten Geschwindigkeit in Fahrzeug-Längsrichtung (*Translationsgeschwindigkeit*) und der Drehung um den Momentanpol (*Rotationsgeschwindigkeit*) bestimmt.
- Bei der Berechnung des Lenkwinkels, der zum Fahren eines vorgegebenen Bahnradius erforderlich ist, muss der vom Beladungszustand, d.h. von der Position des LAM, abhängige Radstand berücksichtigt werden.

Die Hardware der Fahrzeugsteuerung besteht aus einem Beckhoff Embedded PC mit EtherCAT I/O Klemmen zum Anschluss der Sensorik und Aktorik; als Software läuft darauf ein TwinCAT 3 PLC System.

#### 4.4 ANBRINGUNG DER SENSOREN

Die kompakte Bauweise des FLIP<sup>®</sup> bedingt Restriktionen für den Einbau von Sensoren zur Behältererkennung. Die hinteren Ausleger (Radarme) des Fahrwerks haben eine Breite von nur 50 mm, so dass hier keine voluminösen Sensoren wie z.B. messende Laserscanner angebracht werden können.

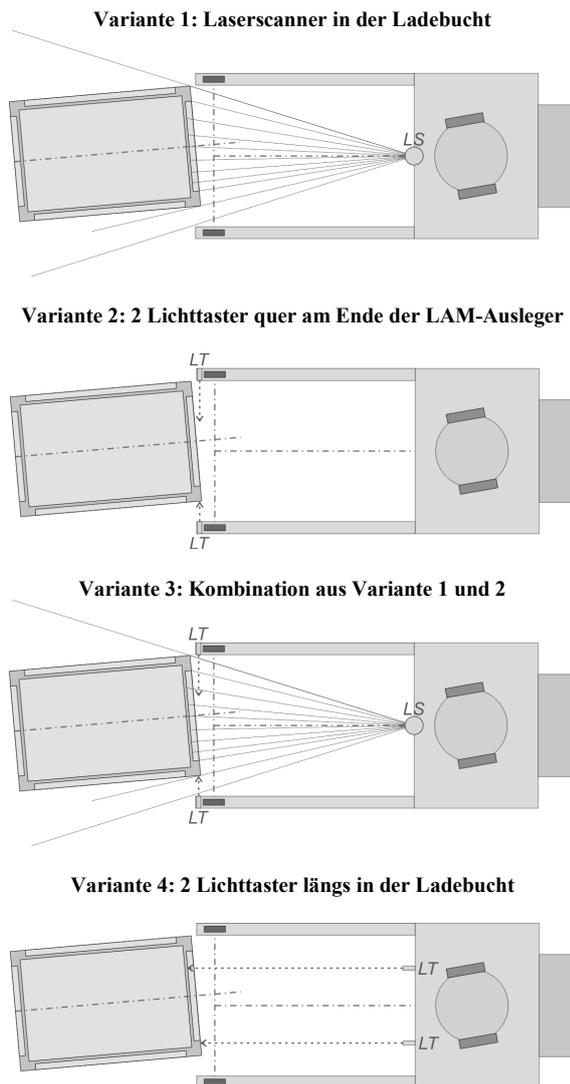


Abbildung 7. Untersuchte Einbaupositionen für Lichttaster (LT) und Laserscanner (LS)

Der größte Bauraum steht an der Rückseite des Fahrzeugvorderteils vor der Ladebucht zur Verfügung. Der Erfassungsbereich eines hier montierten optischen Sensors (Kamera, messender Laserscanner) wird allerdings seitlich durch die hinteren Ausleger begrenzt.

## 5 SENSOREN ZUR BEHÄLTERERKENNUNG

Nach einer Vorauswahl wurden ausschließlich berührungslos messende, optische Sensoren betrachtet. Diese werden näher unterschieden in

- 1-dimensionale Messsysteme (Lichttaster mit festem Schalterpunkt, messende Lichttaster)
- 2-dimensionale Messsysteme (LiDAR Sensoren, messende Laserscanner)
- 3-dimensionale Messsysteme (TOF-Kameras)

Nach einer Marktrecherche verfügbarer Sensoren, die auch die oben genannten Anforderungen an die mechanische Einbausituation erfüllen, wurden schließlich drei Typen ausgewählt und zum direkten Vergleich unterschiedlicher Messprinzipien in das Versuchsfahrzeug eingebaut:

- Reflexions-Lichttaster SICK WTT12LC-B2543, Messbereich 50 – 1800 mm, Schnittstelle: IO-Link
- Optischer Abstandssensor Leuze ODSL 8/C66-200-S12, Messbereich 20 – 200 mm, Schnittstelle: Analog-4 – 20 mA
- 2D-LiDAR Sensor SICK TIM361, Messbereich 50 mm – 10 m, Schnittstelle: TCP/IP

