

# FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · F. Hohenstein · M. Jung

Das Staplerauge



# Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Das Staplerauge***

der Forschungsstelle

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 17244 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL  
wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2014

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49.89.289.15955

Telefax: + 49.89.289.15922

[www.fml.mw.tum.de](http://www.fml.mw.tum.de)

# Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Das Staplerauge“ wird der Ansatz einer Funktionsintegration diverser Sensorfunktionen am Gabelstapler mittels Bildverarbeitung untersucht.

Zu diesem Zweck wird ein Software-Framework konzipiert, das die Entwicklung solcher Bildverarbeitungslösungen deutlich erleichtert. Dieses Framework basiert auf dem Pipes-and-Filter Architekturmuster, d. h. die eigentlichen Teilfunktionen einer Sensorfunktion werden in Filter-Klassen untergebracht, die dann abhängig von der zu lösenden Aufgabe in einer bestimmten Reihenfolge miteinander verknüpft werden können und somit einen einfach zu nutzenden, flexiblen Baukasten für Bildverarbeitungslösungen darstellen.

Auf Basis dieses Frameworks werden folgende Sensorfunktionen umgesetzt und evaluiert:

- Gabel-belegt Erkennung
- Warenidentifikation mittels NVE-Code
- palettengenaue Lokalisierung
- lagerfachgenaue Gabelhubhöhen Erkennung

Die Demonstratoren eignen sich für den vorgesehenen Einsatz und können Systemintegratoren als Basis für eigene Entwicklungen dienen. Für den Praxiseinsatz werden konkrete Maßnahmen vorgeschlagen.

Eine Funktionsintegration, also eine Umsetzung mehrerer Funktionen mit nur einem Sensor, wird in Form eines kombinierten Demonstrators umgesetzt, der die Gabelhubhöhe bestimmen kann und gleichzeitig ohne nennenswerten Rechenaufwand die Lokalisierung realisiert. Eine solche Kombination muss die Maximalanforderungen aller integrierten Sensorfunktionen an die Hard- und Software erfüllen und zudem im selben Sichtfeld der Kamera arbeiten können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	3
1.2	Forschungsziel	4
1.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	5
1.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	6
1.2.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	7
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>9</b>
2.1	Zustandserfassung am Gabelstapler	10
2.1.1	Zustandserfassung zur Lokalisierung	11
2.1.2	Weitere Zustandserfassung	16
2.2	Optische Sensortechnologien zur Zustandserfassung	20
2.3	Methoden in der Bildverarbeitung zur Zustandserfassung	24
2.3.1	Klassifizierung	24
2.3.2	Tracking	24
2.3.3	Identifizierung	25
2.3.4	Videoüberwachung (CCTV)	26
2.3.5	Kalibrierung der Kamera	26
<b>3</b>	<b>Einsatzszenario und Anforderungsanalyse</b>	<b>29</b>
3.1	Einsatzszenario mit zu realisierenden Sensorfunktionen	29
3.1.1	Einsatzszenario	30
3.1.2	Sensorfunktionen	32
3.2	Sensorsystem und dessen Anbringung	36
3.3	Anforderungen und Lastenheft	40
3.3.1	Sensorfunktion als Demonstrator	40
3.3.2	Kamerasystem als Sensorik	42
3.3.3	Software	45
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines Software-Frameworks</b>	<b>47</b>
4.1	Einordnung im bildverarbeitenden System	47
4.2	Architektur des Software-Frameworks	49
4.2.1	Die Klasse Sensorfunktion	49

4.2.2	Entwurfsmuster für die Bildverarbeitung	50
4.3	Funktionen des Software-Frameworks	51
4.3.1	Prinzipien zur Hardware-Anbindung	51
4.3.2	Methoden der Bildverarbeitung	53
4.3.3	Nutzungskonzept für den Anwender	54
<b>5</b>	<b>Umsetzung von Sensorfunktionen im Demonstrator mittels Software-Framework</b>	<b>57</b>
5.1	Kameravorbereitung des Versuchsstaplers	57
5.1.1	Anbringungspunkte	57
5.1.2	Kommunikations- und Energieanbindung	59
5.1.3	Kamerahalterung	60
5.1.4	Hardwareauswahl Kamerasystem	61
5.2	Gabel-Belegt Erkennung	63
5.2.1	Zweck	63
5.2.2	Funktionsweise	64
5.2.3	Berechnungsvorschrift	66
5.2.4	Filterketten zur Gabel-belegt Erkennung	68
5.3	Waren-Identifikation mittels NVE-Code	69
5.3.1	Zweck	69
5.3.2	Funktionsweise	70
5.3.3	Berechnungsvorschrift	74
5.3.4	Bildverarbeitungs-Filterkette zur NVE-Erkennung	74
5.4	Lokalisierung (Voruntersuchungen)	75
5.4.1	Lokalisierungsarchitektur	76
5.4.2	Tag	76
5.4.3	Funktionsweise	78
5.5	Gabelhubhöhen-Erkennung	86
5.5.1	Zweck	86
5.5.2	Funktionsweise	87
5.5.3	Berechnungsvorschrift	88
5.5.4	Bildverarbeitungs-Filterkette zur Bestimmung der Hubhöhe	91
<b>6</b>	<b>Evaluierung des Software-Frameworks und der Demonstratoren</b>	<b>93</b>
6.1	Software-Framework	93

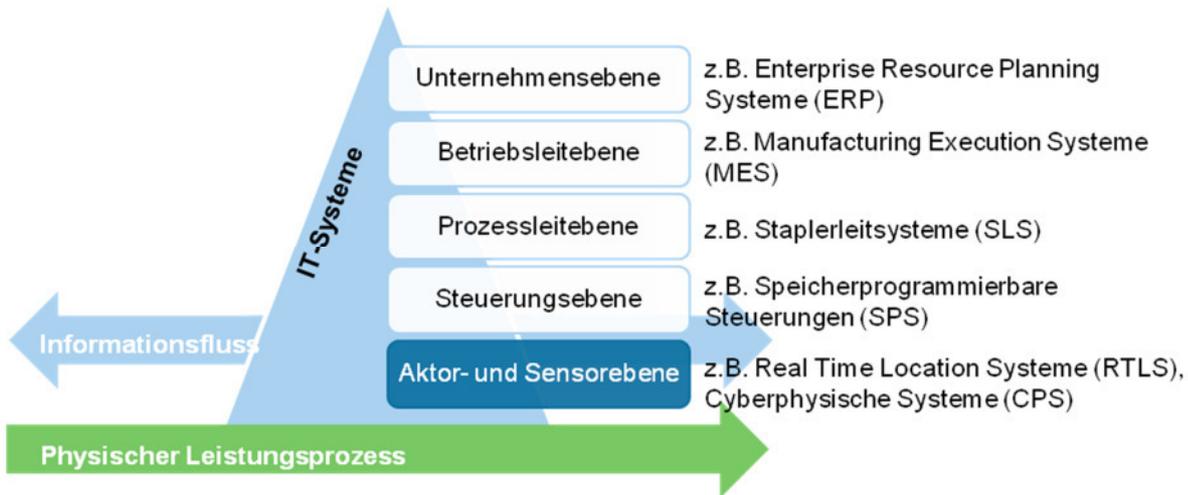
6.1.1	Ablauf der Evaluierung	93
6.1.2	Fragebogen	94
6.1.3	Auswertung	95
6.1.4	Fazit	100
6.2	Demonstratoren	100
6.2.1	Gabel-Belegt Erkennung	100
6.2.2	Waren-Identifikation mittels NVE-Code	106
6.2.3	Lokalisierung (Voruntersuchungen)	110
6.2.4	Gabelhubhöhen-Erkennung	117
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick</b>	<b>123</b>
7.1	Zusammenfassung	123
7.2	Nutzung und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	125
7.3	Ausblick	127
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>141</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>145</b>
	<b>Anhang A Informationen zum Software-Framework</b>	<b>A-1</b>

# 1 Einleitung

Die Intralogistik ist und bleibt das Rückgrat der Supply Chain und gewinnt zunehmend an Bedeutung, da sie durch technische und organisatorische Lösungen zur Erreichung globaler Zielsetzungen in der Supply Chain beiträgt [ARN-2006]. Diese Forschungsarbeit fokussiert auf die Schaffung einer technischen Lösung, die effizienten innerbetrieblichen Transportprozessen den Weg bereitet. Gerade in der Intralogistik schlummern nennenswerte Effizienzpotenziale, die es zu heben gilt. Vor allem am Hochlohnstandort Deutschland helfen diese Entwicklungen in einem gering automatisierten Umfeld Arbeitsplätze zu sichern.

Der heutige Trend zu kundenspezifischen Produkten führt zu einer steigenden Komplexität in der Prozessgestaltung und -ausführung. Zur Beherrschung dieser werden Systeme zur Zustandserfassung in den Wertschöpfungsprozessen eingeführt, die eine laufende Überwachung und Steuerung der Prozesse in zunehmender Echtzeit ermöglichen [BAR-2008]. Unternehmen, die eine entsprechende Echtzeitprozesssteuerung basierend auf umfangreichen Echtzeitdaten aufbauen, werden auch Echtzeitunternehmen bzw. Real-time Enterprises (RTE) genannt. Die damit zu erreichende Beherrschung der Produkt- und Prozesskomplexität führt dazu, dass geringere Durchlaufzeiten durch die Parallelisierung ehemals sequentieller Vorgänge ermöglicht werden. Kuhlin beobachtet hierzu ein zunehmend integriertes, parallelisiertes Vorgehen in der Planung und Ausführung [KUH-2005].

Die technische Realisierung baut auf der Integration von Zustandssensoren und -aktoren in der Anlagen- und Maschinenteknik auf. Diese erfassen Systemzustände des Leistungsprozesses und stellen diese übergelagerten IT- und Unternehmenssystemen zur Verfügung. Abbildung 1-1 ordnet diese in die heutige IT-Struktur produzierender Systeme ein und stellt ihre Kopplungsfunktion zwischen Informationsfluss und physischem Leistungsprozess heraus. Ein bisher bestehender Medienbruch zwischen Informations- und Materialfluss wird damit in der Logistik geschlossen [GÜN-2010b]. Ein Beispiel für entsprechende Sensorsysteme können Echtzeitlokalisierungssysteme (Real Time Location Systems RTLS) sein, die Positionsinformationen zu im Leistungsprozess analysierten Objekten in Echtzeit liefern. Ebenso sind Systeme zur automatischen Identifizierung (AutoID) zu nennen, die z. B. auf der Basis der Radio Frequency Identification (RFID)-Technologie realisiert werden.



**Abbildung 1-1: Sensorsysteme als Basis für IT-Systeme in produzierenden Unternehmen (nach [ACA-2013])**

Sofern von dem Lokalisierungsobjekt Flurförderzeug (FFZ) als das den Transportprozess ausführende Objekt gesprochen wird, stellt Arnold fest, dass durch die aufgezeigte Entwicklung der Kopplung von Informations- und Materialfluss das FFZ zur „zentralen Schnittstelle im innerbetrieblichen Logistikprozess“ [ARN-2006] wird. Zahlreiche Beispiele aus der Praxis der Logistik untermauern diese Feststellung.

Darüber hinaus ist ein Trend zur flexiblen Automatisierung in der Intralogistik zu beobachten, der insbesondere auch das FFZ erfasst. Die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Gabelstaplers ist unter den Transportmitteln ungebrochen [HEI-2006], allerdings gerät das Konzept Gabelstapler zunehmend auf Grund des sehr hohen Anteils manueller Tätigkeiten ins Hintertreffen [ARN-2006]. Manuelle Tätigkeiten werden häufig als nicht kosteneffizient angesehen, da sie menschlichen Fehlern unterliegen und von der jeweiligen Leistungsfähigkeit des Menschen stark abhängig sind. Suchvorgänge durch Fehlverladungen, Rangiermanöver, Kollisionen, Beschädigungen der Lagereinrichtung etc. sind an dieser Stelle als Beispiele für Ineffizienzen anzuführen, die durch eine Teilautomatisierung des FFZ reduziert werden sollen. Gerade auch im Zuge der heutigen Bestrebungen, die Prozesseffizienz durch Lean-Management-Methoden zu steigern, wird die Automatisierung gefördert. Ono beschreibt die Automatisierung als einen Lösungsansatz zur Vermeidung von Ineffizienzen [ONO-2009].

Die bisherige Umsetzung der Zustandserfassung am FFZ sieht einen Mix an verschiedenartigen Sensortechnologien vor, die jeweils eine einzelne Sensorfunktion umsetzen. Hierdurch ist der Anwender verpflichtet, an seinen Fahrzeugen an voneinander abweichenden Anbringungsorten einzelne Sensorsysteme anzubringen und

in der Regel kabelgebunden zu integrieren. Ferner nimmt er damit in der Nutzung der Sensoren häufig unbewusst eine Festlegung vor, die ihm nicht ermöglicht, im Zuge sich ändernder Anforderungen mit bestehenden Sensorsystemen zusätzliche oder alternative Sensorfunktionen vorzunehmen. Entsprechende Sensorfunktionen, die es ermöglichen, übergelagerten IT-Systemen eine FFZ-Prozesskontrolle vorzunehmen, sind insbesondere

- die Erfassung der Identität der aufgenommenen Güter,
- die Bestimmung des Zeitpunktes aufgenommener und abgegebener Güter bzw. des Beladungszustandes,
- die Bestimmung der eigenen Position im Raum und der Hubhöhe der erfolgenden Ein- und Auslagerungen.

Damit bedarf es einer technischen Lösung zur Erfassung relevanter Zustände am FFZ, die die im Fahrzeug inhärente Flexibilität nicht einschränkt und zudem zukünftig wachsenden Bedarf der Zustandserfassung durch eine eigene Anpassungsfähigkeit gewachsen ist. Im Folgenden wird diese aus der Anwendung motivierte Problemstellung hinsichtlich wissenschaftlicher Aspekte vertieft und die Zielformulierung für die in diesem Forschungsprojekt vorgenommene Forschungsarbeit vorgenommen.

### **1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung**

Die Automatisierung von Flurförderzeugen wird in der Literatur als anspruchsvolle Aufgabe angesehen [JÜN-1989]. Bisherige Lösungen setzen für die ihr zu Grunde liegende Zustandserfassung auf eine hohe Integration in die Fahrzeugsteuerung und in bordeigene Sensorsysteme. Da der Lebenszyklus für FFZ in der Tendenz bei über 10 Jahren und häufig auch deutlich darüber liegt, ist zu einer breiten Zustandserfassung in den innerbetrieblichen Transportprozessen eine Lösung zur Nachrüstung erforderlich, da ein kompletter Austausch des gesamten aktuellen Flurförderzeugbestands nicht wirtschaftlich wäre.

Da in der FFZ-Branche bisher keine Standardisierung des Informationsaustauschs über inzwischen verbreitete CAN-Bus-Systeme an den Fahrzeugen zu beobachten ist, erfordern heutige Nachrüstsysteme eine individuelle Abstimmung auf das jeweilige Fahrzeug. Auf Grund dieser uneinheitlichen Rahmenbedingung hat sich auf dem Markt eine Vielzahl an Sensorsystemen z. B. zur Lokalisierung gebildet, die alle trotz

des nachweislichen Einsatzbedarfs nur eine geringe Verbreitung erfahren. Mautz schlussfolgert daraus, dass somit bisherige Systeme keine den Anforderungen konforme Lösung darstellen [MAU-2008]. Verstärkt wird dieses Erkenntnis durch die Erfahrung, dass die Umsetzung entsprechender Systeme zur Zustandserfassung, vorzugsweise der Position, ein hohes Maß an Abstimmung mit der Anwendungsumgebung, dem Anwendungsprozess und der bestehenden Infrastruktur erfordert [LIA-2012].

Damit stellt sich die wissenschaftliche Fragestellung, welchen technischen Ansatz ein Sensorsystem umfassen muss, damit es über vielfältige Anwendungsmöglichkeiten am FFZ verfügt und zusätzlich an diesem nachgerüstet werden kann. In dem dieser Forschungsarbeit zu Grunde liegenden Forschungsantrag wurde hierzu ein hohes Umsetzungspotenzial in der Nutzung einer 2D-Kamera mit anschließender Bildverarbeitung gesehen. In der Literatur wird vielfach der Kameratechnologie die Fähigkeit zur hier geforderten Funktionsintegration zugesprochen [GAR-1998]. Wissenschaftliche Arbeiten zum Zeitpunkt der Projektbeantragung setzen im Rahmen dieser Problemstellung am FFZ allerdings einen Schwerpunkt auf die RFID-Technologie [BAR-2008].

Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie die Bildverarbeitung im Detail zu gestalten ist, damit sie dem Anwender eine Erweiterbarkeit der Sensorfunktionen mit geringem Aufwand und Sachverstand ermöglicht. Heinecker identifiziert hierzu sog. Wandlungsbefähiger, die im Rahmen der hier zu wählenden Umsetzung zu berücksichtigen sind [HEI-2006]:

- Funktions- und Nutzungsneutralität
- Erweiter- und Reduzierbarkeit
- Modularität des Systems

### **1.2 Forschungsziel**

Das gemeinsame Forschungsziel für diese Arbeit ist der Nachweis der technischen Machbarkeit des hier aufgezeigten Ansatzes. Hierzu wird ein 2D-Kamerasystem am Versuchsträger integriert und das entsprechend gestaltete offene Software-Framework für die Bildverarbeitungs-basierte Realisierung einzelner Sensorfunktionen umgesetzt. Dabei gilt das Paradigma der Funktionsintegration, d. h. mit der Kamera einen einzigen Sensor für die multivariante Zustandserfassung im Leistungs-

prozess des FFZ zu erstellen. In einer anschließenden Evaluierung des aufgebauten Demonstrators ist die technische Machbarkeit unter Darstellung des Grades der Erreichung zuvor gesetzter Anforderungen an die Funktionsqualität zu bestätigen. Eine serienreife Umsetzung der Sensorfunktionen ist ausdrücklich nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Darüber hinaus ist das Forschungsziel, dem Anwender im Rahmen dieser Entwicklung konkrete Handlungsempfehlung für die Wahl geeigneter Systemmodule, wie z. B. des Kamerasystems, an die Hand zu geben.

In diesem Projekt wird insbesondere durch die offene Entwicklung des Software-Frameworks und der Ausarbeitung konkreter Handlungsempfehlungen die Zielsetzung verfolgt, zukünftigen KMU-Anwendern und -Systemintegratoren einen sicheren Einstieg in den hier verfolgten technischen Ansatz zur Zustandserfassung, mittels Bildverarbeitung am FFZ zu ermöglichen.

### **1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Das Forschungsergebnis ist eine offene Softwareplattform, die auf offenen Schnittstellen aufsetzende 2D-Kamerasysteme anbindet und dem Nutzer eine Methodik an die Seite stellt, um mittels der Kombination einzelner Bildverarbeitungsalgorithmen neue Sensorfunktionen am FFZ zu realisieren. Das Software-Framework wird mit Projektende der Öffentlichkeit zur freien Nutzung übergeben.

In dem Forschungsergebnis inbegriffen ist die exemplarische Umsetzung von vier Sensorfunktionen, die in der heutigen Zustandserfassung am FFZ die wichtigsten Funktionen darstellen. Hierzu gehören der:

- Demonstrator Gabel-Belegt Erkennung (Kapitel 5.2)
- Demonstrator Warenidentifikation mittels NVE-Barcode (Kapitel 5.3)
- Voruntersuchungen zur Lokalisierung im Raum (Kapitel 5.4)
- Demonstrator Hubhöhen-Messung (Kapitel 5.5)

Grundlegend für diese Forschungsergebnisse ist eine genaue Anforderungsdefinition an die in den Demonstratoren umzusetzenden Funktionalitäten. Eine zusätzliche Evaluierung liefert eine Quantifizierung der Eignung des hier gewählten technischen Ansatzes.

Weiteres Ergebnis dieses Projekts ist eine Spezifikation des Kamerasystems, welches für die Umsetzung obiger Sensorfunktionen erforderlich ist.

### **1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Dieses Projekt liefert durch den technischen Nachweis der Funktionsintegration zur Zustandserfassung am FFZ durch die Anwendung einer 2D-Kamera einen innovativen Beitrag für neue Methoden der Prozessunterstützung am FFZ. Die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit der hier verfolgten Lösung bietet die Möglichkeit, mit im Vergleich zum heutigen Stand der Technik geringem Aufwand und Knowhow neue Sensorfunktionen zu realisieren und damit neuartige Ansätze zur Fahrerassistenz zu ermöglichen.

Weitere Innovationen dieser Lösung im Vergleich zum heutigen Stand der Technik, der die Anbringung einer Vielzahl singulärer und nicht hinsichtlich der Funktionalität anpassbarer Sensortechnologien vorsieht, ergeben sich durch folgende in der Entwicklung verfolgten Grundsätze:

- Reduktion des Integrationsaufwandes am FFZ und in der Einsatzumgebung durch Minimierung der erforderlichen Infrastruktur
- Leistungssteigerung der Funktionalitäten durch höhere Erkennungsleistung und/oder Genauigkeit
- Zusammenführung der Hardware in einer Sensortechnologie, d. h. durch Funktionsintegration in der Sensortechnologie 2D-Kamera

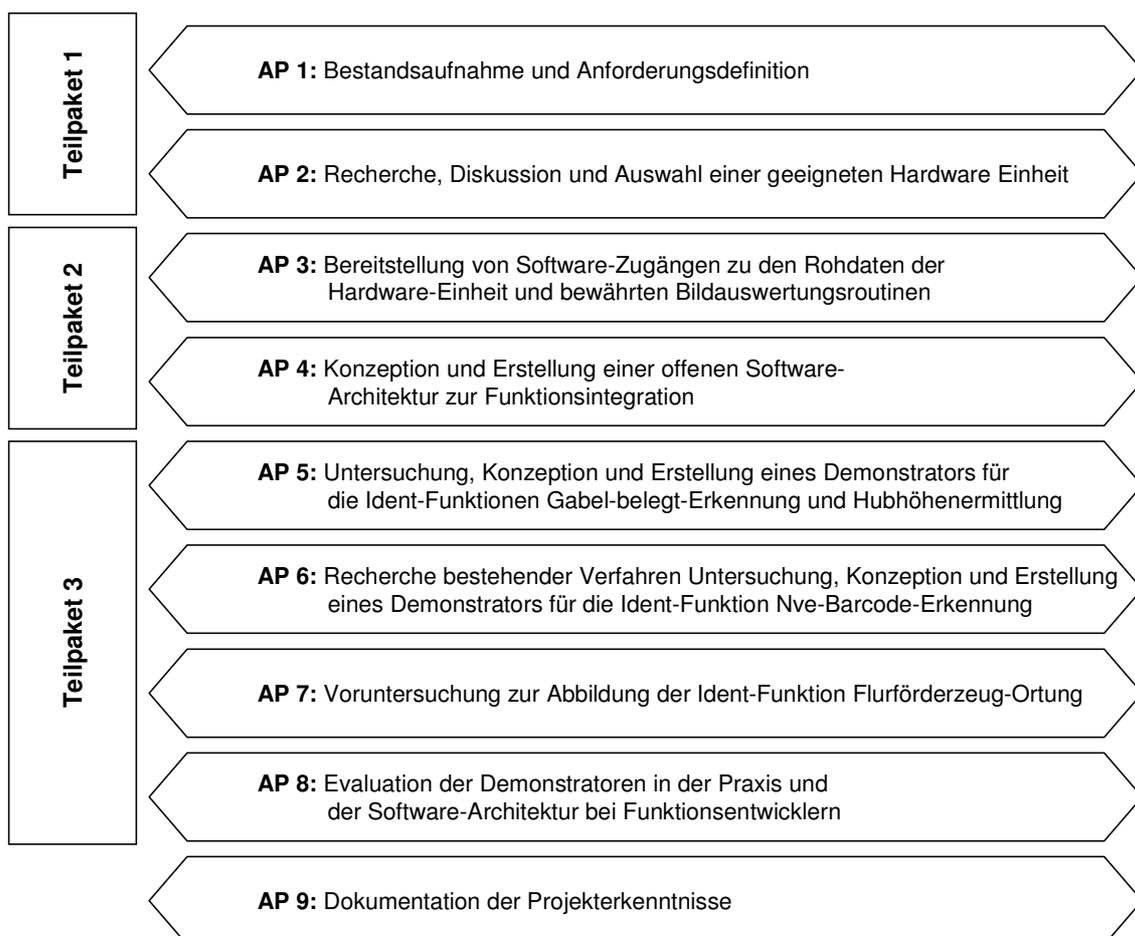
Damit entsteht ein innovativer Beitrag für die Förderung eines breiten Einsatzes der Zustandserfassung in logistischen Leistungsprozessen, hier fokussiert auf den Transportprozess mittels Gabelstapler.

Mit dem hier verfolgten Ziel, die Sensorsysteme in einer Technologie zusammenzuführen, wird im Prinzip ein ähnlicher innovativer Beitrag wie mit der Entwicklung der iPhones und den zugehörigen Apps verfolgt. Das Betriebssystem iOS liefert für die Hardwareplattform iPhone einen Stamm an nutzungsneutralen Funktionen, die Entwickler in der Gestalt einer App zu neuen Funktionalitäten kombinieren können. Mit der Kamera und dem Software-Framework entsteht eine vergleichbare Rahmenbedingung für die Entwicklung neuer Sensorfunktionen zur Zustandserfassung.

Es wird hiermit insgesamt das Ziel verfolgt, einen innovativen Beitrag zum einfacheren und breiteren Einsatz der Zustandserfassung zu leisten.

### 1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Zur Erreichung des Forschungsziels wird die Gesamtaufgabe in drei Teile gegliedert. Teilpaket 1 umfasst die detaillierte Bestandsaufnahme, die Definition von Anforderungen und die Diskussion und Auswahl einer geeigneten Hardware-Einheit. Teilpaket 2 behandelt die Softwareanbindung. Hierbei wird zwischen der Erstellung eines offenen Software-Frameworks, welches die modulare Funktionsarchitektur ermöglicht, und der Bereitstellung von Bildauswertungsbibliotheken unterschieden. Teilpaket 3 beinhaltet abschließend Voruntersuchungen und die Erstellung von Demonstratoren für erste wichtige Ident-Aufgaben. Die nähere Unterteilung wird durch Abbildung 1-2 inkl. der Aufteilung in Arbeitspakete ersichtlich.

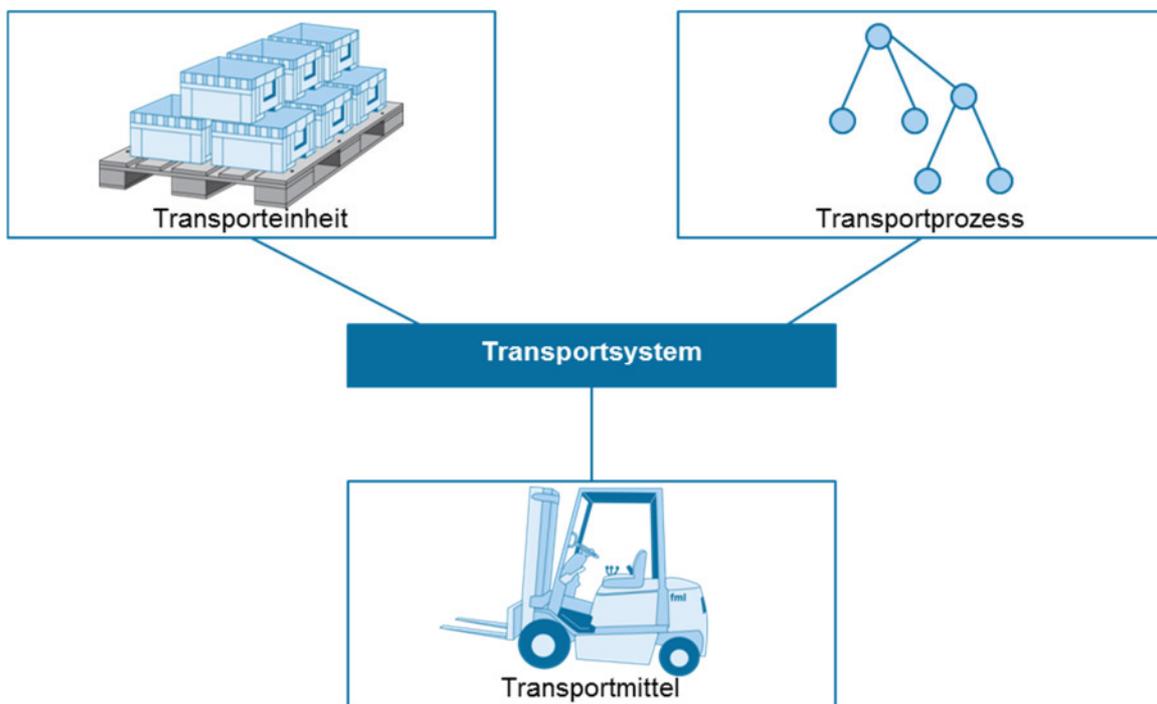


**Abbildung 1-2: Methodische Aufteilung des Forschungsvorhabens in drei Teilpakete und neun Arbeitspakete**



## 2 Stand der Forschung

Die Intralogistik ist der Bestandteil der Logistik, der sich um die Organisation, die Steuerung, die Optimierung und selbstverständlich um die Durchführung des innerbetrieblichen Material- und Informationsflusses kümmert [DEL-2010]. Die Steuerung und insbesondere die Ausführung des Materialflusses, d. h. des Transports von Gütern zwischen Quelle und Senke, obliegt dem Transportsystem [MAR-2009]. Das Transportsystem teilt sich in die zu transportierende Transporteinheit, in das Transportmittel zur Ausführung des Transports und in den Transportprozess zur Steuerung der Transportausführung ein (vgl. Abbildung 2-1).



**Abbildung 2-1: Bestandteile des Transportsystems [GÜN-2012]**

Für die Steuerungen eines Prozesses, wie z. B. des Transportprozesses, werden Informationen zum Zustand oder zur Zustandsänderungen im Prozess benötigt. Bartneck sieht in diesen Informationen auch die wesentliche Grundlage für die Ausführung eines effizienten Materialflusses [BAR-2008]. Entsprechende Informationen über den Zustand des ablaufenden Prozesses, auch Statusinformationen genannt, werden durch Sensoren im Transportprozess erfasst [HES-2009]. Jeder Sensor hat in diesem Fall eine spezifische Information, die er erfasst, und erfüllt damit eine Sensorfunktion zur Zustandserfassung.

Der Transportprozess kann durch eine Vielzahl verschiedenartiger Transportmittel ausgeführt werden, wobei anhand der Kontinuität des Materialflusses zwischen Stetigförderern und Unstetigförderern unterschieden wird. Im Vordergrund dieser Arbeit stehen Unstetigförderer, deren weitest verbreiteter Vertreter der Gabelstapler als flurgebundenes Transportmittel mit Einrichtung zum vertikalen Hub von Gütern ist. Damit ist der Gabelstapler für die Handhabung von unterfahrbaren Gütern im Regal, auf dem Boden und zur Übergabe an Stetigförderer geeignet. Folglich zeichnet er sich durch seine hohe Flexibilität aus [ARN-2008], wobei dies mit einem verhältnismäßig hohen Anteil manueller Tätigkeiten einhergeht [JÜN-1989, HEI-2006].

An dieser Stelle soll nun der Stand der Forschung dargestellt werden, der die Zustandserfassung im Transportprozess am Gabelstapler beschreibt, um zum einen eine effiziente Ausführung des Prozesses zu garantieren und zum anderen manuelle Tätigkeiten im Prozess zu reduzieren. Dazu werden im ersten Schritt Sensorfunktionen am Gabelstapler beschrieben, während im zweiten Schritt die Bedeutung optischer Sensortechnologien zur Umsetzung dieser Sensorfunktionen dargestellt wird. Im dritten Schritt wird der Stand der Forschung im Bereich der Bildverarbeitung skizziert.

### **2.1 Zustandserfassung am Gabelstapler**

Ein Zustand ist die Beschreibung der Ausprägung eines Vorgangs oder eines Objekts zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Beschreibung erfolgt durch eine Quanti- und/oder Qualifizierung der Eigenschaften des jeweiligen Vorgang oder Objekts. Im Vordergrund dieser weiteren Diskussion steht die Erfassung der jeweiligen Ausprägungen des Objekts Gabelstapler im Vorgang des innerbetrieblichen Transportes.