### 5.1 MESSDATENAUSGABE

Die Sensoren haben unterschiedliche Schnittstellen zur Messdatenausgabe. Zur Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung wurden die entsprechenden EtherCAT I/O-Klemmen an den Steuerungsrechner angeschlossen:

- *Analog-Eingangsklemme 4 – 20 mA*  
 Die Entfernungsmesswerte sowie die Statusinformationen „Messwert ok / zu nah / zu weit“ werden mit jedem Programmzyklus der Software-PLC (5 ms) ausgelesen. Die Auflösung ist dabei durch den Sensor begrenzt (laut Datenblatt 0,1 - 0,2 mm).
- *IO Link Masterklemme*  
 Die Entfernungsmesswerte werden mit jedem Programmzyklus der Software-PLC mit einer Auflösung von 1 mm ausgelesen. Die Statusinformationen „Messwert ok / zu nah / zu weit“ werden nur auf Anforderung durch das PLC Programm übertragen, die Antwortzeit beträgt dabei bis zu 190 ms.

Die Entfernungsmesswerte des TIM Laserscanners werden über eine TCP/IP Schnittstelle an den Steuerungsrechner übertragen. Die Entfernungsauflösung beträgt 1 mm, die Winkelauflösung 1/3° und die Scanfrequenz 15 Hz.

## 6 ABLAUF DER LASTWECHSELAKTION

### 6.1 BEHÄLTER AUFNEHMEN

Das Aufnehmen eines Behälters ohne Feinpositionierung erfolgt typischerweise in folgenden Schritten:

1. Das Transportsystem beauftragt ein FTF, zu einer Zwischenposition in der Nähe des aufzunehmenden Behälters zu fahren. Diese Zwischenposition befindet sich im absoluten Koordinatensystem an der Pose  $P_{Z1,W}$ ; der Behälter befindet sich an der Pose  $P_{B,W}$ .
2. Das unbeladene FTF fährt diese Zwischenposition an; dazu vergleicht die Navigations-Software in der Fahrzeugsteuerung ständig die vom Navigationssensor erfasste Ist-Position mit der durch die Bahnplanung vorgegebenen Soll-Position und regelt damit die Soll-Geschwindigkeiten der Fahrtriebe. Während der Fahrt kann das LAM des FLIP® angehoben werden, um die Bodenfreiheit zu erhöhen.

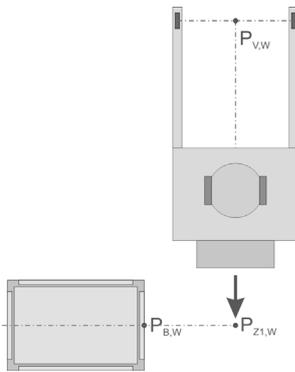


Abbildung 8. Lastaufnahme – Schritt 1 und 2

3. Das FTF hält an der Zwischenposition an und senkt ggf. das LAM ab. Damit verlängert sich der Radstand des Fahrzeugs und der Bezugspunkt für die Navigation verschiebt sich. Nach Absenken des LAM befindet sich der Ursprung des lokalen Koordinatensystems  $O_V$  an der Pose  $P_{Z1,W}$ .

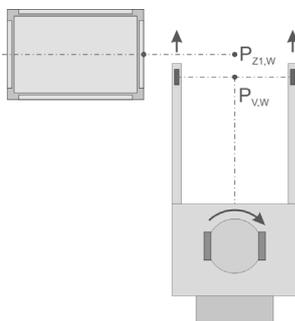


Abbildung 9. Lastaufnahme – Schritt 3

Jetzt beginnt die eigentliche Aufnahme-Aktion:

4. Das Transportsystem beauftragt das FTF, rückwärts zur Position des aufzunehmenden Behälters zu

fahren. Da der Behälter in der Regel neben dem Fahrweg abgestellt wird, muss das FTF zunächst eine Drehbewegung um typischerweise  $45 - 90^\circ$  ausführen. Der Bezugspunkt  $O_V$  befindet sich danach in der Pose  $P_{Z2,W}$ .

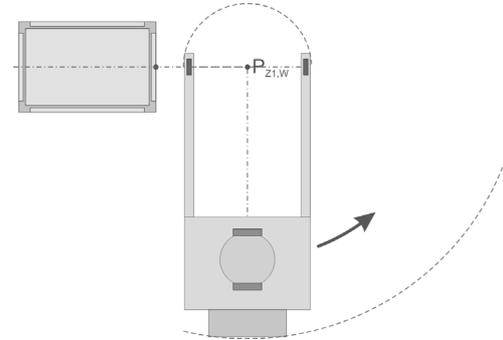


Abbildung 10. Lastaufnahme – Schritt 4

5. Nach der Drehbewegung muss das Fahrzeug mittig und parallel zur Längsachse des Behälters stehen. Das bedeutet, der Behälter befindet sich im lokalen Koordinatensystem des Fahrzeugs an der Pose  $P_{B,V} = (x_{B,V}, y_{B,V}, p_{B,V})$  mit  $y_{B,V} = 0$  und  $p_{B,V} = 0$ . Der Vektor  $O_V P_{B,V}$  entspricht dem Vektor  $P_{Z2,W} P_{B,W}$ .