Die Bedeutung dieser Zustandserfassung beschreibt Deierling eindrucksvoll, indem er Effizienzverluste im Gabelstapler-basierten Transport auflistet und eine mangelnde Transparenz über den Zustand des jeweilig ablaufenden Transportprozesses anführt [JUN-2010]. Hierin sieht er hohen Forschungsbedarf, der heute bereits in einer Vielzahl an überwiegend anwendungsorientierten Forschungsprojekten bearbeitet wird. Entsprechende Projekte fokussieren nicht auf einer klar definierte Menge an Sensortechnologien, sondern lassen sich anhand der umzusetzenden Sensorfunktionen besser differenzieren. Einen sehr hohen Stellenwert hat hierbei die Lokalisie-

rung gegenüber allen weiteren Sensorfunktionen, weswegen im weiteren Verlauf der Stand der Forschung zur Lokalisierung separat aufgezeigt wird.

### 2.1.1 Zustandserfassung zur Lokalisierung

Sofern der Zustand des Aufenthaltsortes eines Objektes durch dessen Lokalisierung betrachtet wird, wird im Kern die Pose des Objektes bestimmt. Die Pose umfasst die Erfassung der Position und der Orientierung des Objektes [DIN 8373]. Die Position ist eine räumliche Kennzeichnung des Objektes, indem dessen Abstand zu einem Ursprung des Raums bzw. zu einem Bezugspunkt in Koordinaten ausgedrückt wird. Hierbei wird auch von der absoluten Position gesprochen [MAL-2009]. Die Orientierung ist der Differenzwinkel zwischen den körpereigenen Achsen des Objektes und den den Raum aufspannenden Koordinatenachsen.

Da der Raum im weiteren Verlauf durch drei Dimensionen des verwendeten kartesischen Koordinatensystems aufgespannt wird, stellt eine zwei-dimensionale Positionsbestimmung nur eine Bestimmung des Aufenthaltsortes in der Ebene dar, die senkrecht zur Erdgravitation liegt. Eine vollständige und eindeutige Beschreibung der räumliche Lage erfolgt nur durch eine drei-dimensionale Positions- und Orientierungsbestimmung. Einschränkungen in den Freiheitsgraden des betrachteten Objektes ermöglichen allerdings, eine reduzierte Anzahl an Dimensionen zu betrachten. So bewegt sich ein Gabelstapler typischerweise auf der Ebene fort (2D) und dreht sich lediglich um dessen Normale. Findet allerdings eine Betrachtung der Position der Gabelzinke am Gabelstapler statt, ist zumindest eine dreidimensionale Betrachtung der Gabelzinke erforderlich.

Im weiteren Verlauf der Diskussion des Stands der Technik wird auf die Differenzierung zwischen Pose- und Orientierungsbestimmung nur eingegangen, sofern sich das betrachtete System vom weiteren Stand der Technik absetzt. In der breiten Wahrnehmung wird diese Differenzierung selten vorgenommen.

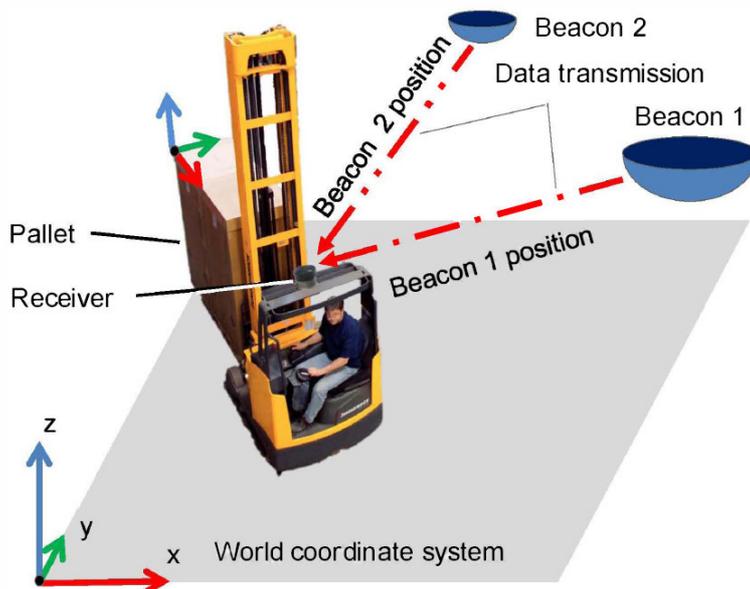
Eine Vielzahl an Forschungsprojekten beschäftigt sich singular mit der Entwicklung einer Lokalisierungslösung für die Bestimmung der Pose/Position des Gabelstaplers. Hierbei kommen unterschiedliche Technologien zur Lokalisierung zum Einsatz, wobei Funklösungen eine hohe Verbreitung aufzeigen, optische Technologien in letzter Zeit vermehrt in den Vordergrund drängen und auch die Zusammenführung verschiedener Technologien mit dem Ziel der Lokalisierung erfolgt.

Das Projekt zur Entwicklung eines Local Positioning Radar (LPR) am Institut für Elektrische Informationstechnik an der TU Clausthal unter der damaligen Leitung von Prof. M. Vossiek ist für **Funktechnologien** ein geeignetes Beispiel. Hohe Reichweiten in der Positionsbestimmung werden durch den Betrieb des Systems bei 5,8 GHz erreicht. Das Signal wird hinsichtlich seiner Laufzeit zwischen Sende- und Empfangsimpuls (Round Trip of Flight RtoF) am Gabelstapler ausgewertet, was durch die Kenntnis der Signalgeschwindigkeit eine Distanzinformation liefert. Die parallele Auswertung mehrerer Signale, die an identifizierten Transpondern im Raum reflektiert werden, ermöglicht nach dem Prinzip der Lateration eine Positionsbestimmung. In der Umgebung reflektierte Signale beeinflussen die Positionsbestimmung negativ, weswegen versucht wird, sie durch statistische Methoden zu eliminieren. Ein vorgestellter Demonstrator erzielt eine Lokalisierungsgenauigkeit von  $\pm 10$  cm [FUE-2008]. Einen vergleichbaren Ansatz verfolgt das Projekt „BlackFIR 2.4 Invers“ am Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen, wobei hier ein 2,4 GHz Signal verwendet wird [HEU-2011]. Eine ebenso hohe Lokalisierungsgenauigkeit wird dadurch erzielt, dass die Sende- und Empfangsantenne auf dem Gabelstapler aus einer Vielzahl an Antennenelementen besteht, die in Serie ein Antennenarray ergeben und somit eine sehr präzise Auswertung der Einfallsrichtung des Signals erfolgen kann. Diese Winkelinformationen (Angle of Arrival AoA) zu einer Vielzahl an Referenztranspondern im Raum ermöglichen unter Nutzung des Prinzips der Angulation eine Positionsbestimmung.

In weiteren Forschungsprojekten zur Staplerlokalisierung werden **optische Technologien** verwendet, gerade auch um neben der Lokalisierung weitere Funktionen realisieren zu können oder den Aufwand zur dichten Anbringung von Referenzen im Raum zu reduzieren.

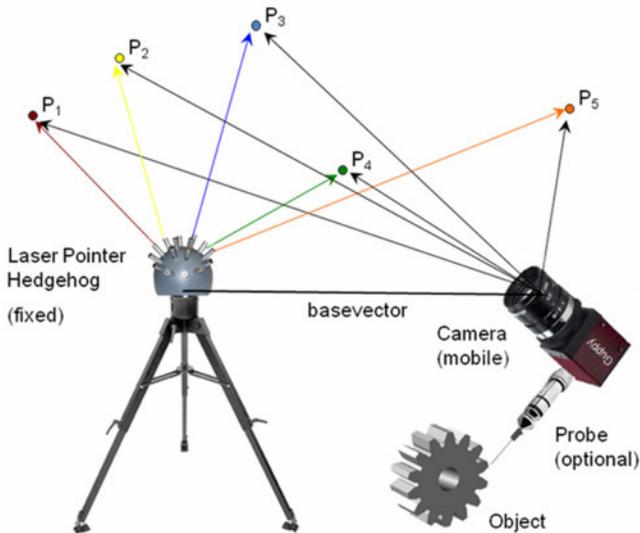
Das letztgenannte Motiv ist im Projekt „ISI-WALK“, bzw. in dessen Teilprojekt „Wandlungsgerechte Automatisierung von Transport- und Lagersystemen“, am Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH (IPH) der Beweggrund für die Nutzung aktiver Referenzbarken an der Hallendecke, die im infraroten Bereich pulssierend identifizierende Lichtsignale aussenden. Eine Infrarotkamera auf dem Gabelstapler ermöglicht die Identifikation der Barke und damit die Bestimmung der absoluten Position der Referenz. Parallel erzeugt die auf dem Gabelstapler lokalisierende Einheit ein Bild der Szene im sichtbaren Bereich des Lichtes, so dass auf dem Bild die relative Lage der Kamera bzw. des Gabelstaplers zur Referenz erkennbar ist (vgl. Abbildung 2-2). Durch die Kombination der relativen Pose zur Marke und der abso-

luten Pose der Marke lässt sich die absolute Pose des Gabelstaplers bestimmen. Dieser Ansatz sieht vor in Hallen die vorhandene künstliche konventionelle Beleuchtung durch spezielle Beleuchtung auszutauschen, die im infraroten Bereich charakteristisch pulsiert. Hierdurch wird ein Reduktionsaufwand in der Schaffung einer bei Lokalisierungssystemen bisher erforderlichen Infrastruktur dargestellt [HEI-2012].



**Abbildung 2-2: Systemaufbau im Forschungsprojekt ISI-Walk [HEI-2012]**

Im Forschungsprojekt „CLIPS - Camera and Laser Indoor Positioning System“ am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich wird ein ähnlicher Ansatz umgesetzt, der sich allerdings nicht auf die Staplerlokalisierung als Anwendung bezieht, sondern das Ziel einer Millimeter-genauen Innenraumlokalisierung verfolgt. Hier wird mit einer konventionellen Industriekamera die im Bild projizierte Lage eines starren Verbundes an Laserdioden betrachtet, die jeweils auf Grund ihrer Farbe identifiziert werden können (vgl. Abbildung 2-3) [MAU-2010]. In beiden Projekten werden somit aktiv strahlende Komponenten für die Kennzeichnung einer absoluten Referenz im Raum verwendet.



**Abbildung 2-3: Systemaufbau im Forschungsprojekt CLIPS [MAU-2010]**

Diese Gestaltung wird im Projekt „MarLO – Markerbasierte Lokale Ortung für Betriebsmittel, Güter und Waren“ am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung umgekehrt, zudem wird nur ein passiver Marker verwendet. Statt einer Bestimmung der Pose am Fahrzeug selber nach dem Prinzip einer Eigenortung (siehe Forschungsprojekte ISI-Walk und CLIPS), werden hier Kameras im Raum an Referenzpunkten installiert, die einen identifizierenden, optischen und passiven Marker auf dem Dach des Gabelstaplers im Bild erfassen. Diese Bilder werden hinsichtlich der Lage des Markers im Bild ausgewertet (vgl. Abbildung 2-4) und mit der absoluten Position der jeweiligen Kamera zusammengeführt, so dass außerhalb des Gabelstaplers zentral für eine Vielzahl an Gabelstaplern deren jeweilige Pose bestimmt wird [BOR-2011]. Dieser Ansatz wird in der Literatur auch als Fremdortung bezeichnet.



**Abbildung 2-4: Beispielbild für die weitere Bestimmung der relativen Lage des Gabelstaplers im Bild, Forschungsprojekt MarLO [BOR-2011]**

Der von den Autoren hervorgehobene Vorteil dieses Ansatzes ist die Möglichkeit, durch die kamerabasierte Beobachtung der Staplerbewegungen nicht nur die laufende Posenänderung der Stapler zu verfolgen, sondern auch weitere visuell erfassbare Zustände in den logistischen Prozessen zu erfassen [BOR-2011]. Hierfür wäre eine separate Bildauswertung der gleichen Bildszenen erforderlich.

Neben beschriebenen Forschungsansätzen, die zur Umsetzung einer Lokalisierung maßgeblich auf eine Technologie aufbauen, wird der Ansatz der **integrierten Navigation** verfolgt. Hierunter ist nach [DOD-2010] und [STR-2008] die parallele Verwendung einer Vielzahl an Technologien mit dem einheitlichen Ziel der Lokalisierung ein und desselben Objektes zu verstehen. Idealerweise werden hierdurch Technologien kombiniert, die sich in ihren Vor- und Nachteilen insbesondere hinsichtlich der Störwirkung von Umgebungseinflüssen ergänzen. Die Systeme unterscheiden sich allerdings im jeweiligen Grad der Fusionierung der einzelnen Sensorsignale.

Im anwendungsorientierten Forschungsprojekt „Flexible Indoor- und Outdoor-Lokalisierung von Flurförderzeugen“ am Lehrstuhl fml (ZIM-FV KF2063702KM8) wurde das Ziel verfolgt, durch die intelligente Kombination verschiedener Sensortechnologien eine kurz- und langfristig stabile Lokalisierung des Gabelstaplers sowohl im Innen- als auch im Außenbereich von Lagern zu realisieren. Hierzu wird ein Global Positioning Satellite (GPS-)Receiver mit einer RFID-LF Lokalisierung unter Anwendung von Bodentranspondern kombiniert, so dass eine flächendeckende punktuelle Lokalisierung erfolgen kann. Um diese Lokalisierung kurzfristig zu stabilisieren und in eine kontinuierliche Lokalisierung zu erweitern, wird zusätzlich eine

Mehrachsen-Inertialsensorik integriert. Zustandsabhängig findet eine statische Fusionierung der jeweiligen absoluten und relativen Informationen zur Pose des Fahrzeuges statt, so dass im Ergebnis ein verbessertes Lokalisierungsergebnis steht [GÜN-2010a].

Mit der Fokussierung auf autonom verfahrenende Flurförderzeuge, z. B. Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF), findet der Ansatz der integrierten Navigation ebenso seinen Einsatz. Hier findet eine deutlich höhere Integration des Systems in die Fahrzeugsteuerung statt, so dass z. B. Odometrie-Sensoren in die Bestimmung der Pose eingeschlossen werden. Beispiele hierfür sind die Forschungsprojekte „KARIS – Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistiksystem“ am Institut für Förder-technik und Logistiksysteme in Karlsruhe und das Projekt „LASSO – Fahrerlose Transportsysteme mit Lasernavigation“ am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund. Diesen Projekten ist ebenso ein deutlich höherer Fusionsgrad der jeweiligen Sensortechnologien gemeinsam, indem in der Fusionierung eine stochastisch basierte Zustandsschätzung der Sensor-eigenen Fehlercharakteristik erfolgt. Hierbei werden auf bayessche Filtermethoden zurückgegriffen.

Im Ergebnis ist zu erkennen (vgl. Tabelle 2-1), dass in der Forschung eine Vielzahl an Ansätzen erkennbar ist, die sich als Einsensor- und Mehrensensoren beschreiben lassen. Verbreitet sind für die Aufgabe der Lokalisierung insbesondere Funktechnologien, jedoch finden in der letzten Zeit zunehmend optische Lösungen unter Anwendung von Kameras und Laserscannern Einsatz. Hierbei ist allerdings anzumerken, dass sich die Forschung zu Fragestellungen der Lokalisierung weit über die Problemstellung einer Staplerlokalisierung hinaus bewegt, wie am Beispiel des Forschungsprojektes CLIPS zu sehen ist. Dem Großteil der Forschungsprojekte zur Lokalisierung eines Gabelstaplers bzw. eines Flurförderzeugs (FFZ) ist die Systemgestaltung nach dem Prinzip der Eigenortung gemein.

### **2.1.2 Weitere Zustandserfassung**

Das Flurförderzeug – und der Gabelstapler im Besonderen – entwickelt sich zunehmend zu der relevanten Schnittstelle zwischen der operativen Prozessausführung und der Leit- und Führungsebene in überlagerten Unternehmenssystemen [ARN-2006]. Um dem höheren Steuerungsbedarf der ablaufenden Prozesse auf Grund wachsender Effizienzanforderungen in der Prozessausführung gerecht zu werden, ist es somit erforderlich, am Gabelstapler neben der Lokalisierung weitere Zustände des Transportmittels und -prozesses aufzunehmen. Hierzu wird insbesondere das

Tabelle 2-1: Übersicht zum Stand der Forschung in der Staplerlokalisierung

Projekt	Forschungsinstitut	Lokalisierungstechnologie	Einsensor-(ES)/Mehrsensorsystem	Fahrzeugbedienung manuell (M)/	Lokalisierungsgenauigkeit abs./rel.	System-Architektur
<b>LPR</b>	Prof. Vossiek, TU Clausthal, Institut für Elektrische Informationstechnik	Radar mit 5,725-5,875 GHz	ES	M	dm/-	Eigenortung
<b>BlackFIR 2,4 Invers</b>	Prof. Heuberger, Fraunhofer IIS	Funkt mit 2,4 GHz	ES	M	dm/-	Eigenortung
<b>ISI-Walk</b>	Prof. Overmeyer, IPH Hannover u.a.	Kamera Infrarot, Kamera sichtbares Licht	MS	M	cm/-	Fremdortung
<b>MarLO</b>	Prof. Schenk, Fraunhofer IFF	Kamera (sichtbares Licht)	ES	M	dm/-	Fremdortung
<b>FIO FFZ</b>	Prof. Günthner, TU München, Lehrstuhl fml	RFID-LF 125kHz, Inertialsensorik, GPS	MS	M	dm/dm	Eigenortung
<b>KARIS</b>	Prof. Furmans, KIT, Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme u.a.	Odometrie, Laserscanner	MS	A	cm/cm	Eigenortung
<b>LASSO</b>	Prof. ten Hompel, Fraunhofer IML	Laserscanner, Odometrie	MS	A	cm/cm	Eigenortung

Potenzial zur Fehlervermeidung und zur Reduktion des Verletzungsrisikos des Fahrers angeführt. Somit werden nicht nur Prozesszeiteinsparungen mittels reduzierter Suchzeiten und die Eliminierung manueller sequenzieller Tätigkeiten, z. B. Warenerfassung, erreicht, sondern es wird auch die Arbeitssicherheit durch die Unterbindung eines verletzungsgefährdenden fortwährenden Auf- und Absteigens vom Fahrzeug gesteigert [HOR-2004, JUN-2010, KAN-2010]. In der Entwicklung entsprechender Systeme zur Zustandserfassung wird zahlreicher Forschungsbedarf gesehen [JUN-2010], wobei folgend auf einzelne hervorzuhebende Beispiele eingegangen wird. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Kontext auch vermehrt von Event- oder Ereigniserkennung gesprochen wird, die sich im Kern auf das Erkennen einer Zustandsänderung bezieht und somit lediglich eine relative Betrachtung zweier aufeinanderfolgender Zustände darstellt. Im weiteren Verlauf wird hierbei nicht differenziert, sondern im Allgemeinen über die Zustandserfassung gesprochen. Eine Darstellung der Datenverarbeitung entsprechender Zustandsinformationen, z. B. zur

Prozesssteuerung, erfolgt nicht, da diese nicht Bestandteil der Zielsetzung dieses Forschungsprojektes ist.

Im Rahmen des Transportsystems, bestehend aus dem Transportprozess, dem Transportmittel und der Transporteinheit, ist nicht nur der Aufenthaltsort als Zustand des Transportmittels, sondern in den meisten Fällen auch die **Identität der Transporteinheit** relevant. Diese dient zur Zustandsbeschreibung der Transporteinheit, da in Unternehmenssystemen i.d.R. eine Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Transporteinheit mit dessen Identität logisch verknüpft ist.

Das Forschungsprojekt „IdentProLog“ unter der Konsortialführung des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) in Hannover greift diesen Sachverhalt auf, indem es unter Anwendung der RFID-Technologie eine punktuelle Lokalisierung und durchgehende Warenidentifikation am Gabelstapler umsetzt. Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit liegt neben der prototypischen Umsetzung in der Methodentwicklung für die Integration entsprechender Sensorsysteme am Fahrzeug und deren Einbindung in die IT-Landschaft eines Unternehmens. Das Motiv des Projektes ist die Verwendung des Gabelstaplers, der zentraler Akteur im Transportprozess ist, als „mobiles Gate zur Erfassung von Prozesszuständen“ [JUN-2010].

An der Universität Dortmund wird u.a. in Forschungstätigkeiten ebenso eine Zustandserfassung hinsichtlich Ort und Identität realisiert, wobei als Transportmittel Stetigförderer betrachtet werden [WEI-2010]. Hier wird durch die Kombination der RFID- und Kamera-Technologie und anschließender Datenfusion in definierten Lagerzonen eine Zustandserfassung mit dem Ziel der Prozessdokumentation und -steuerung realisiert. In dem Forschungsprojekt „TILO – Tracing Intelligenter Logistikobjekte“ am Lehrstuhl für Transportsysteme und -logistik der Universität Duisburg-Essen<sup>1</sup> wird dieser Ansatz weiterentwickelt, indem durch eine Aggregation zahlreicher Sensoren weitere Prozesskennzahlen zur Zustandsbeschreibung ermittelt werden.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich nicht vornehmlich mit der Erfassung einzelner Prozesszustände, um den Prozess zu dokumentieren oder zu steuern, sondern um dem Prozessausführenden direkte Assistenzen für eine effizientere und sichere Durchführung an die Seite zu stellen.

---

<sup>1</sup> <http://www.tilo.uni-due.de>

So wird in einem weiteren Teilprojekt des Forschungsprojektes „ISI-WALK“ mit dem Ziel der **Kollisionsvermeidung** beim Vorgang des Umschlages eine Einfahrhilfe in die Ladeeinheit geboten. Hierzu wird jeweils in die Gabelzinkenspitze eine Kamera integriert, die in Summe ein Stereokamerasystem ergeben und somit eine dreidimensionale Ansicht der Einfahrt in die Ladeeinheit erzeugen. Zur weiteren Unterstützung des Fahrers wird dieses Bild hinsichtlich der relativen Lage der Gabelzinke zum Einfahrkanal in das Ladegut mittels Algorithmen der Bildverarbeitung ausgewertet.

Allerdings können Zustandsinformationen nicht nur in der manuellen Prozessausführung durch den Gabelstapler-Fahrer relevant sein, sondern insbesondere in der Prozessautomatisierung. Im Projekt „EMOSES – Entwicklung einer Methode zur Objekterkennung von universellen Stückgütern für die automatische Entladung von Standardladungsträgern aus 3D Laserscandaten“ am Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA)<sup>2</sup> wird ein Entladeroboter von Frachtcontainern in seiner Funktionsausübung geführt. Mittels Laserscanner wird ein 3D Volumenmodell der im Container geladenen Stückgüter erzeugt. Hierbei wird die Aufnahme der einzelnen Packstücklagen durch eine Klassifikation mittels Vorkenntnissen zum Volumen möglicher geladener Packstücke unterstützt. Entsprechend ist eine höhere Funktionalität zu erreichen.

Ein vergleichbares Ziel der automatisierten Depalettierung verfolgt der Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen an der TU Dortmund unter Prof. ten Hompel. Im IGF-Projekt 16919 wird statt eines Laserscanners eine Photonen-Misch-Detektoren-Kamera (PMD-Kamera) verwendet, die die Phasenverschiebung des rückstrahlenden Lichtes auf dem Fotosensor auswertet und somit ebenso ein Tiefenbild der Szene, einer Palette mit einem Gebinde aus einzelnen Packstücken, erzeugt [PRA-2013].

Hier ist zu erkennen, dass eine Vielzahl an Forschungsprojekten zur Erfassung verschiedenartiger Prozesszustände auf optische Systeme setzt, wobei hier 2D- und 3D-bildgebende Verfahren gleichermaßen eingesetzt werden. Allerdings besteht ebenso ein klares Bedürfnis relative Abstandsinformationen zu erfassen, wozu 3D-bildgebende Verfahren bisher den einzigen optischen Lösungsansatz darstellen.

---

<sup>2</sup> [http://www.ips.biba.uni-bremen.de/projekt.html?project\\_id=EMOSES](http://www.ips.biba.uni-bremen.de/projekt.html?project_id=EMOSES)

## 2.2 Optische Sensortechnologien zur Zustandserfassung

### Technische Einordnung

Sensoren zur Zustandserfassung lassen sich entsprechend der jeweiligen Messgrößen in Gruppen gliedern. Als prominente Beispiele für Sensoren sind kapazitive Sensoren (z. B. Drucksensoren), Magnetfeldsensoren (z. B. Hall-Sensoren), Temperatursensoren und auch optoelektronische Sensoren zu nennen. Diese sind Gegenstand der weiteren Betrachtung, wobei ein Einblick in die technische Gestaltung dieser Sensoren und ihr erzeugtes Sensorsignal gegeben werden soll.

Optoelektronische Sensoren beinhalten eine Detektorzelle als elektronischen Baustein, der aus einzelnen Photodioden besteht. Diese sammeln in Form von Licht einfallende Photonen und bilden eine zur Lichtmenge proportionale elektrische Ladung. Die beiden Arten eines Flächensensors, Charge Coupled Device Fotosensor (CCD) und Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS), unterscheiden sich in der Art und Weise der Steuerung des Auslesens der Ladung der einzelnen Photodioden.

Optoelektronische Sensoren nehmen Licht auf, welches sich in drei charakteristische Gruppen abhängig von der Wellenlänge gliedern lässt [DIN 5031-7]:

- Ultraviolettes (UV-) Licht mit einer Wellenlänge von ca. 10 bis 380 nm
- Sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von 380 bis 780 nm
- Infrarotes (IR-) Licht mit einer Wellenlänge ab 780 nm, welches für nahes IR-Licht bis zu einer Wellenlänge von 3000 nm erstreckt.

UV-Licht wird vornehmlich im medizinischen Bereich und in den Werkstoffwissenschaften zur Analyse von Molekülstrukturen verwendet, während IR-Licht im nahen Bereich zum sichtbaren Licht für die Abstands- und Durchgangsmessung verwendet wird. IR-Licht-Sensoren zeichnen sich durch eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Dunst und Luftverunreinigungen aus. Da in der hier betrachteten Einsatzumgebung der innerbetrieblichen Logistik nicht mit entsprechenden Sichteinschränkungen gerechnet wird (vgl. Kapitel 3), steht für die in diesem Projekt verfolgte Entwicklung das sichtbare Licht im Vordergrund.

Somit steht der Vergleich entsprechender optoelektronischer Sensoren mit dem menschlichen Auge nahe, wie es auch der Projekttitle „Das Staplerauge“ andeutet. Jedes bildgebende System zeichnet sich gegenüber dem menschlichen Auge nur

als technisch minderwertige Sensorik aus. Das Sichtfeld ist deutlich eingeschränkter, aber vor allem die räumliche Auflösung und die räumliche Wahrnehmung optoelektronischer Sensoren ist gegenüber dem Auge unterentwickelt. Damit ist ein Vergleich zwischen dem menschlichen Auge und entsprechenden optoelektronischen Sensoren nur unter dem Grundsatz starker Abstraktion zu führen. Bildverarbeitende Systeme bestehen u.a. aus einem optischen Sensor und sind somit auch nur eine unzureichende Näherung des menschlichen Auges und des menschlichen Gehirns, weil optische Sensoren ein unweit instabileres Fehlverhalten (z. B. Sensorrauschen) aufzeigen. [HOL-1998, JÄH-2005]

Zustände lassen sich mittels optischer Sensoren in einem zwei- oder dreidimensionalen Abbild erfassen. Im 2D-Bild besteht das Abbild aus einem Raster an Bildpunkten, die Pixel genannt werden und physisch jeweils einer Fotodiode auf dem Fotosensor entsprechen. Jeder Pixelwert ist eine Information über die Farbsättigung oder Helligkeit der realen Szene. Es ergeben sich im Bild somit Texturen und Konturen bzw. Geometrien, die mittels der Bildverarbeitung analysiert und hinsichtlich einzelner Zustände interpretiert werden können. 3D-Bilder enthalten zusätzlich die Information zur Bildtiefe bzw. zum Abstand eines realen Punktes, symbolisiert durch die Distanz des einzelnen Pixels zum erfassenden Sensor. Eine Darstellung kann als Punktwolke erfolgen, die im Kern eine Liste kartesischer Koordinaten ist. Das 3D-Bild ermöglicht vornehmlich eine Analyse hinsichtlich der räumlichen Zusammenhänge in der erfassten Szene.

### **Das Bildverarbeitungssystem**

Ein Bildverarbeitungssystem besteht aus einem Objektiv und einer Kamera mit einem optoelektronischen Sensor. Eine zusätzliche softwarebasierte Bildverarbeitung auf einer Bildverarbeitungseinheit ermöglicht die Bildanalyse. [DEM-2011]

Die Erfassung einer Szene, welche Objekte beinhaltet, deren Erscheinung in der Bildverarbeitung hinsichtlich charakteristischer Zustände analysiert werden soll, stellt sich wie in Abbildung 2-5 dar. Entsprechende Größen sind maßgeblich für die weitere Diskussion im Rahmen dieses Berichtes. Dabei befindet sich das zu erfassende Objekt in der Gegenstandsebene, die sich mit dem Objektabstand bzw. der Gegenstandsweite  $g$  zum Objektiv befindet, welches die Hauptebene bildet. Damit wird der Objektraum beschrieben, der Teil der realen Welt und somit der erfassten Szene ist. Innerhalb des Objektivs und der Kamera spannt sich der

Bildraum auf. Er befindet sich zwischen der Hauptebene und der Bildebene (dem Fotosensor), seine Größe wird durch die Bildweite  $b$  definiert.

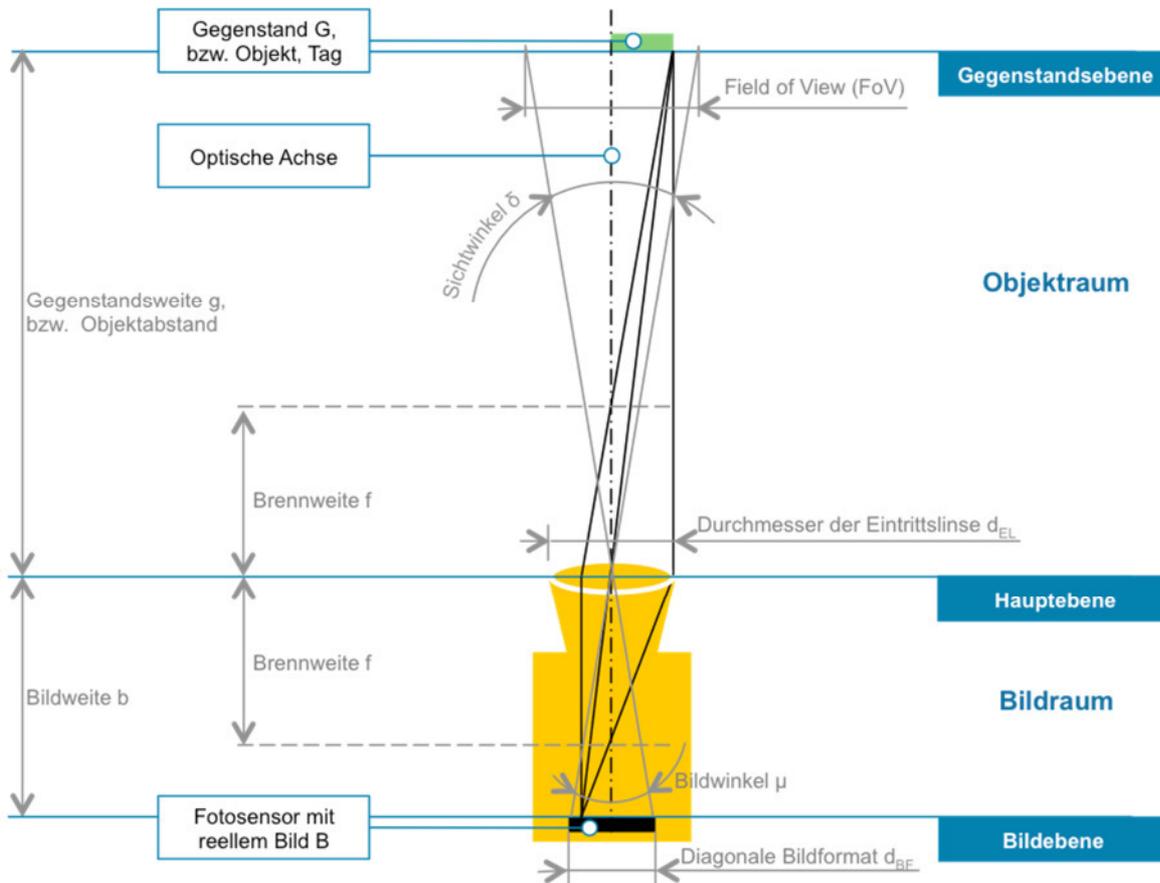


Abbildung 2-5: Modell zur Bilderfassung

### Abgrenzung technischer Konzepte zur 2D- und 3D-Bilderfassung

Für die Kamera gibt es eine Vielzahl an technischen Konzepten, die sich vor allem hinsichtlich der Erfassung einer Szene in einem 2D- oder 3D-Bild unterscheiden. Abweichend von der bisherigen Beschreibung der Bilderfassung, die vornehmlich auf die 2D-Bilderfassung zutrifft, gibt es für die 3D-Bilderfassung monoculare und binoculare Ansätze, die auch in der Logistik z. B. zur Erfassung von Volumina wachsenden Einsatz finden [SCH-2011]. Letztere Systeme werden auch Stereokameras genannt, in denen sich zwei 2D-bilderfassende Kameras in einer starren räumlichen Anordnung zueinander befinden. Durch die Betrachtung von Bildpunktkorrespondenzen der beiden aufgenommenen Bilder der gleichen Szene unter voneinander abweichender Perspektive lässt sich die dreidimensionale Szene rekonstruieren und somit ein Tiefenbild erzeugen. Allerdings stellt die Einschränkung zur räumlichen Anordnung der beiden Kameras für die 3D-Bilderfassung eine Hürde für den Einsatz

und die kostenarme Integration am Gabelstapler dar, die eine der Zielsetzungen in diesem Projekt ist. Deshalb findet im Projekt das Staplerauge nur ein monoculares Kamerasystem seinen Einsatz. In der Nutzung monocularer Kamerasysteme für die 3D-Bilderfassung gibt es in der letzten Vergangenheit große Fortschritte, nicht nur durch die Markteinführung der Microsoft Kinect-Kamera. In diesen Kamerasystemen wird die Tiefeninformation durch die Analyse eines weiteren Signals erzeugt, welches i.d.R. zusätzlich von dem Sensor zusätzlich erzeugt wird. Damit entspricht das System im strengen Sinne keinem Einsensorsystem mehr, wie es der Grundsatz in diesem Projekt ist. In Time-of-Flight Kameras wird die Signallaufzeit eines aktiv ausgesendeten optischen oder akustischen Signals gemessen und hinsichtlich des Abstandes analysiert. So findet in der Microsoft Kinect-Kamera ein Infrarotsensor seinen Einsatz. Allerdings ist die Reichweite begrenzt und die räumliche Auflösung beschränkt, da auf Grund der hohen Übertragungsgeschwindigkeit insbesondere optischer und akustischer Signale die Anforderung an die Zeitauflösung des Sensors sehr groß ist. In herkömmlichen Systemen ist zudem eine hohe Abhängigkeit der Messung von Mehrwegeausbreitungen bzw. Multipath-Effekten zu erkennen. Die Reichweite dieser Systeme ist theoretisch im Kilometerbereich, z. B. für Geo-Anwendungen, und beschränkt sich in einem Low-Cost-Sensor wie der Microsoft Kinect auf eine Reichweite von 0,8 bis 4,0 m [MIC-2012]. Wird das zusätzliche die Tiefe erfassende Signal über die betrachtete Szene geschwenkt, wie z. B. in einem Laserscanner als optischer Zeilensensor der Fall, so besteht auch eine Abhängigkeit von der Eigenbewegung der Kamera. Diese ist über zusätzliche Sensoren zu erfassen und in der Rekonstruktion der Szene einzubeziehen. Hierdurch entsteht eine Abhängigkeit der Sensorgenauigkeit von der Dynamik der Szene. Weitere Ansätze zur monokularen 3D-Bilderfassung setzen auf definierte Lichtmusterprojektionen auf die betrachtete Szene, welche zwar kostengünstig sind, aber große Einschränkungen hinsichtlich der Dynamik der Szene (Lichtverhältnisse, Bewegungen) mit sich bringen. Eine ähnliche Methode sieht lediglich eine definierte Lichtrichtung vor, so dass aus einer Bildfolge durch die Analyse des Schattenwurfs (shape-from-shading) oder durch die Analyse der räumlichen Bewegung (shape-from-motion bzw. structure-from-motion) auf Tiefenbilder geschlossen wird. Diese Ansätze benötigen rechenintensive Operationen und stellen daher hohe Anforderungen an die Bildauswerteeinheit. Durch Engpässe in der Datenverarbeitung und Signalerfassung ermöglichen sie lediglich eine geringe räumliche Genauigkeit. [JÄH-2005]

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass die 2D-Bilderfassung gegenüber der 3D-Bilderfassung hinsichtlich des Datenverarbeitungsaufwandes, der optischen und

räumlichen Auflösung sowie der Unabhängigkeit von vorbestimmten Lichtverhältnissen hinsichtlich des Projektziels der Zustandserfassung am Gabelstapler in der Logistik die vorteilhaftere Lösung darstellt. Darum findet im weiteren Verlauf eine Fokussierung auf Bildverarbeitungssysteme zur 2D-Erfassung statt.

### **2.3 Methoden in der Bildverarbeitung zur Zustandserfassung**

Ebenso vielfältig wie die zu erfassenden Zustände sind auch die Methoden und Algorithmen, die dazu verwendet werden können, die Zustände zu bestimmen. In diesem Unterkapitel werden daher nur die Methoden beschrieben, die für die Entwicklung der in Kapitel 5 beschriebenen Demonstratoren zum Einsatz kommen.

#### **2.3.1 Klassifizierung**

Die Klassifizierung entspricht der Zuweisung von Objekten zu bestimmten Klassen und ist dem Bereich der Mustererkennung zuzuordnen (vgl. JÄH-2005). Sie wird immer dann benötigt, wenn ein Objekt im Bild erkannt werden soll. Jähne stellt den Prozess der Klassifizierung anhand von Merkmalen als Unterscheidung von Klassen im Merkmalsraum dar. Die dazu verwendeten Verfahren berechnen oder extrahieren zunächst Merkmale, genauer einen Merkmalsvektor, eines Objektes und ordnen diesem Merkmalsvektor dann eine Klasse zu (vgl. JÄH-2005).

#### **2.3.2 Tracking**

Bewegt sich die Kamera oder ein erkanntes Objekt im Bild, ist es zweckmäßig, nicht in jedem Bild erneut nach dem Objekt zu suchen. Stattdessen wird üblicherweise die Bewegung des Objektes im Bild erkannt und somit das Objekt in den folgenden Bildern wieder identifiziert. Grundsätzlich werden bei den Tracking-Methoden geeignete Merkmale eines Objektes benutzt, um diese Merkmale dann in den folgenden Bildern wiederzufinden und somit schließlich das Objekt und dessen Bewegung nachvollziehen zu können. (vgl. BRA-2008)

[YIL-2006] enthält eine umfangreiche Zusammenfassung und Erklärung der gängigen Algorithmen.

### 2.3.3 Identifizierung

Die eindeutige Identifizierung eines Objektes erfordert die Erkennung von Merkmalen oder eine Kombination von Merkmalen, die ausschließlich auf einer bestimmten Instanz eines Objektes vorkommen und dieses Objekt somit individuell kennzeichnen. In der Logistik werden in hohem Maße gleichartige, teils standardisierte Hilfsmittel eingesetzt, die sich idealerweise nicht oder nur sehr geringfügig voneinander unterscheiden. Beispiele hierfür sind Ladungsträger wie die Euro-Poolpalette [EUR-2014], VDA-Kleinladungsträger [VDA 4504] oder Versandkartons. Transportmittel sind üblicherweise ebenfalls in Serie gefertigte Produkte, bei denen eine Unterscheidung zweier baugleicher Modelle nicht ohne Weiteres möglich ist. Eine Identifizierung mittels Bildverarbeitung setzt zusätzlich noch die zuverlässige Sichtbarkeit des Unterschiedes baugleicher Instanzen im Kamerabild voraus. Eine Identifizierung der in der Logistik relevanten Objekte ist daher im Allgemeinen nur durch Anbringung künstlicher Marker zu erreichen.

Zur Kennzeichnung von Transportgut hat sich in der Logistik die Nummer der Versandeinheit (NVE) etabliert [GS1-2009]

Die Identifizierung anhand von Barcodes erfolgt im Allgemeinen nach folgendem Muster:

1. Vorverarbeitung zur Bildverbesserung
2. Extraktion der Barcodes (Segmentierung)
3. Bestimmung der Identität

Für die Extraktion gibt es viele verschiedene Ansätze, die sich jeweils die Eigenschaft der großen Helligkeitsunterschiede im Grauwertbild, bedingt durch schwarze Balken und weiße Trennstriche, in einem Barcode zunutze machen.

[WAC-2008] nimmt an, dass sich der Barcode in einer vorgegebenen Ausrichtung befindet und sucht mit einer Scanline nach Beginn und Ende eines Barcodes.

[ŠIM-2011] nutzt verschieden ausgerichtete Scanlines in einem Operatorfenster und markiert große Hell-Dunkel-Unterschiede, die dann ggf. mit ebenfalls markierten, benachbarten Bereichen zusammengefasst werden. [LIN-2011] verzichtet auf die Scanlines im Operatorfenster und sucht dort direkt die maximalen Unterschiede.

[TRO-2006] wendet auf dem Operatorfenster zunächst die diskrete Kosinustransformation an und sucht dann nach großen Koeffizienten zu den Ortsfrequenzen.

Die Dekodierung des Barcodes erfolgt dann in unterschiedlichen Ansätzen aus einem Binärbild, das durch eine Schwellwertoperation bestimmt wird (vgl. [CHA-2005, GAL-2009] verwendet einen Maximum-Likelihood-Schätzer, um auch mit deformierten Barcodes umgehen zu können.

### **2.3.4 Videoüberwachung (CCTV)**

Um sich bewegende Objekte im Blickfeld einer statischen Kamera erkennen zu können, müssen diese vom Hintergrund isoliert werden. Dieser Vorgang wird background oder auch foreground detection genannt (vgl. QIA-2011).

Einfache Ansätze betrachten die Unterschiede zwischen zwei zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommenen Bildern oder zwischen dem aktuellen Wert und dem Mittel- oder Medianwert vergangener Bilder (vgl. QIA-2011). Neuere Ansätze verwenden ein Gaussian Mixture Modell, um das Verhalten des Hintergrundes im Laufe der Zeit zu lernen und zu beschreiben [ZIV-2004].

### **2.3.5 Kalibrierung der Kamera**

Durch die von den Linsen im System Kamera (vgl. Kapitel 2.2) eingebrachten Abbildungsfehler entstehen im aufgenommenen Bild geringfügige Verzerrungen. Wenn möglichst exakte Messungen in einem Bild durchgeführt werden sollen, erhöhen diese Verzerrungen den Messfehler deutlich. Die Abbildungsfehler können in diesen Fällen durch eine Kalibrierung der Kamera bestimmt, modelliert und korrigiert werden. [BRA-2008]

Die Kalibrierung besteht prinzipiell aus folgenden Schritten (vgl.: [BRA-2008]):

1. Zunächst werden mehrere Aufnahmen eines bekannten Soll-Musters, z. B. eines Schachbretts wie in Abbildung 2-6 gezeigt, aus unterschiedlichen Perspektiven mit der Kamera aufgenommen. In der Regel wird das Muster in unterschiedlicher Orientierung in die Kamera gehalten.
2. Das Muster wird erkannt und mit dem Soll-Muster verglichen.

3. Anhand eines Kamera-Modells wird bestimmt, welche mathematische Abbildung von dem aufgenommenen Ist-Muster zu dem hinterlegten Soll-Muster führt.
4. Diese mathematische Abbildung wird dann auf jedes Bild angewandt und macht die in der Kalibrierung erfasste Verzerrung durch die Kameraoptik rückgängig.

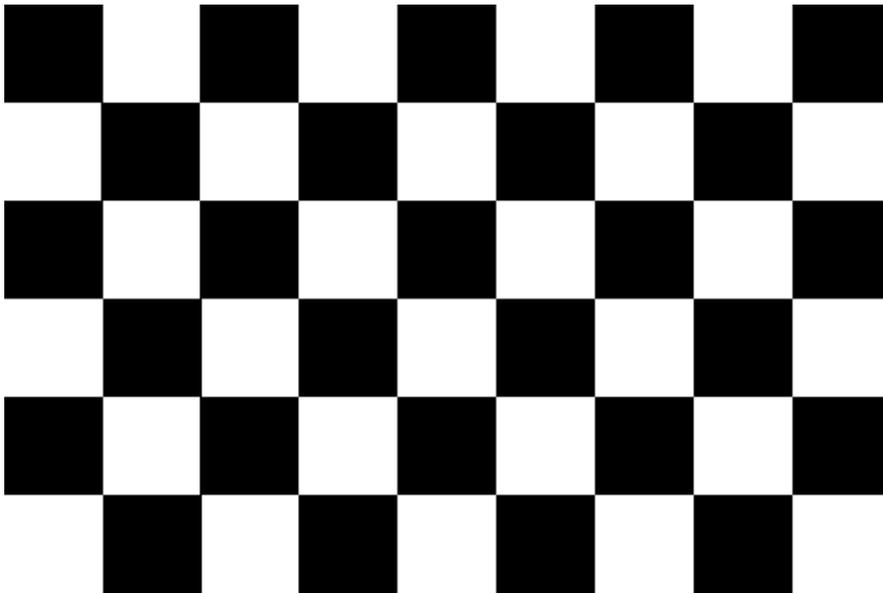


Abbildung 2-6: Schachbrettmuster zur Kalibrierung einer Kamera [OPE-2013]



## **3 Einsatzszenario und Anforderungsanalyse**

Dieses Kapitel stellt das in diesem Projekt zugrunde liegende Einsatzszenario dar. Daraus wird im Anschluss mittels Anforderungsanalyse der Anforderungskatalog an die im Projekt zu leistende Entwicklungsarbeit gestellt.

### **3.1 Einsatzszenario mit zu realisierenden Sensorfunktionen**

Im Folgenden wird das Szenario des innerbetrieblichen Transportprozesses betrachtet, der durch einen Gabelstapler als Vertreter der Gruppe der Unstetigförderer ausgeführt wird. Im innerbetrieblichen Transport gehört der Gabelstapler besonders in kleineren und mittleren Unternehmen zum am meisten verbreiteten Transportmittel.

Jünemann [JÜN-1989] beschreibt den Unstetigförderer als typisches Transportmittel für geringe und mittlere Mengen an Stückgütern, dessen Transportweg hoher Varianz unterliegt. D. h. der Weg zwischen Aufnahme und Entladung des Stückgutes ist variabel, ebenso werden die jeweiligen Orte im Lager für die Ladungsaufnahme und Entladung häufig gewechselt. Betriebliche Funktionsbereiche, in denen entsprechend flexible Transportmittel erforderlich sind, erstrecken sich vom Wareneingang über die Produktion und den Lagerbereich bis hin zum Warenausgang. Demnach ist der Einsatzbereich des Unstetigförderers grundsätzlich der gesamte Betrieb.

Gabelstapler sind Unstetigförderer, die über eine Hubfunktion mit Lastaufnahme verfügen und werden meist als Universalgeräte eingesetzt. Sie erledigen unterschiedlichste Aufgaben in den Bereichen Transport, Ein- und Auslagern und Umschlagen. Hierbei befindet sich das Ladegut z. T. als Gebinde auf Ladehilfsmitteln, wie z. B. Europaletten oder Gitterboxen. Im Sonderfall weiterer Anbaugeräte am Gabelstapler können weitere, spezifische Ladehilfsmittel verwendet werden.

Aus diesen Darstellungen des Einsatzbereiches des Unstetigförderers und des Gabelstaplers im Speziellen lässt sich entnehmen, dass die Transportausführung auf den innerbetrieblichen Bereich einzugrenzen ist und insbesondere das Handhaben des Stückgutes auf Grund seiner spezifischen Eigenschaft des vertikalen Hubs eine Kernfunktion darstellt. Zwar lässt sich der Einsatzbereich auf den gesamten Betrieb erstrecken, d. h. sowohl in überdachten und nicht überdachten Bereichen eines Be-

triebes. Abstimmungen mit Experten des Projektbegleitenden Ausschusses haben allerdings zu dem Ergebnis geführt, dass in der Praxis der Schwerpunkt auf dem Einsatz im Innenbereich liegt. Ergänzt um weitere Literaturrecherchen, Expertengespräche und auch Prozessbeobachtung des Lehrstuhl fml in Stückgutlagern (v. a. Distributionslogistik, Getränkeindustrie, Bauindustrie) kann der Transportprozess bestehend aus einzelnen Szenarien wie folgt zusammengefasst beschrieben werden. Dabei werden mögliche den Fahrer unterstützende Sensorfunktionen genannt. Diese Darstellung ist maßgeblich für die weitere Anforderungsdefinition an das zu entwickelnde System.

### 3.1.1 Einsatzszenario

#### **Anfahrt Lagerplatz**

Ein Transportprozess beginnt mit dem Erhalt eines Fahrauftrages, der auf Zuruf oder auf der Basis eines das Lager und seine Fördertechnik verwaltenden Datenbanksystems, i.d.R. eines Warehousemanagementsystems (WMS), erfolgt. Der Fahrauftrag wird Papier-basiert an den Gabelstaplerfahrer oder mittels Datenfunkanbindung dem Fahrer an einem Staplerterminal angezeigt. Der Transportauftrag umfasst i.d.R. Informationen zur Identität des aufzunehmenden Ladegutes, des aktuellen Einlagerortes und des Zielortes.

Auf Basis dieser Informationen fährt der Gabelstaplerfahrer den aktuellen Einlagerort bzw. Lagerplatz zuerst in der Ebene an und kann durch die Sensorfunktion Lokalisierung hierbei unterstützt und kontrolliert werden.

Die Lagerplatzgröße entspricht mindestens den Abmessungen des unterfahrbaren Ladehilfsmittels des zu transportierenden Gutes. In Ausnahmefällen überragt das Transportgut das zugehörige Ladehilfsmittel. Des Weiteren muss der Gabelstaplerfahrer den Lagerplatz mit der richtigen Seite des Gabelstaplers, an der sich das Lastaufnahmemittel befindet, anfahren. In der Anfahrt des Lagerplatzes rangiert der Gabelstapler vor dem Lagerplatz, um in diesen gerade unter das unterfahrbare Ladehilfsmittel einfahren zu können. Hierbei kann sich das Fahrzeug aufgrund der der 1- oder 2-Rad gelenkten Hinterachse nahezu am Platz drehen. Verfügt das Fahrzeug über einen Seitenschieber, kann der Fahrer durch seitliches Verschieben der Gabelzinken eine Fehlstellung in der Ebene im Bereich von wenigen Zentimetern im Stillstand des Fahrzeuges vor der Aufnahme des Gutes korrigieren.

Nach der Anfahrt des Lagerplatzes in der Ebene hebt der Gabelstaplerfahrer die Gabelzinke an, um in der Höhe den Ziellagerplatz anzufahren. Durch die Sensorfunktion Gabelhubhöhen-Erkennung kann dieser Vorgang unterstützt und kontrolliert werden.

#### **Aufnahme des Ladegutes**

Für die Aufnahme des Ladegutes stellt der Gabelstaplerfahrer den Hubmast senkrecht, der ansonsten aus der Senkrechten i.d.R. um 3° nach vorne und um 8°–10° nach hinten neigen geneigt werden kann [JÜN-1989]. Anschließend wird häufig das auf dem Lagerplatz befindliche Ladegut oder auch der Lagerplatz selber identifiziert. Die bisher weit verbreitete Kennzeichnung mittels Barcode erfordert eine häufig manuelle Erkennung des Barcodes durch die Nutzung eines Barcodescanners, den der Gabelstaplerfahrer mit sich führt. Ladegut-Gebinde werden entsprechend der GS1 Empfehlung für EPC/RFID-Transportetiketten [GS1-2009] durch ein sog. Nummer der Versandeinheit (NVE)-Etikett in der Größe DIN A6 gekennzeichnet. Dieses enthält einen EAN128-Code, der i.d.R. am Gabelstapler durch den Handscanner gelesen wird. Grundsätzlich ist diese Kennzeichnung allerdings über die Branchen und Unternehmen hinweg nicht zwingend nach der Empfehlung der GS1 umgesetzt, sondern kann Abwandlungen der GS1-Empfehlung beinhalten oder einem eigenen Standard zugrunde liegen. Alternativ zu dieser Barcode-basierten Kennzeichnung werden in der Praxis zunehmend auch RFID-basierte Kennzeichnungen für Ladeeinheiten [BAR-2008] verwendet, deren Auswertung mittels optischem Sensor nicht möglich ist.

Nach der erfolgreichen Prüfung der Waren-Identität bzw. der Lagerplatz-Identität in Abgleich mit dem Transportauftrag erfolgt die Aufnahme des Ladegutes durch langsame Einfahrt in das unterfahrbare Ladehilfsmittel. Eine weitere Sensorfunktion zur Gabel-Belegt Erkennung unterstützt die vollständige Aufnahme des Gutes. Ist die Gabelzinke vollständig in das Ladegut eingefahren, wird das Ladegut durch ein vertikales Verfahren der Gabelzinke angehoben. Daraufhin setzt der Gabelstapler rückwärts zurück, wobei der Fahrer durch einen Schulterblick die freie Fahrt heckseitig absichert. Nachdem der Gabelstapler mitsamt Ladegut aus dem Lagerplatz ausgefahren ist, wird der Hubmast nach hinten um bis zu 10° geneigt, um die Ladung auf der Gabelzinke zu stabilisieren. Die Gabelzinke wird in eine Höhe von bis zu 50 cm über dem Boden in Fahrposition gebracht.

### **Transport**

Anschließend startet der Gabelstapler die Fahrt zum Ziellagerplatz, wobei er die Fahrt bei behinderter Sicht nach vorne idealerweise rückwärts fortsetzt. Elektrogetriebene Gabelstapler erreichen i.d.R. Fahrgeschwindigkeiten bis 15 km/h, während Diesel- oder Gasgetriebene Gabelstapler auch Fahrgeschwindigkeiten um die 25 km/h erreichen können. Im Extremfall beträgt die Fahrgeschwindigkeit 40 km/h. Lediglich auf längeren Fahrstrecken werden diese Fahrgeschwindigkeiten erreicht.

Während des Transportes ändern sich die Umgebungsbedingungen, insbesondere die Lichtverhältnisse. Lokale, künstliche Beleuchtung und auch Fensteröffnungen in den Außenwänden und an der Decke führen zu wechselnden Helligkeiten, die auch über den Tag durch die Sonnenwanderung einer Varianz unterliegen. Ferner sind die Fahrwege unterschiedlich gestaltet. Fahrwege können für ein oder zwei Fahrrichtungen vorgesehen sein und somit unterschiedliche Wegbreiten ausweisen, auf denen ggf. eine Lokalisierung sicherzustellen ist. VDI 2199 gibt zu den baulichen Ausprägungen des Fahrweges in Innen- und Außenbereichen einen Überblick und nennt eine erforderliche Mindesthelligkeit von 100 Lux in Regalgassen und auf Fahrwegen [VDI-2199].

### **Anfahrt Lagerplatz**

Siehe hierzu die bereits erfolgte Prozessbeschreibung „Anfahrt Lagerplatz“ zu Beginn des Transportprozesses.

### **Abgabe des Ladegutes**

Die Abgabe des Ladegutes entspricht im Ablauf weitestgehend der Aufnahme des Ladegutes in umgekehrter Reihenfolge, weswegen keine detaillierte Beschreibung erfolgt.

### **3.1.2 Sensorfunktionen**

In dem beschriebenen Einsatzszenario können eine Vielzahl von Sensorfunktionen zur Unterstützung und Kontrolle des Gabelstaplerfahrers angewendet werden. Im Folgenden werden die Sensorfunktionen und deren heutige technische Lösung beschrieben, die diesem Forschungsprojekt als Basis für die Umsetzung in Demonstratoren dienen.

### **Sensorfunktion NVE-Erkennung**

Die Identifikation der durch ein NVE-Etikett gekennzeichneten Ladeeinheit sollte unmittelbar vor deren Aufnahme durch Einfahrt der Gabelzinke in das unterfahrbare Ladehilfsmittel erfolgen. Hierdurch kann im Fall der anstehenden Aufnahme der falschen Ladeeinheit der Fehler im Moment des Auftretens erkannt und dem Gabelstaplerfahrer gemeldet werden. Damit ergibt sich ein Mindestabstand für die Identifikation der Ladeeinheit entsprechend der Gabelzinkenlänge, die i.d.R. mit 1,2 m angesetzt werden kann.

Zu berücksichtigen sind hierbei optische Einschränkungen, die durch eine nicht optimale Anbringung des NVE-Etiketts auf der Ladeeinheit entstehen. Zum einen kann sich das NVE-Etikett auf einer dem Gabelstapler abgewandten Seite des Ladehilfsmittels (LHM), auf dem die Ware mit der NVE transportiert wird, befinden, so dass keine Line-of-Sight (LoS) Bedingung vorliegt. Des Weiteren werden Ladeeinheiten in Form von Gebinden durch Umreifungen und optionale Anbringung einer Schrumpffolie zusätzlich gesichert. Hierdurch ergeben sich teilweise Abdeckungen des NVE-Etiketts oder eine Deformation bis hin zum Einriss des NVE-Etiketts.

### **Sensorfunktion Gabel-Belegt Erkennung**

Die Erkennung des belegten Zustandes der Gabelzinke durch aufliegende Ladeeinheiten bzw. dessen Zustandsänderung ist insbesondere bei der Ein- und Ausfahrt aus der Ladeeinheit zu bestimmen.

Aufgenommen ist eine Ladeeinheit, wenn beide Gabelzinken in diese eingefahren sind und der Gewichtsschwerpunkt der Ladeeinheit auf der Gabelzinke liegt. Bei mehrfach tiefen und mehr als ein Paar Gabelzinken am Gabelträger des Gabelstaplers wird i.d.R. mehr als eine Ladeeinheit aufgenommen. Ferner existiert eine Vielzahl an Anbaugeräten für diese und weitere Sonderfälle [MAR-2009], die nicht Bestandteil dieser Betrachtung sind.

Die entsprechende Zustandserkennung ist insbesondere in Systemen mit automatischer Lagerplatzverbuchung relevant. Im Moment der Zustandsänderung wird der zugehörige Lagerplatz mittels einer weiteren Sensorfunktion ermittelt und zur Quittierung eines erfolgreich ausgeführten Transportauftrages an das Lagerverwaltungssystem (LVS) oder andere Unternehmenssysteme übermittelt.

Dementsprechend sind die zu erfassenden Zustände sowohl die beladene und unbeladene Gabelzinke, als auch die Erkennung unbekannter Zustände, die eine Prüfung des Gabelstaplerfahrers erfordern. Weitere erfassbare Zustände, die auf die hier beschriebene Zustandserfassung aufbauen und den hier betrachteten Rahmen sprengen, sind:

- Erkennung des Belegungsgrades
- Erkennung des Belegungsmusters (bei der Mehrfachaufnahme von Ladeeinheiten)

Der Stand der Technik zur Erfassung der Gabelbelegung umfasst verschiedenartige optische und Kraft-basierte Sensortechnologien:

- Gewichtssensorik mittels Gewichtsmessung
- Lasersensorik mittels Schwellwert-basierter Abstandsmessung

#### **Sensorfunktion Gabelhubhöhen-Erkennung**

Die Gabelhubhöhen-Erkennung wird zur automatischen Lagerplatzerkennung mittels der 3D-Position und zur automatischen Hubhöhenvorwahl [BUT-2008] benötigt.

Im ersten Fall ist die notwendige Genauigkeit der Gabelhubhöhen-Erkennung eine geringere, da lediglich entsprechend der Abstände der Lagerplätze in der Höhe eine ausreichende Genauigkeit erforderlich ist, z. B. die halbe Lagerfachhöhe. Im Fall der automatischen Hubhöhenvorwahl verfährt der Gabelstapler automatisch die Gabelzinke ohne Führung durch den Gabelstaplerfahrer, weswegen eine Genauigkeit im cm-Bereich erforderlich ist. Das Anfahren von insbesondere Regalböden auf Grund einer fehlerhaften Hubhöhe ist zu vermeiden.

Es ist bei der Gabelhubhöhen-Erkennung zu berücksichtigen, dass sich durch die Veränderung der Hubmast-Neigung die Position der Gabelzinkenspitze ändert. Damit variiert auch die Gabelhubhöhe, deren Bezug auf die Gabelzinke zielführend ist.

Heutige Sensorsysteme zur Bestimmung der Gabelhubhöhe sind optische und mechanische Systeme, wie z. B. Seilzüge und Ultraschallsensoren.

#### **Sensorfunktion Lokalisierung**

Die Lokalisierung in der Ebene soll die Anfahrt des richtigen Lagerplatzes gewährleisten. Somit muss die Lokalisierung nicht nur die Position in entsprechender Genauigkeit auflösen, sondern auch die Orientierung des Fahrzeuges im Verhältnis zur Ausrichtung des Lagerplatzes ermitteln. Die Aufgabe der Lokalisierung umfasst damit die Lagerplatz-genaue Lokalisierung in Form der Bestimmung der Pose des Fahrzeuges (Position und Orientierung).

Eine Lokalisierung des Transportmittels, in diesem Fall des Gabelstaplers, erfolgt häufig mit dem Ziel, indirekt das Transportgut zu lokalisieren [MAL-2009]. Dies ist im Verbund mit einer Hubhöhen-Erkennung und Warenidentifikation, z. B. mittels NVE-Kennzeichnung, möglich.

Weiterer Bedarf für die Lokalisierung besteht bei Systemen der automatischen Lagerplatzverwaltung [EVE-2005, MAN-2009]. Dies trifft sowohl auf Lager zu, die nach dem Prinzip der freien Lagerplatzwahl betrieben werden, wie auf Lager mit dem Prinzip der festen Lagerplatzwahl. Im ersten Fall wird der Lagerplatz erkannt und im Lagerverwaltungssystem dem jeweiligen Gut zugeordnet. Im anderen Fall ermöglicht die Lagerplatz-genaue Lokalisierung die Vermeidung einer Entladung auf dem falschen Lagerplatz. In beiden Fällen bedarf es einer zusätzlichen Hubhöhen-Erkennung, wenn Regallagerplätze automatisch ohne Lesen einer separaten Lagerfachkennzeichnung identifiziert werden sollen. Eine weniger genaue Lokalisierung ist in den weiteren Anwendungsfällen notwendig, in denen die Lokalisierung als Basis für die Fahrauftragsdisposition, z. B. in Staplerleitsystemen (SLS) [MAR-2009], oder für die Materialflussanalyse [ARN-2006], z. B. hinsichtlich einer Optimierung der Lagereinteilung und des Fahrweglayouts, verwendet wird. Im Spannungsfeld dieser Anwendungen, die auf eine Lokalisierung des Gabelstaplers zurückgreifen, ergeben sich weitere Anwendungen wie z. B. die Navigation des Fahrers [VDI-2005], die automatische Toröffnung bei Anfahrt [FUH-2010] oder die Gefahrenwarnung [BUT-2008].