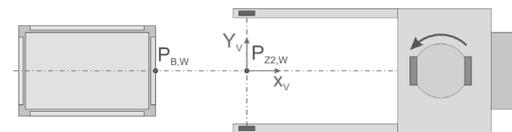


Abbildung 11. Lastaufnahme – Schritt 5

6. Das FTF fährt jetzt geradeaus rückwärts, bis sich der Behälter in der Ladebucht befindet, d.h.  $x_{B,V} \geq L_B$ .

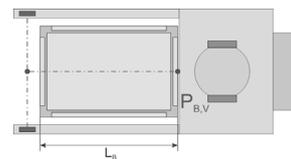


Abbildung 12. Lastaufnahme – Schritt 6

7. Zum Aufnehmen des Behälters wird das LAM angehoben. Damit verkürzt sich der Radstand des Fahrzeugs und der Bezugspunkt für die Navigation verschiebt sich.
8. Das FTF fährt vorwärts, bis sich sein Bezugspunkt  $O_V$  wieder an der Pose  $P_{Z2,W}$  befindet und meldet dem Leitsystem den Abschluss der Lastaufnahme-Aktion.

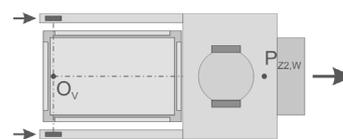


Abbildung 13. Lastaufnahme – Schritt 7 und 8

9. Das Transportsystem beauftragt das FTF mit der Fahrt zum Abgabeplatz des Behälters.

## 6.2 BEHÄLTER ABGEBEN

Das Abgeben eines Behälters erfolgt typischerweise in folgenden Schritten:

1. Das Transportleitsystem beauftragt das FTF, zur Zielposition am Abgabepplatz des Behälters zu fahren. Diese Abgabeposition befindet sich in der Regel seitlich neben dem Hauptfahrweg, damit der abgestellte Behälter nicht die Route für weitere FTF versperrt. Der letzte Bewegungsschritt besteht dann wie bei der Lastaufnahme aus einer Drehung und anschließender Rückwärtsfahrt.
2. Das beladene FTF fährt diese Position an; die Navigation erfolgt dabei über den Navigationssensor. Eine sensorische Prüfung, ob der Abgabepplatz frei ist, ist im Rahmen dieser Studie nicht gefordert. Wenn die vorhandene Sensorik aber eine Prüfung ermöglicht, kann damit die Betriebssicherheit erhöht werden.
3. Das FTF senkt das LAM zum Absetzen des Behälters ab. Damit verlängert sich der Radstand des Fahrzeugs und der Bezugspunkt für die Navigation verschiebt sich.
4. Das FTF fährt geradeaus vorwärts, bis sich der Behälter außerhalb der Ladebucht befindet, d.h.  $x_{B,V} \leq 0$ , und meldet an das Leitsystem den Abschluss der Lastabgabe-Aktion.
5. Das Transportleitsystem beauftragt das FTF mit der Fahrt zur nächsten Zielposition.

## 7 FEINPOSITIONIERUNG

Die oben beschriebenen Abläufe insbesondere bei der Behälteraufnahme setzen voraus, dass das FTF mit Hilfe der Navigationssensorik die Zielposition hinreichend genau anfährt und dass der Behälter hinreichend genau an der definierten Aufnahmeposition platziert ist.

Die Betriebssicherheit lässt sich daher erhöhen, wenn die tatsächliche Position des Behälters relativ zum Fahrzeug unmittelbar vor und während der Lastaufnahme erfasst und die Position des Fahrzeugs entsprechend korrigiert wird.

In der oben beschriebenen Schrittfolge muss dann zwischen den Schritten 4 (Drehung in Richtung des Behälters) und 5 (Geradeausfahrt rückwärts zur Aufnahmeposition) noch eine Korrekturphase eingefügt werden. In dieser Phase werden gemessene Abweichungen der Behälterposition relativ zum Fahrzeug durch das Bahnplanungs-Modul der Navigationssoftware in der Fahrzeugsteuerung korrigiert.

Wenn bei der Bestimmung der relativen Behälterposition festgestellt wird, dass die Abweichung definierte

Grenzwerte überschreitet, so dass keine Korrektur der Bahnplanung möglich ist, muss die Behälteraufnahme abgebrochen werden und die Fahrzeugsteuerung generiert eine Fehlermeldung ans Transportleitsystem.