Abstimmung mit Experten aus dem Projektbegleitenden Ausschuss und weiteren möglichen Anwendern ergaben ein außerordentlich hohes Potenzial für die Anwendung der Lokalisierung zur automatischen Lagerplatzverwaltung, die insbesondere den Prozess der manuellen Lagerplatzidentifikation einspart und das System sicherer gegen Manipulationen, z. B. durch vor Anfahrt des Ziellagerplatzes manuell eingegebenen Quittierungen, macht. Dementsprechend wird in der weiteren Diskussion

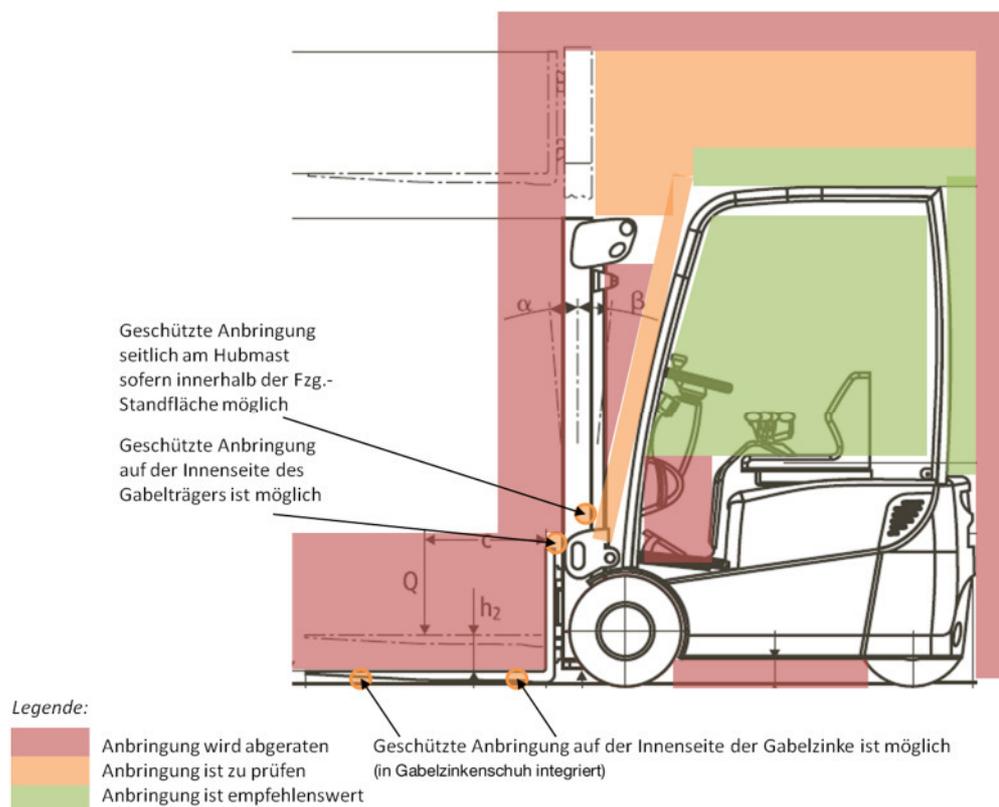
der Sensorfunktion Lokalisierung der Fokus auf die Lagerplatz-genaue Lokalisierung gelegt.

## 3.2 Sensorsystem und dessen Anbringung

Durch die typische Bauform eines Gabelstaplers als angetriebenes Flurförderzeug mit Fahrersitz und Hubeinrichtung an der Frontseite [VDI-2199], an der häufig Gabelzinken für die Aufnahme und Abgabe von Transporteinheiten geführt werden, ergeben sich Einschränkungen in der Anbringung von Sensorsystemen am Fahrzeug. Da sich der Gabelstapler durch einen rauen Einsatz auszeichnet, ergeben sich insbesondere Gefahren des Abfahrens und Kollidierens der Sensorsysteme mit dem Transportgut, am Gabelstapler verfahrenen Einrichtungen und der Umgebung. Unter diesen Aspekten werden folgend mögliche Anbringungspositionen diskutiert (vgl. Abbildung 3-1):

1. Gabelzinken und -träger
  - a. Die Aufnahme und Abgabe des Transportgutes findet an der Gabelzinke statt, weswegen die Gabeln selber hohen Lasten, Reibkräften und Stoßbelastungen ausgesetzt sind.
  - b. Der Gabelträger ist den gleichen Belastungen der Gabelzinke ausgesetzt, wobei ein Lastenschutzgitter den Gabelträger als optionale Ausstattung [DIN EN 1726-1] zum Teil mit schützt, da es diesem vorgelagert angebracht ist.
- Gabelhub
  - a. Trotz unterschiedlicher Bauarten des Hubmastes wird von einer Anbringung am und im Hubmast abgeraten, da durch die Vielzahl der Stellbewegungen Beschädigungen nicht ausgeschlossen sind.
  - b. Lediglich eine seitliche Anbringung am Hubmast kann geprüft werden, sofern die Anbringung innerhalb der Fahrzeug-Standfläche erfolgt.
- Fahrerschutzdach
  - a. Direkt auf dem Fahrerschutzdach sind Anbringungen möglich.
  - b. Bei Sensorsystemen bzw. Sensoranbringungen, die eine signifikante Höhe haben, ist die erforderliche Durchfahrhöhe in der Einsatzumgebung abzusichern. Es empfiehlt sich keine Anbringungen vorzunehmen, die über die Höhe des unausgefahren Hubgerüsts reichen.
- Fahrzeugheck

- a. Sofern die Anbringung am Fahrzeugheck innerhalb der Fahrzeugaufstandsfläche erfolgt ist eine Anbringung möglich.
- b. Von über die Fahrzeugaufstandsfläche ragenden Anbringungen wird abgeraten, da das Heck häufig Kollisionen ausgesetzt ist.
- Fahrgastzelle
  - a. Innerhalb der Fahrgastzelle sind Sensoranbringungen möglich, sofern sie die Bewegungsfreiheit und die Sicht des Fahrers nicht eingrenzen.
  - b. Damit sind Anbringungen im Fußraum und an der Front der Fahrgastzelle nicht zu empfehlen.
- Unterboden
  - a. Von einer Unterboden-Anbringung wird abgeraten, da insbesondere elektrobetriebene Gabelstapler eine geringe Bodenfreiheit aufweisen und Schwellen, herumliegende Gegenstände etc. in den Fahrwegen zu Beschädigungen am Fahrzeug führen können.



**Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Anbringungspunkte für Sensorik**

Über die dargestellten grundsätzlichen Einschränkungen für Sensorsysteme am Gabelstapler ergeben sich speziell für die Anbringung eines Kamerasystems als Sensor weitere Einschränkungen. Diese liegen u. a. darin begründet, dass die kabelgebundene Daten- und Spannungsanbindung der Kamera gewährleistet werden muss und

der Sensor immer dann eine Line-of-Sight (LoS)-Verbindung zur zu betrachtenden Szene benötigt, wenn ein Zustand in der Szene erfasst werden soll. Die Sichtachse zwischen Kamera und Szene, an der die zu betrachtenden Zustände mittels Bild aufgenommen werden sollen, darf nicht durch ein optisches Hindernis unterbrochen werden.

Damit ergeben sich für den Fall einer Kameraanbringung am Gabelstapler, folgende zu vermeidende Gegebenheiten und damit Kriterien.

- **Außerhalb der Fahrzeuggrenze**  
Der Sensor befindet sich außerhalb des Fahrzeuggrundrisses (x-y Ebene), der sog. Fahrzeugaufstandsfläche, und könnte abgefahren werden. Oder der Sensor befindet sich oberhalb des unausgefahrenen Hubgerüsts und könnte in der Höhe ebenso abgefahren werden. Dieses Kriterium bildet im Kern die Erkenntnisse aus der Diskussion zu Abbildung 3-1 ab.
- **Beweglicher Träger**  
Der Anbringungspunkt, d. h. Träger des Sensors, ist ein bewegliches Element am FFZ, das während des Transportprozesses verfahren wird. Eine mitlaufende, häufig aufwändige und mechanisch anfällige Verkabelung ist in diesem Fall vorzusehen.
- **Abdeckung im Prozess möglich**  
Hierbei erfolgt die Betrachtung für Normalfälle des Transportprozesses (Heben/Senken/Neigen des Gabelträgers, Rangieren des FFZ). Eine Abdeckung tritt dann auf, wenn das zu betrachtende Objekt in die optische Achse zwischen Sensor und Betrachtungsobjekt durch ein anderes Objekt verdeckt wird und eine Zustandsbestimmung dadurch vorübergehend nicht vorgenommen werden kann.
- **Öffnungswinkel Objektiv**  
Abhängig von der Sensorfunktion wird aus der sich ergebenden Bildgeometrie für den jeweiligen Anbringungspunkt eine Schätzung des notwendigen Öffnungswinkels des Objektivs abgeleitet. Anhand einer Marktübersicht zu Objektiven kann geprüft werden, ob ein entsprechendes Produkt existiert.
- **Weitere Kriterien (nicht in der Bewertung berücksichtigt)**
  - a. Schmutzanfälligkeit (Wasser, Staub, etc.)

Nicht immer ist eine Einhaltung aller oben genannten Kriterien möglich. In diesen Fällen ist eine Abwägung vorzunehmen, welches Kriterium am Wichtigsten ist. Häu-

fig tritt dieses Problem auf, wenn es schwierig ist, überhaupt eine Position zu finden, aus der stets eine LoS im richtigen Winkel auf die zu betrachtende Szene besteht.

Abbildung 3-2 gibt einen Überblick über alle betrachteten Anbringungspunkte für das Kamerasystem, die für alle in den Demonstratoren umzusetzenden Sensorfunktionen im Rahmen von Experteninterviews und einer analytischen Betrachtung bewertet wurden. Hierbei konnten insbesondere die Anbringungspunkte ID01, ID03, ID04 und ID15 als besonders geeignet identifiziert werden, die für die weitere Umsetzung in diesem Forschungsprojekt vertieft werden. Eine Erläuterung dieser Auswahl ist in Tabelle 3-1 zu finden.

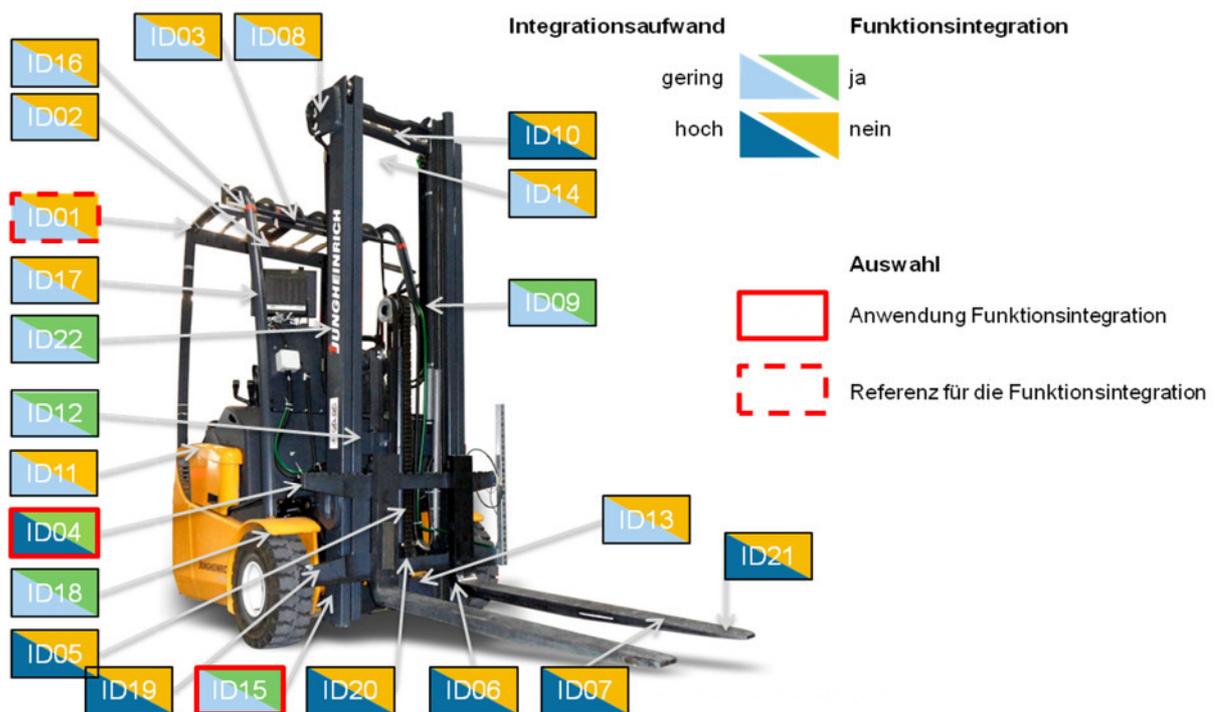


Abbildung 3-2: Übersicht betrachteter und favorisierter Anbringungspunkte für die Kamera

Tabelle 3-1: Erläuterung der Auswahl favorisierter Anbringungspunkte

Anbringungspunkt	NVE-Erkennung	Gabelbeleg-Erkennung	Gabelhubhöhen-Erkennung	Lokalisierung	Erläuterung
ID01			X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximal einfachste Anbringung der Kamera</li> <li>Geringe Gefahr der Verschmutzung durch bei Fahrt aufgewirbelte Bodenverschmutzung</li> <li>Behinderte Sicht auf die Gabelzinke, dadurch keine breite Eignung.</li> </ul>
ID03			X	X	Vgl. ID01

<b>ID04</b>	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitlaufende Kabelführung auf Grund des beweglichen Trägers notwendig; dies ist ein Kompromiss.</li> <li>• Ansonsten uneingeschränkte Sicht auf den relevanten Erfassungsbereich</li> <li>• Kamera ist gegen mechanische Einwirkung durch aufgenommene/entladene Güter zu schützen.</li> <li>• Da in der z-Achse beweglich nicht für die Lokalisierung geeignet, es sei denn Kenntnis über die aktuelle Hubhöhe existiert.</li> <li>• Ausreichend Bauraum für die Kameraanbringung</li> </ul>	
<b>ID15</b>			X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschmutzungsrisiko durch benachbarte Reifen gegeben</li> <li>• Optimale Sicht auf relevanten Erfassungsbereich</li> <li>• Ausreichend Bauraum für die Kameraanbringung</li> </ul>

## 3.3 Anforderungen und Lastenheft

Für die weitere Bearbeitung des Projektes und Umsetzung der Demonstratoren wird im Einklang mit dem Projektziel folgender Anforderungskatalog festgelegt. Der Anforderungskatalog stellt das Ergebnis der Anforderungsanalysen aus Kapitel 3.1 und 3.2 dar. Die Erstellung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses.

### 3.3.1 Sensorfunktion als Demonstrator

Basierend auf der in Kapitel 3.1.1 erfolgten Darstellung des Einsatzszenarios erfolgt für die weitere Umsetzung der Demonstratoren die Eingrenzung auf die Anwendung des Systems im Innenbereich von Lagern am elektrogetriebenen Gabelstapler, der einen maximalen Hub von 3,6 m ausweist und maximal 12,5 km/h fährt. Als Lastaufnahmemittel fungieren zwei einfach-tiefe Gabelzinken mit einer Länge von je 1,2 m. Die Lagerung des Gutes erfolgt sowohl im Bodenblocklager als auch im Regallager. Das Ladegut befindet sich auf unterfahrbaren Ladehilfsmitteln, wobei hierfür exemplarisch Europalette und Gitterbox mit jeweils einer Grundfläche von 1200 x 800 mm gewählt werden.

Für die umzusetzenden Demonstratoren gehen damit folgende weiteren Anforderungen hervor.

## Sensorfunktion NVE-Erkennung

Tabelle 3-2: Anforderungskatalog NVE-Erkennung

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
<b>Funktion</b>	Identifikation der mittels DIN A4 großem NVE-Etikett gekennzeichneten Ladeeinheit, wobei das NVE-Etikett nach GS1 Empfehlung an der Ladeeinheit angebracht ist. Die Identifikation findet vor der Einfahrt in das Ladehilfsmittel (LHM) statt.	Warenidentifikation vor LHM-Einfahrt
<b>Zustandsinformation</b>		Code-Inhalt und -Position im Bild
<b>Prozessgeschwindigkeit, bzw. Fahrgeschwindigkeit</b>		< 10 km/h
<b>Code-Standards</b>	Neben dem EAN128-Code sind weitere Code-Standards durch das Einbinden entsprechender Bildverarbeitungsbibliotheken zu ermöglichen	Erweiterbar
<b>Beschädigung Code</b>	Die Code-Identifikation soll weitestgehend robust sein gegenüber z. B. Schrumpffolien-bedingte Stauchungen des Etiketts und Oberflächenreflexionen des Lichts. Grundsätzliche Problematiken der optischen Code-Identifikation in der Form einer fehlenden Line-of-Sight Situation (z. B. durch Abdeckungen mittels Warenumreifung) sind nicht zu lösen.	Resistenz gegen Stauchung u. Oberflächenreflexion

## Sensorfunktion Gabel-Belegt Erkennung

Tabelle 3-3: Anforderungskatalog Gabel-Belegt Erkennung

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
<b>Funktion</b>	Identifikation einer Belegungsänderung der Gabelzinke, d. h. einem Wechsel zwischen dem belegten und dem unbelegten Zustand (bzw. dem unbelegten und dem belegten Zustand). Dadurch soll eine automatische Lagerplatzidentifikation durch die Lokalisierung sinnvoll ausgelöst werden können.	Identifikation Belegungsänderung
<b>Zustandsinformatioent</b>	Eine Beladung liegt vor, wenn zweifelsfrei beide Gabelzinken durch das Ladegut belegt sind. Mehrfachaufnahmen von Ladegütern sind möglich, werden jedoch ebenso als „nur“ beladen erkannt. Die Gabelzinke ist zweifelsfrei unbeladen, wenn kein Ladegut auf der Gabelzinke liegt. Alle weiteren Zustände bzw. unsichere Zustände sind als unbekannte Zustände zu kennzeichnen.	unbeladen beladen unbekannt
<b>Prozessgeschwindigkeit, bzw. Fahrgeschwindigkeit</b>		<10 km/h
<b>Form der Gabelzinke</b>	Die Gabelzinke ist grundsätzlich austauschbar und kann variablen Abmessungen unterliegen. Dies betrifft auch die Variabilität der oberflächlichen Textur der Gabelzinke. Eine praktische Umsetzung erfolgt mit einem einfachtiefen Gabelzinkenpaar.	variabel (einfache Gabelzinke)

### Sensorfunktion Gabelhubhöhen-Erkennung

Tabelle 3-4: Anforderungskatalog Gabelhubhöhen-Erkennung

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
<b>Funktion</b>	Identifikation der jeweiligen Ebene, auf der das Ladegut eingelagert wird. Hierbei handelt es sich um die Lagerebene im Bodenblocklager oder die Regalebene im Regallager. Diese Anforderung wird quantitativ mit einer Genauigkeit von +/- 5cm übersetzt.	Identifikation Lager/ Regal-ebene
<b>Zustandsinformation</b>	Die Gabelhubhöhe wird in diesem Fall vereinfacht auf die Höhe der Unterseite des Gabelzinkenpaars am Gabelträger über Grund bezogen.	Unterseite Gabelzinken am Gabelträger über Grund
<b>Prozess seitliches Verschieben GZ</b>	Ein seitliches manuelles oder angetriebenes Verschieben der Gabelzinken (GZ) am oder mit dem Gabelträger ist ohne Einfluss auf die bestimmte Gabelhubhöhe.	unabhängig
<b>Prozess Hubmastneigung</b>	Die Veränderung der Hubmastneigung ist hat Einfluss auf die bestimmte Gabelhubhöhe, abhängig vom Anwendungsfall muss die Neigung daher berücksichtigt werden.	unabhängig
<b>Prozess Beladung GZ</b>	Die Bestimmung der Gabelhubhöhe ist unabhängig von dem beladenen und unbeladenen Zustand des Gabelzinkenpaars.	unabhängig

### Sensorfunktion Lokalisierung

Tabelle 3-5: Anforderungskatalog Sensorfunktion Lokalisierung

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
<b>Funktion</b>	Mittels der Lokalisierung in der Ebene ist die positonsbasierte Identifikation des Lagerplatzes in der Ebene möglich. Darüber hinaus wird die Orientierung des Fahrzeuges im Raum um die z-Achse (Vertikale) bestimmt.	Lagerplatzgenaue Lokalisierung
<b>Zustandsinformation</b>	2D-Position x, y 1D-Orientierung $\gamma$	x, y, $\gamma$
<b>Prozessgeschwindigkeit, bzw. Fahrgeschwindigkeit</b>		<20 km/h
<b>Einsatzbereich</b>		Innenbereich Lager mit Industrieboden

#### 3.3.2 Kamerasystem als Sensorik

In diesem Projekt wird die Sensortechnologie Kamera als optischer Sensor gewählt, die im sichtbaren Bereich des Lichts (Wellenlänge  $\lambda = 380-780$  nm) betrieben wird. Das Kamerasystem besteht aus folgenden Komponenten, die im einzelnen weiter hinsichtlich der jeweiligen Anforderungen der zu realisierenden Sensorfunktionen definiert werden:

## Kamera-Body

Tabelle 3-6: Anforderungskatalog Kamera-Body

Funktion	Erläuterung	Anforderung
<b>Auflösung</b>	Die Auflösung bestimmt die Größe der kleinsten Merkmale projiziert auf die Bildebene, die von der Kamera erfasst werden können. Die kleinsten Details werden bei der Barcode-Erkennung/Auswertung benötigt, daher ist diese maßgeblich für die Dimensionierung der Kamera.	>5 Mio. Pixel
<b>Farbtiefe</b>	Die Demonstratoren kommen mit einem Graustufenbild aus, da die wesentlichen Merkmale des Bildes durch Helligkeitsunterschiede erkannt werden können und für das Verständnis der Algorithmen durch den Menschen leichter zu handhaben sind. Bei Vorliegen eines Farbbildes wäre daher zunächst eine Konvertierung in Graustufen vorzunehmen, was zusätzlichen Rechenaufwand verursacht.	8bit Graufarben
<b>Bildrate (FPS)</b>	Die Zahl der notwendigen Bilder pro Sekunde ergibt sich aus den Anforderungen der einzelnen Demonstratoren und der zur Verfügung stehenden Rechenleistung. Für die Umsetzung der Lokalisierung ist auf Grund der möglichen Fahrgeschwindigkeit des Gabelstaplers in Abhängigkeit der zu erreichenden lagerplatzgenauen Lokalisierung die Maximalanforderung 25 Bilder pro Sekunde (FPS). Alle weiteren Demonstratoren erfordern eine Bildwiederholrate von 5 (Minimalanforderung) bis 10 FPS	max. 25
<b>Sensorgroße</b>	Die Sensorgröße liefert u. A. auch das Seitenverhältnis des aufgenommenen Bildes. In allen betrachteten Demonstratoren ist eine nahezu quadratische Szene zu betrachten. In der Kameratechnik hat sich zudem für die Sensorgröße die Größe 2/3“ der Sensordiagonale als Standard etabliert.	2/3“
<b>Sensortechnologie</b>	Die Frage Charge-coupled Device (CCD) oder Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) läuft in diesem Anwendungsfall des Projektes auf Rolling Shutter oder Uniform Synchron Shutter hinaus. Gegen CMOS spricht, dass der Rolling Shutter Effekt eine Verzerrung des Bildes verursacht, da die Pixel iterativ ausgelesen werden, statt alle gleichzeitig (uniform synchron). Auf Grund der höheren Bewegungsgeschwindigkeiten, die insbesondere im Demonstrator Lokalisierung eine Rolle spielen, sind darum CCD-Sensoren zu bevorzugen. Alle weiteren Demonstratoren wären auch durch im Verhältnis kostengünstigere CMOS-Sensoren zu realisieren.	CCD
<b>Lichtempfindlichkeit des Sensors</b>	Hohe Fahrgeschwindigkeiten ( $\leq 20$ km/h) und entsprechende Bewegungseffekte im Bild können durch eine kürzere Belichtungszeit gemindert werden. Dies erfordert andererseits extrem Licht-sensible Sensoren oder alternativ eine sehr starke Beleuchtung, die am Anwendungsfall Gabelstapler schwer zu realisieren ist.	Hoch
<b>Hardwareschnittstelle</b>	Auf Grund einer hohen Anzahl FPS bei ebenso hoher Auflösung ist eine Hardwareschnittstelle mit hoher nutzbarer Übertragungsrate zu wählen. Demnach wird USB 3.0 (max. 5 GBit/s) als Maximalanforderung gesehen, wobei Gigabit-Ethernet (max. 1Gbit/s) die Mindestanforderung darstellt.	Ethernet/ USB 3.0
<b>Treiberschnittstelle</b>		GigE/Genicam
<b>Linse Mount</b>	Im industriellen Einsatz haben sich C-Mount Objektivanschlüsse als Standard herausgebildet. Dies ist insbesondere auch wegen höheren mechanischen Belastungsfähigkeiten des Objektivgewindes begründet. Entsprechende Anforderungen (inbes. Vibrations-Widerstandsfähigkeit) existieren auch am FFZ. Es bestehen Adapter für verschiedenartige	C-Mount

### 3 Einsatzszenario und Anforderungsanalyse

	Objektivanschlüsse. Somit ist die Optimalanforderung ein C-Mount.	
<b>Beleuchtungssteuerung</b>	Konstante Lichtintensität in der zu erfassenden Szene ist insbesondere bei Feature-Tracking Anwendungen notwendig. Gerade in Gebäuden bestehen auf Grund von einem ständigen Wechsel zwischen künstlichem und natürlichem Umgebungslicht bei bewegten Szenen diese Bedingungen nicht. Darum ist die Möglichkeit vorzusehen extern zur Kamera gezielte Beleuchtung am Fahrzeug anzubringen, die durch die Kamera angesteuert werden kann.	extern mittels Schnittstelle
<b>Weitere optionale Anforderungen</b>		Binning, Bildstabilisierung

### Objektiv

Tabelle 3-7: Anforderungskatalog Objektiv

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
<b>Linse Mount</b>	Siehe Tabelle 3-6	vgl. Kamera-Body
<b>Auflösung</b>	Siehe Tabelle 3-6	vgl. Kamera-Body
<b>Öffnungswinkel horizontal x vertikal</b>	Der Öffnungswinkel wird bestimmt durch die reale Größe der zu erfassenden Szene und dem Abstand des Objektivs zur Szene. Als Extremfall stellt sich hier die Erfassung des EAN128-Codes auf dem NVE-Etikett heraus. Theoretische Analysen ergeben den Bedarf für ein Objektiv mit dem Öffnungswinkel von ca. 60 ° x 45 ° (h x v)	ca. 60 ° x 45 °
<b>Filter</b>	Durch Sonneneinstrahlung und starke „hell-dunkel“ Übergänge entsteht eine Überblendung des Bildsensors, insbesondere bei Reflexionen auf metallischen Flächen. Dementsprechend ist die Möglichkeit zur situationsbedingten Anbringung von Filtern vorzusehen.	Aufnahme Filter
<b>Bildrauschen</b>	Für das durch das Objektiv verursachte Bildrauschen existieren keine objektiven Daten seitens der Hersteller. Eine Auswahl muss auf Basis von Erfahrungswerten durchgeführt werden, indem Objektive qualitativ hochwertiger Hersteller bevorzugt werden.	Hochwertiges Objektiv
<b>Verzeichnungsfehler</b>	Grundsätzlich gilt, dass extreme Brennweiten und Zoom-Objektive prädestiniert sind für Verzeichnungsfehler. Ferner ist bei Weitwinkel-Objektiven die Verzeichnung (tonnenförmig) besonders schwer korrigierbar. Gerade im Demonstrator zur NVE-Erkennung ist die Verzeichnung am Rand zu minimieren, da die Position des NVE-Etiketts im Bild variabel ist. Darum sind Tele-Objektive zu bevorzugen.	minimieren
<b>Blendenzahl k</b>	Die Blendenzahl k ist das Verhältnis aus Brennweite und Öffnungsdurchmesser des Objektivs. Mit steigender Blendenzahl k reduziert sich die Lichtmenge, die am Sensor aufgenommen wird - d. h. Belichtungszeiten und der Bedarf an zusätzlicher Beleuchtung steigen. In Konformität mit der Anforderung zur hohen Lichtstärke des Sensors ist hier eine möglichst minimale Blendenzahl zu bevorzugen.	minimieren

### 3.3.3 Software

Die Software in diesem Projekt besteht aus drei Bestandteilen, wobei das Software-Framework das Entwicklungsziel des Projektes darstellt. Eine oder mehrere Bildverarbeitungsbibliotheken sind im Software-Framework zu integrieren, während die Entwicklungsumgebung bei der Programmierung der Lösung als Werkzeug hilft.

### Software-Framework

**Tabelle 3-8: Anforderungskatalog Software-Framework**

Kriterien	Erläuterung	Anforderung
<b>Lizenz</b>	Die Entwicklung soll zur kostenlosen Nutzung bereitstehen und von fremden Entwicklern weitergeführt werden.	Open Source zur freien Nutzung und Weitergabe
<b>Betriebssystem</b>	Heutige Staplerterminals werden i.d.R. bereits mit MS Windows XP, gelegentlich in der embedded-Version, im 32-bit Modus betrieben. Eine Ausführbarkeit des Software-Frameworks ist hier zu sichern. Darüber hinaus ist der Portierungsaufwand auf ein Linux-System an allen möglichen Stellen zu minimieren.	MS Windows XP embedded 32-bit
<b>Programmierung</b>	Um eine Umsetzung auf Windows-betriebenen Staplerterminals zu ermöglichen ist auf eine separate Laufzeitumgebung, z. B. .NET Framework, zu verzichten. Darum wird eine Programmierung in C/C++ vorgesehen.	C/C++
<b>Objektorientierte Nutzung der Bildverarbeitung</b>	Die Zielgruppe des Software-Frameworks sind vorwiegend Systemintegratoren, die sich selbst bisher mit Bildverarbeitung wenig beschäftigt haben. Damit diese Gruppe der Anwender die komplexen Methoden der Bildverarbeitung möglichst mit geringem Einarbeitungsaufwand anwenden kann, müssen mögliche Fehlerquellen und Stolperfallen bei der Anwendung dieser Methoden vermieden werden. Dies lässt sich am Besten durch objektorientierte Kapselung der Methoden erreichen.	erforderlich
<b>Hubfunktionalität für die Kameraschnittstelle</b>	Zur voneinander unabhängigen Verwendung des gleichen Kamerabildes ist eine Hubfunktionalität umzusetzen.	erforderlich
<b>Parameteroptimierung Bildverarbeitungsalgorithmen</b>	Es sind Startwerte und Mechanismen zur Wahl von Parametern der genutzten Bildverarbeitungsalgorithmen vorzusehen, so dass weniger erfahrene Nutzer mit dem Software-Framework zügig erste erfolgreiche Umsetzungen einzelner Sensorfunktionen erzielen können.	erforderlich

## Bildverarbeitungsbibliothek

Tabelle 3-9: Anforderungskatalog Bildverarbeitungsbibliothek

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
Lizenz	Die Bildverarbeitungsbibliothek soll zur kostenfreien Nutzung zur Verfügung stehen und modifiziert wieder veröffentlicht werden dürfen.	Open Source zur freien Nutzung und Weitergabe
API für Programmiersprachen		C/C++
Grafikkartenunterstützung (CUDA/OpenCL)	Zur Beschleunigung der Datenverarbeitung sollen Bildverarbeitungsschritte ggf. auf die Grafikkarte zur Ausführung ausgelagert werden können.	optional
Bildverarbeitungsalgorithmen	Es ist auf die Wahl einer möglichst umfangreichen Bibliothek an Bildverarbeitungsalgorithmen zu achten, die auch auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse weiterentwickelt werden.	wissenschaftlich aktuell, umfangreich

## Entwicklungsumgebung

Tabelle 3-10: Anforderungskatalog Entwicklungsumgebung

Kriterium	Erläuterung	Anforderung
Lizenz	Die Entwicklungsumgebung soll zukünftigen Entwicklern möglichst kostenfrei zur Verfügung stehen.	Open Source zur freien Nutzung und Weitergabe bevorzugt
SVN-Anbindung	Eine versionsbasierte Sicherung der verschiedenen Entwicklungsstände des Software-Frameworks ist in der Entwicklungsumgebung vorzusehen.	erforderlich
Compiler		C/C++
Betriebssystem		MS Windows 32-bit

## 4 Entwicklung eines Software-Frameworks

Für die Entwicklung kamerabasierter Sensorfunktionen für Gabelstapler werden zum einen grundlegende Funktionen wie der Zugriff auf Kameras (z. B. Bildaufnahme, Kamerakonfiguration) oder häufig verwendete Bildverarbeitungs- und Auswertungsmethoden und zum anderen aber auch Algorithmen, die speziell für den Anwendungsfall am Gabelstapler geeignet sind, benötigt.

Das im Rahmen des Projektes entwickelte Software-Framework soll aber auch im Umgang mit den Methoden aus dem Bereich Computer Vision wenig vertrauten Personen die Entwicklung von Sensorfunktionen für Gabelstapler erleichtern. Dies wird in dem Software-Framework im Wesentlichen durch zwei Maßnahmen erreicht:

1. Es werden häufig verwendete Verfahren und Methoden implementiert, die in Form von Bausteinen direkt verwendet werden können, ohne dass das Funktionsprinzip des Bausteins selbst verstanden werden muss (Black Box Prinzip). Voraussetzung ist lediglich das Verständnis, welche Eingabe durch den Baustein zu welcher Ausgabe transformiert wird.
2. Das Nutzungskonzept des Frameworks erlaubt die Kombination der Bausteine in einer einfachen und leicht verständlichen Art und Weise. Für die Nutzung von Bildverarbeitungsmethoden wird die OpenCV Bibliothek [OPE-2013] eingebunden. Diese stellt sehr viele Algorithmen aus dem Bereich Computer Vision zur Verfügung, auf denen die Demonstratoren aufbauen können. Zur weiteren Vereinfachung des Entwicklungsprozesses und zur Reduktion des Einarbeitungsaufwandes wird eine vollständige Entwicklungsumgebung (Compiler, Debugger, Codeeditor etc.) zusammengestellt, so dass ohne Kosten und Installationsaufwand mit der Entwicklung von Programmen begonnen werden kann.

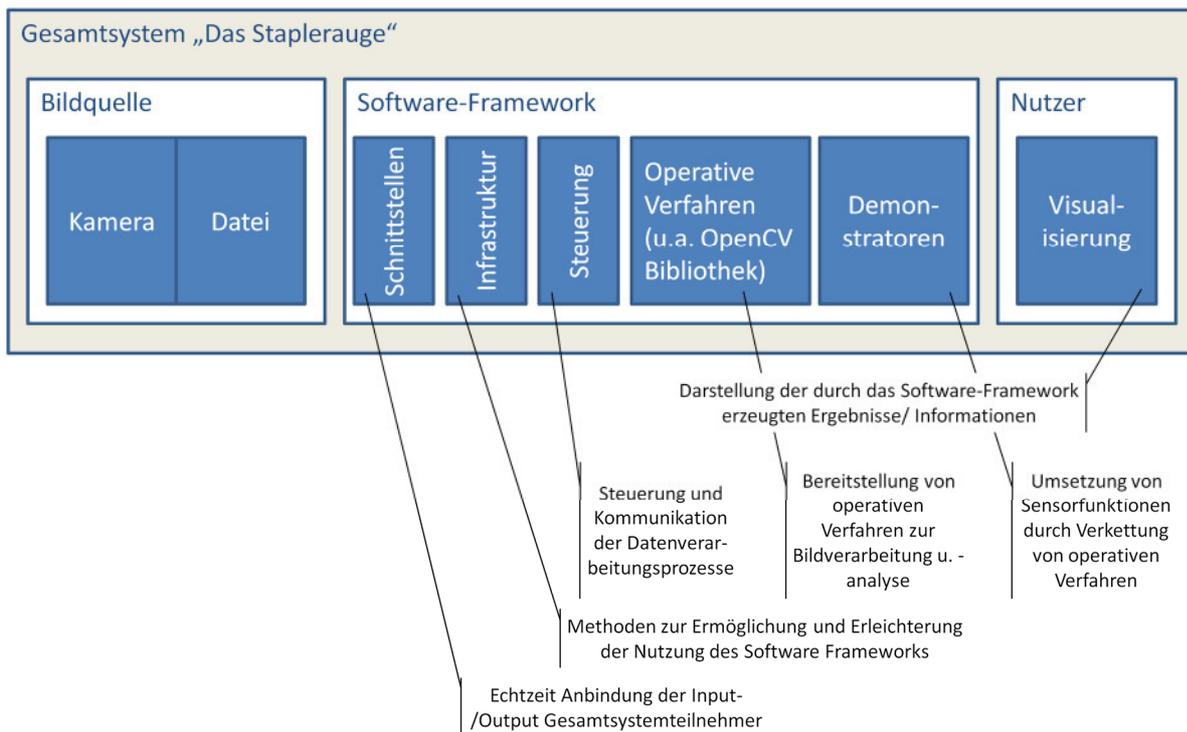
### 4.1 Einordnung im bildverarbeitenden System

Die Eingabe für die Verarbeitungsschritte des Software-Frameworks sind zunächst Bilddaten, die von einer Bildquelle stammen (Kamera oder Videodatei). Der Zugriff auf diese Bildquelle wird über verschiedene Schnittstellen ermöglicht, die eigentliche

## 4 Entwicklung eines Software-Frameworks

Bildaufnahme ist allerdings nicht Bestandteil des Frameworks, sondern wird vom Kameratreiber übernommen, der lediglich über die oben genannten Schnittstellen gesteuert werden kann.

Die aufgenommenen Bilddaten können dann in zusammenschaltbaren Modulen weiterverarbeitet werden, die wiederum teilweise auf Methoden aus externen Bibliotheken (z. B. OpenCV) zugreifen (siehe Abbildung 4-1). Die im Rahmen des Projektes erstellten Demonstratoren ergeben sich jeweils aus einer Kombination dieser Module und sind somit durch Anwendung des Nutzungskonzeptes realisiert.



**Abbildung 4-1: Einordnung relevanter Systembestandteile in das Gesamtsystem "Das Staplerauge"**

Durch eine Sensorfunktion generierte Daten werden durch nachgelagerte Programmteile weiterverarbeitet oder dem Nutzer angezeigt. Dieser Teil einer Funktion ist streng genommen nicht Bestandteil der Sensorfunktion, daher spezifiziert das Software-Framework auch keine Schnittstelle für die Nutzung der Daten in anderen Programmen. Es obliegt dem Nutzer des Frameworks, sich die Schnittstelle für die Anbindung der generierten Daten für seine Anwendung in Form eines Moduls selbst zu definieren. Zu Demonstrationszwecken werden jedoch im Software-Framework Beispiele zu einer möglichen Umsetzung bereitgestellt.

## 4.2 Architektur des Software-Frameworks

Das zentrale Programmierparadigma des Software-Frameworks ist die objektorientierte Programmierung (vgl. LAH-2011). Klassen (Schablonen für Objekte) und Algorithmen aus den folgenden Bereichen werden durch das Software-Framework bereitgestellt:

- Sensorfunktion (Oberklasse für Demonstratoren)
- Aufnahme und Verteilung von Bilddaten (VideoHub)
- Bildvorverarbeitung und Bildmanipulation sowie Bildauswertung (Filter)
- Konfiguration von Kamera und Anwendung ((Camera-)Configurer)

Abbildung 4-2 stellt die Architektur des Software-Frameworks vereinfacht dar:

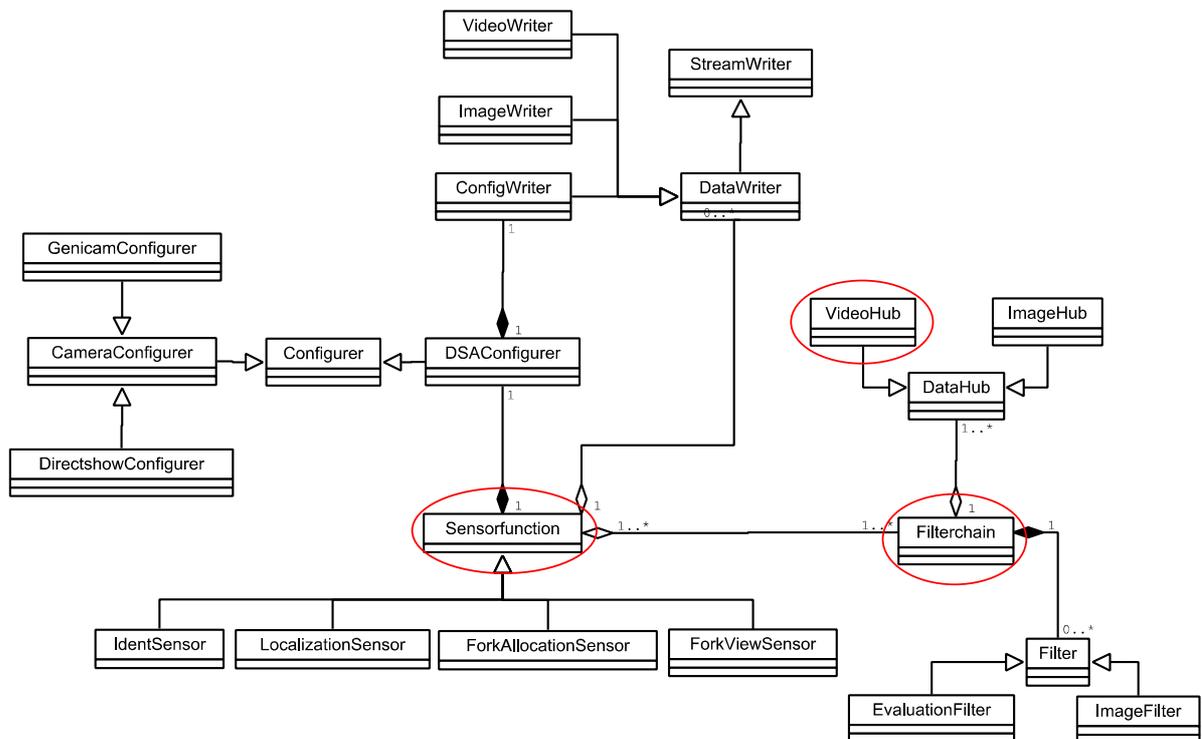


Abbildung 4-2: Vereinfachtes Klassendiagramm (die zentralen Komponenten sind eingekreist)

### 4.2.1 Die Klasse Sensorfunktion

Die zentrale Komponente ist die Klasse Sensorfunktion. Objekte, die Instanzen dieser (Ober-)Klasse sind, implementieren eine konkrete Sensorfunktion und können sich dabei aller anderen Klassen bedienen.

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Demonstratoren (Barcode-Erkennung, Gabel-Belegt Erkennung, Bestimmung der Gabelhubhöhe, Lokalisierung) werden

von dieser Klasse abgeleitet. Jede dieser Klassen enthält mindestens eine Kette von Filtern mit der Bildverarbeitungslogik.

### 4.2.2 Entwurfsmuster für die Bildverarbeitung

Für die Demonstratoren können folgende Anforderungen bezüglich der Informationsverarbeitung identifiziert werden:

1. Zu übertragene Datenmenge: Der Datenstrom, der von der Kamera geliefert werden kann, beträgt bis zu 125MB/s (5 Megapixel je Bild bei 25 Bildern pro Sekunde).
2. In logistischen Prozessen wird häufig ein synchroner Material und Informationsfluss angestrebt. Die Sensorfunktion muss daher ihre Information mit so wenig Verzögerung wie möglich bestimmen und weitergeben.
3. Im Allgemeinen liefern Sensorfunktionen am Gabelstapler Messwerte, die von nachgelagerten Anwendungen weiterverarbeitet werden, so dass eine grafische Darstellung oder Nutzerinteraktion erst dort benötigt wird. In dem Framework sind daher keine derartigen Methoden erforderlich.
4. Die auf dem Gabelstapler anzubringenden Recheneinheiten müssen der Mobilität des Fahrzeugs wegen aus dessen Batterie oder einer eigenen zusätzlich mitgeführten Batterie mit Strom versorgt werden und daher sparsam im Stromverbrauch sein. Zudem werden üblicherweise Fahrzeugterminals für die Interaktion mit dem Fahrer z. B. zur Bestätigung des Fahrauftrages verwendet. Für derartige Anwendungen sind keine leistungsfähigen Recheneinheiten notwendig, daher sind am Markt verfügbare Staplerterminals, auf denen entsprechende Sensorfunktionen ausgeführt werden sollen, in Bezug auf die Rechenleistung deutlich langsamer als handelsübliche PCs. Die eingesetzten Algorithmen müssen daher in prozessrelevanter Echtzeit auf diesen Geräten ausgeführt werden können und dürfen daher nicht zu viel Rechenleistung benötigen.
5. Das Entwurfsmuster soll möglichst einfach anzuwenden sein, damit die Einstiegshürde für Entwickler nicht zu hoch ist.

Gemäß Kriterien 3 und 4 scheiden Entwurfsmuster für interaktive Systeme aus (mangelnde Nutzerinteraktion in den Anwendungen). Ebenso sind Muster für dezentrale Systeme (vgl. BUS-1996) wenig geeignet. Besonders erfüllt das Pipes-and-Filter Entwurfsmuster (BUS-1996) die Kriterien 1 und 2, da es für die effiziente Verarbei-

tung großer Datenmengen entwickelt wurde. Das Entwurfsmuster ist zudem auch für Laien leicht verständlich und einfach anzuwenden. Aus diesem Grund sind im Software-Framework alle Bildverarbeitungsoperationen in Filter-Objekten untergebracht. Diese Filter transformieren die ihnen übergebenen Eingaben in Ausgaben. Die Verknüpfung der Filter untereinander wird über sogenannte Pipes hergestellt. Die Ausgaben der vorhergehenden Filter werden dabei zur Weiterleitung von Information oder Weiterverarbeitung der Daten mit den Eingabeschnittstellen der nachfolgenden Filter verknüpft. Für die Filter wird stets eine feste Ausführungsreihenfolge, eine sogenannte Filterkette, definiert. Im Framework sind zwei verschiedene Arten von Filtern vorgesehen:

1. ImageFilter haben als Eingabe ein Bild und ggf. weitere Parameter, modifizieren dieses Bild und stellen es anschließend als Ausgabe bereit.
2. EvaluationFilter haben als Eingabe ebenfalls immer ein Bild (und üblicherweise weitere Parameter) wie die ImageFilter, aber leiten dieses Bild unverarbeitet als Ausgabe weiter und stellen zusätzliche Informationen als Ausgabe bereit oder führen vom Bild unabhängige Aktionen durch.

Um komplexe Filterketten wiederverwenden zu können, besteht die Möglichkeit, eine komplette Filterkette als normalen Filter zu nutzen. In diesem Fall entspricht die Eingabe des ersten Filters dieser Kette der Eingabe des so erzeugten Filters; als Ausgabe wird die Ausgabe des letzten Filters der Kette bereitgestellt.

## 4.3 Funktionen des Software-Frameworks

### 4.3.1 Prinzipien zur Hardware-Anbindung

Zur gleichzeitigen Nutzung einer Kamera durch mehr als eine Sensorfunktion muss das Kamerabild mehreren Anwendungen oder Modulen zur Verfügung gestellt werden. Die Treiber einer Kamera unterbinden jedoch in der Regel einen mehrfachen, gleichzeitigen Zugriff auf die Hardware, zudem ist es sinnvoller und performanter, das Bild nur einmal von der Kamera zu beziehen und dann ggf. als Kopie den nachfolgenden Programmteilen zur Verfügung zu stellen.

Die Klasse VideoHub kann dazu genutzt werden, eine Bildquelle zwischen mehreren Bildverarbeitungsketten zu teilen. Eine Instanz dieser Klasse verteilt Kopien der Sensordaten (Bilder) an nachfolgende Filter und benötigt einen Bilddatenstrom als Ein-

gabe. Dieser kann entweder von einer Kamera bereitgestellt werden oder aus bereits vorverarbeiteten Bildern bestehen. Dadurch ist es möglich, gemeinsame Arbeitsschritte (z. B. die Bildvorverarbeitung) mehrerer Module zusammenzuführen und das Bild erst danach in den Modulen zu benutzen. Somit wird Rechenzeit eingespart und gegenseitige Störungen der Filterketten untereinander werden vermieden.

Der je Kamera nur einmal benötigte Zugriff auf die Kamerahardware hingegen besteht aus zwei funktionalen Einheiten:

1. Bildaufnahme
2. Anpassung der Kameraeinstellungen (z. B. Einstellung der Belichtungszeit)

Um beide Funktionen umsetzen zu können ist die Verwendung der Treiber-API notwendig. Mit GigEVision und Usb3Vision [AIA-2014b] sind herstellerunabhängige Standards zum Zugriff auf die Kameraaufnahmen verfügbar. Leider sind diese Standards nur Mitgliedsfirmen der Automated Imaging Association (AIA) [AIA-2014a] zugänglich, daher sind standardkonforme, quelloffene Treiber nicht umsetzbar. Entsprechend kann im Rahmen des Software-Frameworks auch keine kameraunabhängige Treiberanbindung integriert werden, dem Nutzer bleibt deswegen nur die Möglichkeit, die benötigten Herstellertreiber selbst zu integrieren. Erschwerend kommt hinzu, dass die Herstellertreiber einer inkompatiblen Lizenz unterliegen und daher mit dem Framework aus rechtlichen Gründen nicht bereitgestellt werden dürfen. Für die meisten Treiber werden durch den Hersteller aber entsprechende Codebeispiele zur prinzipiellen Kameraanbindung bereitgestellt.

Zusätzlich sind grundlegende Funktionen der Kameratreiber für Microsofts DirectShow-API [MIC-2014a] verfügbar. Der grundlegende Nachteil von DirectShow-Treibern für Industriekameras besteht in der fest definierten Liste der Kameraoptionen, die ohne herstellerspezifische Erweiterungen genutzt werden können. Die herstellerspezifischen Erweiterungen können meist durch Anbindung einer zusätzlichen, vom Hersteller bereitgestellten Bibliothek und dem damit verbundenem Programmieraufwand angebunden werden. Zudem kann DirectShow nur unter Microsoft Windows genutzt werden.

Zur Konfiguration von Industriekameras existiert der herstellerübergreifende Standard Genicam [EMV-2009]; er wird von den meisten GigEVision-Kameras unterstützt und kann zusammen mit dem Software-Framework genutzt werden. Diese Möglich-

keit der generischen Konfiguration erlaubt sowohl Standardoptionen als auch benutzerdefinierte Optionen einzustellen.

### 4.3.2 Methoden der Bildverarbeitung

Nach Jähne umfasst digitale Bildverarbeitung die Verarbeitung von Bildern von der Bildaufnahme mittels eines Sensors bis zur gewonnenen Information [JÄH-2005]. Jähne unterscheidet vier Hauptschritte:

1. Bildaufnahme
2. Vorverarbeitung (Bildverbesserung)
3. Merkmalsextraktion (Anwendung von Filtern und Mechanismen zur Trennung von interessierenden Objekten vom nicht interessierenden Hintergrund)
4. Bildanalyse

Die Bildaufnahme und Teile der Bildvorverarbeitung werden von der Kamera übernommen, daher muss die Bildverarbeitungssoftware nur die Verarbeitung der Bildinformationen, welche die Kamera liefert, umsetzen. Zu den umzusetzenden Funktionen gehören also Bildverbesserung, Merkmalsextraktion und Bildanalyse. Die grundlegenden Bildverarbeitungsalgorithmen im Software-Framework werden aus der OpenCV Bibliothek [OPE-2013] integriert. Diese Bibliothek wird aus folgenden Gründen gewählt:

1. Sie steht unter einer Open Source Lizenz, welche die Weitergabe des Quellcodes erlaubt, aber nicht verpflichtend vorschreibt. Erlaubt sein muss die Weitergabe, damit im Rahmen des Forschungsprojektes entstandene Programmquellcodes der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden können. Die Pflicht zur Weitergabe des modifizierten Quellcodes stellt hingegen für Firmen, die ihre Produkte auf den bereitgestellten Quellcodes aufbauen möchten, oft ein Problem dar, da damit automatisch eine Offenlegung des eigenen Know-hows verbunden ist und somit Wettbewerbsvorteile des Unternehmens zunichte gemacht werden.
2. Viele Algorithmen aus allen relevanten Bereichen der Bildverarbeitung sind enthalten.
3. Die Bibliothek wird aktiv weiterentwickelt und um aktuelle Algorithmen ergänzt. Zudem kann eine große Community bei Fragen und Problemen weiterhelfen.

4. Eine äußerst umfangreiche API-Dokumentation ist vorhanden und Anleitungen und Bücher rund um die Bibliothek sowohl für Anfänger als auch Experten erleichtern deutlich den Einstieg in die Nutzung von OpenCV.
5. Auf vielen Webseiten werden Codebeispiele für Basisaufgaben aus dem Bereich Computer Vision zur Verfügung gestellt. Insbesondere Anfänger können daher mittels „Learning-by-Doing“ (vgl. KNO-2011) vorgehen.

Zur einfacheren Verwendung und Kombination der Bildverarbeitungsalgorithmen werden im Software-Framework die Algorithmen in Filter-Objekten gekapselt. Dadurch lassen sich Aneinanderreihungen von Filtern leicht erzeugen und somit komplexe Programmabläufe einfach realisieren. Eine reduzierte Zahl der notwendigen Parameter für die jeweiligen Algorithmen kann durch Vorgabe gängiger und allgemein gut funktionierender Parameterkombinationen in der Wrapper-Klasse erreicht werden. In vielen Fällen ist so eine einfache Handhabung am Anfang möglich, dennoch lassen sich die anderen Parameter später für ein Fine-Tuning ändern, sobald der Nutzer besser versteht, wie die Funktion des Filters durch die Parameter beeinflusst wird.

### 4.3.3 Nutzungskonzept für den Anwender

Eine Sensorfunktion besteht, wie oben beschrieben, aus einer Liste untereinander verbundener Filter. Der erste Filter muss einen VideoHub als Eingabe haben, um den Videodatenstrom (z. B. von Kamera oder Videodatei), der verarbeitet werden soll, für die Weiterverarbeitung zu beziehen. Alle nachfolgenden Filter arbeiten jeweils mit den Ausgaben vorheriger Filter. Der letzte Filter liefert üblicherweise die durch die Verarbeitung der Filterkette extrahierte, insgesamt erwünschte Information.

Um eine sinnvolle Filterkette zu erstellen müssen (mindestens) die folgenden Objekte erzeugt werden:

1. ein (Video)Hub für die Aufnahme und Weitergabe der Bilder,
2. ein paar (unterschiedliche) Filter zur Verarbeitung der Bilder und
3. eine Liste mit den Filter-Objekten in einer festgelegten Reihenfolge.

Die Ein- und Ausgaben eines jeden Filters müssen zusätzlich definiert werden, um die Filter miteinander zu verknüpfen. Der Nutzer des Frameworks muss sicherstellen, dass alle notwendigen Eingaben mit den Ausgaben vorhergehender Filter verbunden sind. Die Liste der Filter wird zur Erstellung der Filterkette benötigt (Filter-

chain-Objekt). Die Filterchain ist lediglich für die Ausführung und Verwaltung der Filterliste verantwortlich. Zusätzliche, vom Benutzer definierte Filterklassen können dann wie die mit dem Software-Framework ausgelieferten Filter eingesetzt werden.

## Beispiel

Das folgende Programm implementiert eine sehr einfache Gabelzinkenkamera, mit der man einen Bilddatenstrom aus Sicht der Gabelzinken auf einem Staplerterminal darstellen kann – vorausgesetzt die Kamera ist entsprechend montiert. Das Programm kann optional auch den Bilddatenstrom aufnehmen und in einer Datei abspeichern. Die Aufnahme kann durch `filter2->setActive(false)`; unterdrückt werden.

```
// Bildquelle
const double fps = 15.0; // 15 Bilder pro Sekunde
GigeVisionVideoCapture* capture = new GigeVisionVideoCapture("192.168.1.10");
capture->set(CV_CAP_PROP_FPS, fps);
VideoHub hub(capture);
// Filter
// Größenänderung des Videos auf 800x600
ResizeFilter *filter1 = new ResizeFilter(Size(800,600));
// Schreibe Video in Datei recorded.avi
VideoWriterFilter *filter2 = new VideoWriterFilter("recorded.avi",
CV_FOURCC('X','V','I','D'), fps);
// zeige Video auf Bildschirm
ImageOutputFilter *filter3 = new ImageOutputFilter("Video");
// warte bis nächstes Bild aufgenommen wurde
WaitFilter *filter4 = new WaitFilter(fps);

// Pipes (Verbindungen zwischen den Filtern)
filter1->setInput(&hub);
filter2->src = &(filter1->dst);
filter3->src = &(filter2->dst);
filter4->src = &(filter3->dst);

// Filterkette
list<Filter*> *filterList = new list<Filter*>();
filterList->push_back(filter1);
filterList->push_back(filter2);
filterList->push_back(filter3);
filterList->push_back(filter4);
FilterChain chain(filterList);

// führe die Filterkette in Endlosschleife aus
for(;;) {
    chain.apply();
}
```

**Quellcode 4-1: einfaches Beispielprogramm, das mit dem Software-Framework umgesetzt ist**

## Integrierte Entwicklungsumgebung

Zur weiteren Vereinfachung der Frameworknutzung wird zusätzlich eine Eclipse-basierte [ECL-2014] integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) bereitgestellt. Ein Beispielprojekt ist dort bereits integriert, somit kann mit der Entwicklung ohne vorherigen Einrichtungsaufwand begonnen werden. Es muss lediglich eine Java-Laufzeitumgebung [ORA-2014] installiert sein. Eclipse ist eine beliebte und weit ver-

breitete Entwicklungsumgebung, deren Lizenz die kostenlose Weitergabe erlaubt (vgl. ECL-2004). Zum Funktionsumfang gehören unter anderem Code-Vervollständigung, Integration diverser Compiler und Debugger für unterschiedliche Programmiersprachen und Unterstützung für Versionskontrolle sowie das Ergänzen weiterer Funktionen über entsprechende Erweiterungen. Für andere Entwicklungsumgebungen, z. B. Microsoft Visual Studio, ist die kostenlose Weitergabe aus Lizenzgründen nicht möglich. Zwar bietet der Hersteller Microsoft prinzipiell eine vom Funktionsumfang her deutlich eingeschränkte Version seiner Entwicklungsumgebung an, allerdings gestatten die Lizenzbedingungen dieser Version nur den direkten Bezug der Software von Microsoft selbst.

Die für das Software-Framework zusammenstellte IDE beinhaltet:

1. Eclipse 4 (Juno, Service Release 2) [ECL-2014]
2. CDT (C/C++ development tools) [ECL-2014]
3. Subversive SVN Extension (SVN Versionskontrolle) [ECL-2014]
4. C/C++ compiler MinGW (gcc 4.6.2, 32-Bit) [MIN-2013]

Diese Zusammenstellung kann unter Microsoft Windows ohne Installation direkt von einem USB-Stick betrieben werden. Es ist möglich, den Microsoft C++ Compiler [MIC-2014b] zu integrieren, sofern dieser auf dem entsprechenden Rechner installiert ist.

Für andere Betriebssysteme kann diese Zusammenstellung relativ einfach durch den Nutzer zusammengestellt werden.

## **5 Umsetzung von Sensorfunktionen im Demonstrator mittels Software-Framework**

Im Rahmen dieses Kapitels werden relevante Aspekte des Systementwurfs und der anschließenden Umsetzung durch eine Integration der einzelnen Systembestandteile diskutiert.

### **5.1 Kameravorbereitung des Versuchsstaplers**

Die Vorbereitung des Versuchsstaplers zur Nutzung einer Kamera mit dem Ziel der kamerabasierten Zustandserfassung umfasst folgende Bestandteile:

- Identifikation geeigneter Anbringungspunkte zum Betrieb einer Kamera
- Kommunikations- und Energieanbindung der gewählten Anbringungspunkte
- Kameramontage mittels Halterung am Anbringungspunkt
- Hardwareauswahl eines Kamerasystems (Kamera-Body inkl. Objektiv)

#### **5.1.1 Anbringungspunkte**

Hinsichtlich der Identifikation geeigneter Anbringungspunkte fand im engen Austausch mit Experten des Projektbegleitenden Ausschusses eine Begutachtung am Versuchsstapler statt, der exemplarisch für die Anbringung am Flurförderzeug verwendet wird. Im Anschluss fand eine Bewertung jedes Anbringungspunktes statt, die die Zielgrößen

- Reduktion des Integrationsaufwandes,
- Gewährleistung einer Betriebssicherheit im Standardprozess,
- technische Machbarkeit der Umsetzung einer kamerabasierten Zustandserfassung und
- Umsetzung einer Funktionsintegration im kamerabasierten Sensor

einschließt. Im Folgenden gibt Tabelle 5-1 einen Überblick zu den angewandten Bewertungskriterien.

**Tabelle 5-1: Bewertungskriterien der sicheren Anbringung einer Kamera**

	Integrations- aufwand	Betriebs- sicherheit	Technische Machbarkeit	Funktions- integration
<p><b>1. Lage der Kamera im Verhältnis zur Fahrzeuggrenze</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Befindet sich die Kamera außerhalb des Fahrzeuggrundrisses (xy-Ebene), besteht eine erhöhte Gefahr des Abfahrens.</li> <li>Ebenso ist diese Gefahr existent, wenn der Sensor oberhalb des Hubmastes (exkl. Ausleger) angebracht wird.</li> </ul>		✓		
<p><b>2. Beweglichkeit des Trägers, an dem die Kamera befestigt wird</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sofern der Träger ein bewegliches Element ist, welches seine Stellung im Rahmen der Staplerbedienung im Transportprozess verändert, ist eine mitlaufende Verkabelung und somit ein erhöhter Integrationsaufwand erforderlich.</li> </ul>	✓			
<p><b>3. Einschränkung der Sichtachse</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Eine Kamera ist ein Sensor, der eine Sichtverbindung zum zu betrachtenden Objekt erfordert. Somit stellt z. B. eine Abdeckung des betrachteten Objektes eine Einschränkung dar, die die Funktion des Sensors für den Moment der Abdeckung verhindert.</li> <li>Die Betrachtung erfolgt für Standardfälle des Transportprozesses (Heben/Senken/Neigen des Gabelträgers, Rangieren FFZ).</li> </ul>			✓	
<p><b>4. Anforderungen an das Sichtfeld, bzw. den Öffnungswinkel des Objektivs</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Abhängig von der Sensorfunktion wird aus der sich ergebenden Bildgeometrie für den jeweiligen Anbringungspunkt eine Schätzung des notwendigen Öffnungswinkels des Objektivs abgeleitet.</li> <li>Es ist anhand einer eigens recherchierten Marktübersicht zu Objektivs zu überprüfen, inwiefern der sich ergebende Öffnungswinkel durch ein Objektiv zu realisieren ist.</li> </ul>			✓	✓

Es wurden 22 mögliche Anbringungspunkte dieser Bewertung unterzogen, um am Ende die Anbringungspunkte ID15 und ID04 für die weitere Umsetzung auszuwählen. Lediglich der Anbringungspunkt ID01 wird ebenso umgesetzt, da dieser für Referenzuntersuchungen zur Lokalisierung ohne Realisierung einer Funktionsintegration verwendet wird. Hier ist von Interesse zu quantifizieren, welche Qualitätsabstriche in der Umsetzung der kamerabasierten Funktionsintegration gegenüber einer kamerabasierten Einzelfunktion hinzunehmen sind (siehe Abbildung 5-1). Hierbei können folgende Demonstratoren für Sensorfunktionen an den ausgewählten Anbringungspunkten umgesetzt werden:

- ID01 heckseitig am Fahrerschutzdach
  - Lokalisierung (Referenzuntersuchung)
- ID04 seitlich am Gabelträger
  - NVE-Erkennung
  - Gabel-Belegt Erkennung
- ID15 unteres Ende Hubmastgerüst
  - Gabelhubhöhen-Erkennung
  - Lokalisierung

Dabei existieren hinsichtlich der Anforderungen an das Kamerasystem bei den hier betrachteten Varianten für die Funktionsintegration an den Anbringungspunkten ID04 und ID15 Konflikte. Bei konträren Anforderungen (vgl. Kapitel 3.3.2) ist eine Orientierung an den Maximalanforderungen erforderlich und die im Rahmen der Evaluierung (Kapitel 6.2) realisierten Leistungen sind im Hinblick auf den getätigten Kompromiss in der Systemwahl zu interpretieren.