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, besteht die relative Pose des aufzunehmenden Behälters  $P_{B,V}$  in Bezug auf das Fahrzeug in dessen lokalem Koordinatensystem aus den Komponenten  $x_{B,V}$  (Abstand der Behältervorderseite zum Fahrzeug-Bezugspunkt in Längsrichtung),  $y_{B,V}$  (seitlicher Versatz der Behältervorderseite zur Fahrzeug-Längsachse) und  $p_{B,V}$  (Verdrehwinkel der Behälterlängsseiten zur Fahrzeug-Längsachse); vgl. Abbildung 4.

In Abschnitt 4.4 wurden die möglichen Anordnungen für optische Sensoren zur 1- oder mehrdimensionalen Entfernungsmessung beschreiben. In den folgenden Abschnitten werden zwei unterschiedliche Kombinationen von Sensoren und die Verfahren beschrieben, mit denen die einzelnen Komponenten der relativen Behälterposition gemessen und von der Fahrzeugsteuerung zur Korrektur der Bahnplanung ausgewertet werden können.

## 7.1 LASERSCANNER UND LICHTTASTER QUER ZUR FAHRTRICHTUNG

Mit einem messenden Laserscanner, dessen Scanebene parallel zur  $xy$ -Ebene des Fahrzeug-bezogenen Koordinatensystems angeordnet ist, kann das Profil der dem Fahrzeug zugewandten Seite(n) des Behälters erfasst werden. Je nach relativem Winkel des Behälters zur Montageposition des Scanners wird dabei nur die Vorderseite des Behälters oder auch ein Teil einer Längsseite erfasst.

Aus den Entfernungsmesswerten und den bekannten Winkeln der einzelnen Scan-Punkte kann ein Softwaremodul in der Fahrzeugsteuerung die relative Position der einzelnen Scanpunkte zum Fahrzeug berechnen. Weitere Analysen ermöglichen dann die Berechnung der drei Komponenten der relativen Behälterpose  $P_{B,V}$ .

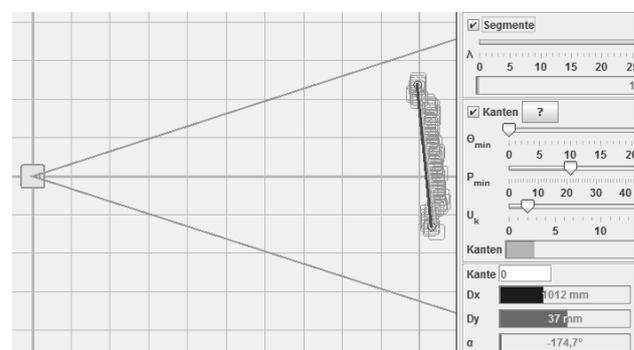


Abbildung 14. Messwerte des TIM Laserscanners mit maßstablicher Darstellung der Entfernungs- und Winkel-Unschärfe

Voraussetzung dafür ist, dass sich die Vorderseite des Behälters mindestens teilweise im Sichtbereich des Scanners befindet. Bei der gewählten Montageposition des

Scanners wird der Sichtbereich durch die Radarme des LAM seitlich begrenzt. Bei der Auswertung der Entfernungsmesswerte kann daher nur ein begrenzter Winkelbereich berücksichtigt werden.

Zur Bestimmung der y- und p-Komponenten der relativen Behälterpose sollte sich die Behältervorderkante vollständig im Sichtbereich des Scanners befinden. Aufgrund des charakteristischen Profils der in dieser Studie verwendeten KLT mit der ausgeprägten Griffmulde (s. Abschnitt 3.2) reicht es aus, wenn sich mindestens diese Mulde im Sichtbereich befindet.

Zur Bestimmung des seitlichen Versatzes  $y_{B,V}$  wird die Position der beiden Kanten der Mulde ausgewertet. Dazu muss die auswertende Software die Sprünge der Entfernungsmesswerte innerhalb eines Scans detektieren, z.B. durch Differenzbildung benachbarter Messwerte.

Aufgrund der Strahlaufweitung des verwendeten Laserscanners beträgt der Durchmesser des messenden Laserstrahls in einer Entfernung von 1 m ca. 24 mm. Die Kanten der Griffmulde und die Behälter-Außenkanten werden also nicht „scharf“ erkannt, sondern die Entfernungsmesswerte schwanken in diesem Bereich. Auch mit verschiedenen Filtermethoden gelingt es nicht, den seitlichen Versatz genauer als ca.  $\pm 20$  mm zu bestimmen.

Um den seitlichen Versatz beim Aufnehmen des Behälters genauer zu bestimmen, wurden daher zusätzlich zwei messende Lichttaster in den Enden der Radarme eingebaut. Diese können den seitlichen Versatz aber erst messen, sobald das FTF bei der Lastaufnahme so weit auf den Behälter zugefahren ist, dass mindestens eine Ecke des Behälters von den seitlichen Lichtmastern erfasst wird.