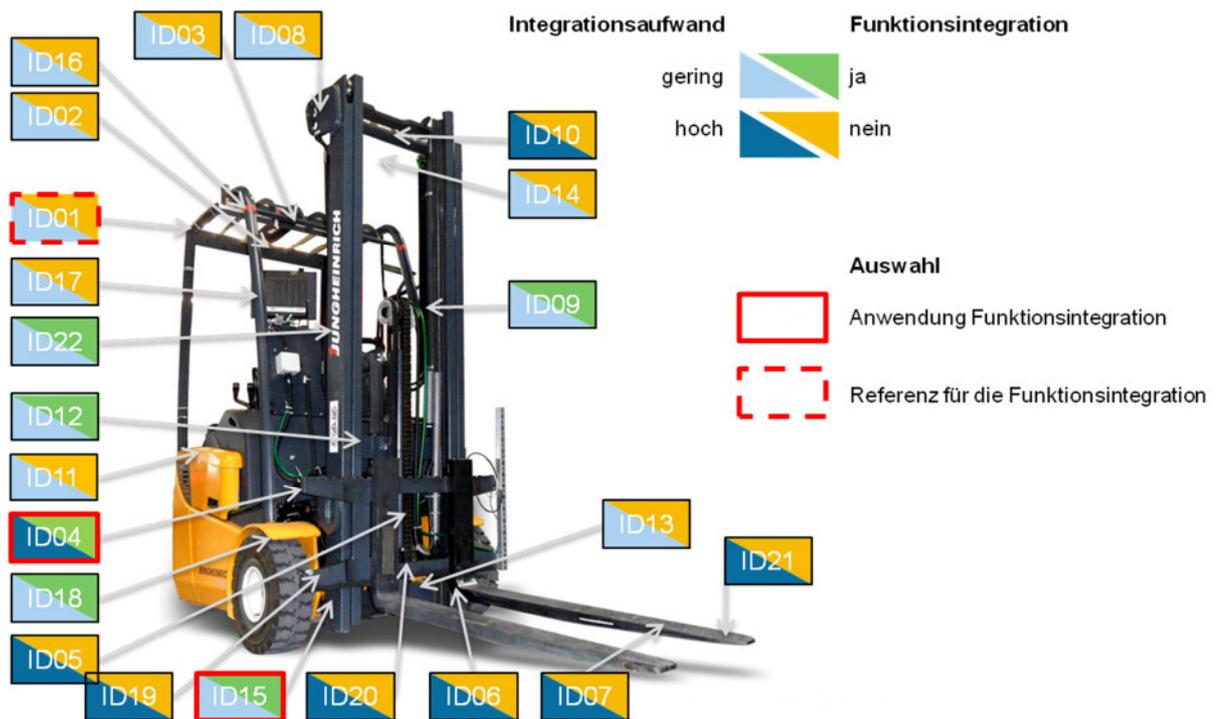


Abbildung 5-1: Überblick der betrachteten Anbringungspunkte

### 5.1.2 Kommunikations- und Energieanbindung

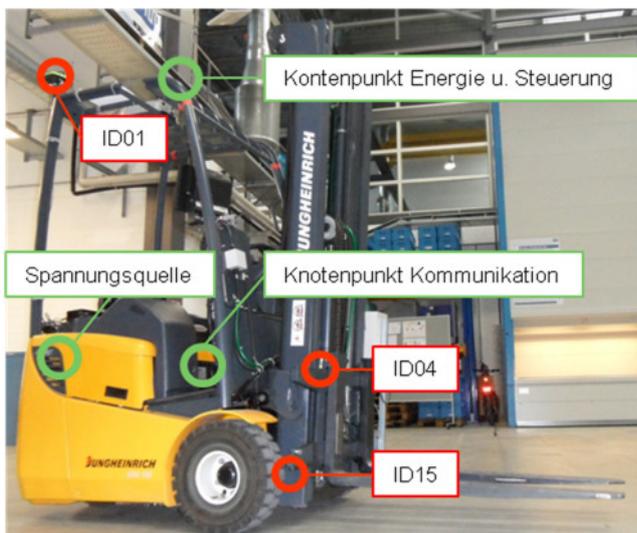
Eine am Stapler betriebene Kamera benötigt eine Spannungsversorgung und Kommunikationsanbindung. Ein entsprechendes Lastenheft nimmt eine Spezifikation der

## 5 Umsetzung von Sensorfunktionen im Demonstrator mittels Software-Framework

zu wählenden Komponenten und der Verlegung am Fahrzeug vor. Im Ergebnis steht an jedem betrachteten Anbringungspunkt folgende Infrastruktur zur Verfügung:

- Kommunikationsanbindung
  - Ethernet Gigabit mit RJ45-Steckern
  - USB 3.0 mit B-Stecker zzgl. B-/A-Steckeradapter
- Steuerungsanbindung
  - 7 Triggerleitungen für z. B. Beleuchtungssteuerung
- Energieanbindung
  - 5V, 2A
  - 12V, 2A
  - 24V, 0,5A

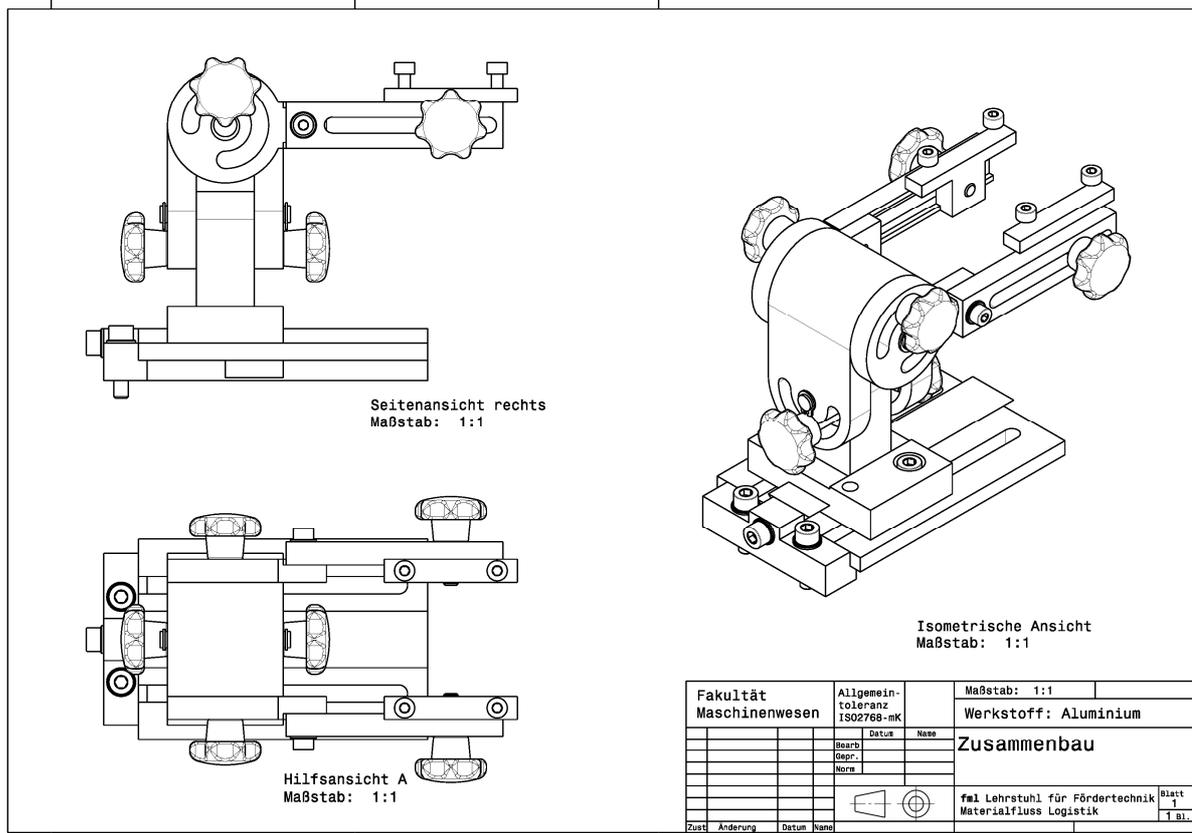
Abbildung 5-2 liefert einen Überblick über die erforderlichen Knotenpunkte, in denen eine Verteilung auf die jeweiligen Anbringungspunkte realisiert wird.



**Abbildung 5-2: Anordnung der Kommunikations- und Energieanbindung**

### **5.1.3 Kamerahalterung**

Für die Realisierung der Demonstratoren wurde eigens eine robuste und fixierbare Kamerahalterung entworfen, die 4-Freiheitsgrade liefert und somit eine flexible Anpassung der Kamera an spezifische Erfordernisse ermöglicht. Ihre Anbringung an den Gabelstapler kann mittels Magnet, Klemmvorrichtung oder Schraubverbindung erfolgen. Grundsätzlich ist die Kamerahalterung modular aufgebaut, so dass eine Reduktion der Freiheitsgrade oder eine andere Anbringungsform am Stapler schnell realisiert werden kann (vgl. Abbildung 5-3).



**Abbildung 5-3: Konstruktionszeichnung der Kameralhalterung mit Schraubverbindung für die Stapleranbringung**

### 5.1.4 Hardwareauswahl Kamerasystem

Eine umfangreiche Recherche am Markt verfügbarer und für den Betrieb am Gabelstapler grundsätzlich geeigneter Industriekamerasysteme ging dieser Hardwareauswahl voraus. Hierbei wurde z. T. auf umfangreiche Erfahrung einzelner Experten im projektbegleitenden Ausschuss gesetzt. Das für die Umsetzung beschaffte Kamerasystem<sup>3</sup> setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Smartek GC2441M Kamera-Body  
CCD-Fotosensor, 2/3" Sensorgröße, 2445 x 2050 Pixel (5,0 MP), 15 FPS, monochromes Bild, Ethernet GigE Vision-Schnittstelle
- Tamron 219HB Objektiv

<sup>3</sup> Das Kamerasystem weicht gegenüber dem in der Beantragung genannten Kamerasystem ab, da es im Zuge der technischen Weiterentwicklung näher am Bedarf ist und die Tendenz sinkender Komponentenpreise hier zu Gunsten der Leistungssteigerung genutzt werden konnte.

## 5 Umsetzung von Sensorfunktionen im Demonstrator mittels Software-Framework

Brennweite 8 mm, Blendenzahl 1,4 bis 16, Öffnungswinkel 59,3 x 45,2°, Fokusbereich 0,26 m bis ∞, C-Mount

- Smartek IPSC4-r2 Beleuchtungssteuerung  
4 Kanäle
- SVL Spot Light SA30WHI Beleuchtung  
Weiße LED, anpassbarer Fokus

**Tabelle 5-2: Abstimmung der Anforderungen aus den Sensorfunktionen an das Kamerasystem (Kamera-Body und Objektiv)**

Modul	Parameter	Gegeben	NVE-Erkennung	Gabel-Belegt	Hubhöhe	Lokalisierung	Konflikte
Kamera  Smartek GC2441M	Auflösung	5 Mio. Pixel	< 55 Mio. Pixel				ja
	Farbtiefe	Monochrom				HDR	
	Bildrate (FPS)	15		> 5	>10	5 bis 25	ja
	Seitenverhältnis Sensor	2:3	1:1,286	1:1			
	Sensortyp	CCD	CCD	CMOS	CMOS	CCD	ja
	Bildstabilisierung	optional	ja	ja	offen	nein	ja
	Schnittstelle Beleuchtung	ja	ja	ja	offen	nein	ja
	Belichtungszeit	minimal	offen	offen	offen	minimal	
	Objektiv-Schnittstelle	C-Mount					
	Treiberschnittstelle	GigE					
	API	Genicam					
Beleuchtungssteuerung	ja						
Objektiv  Tramron 219HB	Öffnungswinkel horizontal x vertikal[°]	59,3 x 45,2	69,2 x 49,4	53,1 x 53,1	53,1 x 53,1	28,1 x 33,4	ja
	Filter	Anbringung optional vorsehen	optional	optional	optional	optional	
	Verzeichnisgrad	minimieren	nicht relevant	nicht relevant	minimieren	minimieren	

<i>Blendenzahl</i>	1,4	minimieren	minimieren	minimieren	minimieren	
<i>Mindestabstand Objekt [mm]</i>	260					
<i>zzgl. Weiterer Parameter in Konsistenz zum Kamera-Modul</i>						

Auf Grund der konträren Anforderungen stellt das obige System einen Kompromiss dar, der die Maximalanforderungen soweit möglich berücksichtigt. Da insbesondere die Anforderungen der Sensorfunktion NVE-Erkennung/Waren-Identifikation hinsichtlich der Auflösung extrem sind, erfolgt eine Einschränkung für die weitere Umsetzung. Es wird davon ausgegangen, dass die Kennzeichnung der zu identifizierenden Ware mittels NVE entsprechend der Vorgaben der GS1 erfolgt, d. h. die vorgeschriebene Anbringungsposition an der Ladeeinheit eingehalten wird [GS1-2009]. Darüber hinaus steht für die Umsetzung der Kamera-Body

- Smartek GC1392C Kamera-Body  
 CCD-Fotosensor, 2/3“ Sensorgröße, 1392 x 1040 Pixel (1,4 MP), 30 FPS, Color-Bild, Ethernet GigE Vision-Schnittstelle

zur Verfügung, der auf Grund der reduzierten Auflösung bei gleich großem Fotosensor eine bessere Lichtempfindlichkeit und somit ein geringeres Rauschverhalten aufzeigt.

## 5.2 Gabel-Belegt Erkennung

### 5.2.1 Zweck

Die Erkennung des Belegungszustandes der Gabelzinken dient der Erkennung der Aufnahme und Abgabe von Gütern. Dadurch soll eine automatische Lagerplatzidentifikation durch die Lokalisierung sinnvoll ausgelöst werden können.

Eine Beladung liegt vor, wenn zweifelsfrei beide Gabelzinken durch das Ladegut belegt sind. Mehrfachaufnahmen von Ladegütern sind möglich, werden jedoch ebenso als „nur“ beladen erkannt. Die Gabelzinke ist zweifelsfrei unbeladen, wenn kein Ladegut auf der Gabelzinke liegt. Alle weiteren Zustände bzw. unsichere Zustände sind als unbekannte Zustände zu kennzeichnen.

### 5.2.2 Funktionsweise

Um den Belegungszustand der Gabelzinken kontinuierlich erfassen zu können, müssen diese permanent im Sichtfeld der Kamera (FoV) zu sehen sein. Eine Betrachtung der Gabelzinken von unten kann aufgrund des Fehlens von Tiefeninformationen nicht zur Erkennung der Belegung herangezogen werden – aus dieser Position betrachtet liegt stets etwas hinter der Gabel und könnte für eine Belegung verantwortlich sein. Eine Betrachtung aus statischer Position von oberhalb des Gabelträgers kann nur erfolgen, wenn die Gabelzinken sich dabei in jeder Hubhöhe im Bild befinden. Bei ausfahrbarem Hubmast kann dies nicht gewährleistet werden. Daher ist das Mitführen der Kamera am Gabelträger notwendig – dies erfordert allerdings eine relativ aufwändige Verkabelung über den Hubmast. Wesentlicher Vorteil der Anbringung am Gabelträger ist allerdings, dass sich die Sicht auf die Gabelzinken nicht ändert und somit eine Belegung einfacher erkannt werden kann. Dies erleichtert gleichzeitig die Erkennung der Gabelzinken, da diese zum Vordergrund gehören und sich im Bild nicht bewegen, während der restliche Teil des Bildes zum Hintergrund gehört. Eine Trennung nach statischem Vordergrund und beweglichem Hintergrund genügt daher, um die Gabelzinken auf unterschiedlichen Fahrzeugen zu identifizieren.

#### Teil 1: Erkennung der Gabelzinken

Die einfachste Form der Erkennung der Gabelzinken ist entsprechend ein Hintergrundfilter, das zugehörige Verfahren nennt sich Background subtraction (vgl. Kapitel 2.3.4).

Eine sehr einfache und vor allem schnelle Form der Hintergrunderkennung ist die Differenzbetrachtung zweier aufeinanderfolgender Bilder (vgl. QIA-2011). Unterscheiden sich die Bilder hinreichend, liefert ihre pixelweise Differenz Hinweise auf zum Hintergrund gehörende Bereiche. Wird dieses Verfahren bei sich bewegendem Gabelstapler ohne Ladung längere Zeit durchgeführt und die sich stark ändernden Pixel werden entsprechend markiert, verbleiben schließlich die Gabelzinken als nicht markierter Vordergrund. Die nicht markierten Bereiche können bezüglich Form und Anordnung konkreten Gabelzinken zugewiesen werden:

- Für eine Gabelzinke im Bild gelten bestimmte Mindestabmessungen und Seitenverhältnisse.
- Zusätzlich kann für ein Gabelzinkenpaar im Bild angenommen werden, dass die Gabelzinkenspitzen in eine ähnliche Richtung zeigen und nie an gegenüberliegenden Bildkanten anliegen (z. B. Gabelzinke 1 am oberen Bildrand, Gabelzinke 2 am unteren Bildrand).

Scheitert die Suche nach Gabelzinken, kann mit der Erkennung von neuem begonnen werden. Parallel zu diesem Schritt werden pixelweise die Mittelwerte aller behandelten Bilder für die Verwendung durch die Belegungserkennung gespeichert. Von Interesse ist hier nur der Mittelwert der Bereiche, die als Gabelzinken identifiziert wurden, er wird später als Referenz für die Belegungserkennung dienen.

Nach erfolgreichem Abschluss dieses Vorgehens sind die Position der Gabelzinken und deren pixelweiser Mittelwert bekannt, ab jetzt kann die Belegung bestimmt werden.

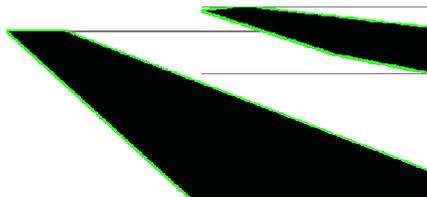


Abbildung 5-4: Binärbild mit Gabelzinkenandidaten und ROI (Gabelzinken grün umrandet)

## Teil 2: Bestimmung des Belegungszustandes

Die Bestimmung der Belegung erfolgt nun ausschließlich auf den als Gabelzinken markierten Bereichen, da nur diese für den eigentlichen Belegungszustand relevant sind. In einem ersten Schritt wird das Referenzbild  $V_{\text{Ref}}(x,y)$  von dem aktuellen Bild  $V_{\text{Pixel}}(x,y)$  abgezogen – bei nicht belegter Gabel ist dieses Bild sehr dunkel, da sich die aktuelle Sicht auf die Gabelzinken vom Referenzbild außer durch Beleuchtungs-

effekte kaum unterscheidet und somit auf jedem Pixel ähnlich große Werte voneinander abgezogen werden:

$$V_{Diff}(x, y) = V_{Pixel}(x, y) - V_{Ref}(x, y)$$

Eine Änderung der Werte auf den Gabelzinken kann jetzt im Wesentlichen zwei verschiedene Ursachen haben:

1. Die Gabel wird belegt, daher entspricht die Sicht darauf nicht mehr dem Referenzbild und es ergibt sich an der Stelle der Gabelzinke durch den großen Unterschied vom Referenzbild ein Muster (vgl. Abbildung 5-5).
2. Andere Lichtverhältnisse (z. B. ein Lichtstrahl, der auf die Gabelzinken fällt) führen ebenfalls zu einer veränderten Sicht auf die Gabel. Dies hat zur Folge, dass in den anders beleuchteten Bereichen der Gabel eine deutliche Abweichung vom Referenzbild entsteht und die Differenz vom Referenzbild ebenfalls ein Muster erzeugt.

Da nur im ersten Fall wirklich eine Belegung stattfindet, muss die Erkennung des Belegungszustandes in der Lage sein, die beiden Fälle voneinander zu trennen.



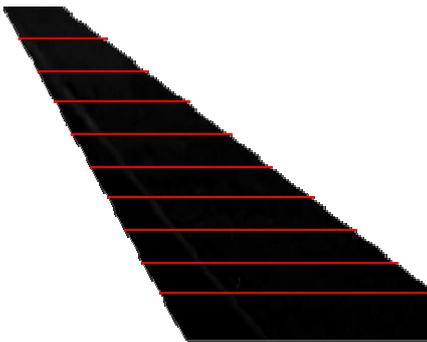
**Abbildung 5-5: Belegungsmuster nach Abzug des Referenzbildes (links: unbelegt, rechts belegt)**

### 5.2.3 Berechnungsvorschrift

Die Berechnung der Belegung erfolgt nach folgender Methodik: Zunächst wird jede Gabelzinke der Länge nach in 10 gleich große Abschnitte zerlegt (siehe Abbildung 5-6). Für jeden dieser Abschnitte werden dann zwei Kennzahlen bestimmt:

1. die Abweichung des Mittelwertes über den gesamten aktuell betrachteten Abschnitt gegenüber dem Mittelwert des selben Abschnittes im Referenzbild (Mittelwertabweichung) und
2. die größte Differenz zwischen je 2 Pixeln im jeweiligen Abschnitt nach Abzug des Referenzbildes (lokale Differenz).

Die Mittelwertabweichung ist ein Indiz für eine Belegung, allerdings sehr anfällig für Änderungen in der Beleuchtung. Eine Beleuchtungsänderung wird in der Regel durch Sonnenlicht verursacht, das durch ein Fenster hereinscheint. Die zusätzliche Helligkeit ist in der Regel nicht stark lokal begrenzt, d. h. es gibt keinen sehr scharf eingestellten Kegel, der ausschließlich einen Teil eines solchen Abschnittes beleuchtet. Stattdessen wird sich der heller ausgeleuchtete Bereich über einen oder mehrere ganze Abschnitte erstrecken. Die lokale Differenz wird sich daher wenig verändern, wenn alle Pixel in einem Abschnitt heller erscheinen.



**Abbildung 5-6: Berechnung der Kennwerte in jedem Abschnitt separat**

Beide Kennwerte werden nun abschnittsweise ausgewertet. Zu diesem Zweck werden die Abschnitte gezählt, die über einem für den Kennwert definierten Schwellwert liegen.

Ist der aktuelle Belegungszustand nicht belegt und liegen genügend Abschnitte oberhalb der Schwellwerte, wird der Zustand auf belegt gewechselt. Umgekehrt gilt: Ist der Zustand belegt und fallen beide Kennwerte unterhalb ihren Schwellwert, wird der Zustand auf nicht belegt gewechselt.

Um die Robustheit zu steigern, wird eine Belegung nur dann angenommen, wenn alle Gabelzinken belegt sind, eine teilweise Belegung ist entsprechend nicht vorgesehen. Dies verhindert, dass eine ungünstig beleuchtete einzelne Gabelzinke eine Änderung des Belegungszustandes anzeigt. Gleichzeitig endet eine Belegung auch erst dann, wenn keine Gabel mehr belegt ist.

## 5.2.4 Filterketten zur Gabel-belegt Erkennung

### Finden der Gabelzinken

Der schematische Ablauf der Filterkette zur Suche der Gabelzinken ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Der zentrale Bestandteil dieser Filterkette ist der

- `ForkBackgroundFilter()`  
Dieser Filter führt die Vordergrunderkennung mittels Differenzbetrachtung zweier aufeinanderfolgender Bilder durch (siehe Kapitel 2.3.4). Berücksichtigt werden dabei nur aufeinanderfolgende Bilder, deren Gesamtunterschied hinreichend groß ist. Nach einer festen Anzahl solcher unterschiedlicher Bilder wird eine Trennung des Hintergrundes angenommen und nach Gabelzinken im markierten Vordergrund gesucht. Falls keine Gabelzinken gefunden werden, setzt sich der Filter zurück und beginnt von neuem.

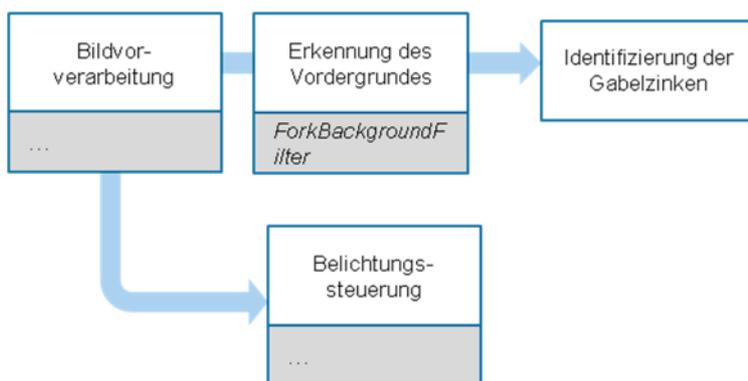


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Erkennung der Gabelzinken

### Bestimmung des Belegungsstatus

Zur Erkennung der Belegung kommen die folgenden Filter zum Einsatz (vgl. Abbildung 5-8):

- `RoiFilter()`  
Dieser Filter beschleunigt und vereinfacht die Berechnungen der folgenden Filter: es wird zunächst der kleinste, rechteckige Bereich um jede Gabelzinke aus dem Bild ausgeschnitten (vgl. Abbildung 5-4) und den nachfolgenden Filtern bereitgestellt. Alle Pixel außerhalb dieser Ausschnitte müssen für die Be-

stimmung des Gabel-Belegt Zustands nicht berücksichtigt werden, der markierte Bereich ist damit eine sogenannte Region of interest (ROI).

- `MaskFilter()`

Die Maske dieses Filters kennzeichnet diejenigen Pixel, welche innerhalb der ROI zur jeweiligen Gabelzinke gehören. Alle anderen Pixel werden ignoriert.

- `SubtractReferenceFilter()`

Zu jedem Pixel der Gabelzinken wird jetzt der zugehörige Referenzwert in diesem Filter abgezogen.

- `ForkAllocationStatusFilter()`

Der `ForkAllocationStatusFilter` bestimmt schließlich den Belegungszustand der Gabelzinken mittels des in der Berechnungsvorschrift angegebenen Verfahrens und stellt diesen für nachfolgende Filter bereit. Der Belegungszustand gilt stets für beide Gabelzinken, die Zustände der einzelnen Gabelzinken werden lediglich im Filter selbst verwendet.

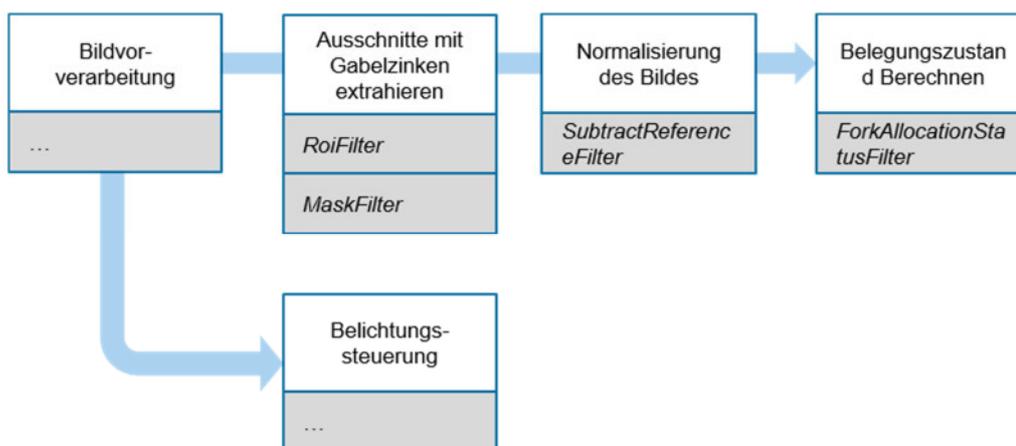


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Gabel-belegt Erkennung

## 5.3 Waren-Identifikation mittels NVE-Code

### 5.3.1 Zweck

Die Warenidentifikation mittels der Nummer der Versandeinheit (NVE) (vgl. 3.1.1) wird durch den Barcode-Demonstrator umgesetzt. Diese Identifikation sollte unmittelbar vor der Aufnahme der gekennzeichneten Ladeinheit durch Einfahrt der Gabelzinke in das unterfahrbare Ladehilfsmittel erfolgen. Hierdurch kann im Fall der anstehenden Aufnahme der falschen Ladeinheit der Fehler im Moment des Auftre-

tens erkannt und dem Gabelstaplerfahrer gemeldet werden. Damit ergibt sich ein Mindestabstand für die Identifikation der Ladeeinheit entsprechend der Gabelzinkenlänge, die i. d. R. mit 1,2 m angesetzt werden kann.

Mögliche Einschränkungen ergeben sich durch eine nicht optimale Anbringung des NVE-Etiketts auf der Ladeeinheit und Beschädigungen oder Verdeckung des NVE-Etiketts. Befindet sich das NVE-Etikett nicht im Sichtfeld der Kamera ist entsprechend auch keine Auswertung möglich.

### 5.3.2 Funktionsweise

Die Identifikation der NVE erfolgt in drei Schritten (siehe Tabelle 5-3). Grundsätzlich ist die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise auf viele Arten von Barcodes anwendbar. Die ZXing-Bibliothek [OWE-2013] unterstützt die Auswertung einer Reihe von unterschiedlichen Codes, neben dem für die NVE eingesetzten Code-128 u. a. auch die auf Consumer-Produkten weit verbreitete EAN.

**Tabelle 5-3: Durchgeführte Bildverarbeitungsschritte im NVE-Demonstrator**

	Operationen	Zweck
<b>Bildvorverarbeitung</b>	Weißabgleich	Kontrastverbesserung
<b>Segmentierung</b>	Suche nach zusammenhängenden, rechteckigen Bereichen im Bild, in denen viele Hell-Dunkel-Wechsel enthalten sind.	Suche nach Bereichen, die Barcode enthalten könnten. Diese sind durch die Quiet Zone vom restlichen Bildinhalt abgetrennt.
<b>Bildauswertung</b>	Übergabe der Segmente an ZXing Bibliothek	Versuch der Auswertung der Kandidaten. Nicht identifizierbare Bereiche enthalten keinen (lesbaren) Barcode.

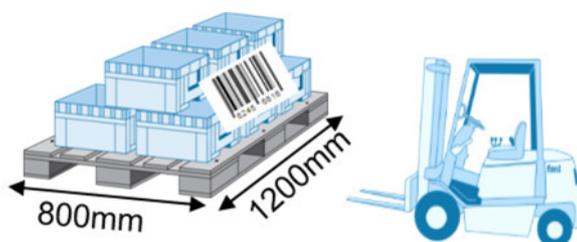
### Bildaufnahme

Für die Bildaufnahme ist eine automatische vorgesehen. Diese dient dem Umgang mit unterschiedlicher Beleuchtung an verschiedenen Orten.

Da nicht zwingend festgestellt werden kann, wann eine Barcode ausgelesen werden muss, ist eine kontinuierliche Aufnahme und Auswertung notwendig. Die maximale Belichtungszeit wird dabei auf 50 ms gedeckelt, damit das Bild bei Bewegung des

Staplers nicht zu sehr verschwommen aufgenommen wird, was sonst eine Auswertung eines Barcodes unmöglich machen würde.

In der Praxis ist nicht davon auszugehen, dass die GS1-Empfehlung [GS1-2009] für die Anbringung der NVE-Etiketten immer eingehalten wird. Es soll daher möglich sein, das NVE-Etikett auch dann zu finden, wenn es sich in beliebiger Ausrichtung an irgendeiner Stelle im Sichtfeld der Kamera auf der zugewandten Front des aufzunehmenden Ladehilfsmittels befindet. Für die Dimensionierung der Optik wird daher eine Euro-Pool-Palette (Abmessung 1200 x 800 mm) angenommen, die bis zu 800 mm hoch beladen und der Kamera im schlimmsten Fall mit der 1200 mm breiten Seite zugewandt ist (vgl. Abbildung 5-9). Zum Entwurfszeitpunkt des Demonstrators existieren lediglich Industriekameras mit einer maximalen Auflösung von etwa 5 Millionen Pixeln. Diese Auflösung genügt nicht, um einen Barcode an beliebiger Stelle auf der Palettenfront erkennen zu können, daher wird angenommen, dass sich der zu erkennende Barcode an einer beliebigen Stelle im oberen rechten Quadranten der zugewandten Fläche befindet. Es ist in Zukunft zu erwarten, dass Industrietaugliche Kameras mit einer erheblich höheren Auflösung verfügbar werden. Der Ansatz kann dann unmittelbar auf die Betrachtung der gesamten Front übertragen werden.



**Abbildung 5-9: Szenario der NVE-Erfassung**

Die Verarbeitung kann anhand eines Grauwertbildes (Pixelwerte 0-255) erfolgen, da die NVE keine Farbinformationen zur Kodierung verwendet.

### **Bildverbesserung**

Zunächst wird im Rahmen der Bildverbesserung eine gleichmäßige Eingabe für die kommenden Filter angestrebt. Hierzu kommt ein einfacher Autowhitebalance-Algorithmus zum Einsatz, der den Mittelwert  $m$  aller Pixel bestimmt und dann jeden Pixel mit  $128/m$  multipliziert. Rundungseffekte vernachlässigt besitzt das Bild danach einen Mittelwert von 128. Durch Anwendung des Filters ergibt sich eine konstante Verschiebung der Helligkeitswerte, welche die Wahl eines Schwellwertes in späteren Bildfiltern vereinfacht.

### Segmentierung

Im Rahmen der Merkmalsextraktion müssen nun Kandidaten, welche möglicherweise Merkmale (=Barcodes) sein könnten, im Bild gefunden werden. Diese Aufgabe erledigt der BarcodeSegmentationFilter. Als Eingabe für diesen Filter dient lediglich das im vorherigen Schritt vorverarbeitete Bild. Als Ausgabe wird zusätzlich eine Liste von rechteckigen Ausschnitten (ROI) bereitgestellt, die zum einen den Inhalt des Ausschnittes in Form eines Bildes beinhaltet und zum anderen die Information, wo dieser Ausschnitt im Bild zu finden ist. Letztere Angabe wird in Form eines Rechtecks und dem zugehörigen Rotationswinkel, in dem das Rechteck angeordnet ist, angegeben. Für das Finden der Kandidaten wird der Algorithmus von [LIN-2011] verwendet. Dieser Algorithmus bietet den Vorteil, dass er sich für verschiedene Arten von Bar- und 2D-Codes eignet. Seine grundlegende Arbeitsweise ist dabei wie folgt:

1. Zunächst werden mit einem 8x8 Pixel großen Operatorfenster die Differenz zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Pixel gefunden. Das Ergebnis ist ein Bild der Größe von 1/64 des Originalbildes ( $1/8 \cdot \text{Höhe}$ ,  $1/8 \cdot \text{Breite}$ ). In einem Bereich, der einem Barcode zugeordnet werden soll, sind die Unterschiede relativ groß, da im Operatorfenster unabhängig von der Orientierung sowohl die schwarzen Bereiche (also die eigentlichen Striche) als auch die dazwischen liegenden weißen Lücken zu finden sind. Ein Barcode sollte also aus einem zusammenhängenden, weitgehend rechteckigen Bereich heller Pixel in dem erzeugten Bild bestehen. Aufgrund der weißen Quiet Zone, die einen Barcode umgibt, sollte dieser Bereich von anderen getrennt sein. Um die Robustheit des Verfahrens zu steigern, wird zunächst ein Weichzeichner verwendet, damit ggf. noch nicht-zusammenhängende Bereiche, die zu einem Barcode gehören, vervollständigt werden. Die Quiet Zone um den Barcode verhindert dabei eine Vereinigung mit anderen Bereichen, die nicht mehr zum Barcode gehören. Anschließend werden die Helligkeitsunterschiede in dem erzeugten Bild eliminiert, indem das Bild mittels eines Schwellwertfilters in ein Binärbild überführt wird. Mittels Erosion (vervollständigt Lücken) und Dilation (trennt versehentlich beim Vervollständigen zusammengeführte Bereiche) entsteht daraufhin ein Bild, das die Bereiche in weiß markiert, die möglicherweise einen Barcode enthalten könnten.
2. Es gilt im nächsten Schritt die zusammenhängenden Bereiche zu bestimmen. In der oberen linken Ecke beginnend wird dabei festgelegt, welche Pixel zu-

sammenhängend sind. Dabei wird jedem Pixel die Nummer zugewiesen, die die Komponenten, zu der er gehört, bezeichnet, und gleichzeitig bestimmt, an welchem Punkt im Bild die Komponente beginnt und an welchem sie endet. Die Details dieses zweistufigen Verfahrens können [LIN-2011] entnommen werden.

3. Für jede Komponente wird von nun an der entsprechende Ausschnitt, den die Komponente im Originalbild repräsentiert, betrachtet. Vor allem die Form und Größe, bei einem Barcode ein Rechteck, bestimmt, ob die Komponente einen Barcode repräsentieren könnte oder nicht. Zuerst werden zu kleine Bereiche, die zwar theoretisch einen Barcode enthalten könnten, der aber aufgrund der geringen Größe nicht auszuwerten wäre, herausgefiltert. Ebenso wird mit Bereichen verfahren, bei denen das Längen zu Breiten-Verhältnis einen Barcode innerhalb der Komponente ausschließt. Für die verbliebenen Bereiche wird nun Mittels der Methode `cv::minAreaRect()` [OPE-2013] das minimale, rotierte Rechteck bestimmt, das alle Pixel des Ausschnitts enthält. Das Ergebnis ist ein Rechteck und ein Rotationswinkel, welcher auf die Orientierung des Barcodes innerhalb des Bildes schließen lässt. Das Bild wird danach so gedreht, dass die Rotation rückgängig gemacht wird (der Rotationswinkel ist ja bekannt), das rotierte Rechteck also einem normalen, horizontal ausgerichteten Rechteck entspricht. Um die spätere Auswertung des Barcode-Kandidaten zu erleichtern werden nun die Helligkeit und die Schärfe des Bildausschnittes verbessert. Das Ergebnis sind also eine Liste aufbereiteter Ausschnitte des Eingabebildes, die möglicherweise einen Barcode enthalten, zuzüglich der Information, wo im Eingabebild diese Ausschnitte zu finden sind. Letztere Information wird benötigt, damit die gefundenen und identifizierten Barcodes im Bild später markiert werden können.

### **Bildanalyse**

Jetzt folgt die eigentliche Auswertung des Barcodes. Dieser Schritt wird vom ZXing-BarcodeAnalysisFilter übernommen und bestimmt den Wert der NVE-Codes innerhalb aller Ausschnitte, sofern sich dort eine NVE befindet. Eine sehr einfache Möglichkeit zu prüfen, ob ein Ausschnitt einen Barcode enthält, ist der Versuch, diesen auszuwerten. Enthält der Ausschnitt einen Barcode und kann dessen Wert ermittelt werden, so wird die Information in der Ausgabe des Filters bereitgestellt, ansonsten wird angenommen, dass dort kein Barcode enthalten ist. Der Filter übergibt die Bild-

ausschnitte einzeln an einen MultiFormatReader aus der ZXing-Bibliothek und speichert die Ergebnisse (Typ des Barcodes und seinen Wert als String) in einer Liste, welche der Filter als Ausgabe bereitstellt.

Zur Visualisierung der bestimmten Information werden weitere Filter verwendet, die für die Funktion des Demonstrators aber keinen Beitrag leisten.

### **5.3.3 Berechnungsvorschrift**

Die Kodierung und Dekodierung des bei der NVE zum Einsatz kommenden Code 128 erfolgt nach der ISO/IEC 15417 (vgl. GS1-2013)

### **5.3.4 Bildverarbeitungs-Filterkette zur NVE-Erkennung**

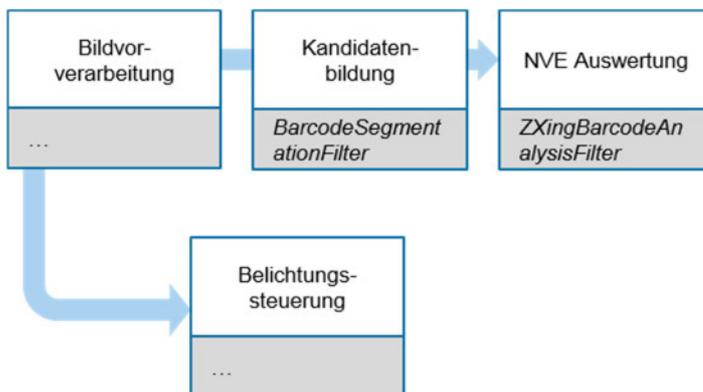
Entsprechend der bisher dargestellten grundsätzlichen Datenverarbeitungslogik in der Bildverarbeitung ergibt sich folgende Bildverarbeitungskette für die Umsetzung der Lokalisierung durch die Nutzung des Software-Frameworks (vgl. Abbildung 5-10):

- `AutoWhiteBalanceFilter()`  
Dieser Filter dient dazu das Bild für die weitere Verarbeitung aufzubereiten. Aus einem Grauwertbild bestimmt dieser Filter einen Skalierungsfaktor, mit dem alle Grauwerte multipliziert werden. So soll eine gleichmäßigere Verteilung auf dem Grauwertspektrum erreicht werden ohne dabei das Rauschen zu sehr zu erhöhen. Für das Lesen des Barcodes ist es insbesondere wichtig, dass sich die schwarzen Balken des Barcodes stärker von den weißen Balken trennen lassen. Aufgrund von Alias-Effekten bei der Abtastung auf dem Fotosensor wird der Kontrast zwischen diesen Flächen geringer aufgezeichnet als er in der Realität der Fall ist. Die Ausgabe dieses Filters ist ein modifiziertes Bild, das im folgenden Filter als Eingabe genutzt wird.
- `BarcodeSegmentationFilter()`  
Hier werden in einem mehrstufigen Verfahren Kandidaten für Barcodes im Bild identifiziert. Solche Kandidaten zeichnen sich vorwiegend durch ihren häufigen, starken Kontrast innerhalb der Region (die abwechselnden schwarz/weiß-Balken), die Form der Region (Form des Barcodes) und die klare Abgrenzung vom Rest der Umgebung (durch Quiet Zone) aus. Die ermittelten Kandidaten werden als Kopie aus dem Originalbild ausgeschnitten und

eine Liste dieser Bildausschnitte wird an den nachfolgenden Filter weitergeleitet.

- ZXingBarcodeAnalysisFilter()

Schließlich wird die im Kandidaten enthaltene NVE bestimmt. Die ZXing-Bibliothek stellt hierfür eine entsprechende API bereit. Als Eingabe dient ein Bild, als Ausgabe erhält man die im Barcode enthaltene Information zurück. Wird kein Barcode erkannt, wird angenommen, dass kein Barcode im Kandidaten enthalten ist. Für die Eingabe muss das Bild zunächst noch in das von der ZXing-Bibliothek verwendete überführt werden, bevor es dekodiert werden kann. Die Ausgabe dieses Filters ist eine Liste der enthaltenen Barcodes samt der Position im ursprünglichen Bild.



**Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die NVE-Erkennung**

## 5.4 Lokalisierung (Voruntersuchungen)

Lokalisierungssysteme zeigen funktionale Bestandteile auf, die in ihrer Gesamtheit dem Ziel der Posenbestimmung, d. h. der Bestimmung von Position und Lage, dienen [FML-2014]. Ein Tag wird zur Kennzeichnung einer Referenz oder einer Identität verwendet, die einen räumlichen Bezug für die Posenbestimmung darstellt. Der Tag eines Location Sensors wird durch die Betrachtung einer charakteristischen Messgröße (z. B. Signallaufzeit, Signalstärke) beobachtet. In der Location Engine wird dieses Signal hinsichtlich der Pose analysiert, so dass die im Ergebnis bestimmte Information Pose mittels einer Middleware an übergelagerte IT-Systeme übergeben werden kann [HOH-2012].

### 5.4.1 Lokalisierungsarchitektur

Nun ist, wie im Projekt vorgesehen, im Kontext der Nutzung einer Kamera mit anschließender Bildverarbeitung zu klären, wie erstens diese Module räumlich anzuordnen sind und wie zweitens im Detail die geschilderten Teilfunktionen umgesetzt werden können.

Bereits durch den verfolgten Grundsatz der Funktionsintegration und die in den vorherigen Demonstratoren erfolgte Festlegung auf eine Kameraanbringung am Stapler schränkt sich die weitere Wahl einer Systemarchitektur für die Lokalisierung ein. Da die Kamera die Funktion der Signalerfassung in der Form der Bilderfassung übernimmt befindet sich somit der Location Sensor am Lokalisierungsobjekt, dem Gabelstapler. Entsprechend der hier üblichen Unterscheidung zwischen einer Eigen- und Fremddortung [HOH-2012] besteht hiermit für die Systemarchitektur die Wahlmöglichkeit zwischen diesen beiden Möglichkeiten. Letztere zeichnet sich dadurch aus, dass die Location Engine nicht am Lokalisierungsobjekt ausgeführt wird. D. h. es ist eine drahtlose Kommunikation sämtlicher erfasster Bilddaten ohne Vorverarbeitung von dem Location Sensor an die (zentrale) Location Engine in der Infrastruktur erforderlich. Da bereits in Kapitel 5.1.4 eine Festlegung auf eine kabelgebundene Datenkommunikation erfolgt ist, die im Wesentlichen in der hohen Datenmenge zu erfassender Bilder begründet ist, ist eine Umsetzung der indirekten Fremddortung nicht möglich und technisch nicht sinnvoll. Durch die Anordnung der Location Engine auf dem Lokalisierungsobjekt erreicht das System eine relevante Autonomie von zentralen Einheiten, die insbesondere auf großen Lokalisierungsflächen die Anforderungen an eine flächendeckende, zuverlässige Datenanbindung an übergelagerte Location Applications entscheidend senkt. Gerade in Tracking&Tracing-Anwendungen ist es möglich, dass eine gepufferte nachgelagerte Übertragung von ermittelten Posenänderungen zur Dokumentation z. B. einer erfolgten Umlagerung möglich ist.

### 5.4.2 Tag

Durch die Wahl der Eigenortung ist es erforderlich, Tags in der Infrastruktur anzubringen, die durch eine auf die Umgebung gerichtete Kamera verfolgt werden können. (Die Anbringung erfolgt hier an den Anbringungspunkten ID01 und ID15). Als Tag dienen grundsätzlich Merkmale, die einen Bezug zu einem räumlichen Modell der Lokalisierungsumgebung herstellen [FIA-2010]. Der räumliche Bezug ist für die

Bestimmung der Pose sowohl translatorisch als auch rotatorisch zu analysieren. Dies erfordert somit Merkmale, die nicht nur eine eindeutige Identität beinhalten, sondern auch eine vorbestimmte Ausrichtung kennzeichnen. Hierbei wird zwischen natürlichen und künstlichen Merkmalen unterschieden. Letztere werden speziell für den Zweck der Lokalisierung angebracht, während erstere bereits natürlicher Bestandteil der Einsatzumgebung sind. Folgende Auflistung nennt Beispiele für optische Merkmale beider Gruppen [VDI-2002, FIA-2010]:

**Tabelle 5-4: Beispiele für natürliche und künstliche Merkmale**

	natürliche Merkmale	künstliche Merkmale
<b>Beispiele</b>	Gebäudeecken	1D-Barcode
	Säulen/ Pfeiler	2D-Codes
	Türen	Markierungen durch Klartext-Beschriftung, z. B. Lagerplatznummerierung
	Lagereinrichtung	Markierung durch künstliche Muster
	Oberflächenstrukturen z. B. der Gebäude- decke oder des Gebäudebodens	

Gerade hinsichtlich der Minimierung des Integrations- und Infrastrukturaufwandes für die Implementierung eines Lokalisierungssystems ist auf natürliche Merkmale zu setzen. Allerdings ist es erforderlich entsprechende Merkmale trotz Skalierung, perspektivischer Verzerrung, teilweiser Abdeckung etc. im innerbetrieblichen Transportprozess fortwährend zweifelsfrei zu erkennen und aufzulösen. In der Robotik gibt es hier bereits zahlreiche Referenzen in der Forschung, z. B. [CUM-2007], die den Ansatz des maschinellen Lernens von Merkmalen und Merkmalsveränderungen verfolgen. Da in diesem Projekt auf eine Voruntersuchung gesetzt wird, ist eine aufwendige Übertragung dieser Konzepte aus der Robotik auf diese Anwendung noch nicht möglich, sicherlich aber als Vision zu verfolgen. Deshalb werden als Tags konventionelle, künstliche Merkmale verwendet, die einen begrenzten Informationsinhalt umfassen, geringere Anforderungen an die optische Auflösung stellen und die Kennzeichnung einer Ausrichtung beinhalten. In Übereinstimmung mit [FIA-2010] werden hier 2D-Codes, auch sog. Referenzmarker, gewählt, die bisher vorzugsweise im Bereich der Augmented Reality eingesetzt werden. Abbildung 5-11 gibt einen grafi-

schen Überblick zur Unterscheidung von Barcodes (sowohl als 1D- und 2D-Code) und Referenzmarkern (2D-Codes).



Abbildung 5-11: Beispiele für Barcodes und Referenzmarker

### 5.4.3 Funktionsweise

Der Großteil der in diesem Projekt getätigten Arbeit umfasst die Gestaltung der Location Engine in enger Abstimmung mit den gesetzten Anforderungen an die Lokalisierungsfunktionalität. Hierbei ergeben sich insbesondere zwei Teilaufgaben, die Markererkennung und die eigentliche Posenbestimmung.

#### Markererkennung

Die Markererkennung umfasst auch die Vorstufe der Bildung von Kandidaten, die eine hohe Wahrscheinlichkeit aufzeigen, einen gesuchten Marker darzustellen. Die eigentliche Markererkennung ist die Auflösung der Identität des Merkmals, wobei sich in der optischen Markererkennung die Identitätserkennung mittels Mustererkennung und Dekodierung etabliert haben [KÖH-2010]. Gerade hinsichtlich der Stabilität und Homogenität der anspruchsvollen Lokalisierungsumgebung des Gabelstaplers ist eine Identitätserkennung mittels Dekodierung zu bevorzugen. Fiala erkennt für die Mustererkennung die große Gefahr von Verwechslungen, wenn das Muster eine zu große optische Auflösung erfordert und die Veränderung einzelner Sub-Merkmale zwischen verschiedenen Mustern nur gering ist [FIA-2010]. Besonders erschwert wird die sichere Identitätserkennung durch eine Mustererkennung auf Grund der hohen Eigenbewegung der Kamera am Gabelstapler [WAG-2007]. Allerdings ist bei der Anwendung der Dekodierung auf einen adaptiven Schwellwert zu setzen, damit Merkmalswechsel im betrachteten Tag (z. B. hell/dunkel- bzw. schwarz/weiß-Wechsel) auch unter verschiedenen lichttechnischen Umgebungsbe-

dingungen und damit verschiedenen Belichtungsparametern zuverlässig detektiert werden können. Weitere Elemente zur Reduktion der Gefahr einer fehlerhaften Markererkennung sind die Berücksichtigung einer Prüfsumme im Markerinhalt [FIA-2010] und die geeignete Auswahl einzelner Marker-IDs als Teilmenge einer zur Verfügung stehenden Gesamtmenge an Markern durch die Betrachtung der Hamming-Distanz.

Im Folgenden werden Open Source Lösungen betrachtet, die bereits die Markererkennung in der oben beschriebenen Form vollständig umsetzen und in das Software-Framework integriert werden können. Über die bisherige Betrachtung hinaus wurde bei der Gegenüberstellung auf eine aufschlussreiche Dokumentation der Software und auf deren Verfügbarkeit auch im Sinne einer weiteren Aktualisierung Wert gelegt (vgl. Tabelle 5-5). Folgende Bibliotheken stellen den Stand der Technik dar und sind in der Bewertung berücksichtigt worden:

- ARToolKit V2.72.1, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>
- ARTag Rev2, <http://www.artag.net>
- ARToolKitPlus V2.1.1, <http://handheldar.icg.tugraz.at/artoolkitplus.php>
- Aruco V1.2.4, <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>

**Tabelle 5-5: Bewertung von Open Source Bibliotheken zur Markererkennung**

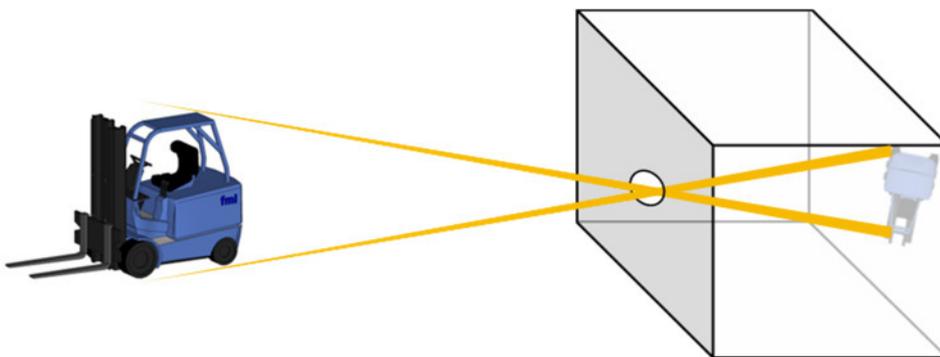
	Verfahren Markeranalyse	Markeranzahl	Abhängigkei- ten	Dokumentation u. Verfügbarkeit	Erkennung- srate	Erkennung- sicherheit
<b>ARToolKit</b>	Mustererken- nung	$\infty$	Keine	0	-	-
<b>ARTag</b>	Identitätserken- nung	1001 bzw. 2002	Keine	0	+	0
<b>ARToolKitPlus</b>	Identitätserken- nung	$\infty$	ARToolKit	-	+	+
<b>Aruco</b>	Identitätserken- nung	1024	OpenCV	+	+	+

Die nach dieser Bewertung zu favorisierende Aruco-Bibliothek ist eine Entwicklung der Universität von Cordoba. Sie setzt die Anwendung eines 5 x 5 Zellen großen codierten Referenzmarkers voraus, der durch einen zusätzlichen schwarzen Rahmen gekennzeichnet ist, um die Kandidatenbildung zu beschleunigen. Die Kandidatenbildung erfolgt somit auf der Basis der Konturenerkennung und Analyse des Konturenumfangs, während die Dekodierung auf der Basis des adaptiven Outs-

Verfahrens [OTS-1979] basiert. Diese Bibliothek ist online dokumentiert und erfährt gelegentliche Weiterentwicklungen, was neuere wissenschaftliche Publikationen der Entwickler bestätigen. [UCO-2014]

### Posenbestimmung

Nachdem die Markererkennung Punktkorrespondenzen zwischen Bild- und Objektpunkten der Marker liefert, ist zu klären wie mit der Hilfe dieser beiden Bezüge die Position der Kamera im Raum und damit des Lokalisierungsobjektes ermittelt werden kann. Hierfür wird das Grundprinzip der Lochkamera verwendet (vgl. Abbildung 5-12), wobei weitere beschreibende Größen des Bild- und des Objektraums im Modell einer Lochkamera in Abbildung 2-5 dargestellt werden.



**Abbildung 5-12: Grundprinzip einer Lochkamera**

Für die Bestimmung der Pose mittels Punktkorrespondenzen haben sich Pose Estimation-Verfahren in der Forschung und Anwendung etabliert. Die Voraussetzung für die Posenschätzung ist die Erfassung der Punktkorrespondenzen nach erfolgter Kamerakalibrierung. Mittels Kamerakalibrierung werden in der Abbildungsgeometrie des Bildraums begründete Fehler in Form von Verzerrungen und Verzeichnungen erfasst, d. h. es werden die internen Parameter des Systems erfasst.

Demgegenüber gibt es externe Parameter, die die Abbildungsgeometrie im Objektraum beschreiben. Dies sind die Rotation  $R$  und die Translation  $t$  der Kamera, d. h. die Bestandteile ihrer Pose gegenüber einem Bezugssystem der Umwelt, einem Weltkoordinatensystem. Externe Parameter werden in der Matrix  $C \in \mathbb{R}^{3 \times 4}$  zusammengeführt. Abbildung 5-13 liefert eine schematische Darstellung der externen Parameter  $R$  und  $t$  im Kontext der Koordinatensysteme, die im Rahmen der Pose Estimation zu berücksichtigen sind.

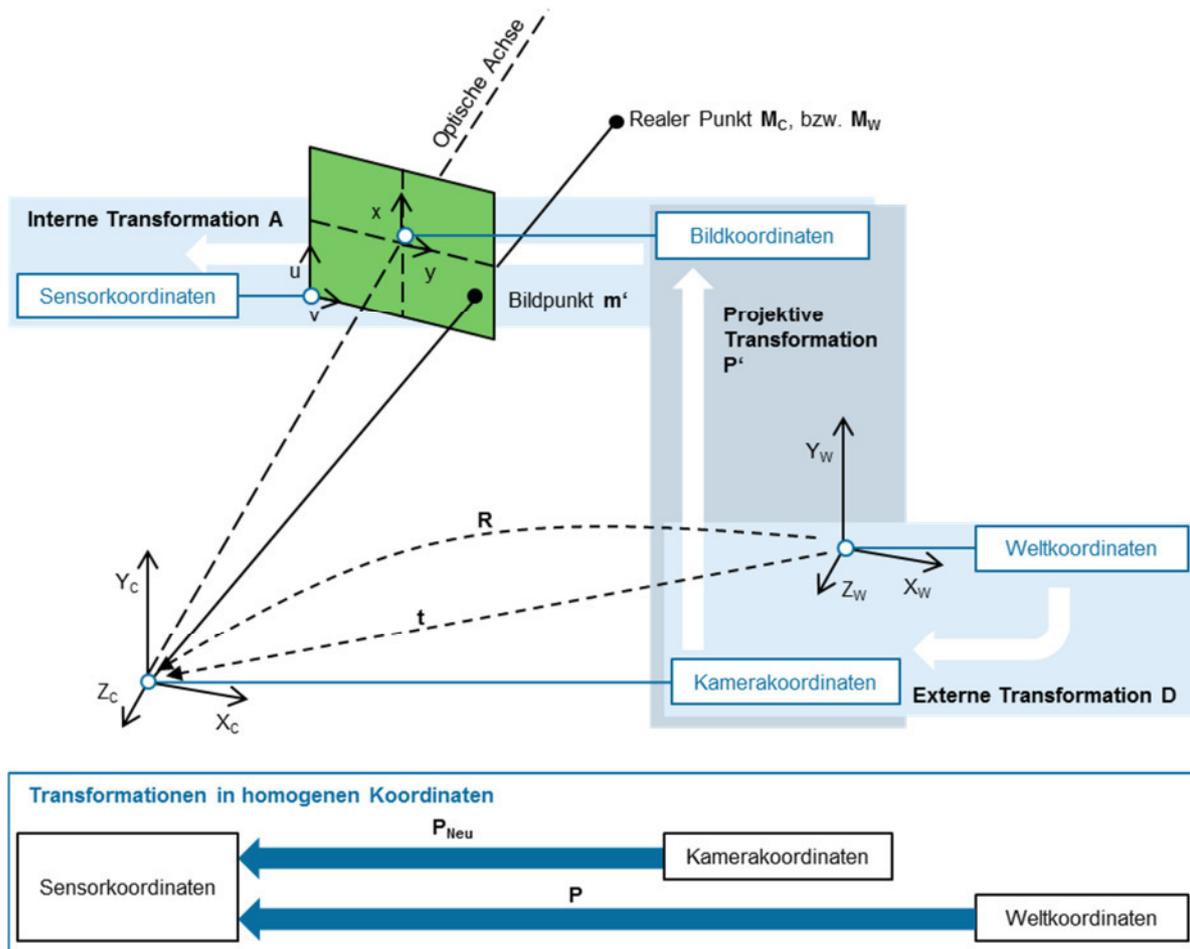


Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der Bild- und Kamerageometrie im Kontext erforderlicher Transformationen zur Pose Estimation (nach [SCH-2005])

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu den erfolgenden Transformationen geliefert. Für eine detaillierte Darstellung wird auf [SCH-2005] verwiesen.

- Externe Transformation  
Ein Objektpunkt  $M_W$  im Weltkoordinatensystem wird in das Kamerakoordinatensystem mittels Rotation  $R$  und Translation  $t$  überführt. Die Rotation  $R$  und die Translation  $t$  stellen die gesuchte Pose der Kamera im Weltkoordinatensystem dar.
- Projektive Transformation  
Mittels projektiver Transformation wird der durch die Zentralprojektion beschriebene Prozess der Projektion des Objektpunktes  $M_C$  auf den korrespondierenden Bildpunkt  $m'$  beschrieben.
- Interne Transformation  
Abschließend erfolgt eine Transformation des Bildpunktes  $m'$  von metrischen Bildkoordinaten in entsprechende pixelbasierte Sensorkoordinaten. Es wer-

den zudem Skalierungs- und Scherungsfehler in der Abbildung korrigiert und der Koordinatenursprung wird aus der Bildmitte an einen Eckpunkt der Fotosensorfläche verschoben.

Entsprechende Methoden zur Bestimmung der Pose sind Schätzverfahren, die einen direkten oder iterativen Charakter haben. Erstere bestimmen keine Näherung der Position, sondern sind eine analytische Bestimmung der Lösung. Allerdings ist nicht garantiert, dass die Lösung auch eine der Realität entsprechende Pose liefert, da Abbildungsfehler in der Form von Pixelrauschen zu fehlerhaften Bildpunkten führen können, deren Fehler in der weiteren analytischen Berechnung unberücksichtigt bleiben. Iterative Verfahren bieten demgegenüber vor allem in der Rechenzeit einen Vorteil und durch überwiegend stochastische Elemente eine gewisse Robustheit Abbildungsfehlern.

**Tabelle 5-6: Bewertung zur Auswahl stehender Posenbestimmungsverfahren<sup>4</sup>**

	Verfahrensart	Anzahl Punktkorrespondenzen	Komplanare Punkte	geometrische Kostenfunktion	OpenCV-Implementierung	weiterführende Quellen	Bewertung
<b>Levenberg-Marquardt Iteration (LMI)</b>	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 4	+	+	+	[HAR-2010]	0
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr weit verbreitetes Verfahren zur Pose Estimation</li> <li>• Hohe Genauigkeit möglich, allerdings stark abh. von der Qualität der Startlösung</li> </ul>						
<b>Extended Pose from Orthography and Scaling with Iterations (ePosit)</b>	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 3	+	+	0	[DEM-1995]	+
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Genauigkeit bei im Verhältnis geringer Laufzeit</li> <li>• jedoch besserer Genauigkeit als z. B. EPnP</li> </ul>						
<b>Robust Pose Estimation from a Planar Target (RPP)</b>	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 4	+	+	0	[SCH-2006] [HON-2011]	+
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ziel höherer Genauigkeit gegenüber iterativen Verfahren, insbes. bei verrauschten Punktkorrespondenzen</li> </ul>						
<b>Complete Analytical Solution with the assistance of Solution Classification (CASSC)</b>	direkt	≥ 4	-	+	+	[GAO-2003]	-

<sup>4</sup> Legende: - geringe Eignung/nein; 0 = mittlere Eignung/ mit Einschränkung; + = gute Eignung/ ja

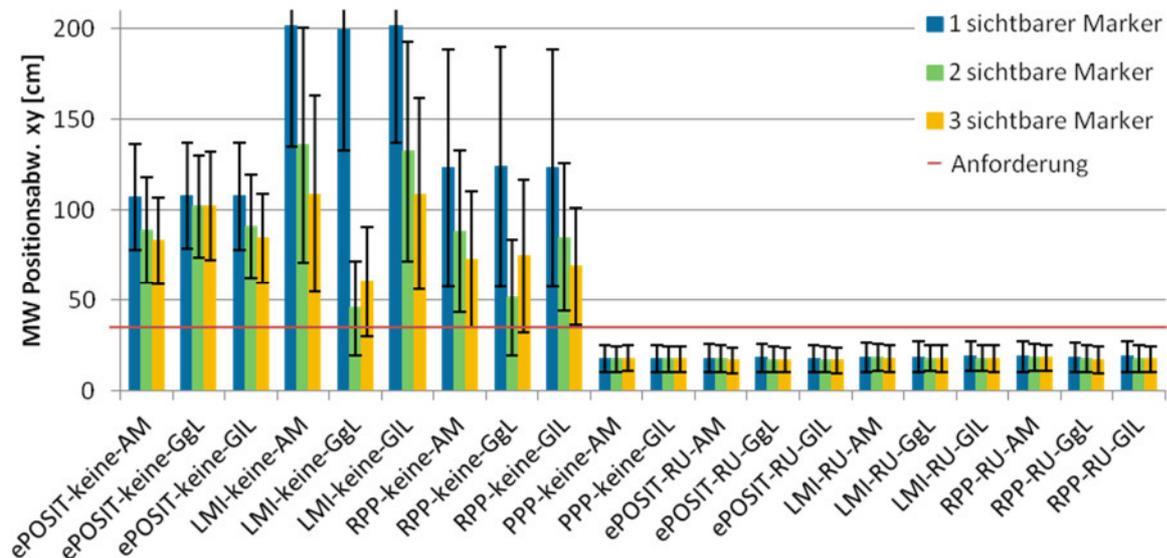
<b>Efficient Perspective n-Point Camera Pose Estimation (EPNP)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokus auf Identifikation robuster, plausibler Lösungen innerhalb der mehrdeutigen P3P-Lösung</li> <li>• Unterstützt keine komplanaren Punktkorrespondenzen.</li> </ul>						
	direkt	$\geq 4$	+	+	+	[LEP-2009]	-
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ziel einer geringen Laufzeit auf Kosten von Genauigkeit im Vergleich zu iterativen Verfahren</li> </ul>							
<b>Pose for Planar Parallel Target (PPP)</b>	direkt	?	+	0	-		0
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Genauigkeit bei optimaler Anbringung der Komponenten, ansonsten hohe Abweichungen zu erwarten</li> <li>• Effiziente Berechnung</li> </ul>						

Die in Tabelle 5-6 erfolgte Bewertung führt zum Ausschluss des CASSC- und EPnP-Verfahrens. Diese beiden direkten Verfahren entsprechen nicht dem Anwendungsbedarf. Das CASSC-Verfahren ist nicht in der Lage komplanare Objektpunkte zu behandeln, während das EPnP-Verfahren eine Auswertungsoptimierung hinsichtlich der Prozesszeit statt der Genauigkeit vornimmt.