Die Korrektur der Fahrzeugpose während der Lastaufnahme kann somit in mehreren Schritten in der Fahrzeugsteuerung implementiert werden:

1. Auswertung der Laserscanner-Messwerte; Bestimmung der relativen Behälterpose  $P_{B,V}$
2. Rotation des Fahrzeugs, bis sich die Längsachsen des Fahrzeugs und des Behälters an der Behältervorderkante schneiden
3. Zufahren auf den Behälter, bis der erste Lichttaster eine Ecke des Behälters erkennt
4. Rotation, bis der zweite Lichttaster die gegenüberliegende Ecke des Behälters erkennt:  
Der Bahnradius muss bei dieser Rotation so gewählt werden, dass der Momentanpol in der zuerst erkannten Behälterecke liegt (s. Abschnitt 4.1).
5. Rückwärts auf den Behälter zufahren, dabei den seitlichen Abstand mit den Entfernungsmesswerten der beiden Lichttaster überwachen

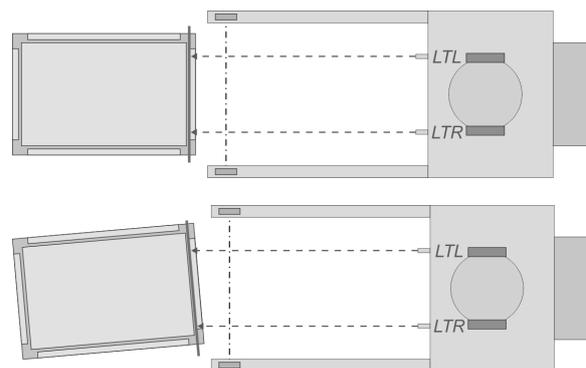
6. Wenn sich der Behälter komplett in der Ladebucht befindet, melden die seitlichen Lichttaster wieder Messwerte oberhalb des Erfassungsbereichs. Dies kann von der Fahrzeugsteuerung als Signal ausgewertet werden, die Fahrbewegung zu stoppen und das LAM anzuheben.

In Schritt 5 wird durch die Auswertung der Messwerte der Lichttaster erkannt, ob der Behälter mittig aufgenommen wurde. Die Korrektur eines detektierten Winkelfehlers ist aber nur noch begrenzt möglich, da sich der Behälter schon teilweise innerhalb der Ladebucht befindet.

## 7.2 LICHTTASTER LÄNGS ZUR FAHRTRICHTUNG

Die zweite untersuchte Sensoranordnung besteht aus zwei messenden Lichtmastern, die am Ende der Ladebucht parallel zur Fahrzeuglängsachse montiert wurden. Um einen Behälter schon zu Beginn der Lastaufnahme erfassen zu können, wurden hierzu Lichttaster mit einem maximalen Messbereich von mindestens 1500 mm verwendet.

### Beide Lichttaster erfassen die Mulde – Winkelberechnung ok



### Einer der Lichttaster erfasst eine Behälterkante – Winkelberechnung fehlerhaft

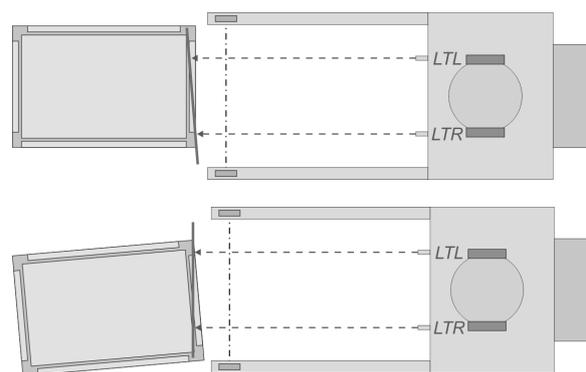


Abbildung 15. Bestimmung des Winkels der Behältervorderkante relativ zum FTF aus den Entfernungsmesswerten von zwei Lichtmastern links (LTL) und rechts (LTR)

Grundsätzlich können mit dieser Anordnung nur die Komponenten  $x_{B,V}$  und  $p_{B,V}$  der Behälterpose erfasst werden. Bei der Bestimmung des Verdrehwinkels  $p_{B,V}$  tritt ein

systematischer Fehler  $\Delta p$  auf, wenn einer der beiden Lichttaster die Griffmulde erfasst und der andere eine Behälterkante. Bei einem seitlichen Abstand der Sensoren von  $d_Y =$

250 mm und einer Tiefe der Griffmulde von  $d_X = 27$  mm beträgt dieser Fehler  $\Delta p = \arctan(d_X / d_Y) = 6.2^\circ$ .

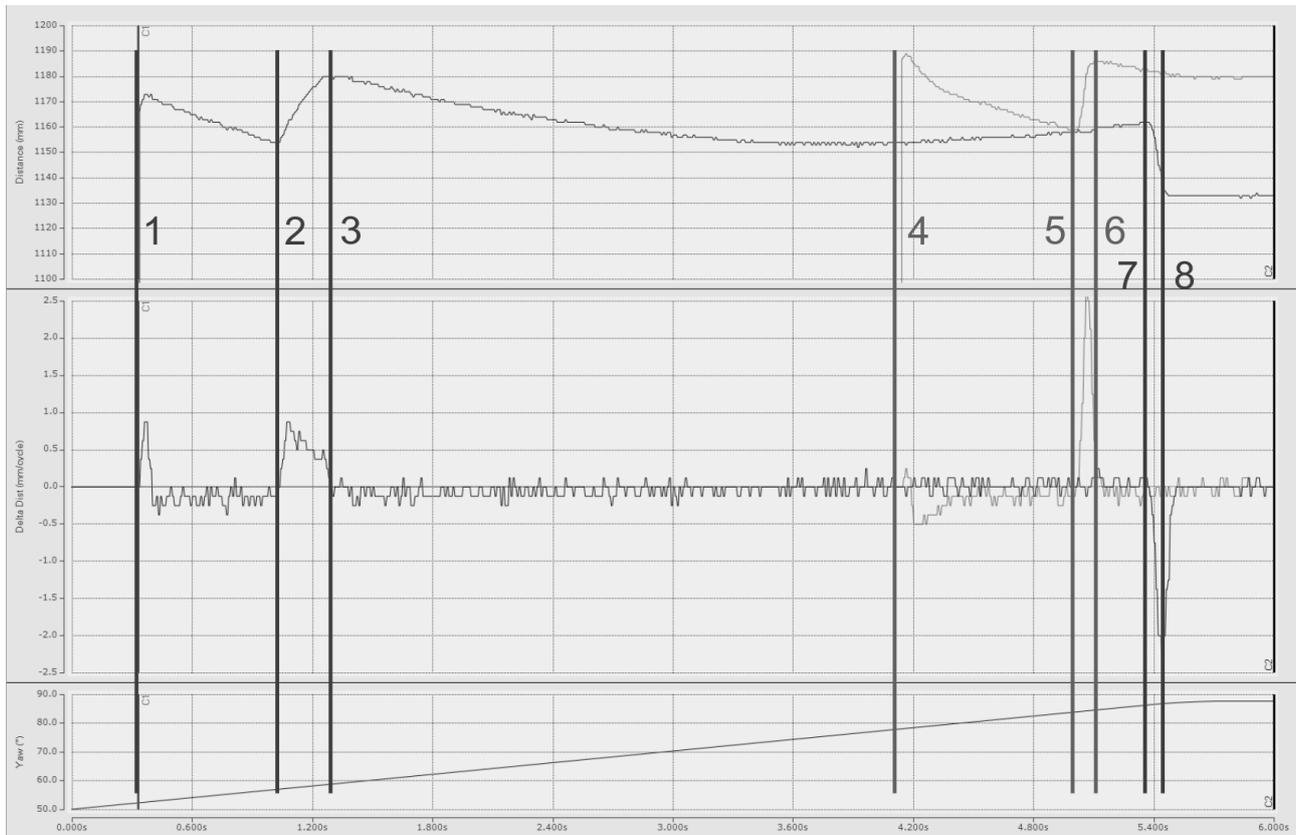


Abbildung 16. Aufzeichnung der Messwerte der Lichttaster rechts und links. Diagramm oben: Entfernung (mm), Mitte: Entfernungsdifferenz pro Messzyklus, unten: Gierwinkel  $p_{V,W}$  des FTF während der Drehbewegung.

Diese Einschränkung gilt aber nur für eine statische Messung, d.h. bei Stillstand des Fahrzeugs. Wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, führt das FTF vor der eigentlichen Lastaufnahme aber eine Drehbewegung aus. Dabei überstreicht der Laserstrahl des Lichttasters mindestens einen Teil der Behältervorderkante. Die Kanten der Griffmulde und die Behälteraußenkanten können daher – wie bei der Auswertung der Laserscanner-Messwerte – durch Differenzierung der Entfernungsmesswerte bestimmt werden. Der Lichtfleckdurchmesser ist mit 12 mm bei 1800 mm Entfernung deutlich geringer als beim Laserscanner (35 mm in 1800 mm Entfernung), so dass die Kantendetektion prinzipiell genauer erfolgen kann.

Die Messung der Behälterpose erfolgt dann in mehreren Schritten:

1. Zu Beginn der Lastaufnahme befindet sich das Fahrzeug in der Pose  $P_{Zl,W}$  (s. Abschnitt 6.1 Schritt 4). Die beiden Lichttaster (LT) erfassen den Behälter noch nicht.
2. Das FTF führt jetzt eine Rotation in Richtung auf die Aufnahmeposition aus. In diesem Beispiel wird eine Drehung um  $90^\circ$  nach links angenommen.

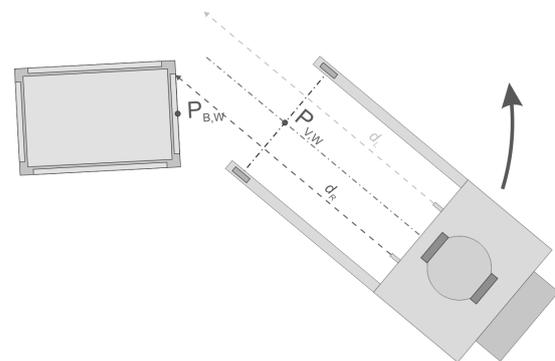


Abbildung 17. Messung während der Drehbewegung: Lichttaster rechts erfasst die linke Behälterecke

3. Der rechte LT erfasst während der Drehung zunächst die linke Außenkante des Behälters. Die Fahrzeugsteuerung speichert ab jetzt in jedem Programmzyklus die Entfernungsmesswerte der beiden LT sowie die absolute Pose  $P_{V,W}$  des Fahrzeugs in einem Datenpuffer (Position 1 in Abbildung 16).

4. Der Lichtfleck des rechten LT streicht über die linke Außenkante weiter in die Mulde. Der Entfernungsmesswert nimmt an dieser Stelle um die Tiefe der Mulde zu (Position 2 - 3 in Abbildung 16).
5. Der linke LT erfasst auch die linke Außenkante des Behälters (Position 4 in Abbildung 16).

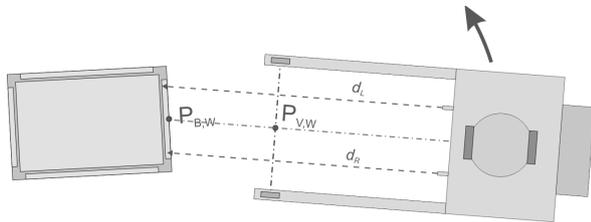


Abbildung 18. Messung während der Drehbewegung:  
 Beide Lichttaster erfassen die Mulde

6. Der Lichtfleck des linken LT streicht über die linke Außenkante weiter in die Mulde. Der Entfernungsmesswert nimmt an dieser Stelle um die Tiefe der Mulde zu (Position 5 - 6 in Abbildung 16).

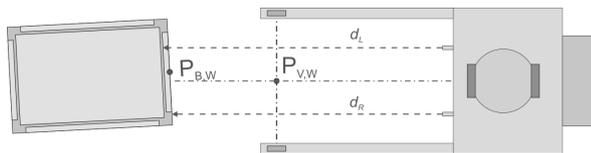


Abbildung 19. Messung am Ende der Drehbewegung

7. Je nach relativer Position des Behälters erreicht der Lichtfleck des rechten LT noch die rechte Ecke der Mulde. Der Entfernungsmesswert nimmt dann um die Tiefe der Mulde ab (Position 7 - 8 in Abbildung 16).

Nach Ende der Drehbewegung wird die Aufzeichnung der Messwerte und der Pose gestoppt und ein Softwaremodul in der Fahrzeugsteuerung berechnet aus den detektierten Sprüngen der Entfernungsmesswerte, den zugehörigen Fahrzeugposen und den bekannten Montagepositionen der Sensoren die Position des Behälters in absoluten Koordinaten  $P_{B,W}$

Aus dem Vergleich mit der aktuellen Fahrzeugpose  $P_{V,W}$  wird nun die relative Pose des Behälters in lokalen Koordinaten  $P_{B,V}$  bestimmt und an das Bahnplanungs-Modul der Fahrzeugsteuerung übergeben. Die Bahnplanung kann dann so korrigiert werden, dass das Fahrzeug vor der Geraudeaußfahrt zum Aufnehmen des Behälters (s. Abschnitt 6.1 Schritt 5) den seitlichen Versatz und den Winkelfehler der relativen Behälterposition minimiert hat.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Studie wurden zwei unterschiedliche Sensorsysteme und Verfahren zur Auswertung der Messwerte erprobt, die grundsätzlich beide geeignet sind, die Anforderungen an die zur Lastaufnahme erforderliche Feinpositionierung zu erfüllen.

Das in Abschnitt 7.1 beschriebene Messsystem aus einem messenden Laserscanner und zwei seitlich angeordneten Lichttastern bietet den Vorteil, unabhängig von einer Fahrbewegung des FTF die Position des aufzunehmenden Behälters in den drei relevanten Koordinaten zu erfassen. Der Abstand in Längsrichtung, der seitliche Versatz und die Verdrehung können in der Fahrzeugsteuerung aus den Messwerten des Laserscanners mit jedem Messzyklus neu berechnet werden.

Um aus den messtechnisch bedingt statistisch schwankenden Messwerten stabile Koordinaten des Behälters zu bestimmen, sind allerdings aufwendige Filterverfahren erforderlich; insbesondere die Mittelwertbildung über mehrere Messzyklen verzögert dabei die Auswertung.

Die zur präziseren Bestimmung der seitlichen Positionsabweichung zusätzlich installierten Lichttaster ermöglichen erst bei unmittelbarer Annäherung an den Behälter eine Positionskorrektur, die zu starken seitlichen Drehbewegungen des FTF führen kann.

Mit dem in Abschnitt 7.2 beschriebenen Messsystem aus zwei in Längsrichtung angeordneten messenden Lichttastern wird der seitliche Versatz des Behälters nur einmalig während einer Drehbewegung des FTF gemessen. Der Abstand in Längsrichtung ist aber in dieser Phase der Lastaufnahme noch so groß, dass sich das FTF in der anschließenden Feinpositionierungsphase mit geringeren Lenkbewegungen auf die gemessene Behälterposition zubewegen kann.

Wenn die in Abschnitt 6.1 genannten Anforderungen an die Aufnahmeposition des Behälters erfüllt sind, stellt damit das System mit zwei Lichttastern die wirtschaftlichere Variante dar.

Beiden Verfahren gemeinsam ist die Möglichkeit, durch Konfigurationsparameter in der Fahrzeugsteuerung die Auswertung der Sensormesswerte auf die Randbedingungen der spezifischen Anwendung zu optimieren. Dazu gehören einerseits die Abmessungen der verwendeten Behälter (Breite und Tiefe der Griffmulde) sowie Parameter des Fahrzeugs (z.B. die Translations- und die Rotations-Geschwindigkeit) und andererseits Randbedingungen der Umgebung, z.B. der seitliche Freiraum, der dem FTF für Korrekturbewegungen zur Verfügung steht.

## LITERATUR

- [BF17] Behling, Jan; Follert, Guido: Regalloses Regal. Neuartige Bedientechnik SAM ermöglicht hochflexible automatische Behälterlagerung. In: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik -GPL-: 26. Deutscher Materialfluss-Kongress 2017: Vernetzte Intralogistik; 6. und 7. April 2017, TU München, Garching, + VDI-Fachkonferenz "Intralogistik für den Handel" Düsseldorf: VDI-Verlag, 2017, S.151-157 (VDI-Berichte 2305)
- [VDI2510] VDI: VDI-Richtlinie 2510, Fahrerlose Transportsysteme (FTS), Oktober 2005
- [ISO9787] ISO 9787 Industrieroboter - Koordinatensysteme und Bewegungsnomenklaturen, Norm, Mai 2013
- [VDA4500] VDA: VDA-Empfehlung 4500 - Kleinladungsträger (KLT-) System, Mai 2018

**Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel**, born in Bergisch-Gladbach, Germany, in 1958, studied Electrical Engineering at RWTH Aachen and graduated from Witten/Herdecke University in 1991. In 2000, he joined the managing board of Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics in Dortmund (since January 2005: Managing Director) and became head of the Chair of Materials Handling and Warehousing at TU Dortmund.

Address: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML), Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4, 44227 Dortmund, Germany, Phone: +49 231 9743-128, E-Mail: [tenhompel@iml.fraunhofer.de](mailto:tenhompel@iml.fraunhofer.de)

---

**Dipl.-Ing. Heinz Huber**, Research Assistant at the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics in the department of Machines and Facilities.

Heinz Huber was born 1961 in Schwerte, Germany. Between 1981 and 1989 he studied Electrical Engineering at the University of Dortmund.

Address: Phone: +49 231 9743-128,  
E-Mail: [heinz.huber@iml.fraunhofer.de](mailto:heinz.huber@iml.fraunhofer.de)

**Mathias Rotgeri, M.Sc.**, Research Assistant at the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics in the department of Machines and Facilities.

Mathias Rotgeri was born 1989 in Dortmund, Germany. Between 2008 and 2014 he studied Mechanical Engineering at TU Dortmund.

Address: Phone: +49 231 9743-335,  
E-Mail: [mathias.rotgeri@iml.fraunhofer.de](mailto:mathias.rotgeri@iml.fraunhofer.de)

**Dipl.-Ing. Guido Follert**, Head of the department Machines and Facilities at the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics. Guido Follert, born in 1969 in Dortmund, studied mechanical engineering with a specialization on Technical Management at the University of Dortmund. At first, he worked as a research assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing at the University of Dortmund and changed over to the Fraunhofer IML in 2008.

Address: Phone: +49 231 9743-253,  
E-Mail: [guido.follert@iml.fraunhofer.de](mailto:guido.follert@iml.fraunhofer.de)