### Optimierung der Posenbestimmung

Synthetische Tests haben zu der Erkenntnis geführt, dass bereits ab einer Gegenstandsweite  $g \approx 3 \text{ m}$  mit Abweichungen bei der Positionsbestimmung (Fehlerradius) von  $r_{abw} \geq 40 \text{ cm}$  zu rechnen ist, sofern ein Bild- bzw. Sensorrauschen angenommen wird [FML-2013]. Deshalb werden verschiedene Optimierungsstrategien entwickelt, deren Kombinationen in weiteren synthetischen Versuchen hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht werden. Diese Versuche zeigen eine besondere Wirkung der Annahme, dass auf Grund der parallelen Ausrichtung des Markers zum Fotosensor keine Rotationen um die Koordinatenachsen  $x^n$  und  $y^n$  auftreten können und somit  $\alpha^n = \beta^n = 0$  anzunehmen ist. Diese Rotationsunterdrückung (Verfahren „Rotationsunterdrückung“ RU) setzt sich in ihrer Wirkung positiv gegenüber der Wirkung der weiteren Optimierungsmaßnahmen durch eine spezifische Gewichtung mehrerer Marker im Bild ab. Hier lässt sich lediglich eine Tendenz hin zu einer Bevorzugung der Berücksichtigung der lokalen Lage einzelner Marker zueinander im Bild bei der Verrechnung der einzelnen, je Marker erfolgten, Posenbestimmungen (Verfahren „Gewichtung lokale Lage“ GIL) feststellen. Zusätzlich ist nur eine moderate Steige-

Die Genauigkeit der Lokalisierung wird durch die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Marker im Bild zu erkennen (vgl. Abbildung 5-14), womit die hinsichtlich des Infrastrukturaufwandes vorteilhafte Annahme, dass nur ein Marker zur genauen Posenbestimmung ausreichend ist, gehalten werden kann.



**Abbildung 5-14: Mittlere Positionsabweichung zzgl. Standardabweichung für verschiedene Verfahrenskombinationen bei einer variierenden Anzahl sichtbarer Marker**

Eine weitere Betrachtung sowohl der Einflusswirkung möglicher Fehler bei der Bestimmung der Bild- und Objektpunkte, als auch der Parallelitätsbedingung führt zu der Erkenntnis, dass als iteratives Posenbestimmungsverfahren ePosit ergänzt um eine Rotationsunterdrückung mit Gewichtung der lokalen Lage mehrerer Marker (ePosit-RU-GIL) Anwendung findet. Als direktes Verfahren wird alternativ das PPP-Verfahren mit ebenso der Gewichtung der lokalen Lage mehrerer Marker (PPP-keine-GIL) herangezogen.

### Bildverarbeitungs-Filterkette zur Lokalisierung

Entsprechend der bisher dargestellten grundsätzlichen Datenverarbeitungslogik in der Bildverarbeitung ergibt sich folgende Bildverarbeitungskette für die Umsetzung der Lokalisierung durch die Nutzung des Software-Frameworks (vgl. Abbildung 5-15):

- FindMarkersFilter()  
Dieser Filter dient dazu mittels Kantenerkennung und schwellwertbasierter Überprüfung des Markerumfangs relevante Markerkandidaten zu bilden.

Durch die Nutzung der Homographie werden Markerkandidaten hinsichtlich der Perspektive bereinigt. Markermodelle werden mit den Markerkandidaten durch die Betrachtung der Hamming-Distanz auf Übereinstimmung geprüft, um die Identität der Marker im Bild zu bestimmen.

- `SplitMarkesByIDFilter()`

In diesem Filter werden Datenbanken geladen, die Markeridentität, die Markerabmessungen und ggf. die Objektpunktkoordinaten beinhalten. Anschließend werden die erkannten Marker entsprechend ihrer ID einer Markerkategorie (z. B. Lokalisierung) zugeordnet und in einem für die Markerkategorie definierten Attributsvektor gespeichert.

- `CamRotationCorrectionFilter()`

Die für die Hubhöhenbestimmung erfolgte  $\alpha^b$ -Rotation der Markerbilder ist um die zuvor als Hubmastneigung bestimmte  $\beta^b$ -Rotation zu ergänzen. Hierdurch wird erreicht, dass die Parallelität zwischen Fotosensor und Marker an der Hallendecke nach erfolgter Hubmastneigung, an der die Kamera körperfest angebracht ist, wieder hergestellt ist.

- `EstimatePoseFilter()`

Dieser zentrale Filter setzt die Posenschätzung unter der Berücksichtigung etwaiger Optimierungsstrategien um. In ihm gekapselt wird der `LocalizorMulti`, der die jeweilige Multimarkerstrategie umsetzt und den `Localizor` aufruft, in dem wiederum die Regulationsstrategien sowie der Funktionsaufruf des anzuwendenden Pose Estimation-Verfahrens realisiert werden. Für die Hubhöhenbestimmung kann er auch alternativ zum `EstimateForkHeightFilter()` verwendet werden, sofern die Bestimmung der Hubhöhe auf der Basis eines der in diesem Kapitel vorgestellten Pose Estimation-Verfahren erfolgt (siehe Kapitel 5.5).

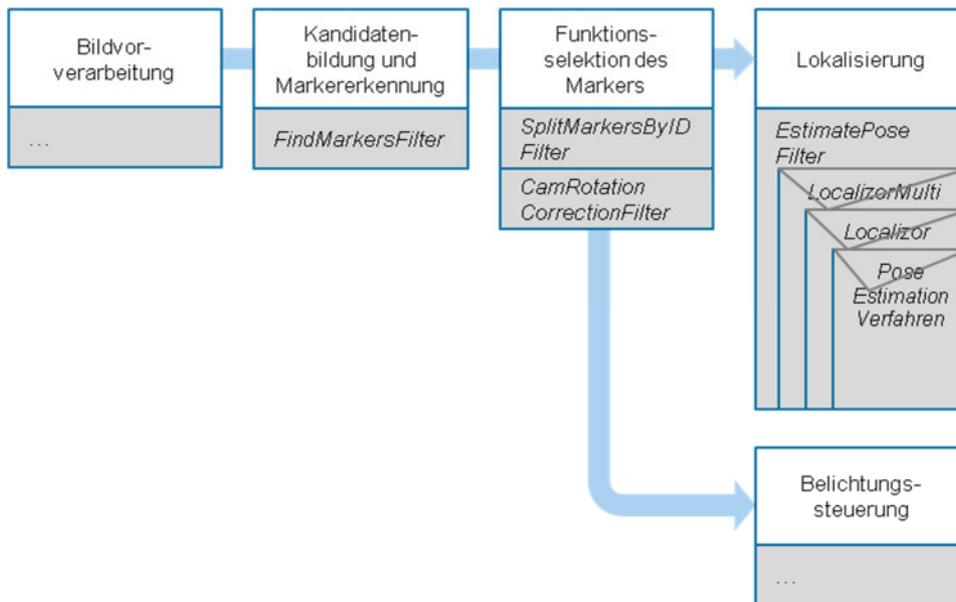


Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Lokalisierung

## 5.5 Gabelhubhöhen-Erkennung

### 5.5.1 Zweck

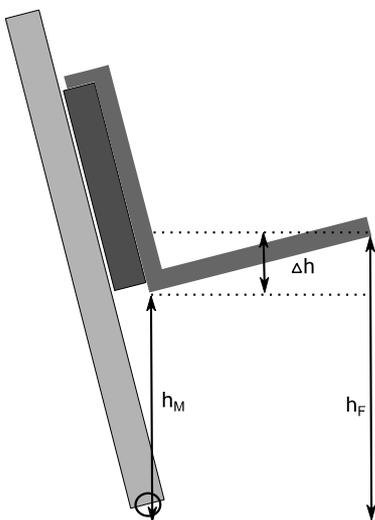
Der Gabelhubhöhen-Demonstrator liefert mehrere für den Fahrer eines Gabelstaplers relevante Informationen:

- Die Neigung des Hubmastes gegenüber der Senkrechtstellung in Grad.
- Die Höhe der Gabelzinkenspitze über dem Boden. Diese Größe ist abhängig von der Neigung des Hubmastes, da auch bei unveränderter Höhenverstellung die Höhe der Gabelzinkenspitzen über dem Boden bei der Rotation um den Drehpunkt des Hubmastes variiert.

Die Hubmastneigung ist für den Fahrer schon allein von Bedeutung, da beim Transport und der Aufnahme von Gütern bestimmte Winkelstellungen (z. B. senkrecht bei Lastaufnahme) vorzunehmen sind, die aus der Perspektive des Fahrers nur schwierig genau einzustellen sind. Die Hubhöhe wird hingegen benötigt, um eine Lagerfachgenaue Zuordnung bei der Ein- und Auslagerung oder eine automatische Hubhöhenvorwahl erreichen zu können. Die Hubhöhe liefert die z-Koordinate des Lagerfachs, während die x- und y-Koordinate in der Ebene durch die Fahrzeugpose definiert sind.

### 5.5.2 Funktionsweise

Die Hubhöhe (an den Gabelzinkenspitzen)  $h_F$  ist von zwei dynamischen Größen (Mastneigung und Höhe des Gabelträgers)  $h_M$  sowie der Geometrie des Fahrzeugs abhängig – auch hier ist also die Neigung des Mastes von Bedeutung, um die Höhe der Gabelzinkenspitze korrekt berechnen zu können (siehe Abbildung 5-16). Herkömmliche, auf Ultraschall basierende Sensoren können die Hubmastneigung nicht bestimmen und setzen daher eine Senkrechtstellung des Hubmastes für eine korrekte Bestimmung der Hubhöhe voraus – eine durchaus vernünftige Annahme, da bei Aufnahme des Ladehilfsmittels die Gabelzinken möglichst parallel zum Boden eingestellt sein sollten. Für eine Lagerfachgenaue Zuordnung mit einer Toleranz  $\pm 40$  cm in der Vertikalen ist die so bestimmte Hubhöhe ohnehin ausreichend. Eine automatische Hubhöhenvorwahl würde ohne Neigungskorrektur bei nicht senkrecht stehendem Hubmast aufgrund der höheren Genauigkeitsanforderungen aber versagen. Die Toleranz bei automatischer Hubhöhenvorwahl ist geringer, da eine Hubhöhenvorwahl nur dann sinnvoll ist, wenn die eingestellte Hubhöhe unmittelbar für die direkte Einfahrt in das Ladehilfsmittel genutzt werden kann und ein Nachregeln durch den Fahrer nicht mehr erfolgen muss.



**Abbildung 5-16: Höhenunterschied zwischen Gabelträger und -zinkenspitze bei Mastneigung**

Zum Zweck der Messung der gesuchten Größen werden zwei Marker mit jeweils unterschiedlicher ID und Größe am Fahrzeug angebracht. Der Neigungsmarker wird an der Fahrerkabine möglichst parallel zur Kameraebene bei senkrechter Hubmaststellung angebracht. Dieser Marker muss bei jedem möglichen Neigungswinkel des Hubmastes im Bild zu sehen sein, damit der Neigungswinkel stets gemessen wer-

den kann. Aufgrund der geringen Entfernung zur Kamera kann er mit 2,5 cm Kantenlänge relativ klein gewählt und dennoch hinreichend genau abgetastet werden. Der Höhenmarker wird am oberen Ende des Gabelträgers parallel zur Kameraebene (entlang der Sichtachse der Kamera) angebracht. Da sich sowohl Gabelträger als auch Kamera mit dem Hubmast neigen, bleibt diese Parallelität stets erhalten.

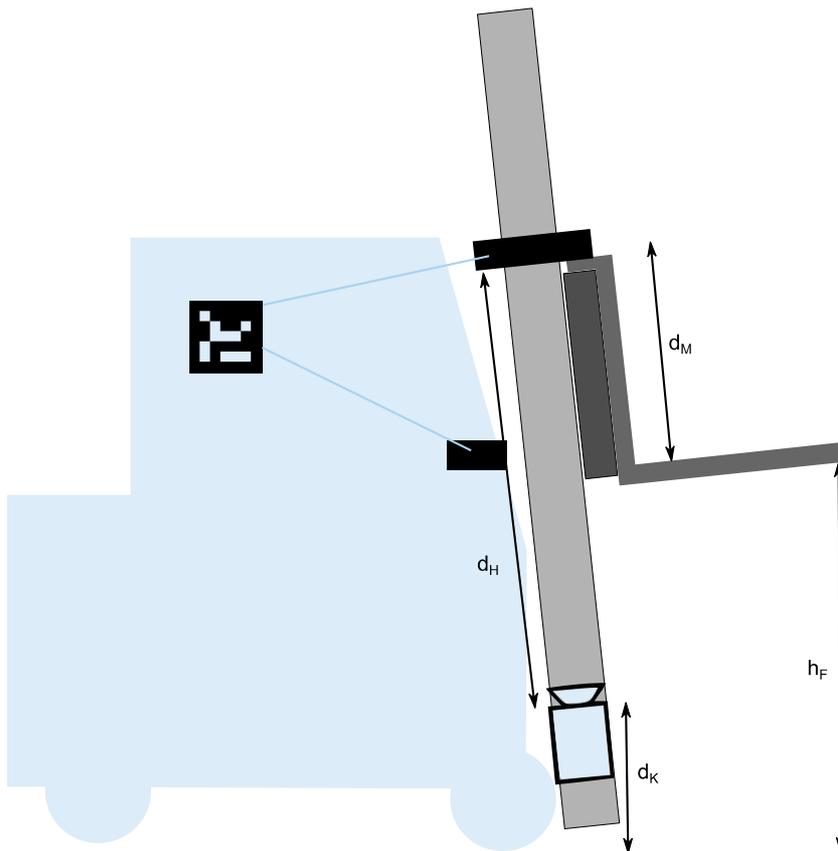


Abbildung 5-17: FOV mit Hubhöhenmarker (rechts) und Neigungsmarker (links)

### 5.5.3 Berechnungsvorschrift

Anders als bei der Bestimmung der Pose für die Lokalisierung sind für die Höhen- und Neigungsbestimmung weniger Informationen relevant, es gibt also deutlich weniger Freiheitsgrade. Die Höhe des Gabelträgers über dem Boden lässt sich aus der z-Koordinate der Posenbestimmung des Hubhöhenmarkers bestimmen. Es können also dieselben Verfahren zur Posenbestimmung wie im Lokalisierungs-demonstrator eingesetzt werden (siehe Kapitel 5.4.3). Die x- und y-Koordinate sowie sämtliche Rotationswinkel sind nicht von Bedeutung und werden daher für die Bestimmung der Hubhöhe ignoriert.

Die gemessene Höhe entspricht der Distanz zwischen der Sensorfläche der Kamera und dem Referenzmarker. Die Höhe der Gabelzinkenspitze kann daraus einfach ermittelt werden, es ist lediglich die Höhe der Sensorfläche über dem Boden  $d_K$  zu addieren und die Distanz zwischen Referenzmarker und Oberkante der Gabelzinken  $d_M$  abzuziehen (siehe Abbildung 5-18). Diese beiden Größen sind stets konstant, von der Anbringung von Kamera und Marker abhängig und müssen in Form von Konfigurationsvariablen hinterlegt werden.



**Abbildung 5-18: Gemessene und konstante Abstände**

Die Änderung der Hubmastneigung hingegen ist proportional zu der vom Markermittelpunkt des Neigungsmarkers im Bild zurückgelegten Strecke: Neigt sich der Hubmast, bewegt sich der Neigungsmarker im Bild zwischen einer minimalen  $P_{\min}(x,y)$  und maximalen Position  $P_{\max}(x,y)$ . Durch die Verwendung des Markermittelpunkts als Referenz machen sich Fehler in der Bestimmung der Markerkanten nicht oder nur sehr geringfügig bemerkbar. Über die Distanz  $|P_{\max} - P_{\min}|$  verteilt sich entsprechend der gesamte Winkelbereich  $[W_{\min}; W_{\max}]$  der Hubmastneigung.  $P_{\min}$  entspreche dabei dem Punkt im Bild, bei dem die Neigung des Mastes nach hinten  $W_{\min}$  maximal ist,  $P_{\max}$  sei entsprechend der Markermittelpunkt im Bild bei maximaler Neigung des Hubmastes nach vorn  $W_{\max}$ . Dazwischen liegt der Punkt  $P_0$ , der den Markermittelpunkt im Bild bei senkrechter Hubmaststellung abbildet. Dies entspricht einer Neigung  $W_0 = 0^\circ$ , der Neigungsbereich nach vorn sei positiv im Intervall  $[0; W_{\max}]$ , der Neigungsbereich nach hinten sei negativ definiert im Intervall  $[W_{\min}; 0]$ .

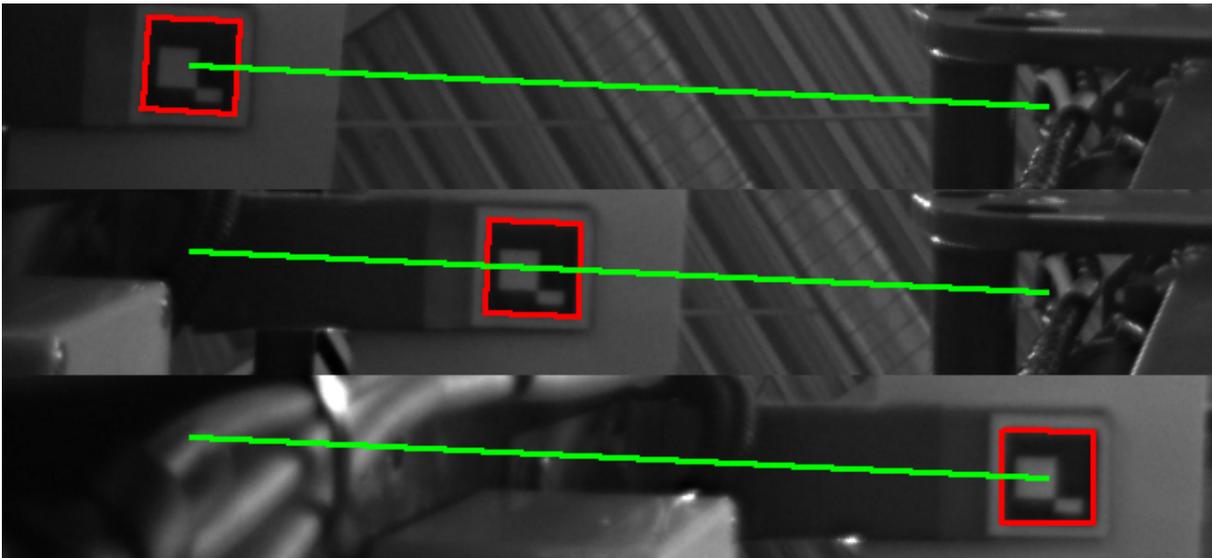


Abbildung 5-19: Rotationsmarker bei  $W_{\max}$  (oben),  $W_0$  (Mitte) und  $W_{\min}$  (unten)

Für die Berechnung der Hubmastneigung fehlt jetzt nur noch eine Zuordnung des realen Winkelbereiches der Hubmastneigung auf die entsprechende vom Markermittelpunkt im Bild zurückgelegte Strecke. Dies geschieht mit Hilfe einer einfachen Kalibrierung:

1.  $W_{\max}$  und  $W_{\min}$  können dem Datenblatt des Staplers entnommen werden. Falls dies nicht möglich sein sollte, müssen die beiden Winkel anderweitig bestimmt oder geschätzt werden.
2.  $P_{\min}(x,y)$  und  $P_{\max}(x,y)$  können durch Einstellung von  $W_{\max}$  und  $W_{\min}$  ermittelt werden.  $P_0$  kann durch Einstellung der Senkrechtstellung des Hubmastes bestimmt werden. Die Senkrechtstellung kann mit einer einfachen Wasserwaage überprüft werden und ist daher auch später sehr genau messbar, selbst wenn  $W_{\max}$  und  $W_{\min}$  nur grob bekannt sind.

Nach der Kalibrierung müssen zur Bestimmung des Neigungswinkels  $W_{\text{mess}}$  nur noch die folgenden Bereiche aufeinander abgebildet werden:

- $[W_{\min}; 0] \rightarrow [P_0; P_{\max}] \Rightarrow \frac{W_{\min} - W_{\text{mess}}}{0 - W_{\min}} = \frac{-|P_{\text{mess}} - P_0|}{|P_{\max} - P_0|}$
- $[0; W_{\max}] \rightarrow [P_{\min}; P_0] \Rightarrow \frac{W_{\max} - W_{\text{mess}}}{W_{\max} - 0} = \frac{|P_{\text{mess}} - P_{\min}|}{|P_0 - P_{\min}|}$

Sind die Neigung und die Höhe bekannt, kann die Position und damit auch die Höhe der Gabelzinkenspitze als Rotation der Gabelzinkenspitze um den Rotationspunkt des Hubmastes um den Winkel  $W_{\text{mess}}$  beschrieben und berechnet werden. Der dafür benötigte, konstante Abstand zwischen Rotationspunkt und Gabelzinkenspitze

muss aus der Fahrzeuggeometrie abgeleitet oder einmalig messtechnisch bestimmt werden.

Grundsätzlich ist es auch möglich den Neigungswinkel anhand geometrischer Überlegungen durchzuführen. Dazu muss allerdings die Beziehung zwischen Position des Markermittelpunktes im Bild und dem Neigungswinkel aus der Fahrzeug-Geometrie abgeleitet werden. Häufig besitzt nur der Hersteller eines Flurförderzeugs präzise CAD-Daten des Fahrzeugtyps, um die benötigten Abstände und Winkel hinreichend genau zu bestimmen – eine Vermessung wäre hingegen schwierig zu realisieren, relativ ungenau und zudem aufwändiger als die beschriebene Kalibrierung.

### **5.5.4 Bildverarbeitungs-Filterkette zur Bestimmung der Hubhöhe**

Die Filterkette entspricht der Aufstellung zur Lokalisierung (siehe Abbildung 5-15). Es wird lediglich ein anderer, am Gabelträger angebrachter Referenzmarker zur Bestimmung der Pose eingesetzt.



## **6 Evaluierung des Software-Frameworks und der Demonstratoren**

### **6.1 Software-Framework**

Das wesentliche Ziel des Software-Frameworks ist die Vereinfachung von Bildverarbeitungsfunktionen für erfahrene Programmierer ohne umfangreiche Kenntnisse der digitalen Bildverarbeitung. Ob dieses Ziel erreicht wird, lässt sich anhand von Usability-Tests mit Personen aus der Zielgruppe bestimmen.

Teil 110 der DIN EN ISO 9241 [ISO 9241-110] definiert Grundsätze für die Gestaltung und Bewertung einer Schnittstelle zwischen Benutzer und System und dient eigentlich der Bewertung interaktiver Systeme. Das Software-Framework ist zwar selbst kein interaktives System, da es dem Nutzer als Baukasten zur Entwicklung einer Bildverarbeitungssoftware dient. Die grundlegenden Eigenschaften, die ein interaktives System laut Teil 110 der DIN EN ISO 9241 erfüllen sollte, wie u. a.

- Aufgabenangemessenheit,
- Selbstbeschreibungsfähigkeit,
- Erwartungskonformität,
- Fehlertoleranz und
- Individualisierbarkeit,

sind ebenfalls im Entwicklungsprozess sehr wertvolle Eigenschaften eines Software-Frameworks. Das Framework dient quasi als vereinfachte Benutzerschnittstelle zur Erstellung von Bildverarbeitungslösungen und kann entsprechend durch den Nutzer genauso bewertet werden wie ein interaktives System.

#### **6.1.1 Ablauf der Evaluierung**

Teilnehmer sind insgesamt sieben Mitarbeiter interessierter Unternehmen aus dem Projektbegleitenden Ausschuss. Diese geringe Teilnehmerzahl erklärt sich aus dem für die Teilnahme an der Evaluierung verhältnismäßig hohen Aufwand von etwa einem vollen Arbeitstag.

Damit die Teilnehmer des Tests mit dem Software-Framework überhaupt umgehen lernen, wird zunächst eine ca. zwei Stunden dauernde Schulung durchgeführt, in welcher grundlegende Methoden der Bildverarbeitung und das Nutzungskonzept des Software-Frameworks vorgestellt werden. Nach einer angemessenen Pause bearbeiten die Probanden selbstständig vier einfache, problemorientierte Aufgaben mit steigendem Schwierigkeitsgrad:

1. Wiedergabe eines Videos aus einer Videodatei
2. Wiedergabe und Aufbereitung eines Videos aus einer Videodatei
3. Erzeugen und Einbinden eines eigenen EvaluationFilter
4. Entwicklung eines einfachen Demonstrators

Für jede Aufgabe bekommen die Probanden eine Quellcodedatei, die bereits einen Teil der Lösung enthält und entsprechend zu vervollständigen ist. Dafür haben die Probanden je Aufgabe 30 Minuten Zeit. Am Ende des Workshops beantworten die Probanden einen zur EN ISO 9241-110 konformen Fragebogen, anhand dessen die Nutzererfahrungen theoretisch ohne Personenbezug erfasst werden (Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl kann eine Anonymität der Nutzer gegenüber dem Workshopleiter nicht gewährleistet werden.). Zum Schluss besteht die Möglichkeit einer Diskussion über die mit dem Software-Framework gesammelten Erfahrungen.

### 6.1.2 Fragebogen

Der vollständige Fragebogen kann 7.3Anhang A entnommen werden. Auf einem Deckblatt geben die Probanden zunächst eine Einschätzung ab, über welche Kenntnisse sie in der C++-Programmierung und der Bildverarbeitung verfügen. Als Optionen für die Einschätzung der Kenntnisse auf dem jeweiligen Gebiet stehen

1. überdurchschnittlich,
2. durchschnittlich und
3. gering/keine

zur Auswahl. Zusätzlich besteht optional die Möglichkeit, das aktuelle Tätigkeitsfeld und Erwartungen an den Workshop jeweils in einem Freitextfeld zu notieren. Diese Fragen gehen nicht in die Bewertung des Software-Frameworks ein, sollen aber die Auswertung der Antworten im Kontext des Nutzers erleichtern.

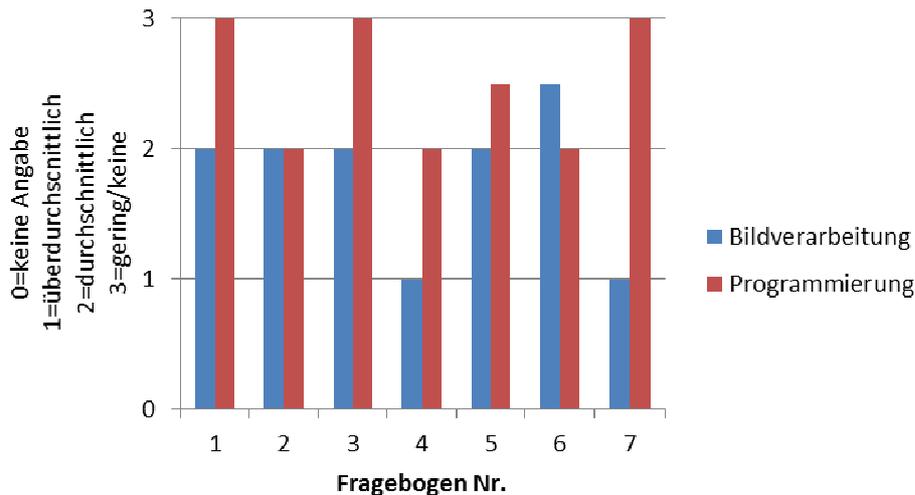
Grundsätzlich werden die Punkte aus Tabelle 6-1 abgefragt. Es erfolgt keine Gewichtung der jeweiligen Kriterien, die Kategorien werden einzeln und unabhängig voneinander ausgewertet.

**Tabelle 6-1: Grundsätzliche Fragestellung zu den Evaluierungskriterien**

Kriterium	Hintergrund
<b>Aufgabenangemessenheit</b>	Eignung des Nutzungskonzepts zur Erfüllung der gestellten Aufgaben und Aufwand bei der Anwendung des Frameworks bzw. sich daraus ergebenden Konsequenzen
<b>Selbstbeschreibungsfähigkeit</b>	Qualität der Quellcode-Dokumentation, Auffinden geeigneter Filter
<b>Erwartungskonformität</b>	Einarbeitungsaufwand, Erweiterbarkeit eigener Lösungen
<b>Fehlertoleranz</b>	Aufwand beim Debugging bei eigenen Fehlern in Filterkette und selbst erstellten Filtern
<b>Individualisierbarkeit</b>	Anbindung an eigene Produkte, mögliche Lösungspfade bei der Bearbeitung der Aufgaben

### 6.1.3 Auswertung

Die Vorkenntnisse der Probanden in der Programmierung bewegen sich im Bereich durchschnittlich bis gering, während die meisten Probanden angeben, über durchschnittliche Kenntnisse im Bereich der Bildverarbeitung zu verfügen (vgl. Abbildung 6-1). Das Fehlen umfangreicher Programmierkenntnisse gestaltet die Lösung der Aufgaben schwieriger, daher hilft der Workshopleiter Probanden bei der Behebung selbst eingebauter Programmierfehler, die auf fehlende Kenntnisse der verwendeten Programmiersprache zurückzuführen sind. Auf der anderen Seite erleichtern Bildverarbeitungskenntnisse den Einstieg in die Nutzung der Bildverarbeitungsfilter.



**Abbildung 6-1: Vorkenntnisse der Probanden des Software-Workshops (Selbsteinschätzung)**

Die Bewertung bezüglich der einzelnen Kriterien (Angabe in Schulnoten) kann Tabelle 6-2 entnommen werden.

**Tabelle 6-2: Bewertung der Probanden je Kriterium (in Schulnoten)**

Kriterium	Mittelwert der Bewertung
Aufgabenangemessenheit	1,8
Selbstbeschreibungsfähigkeit	1,9
Erwartungskonformität	1,4
Fehlertoleranz	2,5
Individualisierbarkeit	1,7

Insgesamt schneidet das Konzept gut ab, auffällig sind der eher schlechte Wert bei der Fehlertoleranz und der gute Wert bei der Erwartungskonformität. Die einzelnen Antworten innerhalb der Kriterien liefern weitere Detailinformationen.

### Aufgabenangemessenheit

Das Nutzungskonzept selbst wird von den Nutzern positiv bewertet. Allerdings sind die Nutzer skeptisch bezüglich der Umsetzbarkeit komplexer Lösungen und dem Wartungsaufwand solcher Programme. Ein Kommentar zu diesen beiden Fragen legt nahe, dass den Probanden eine Einschätzung nach so kurzer Zeit besonders zu diesen Fragen schwer fällt.

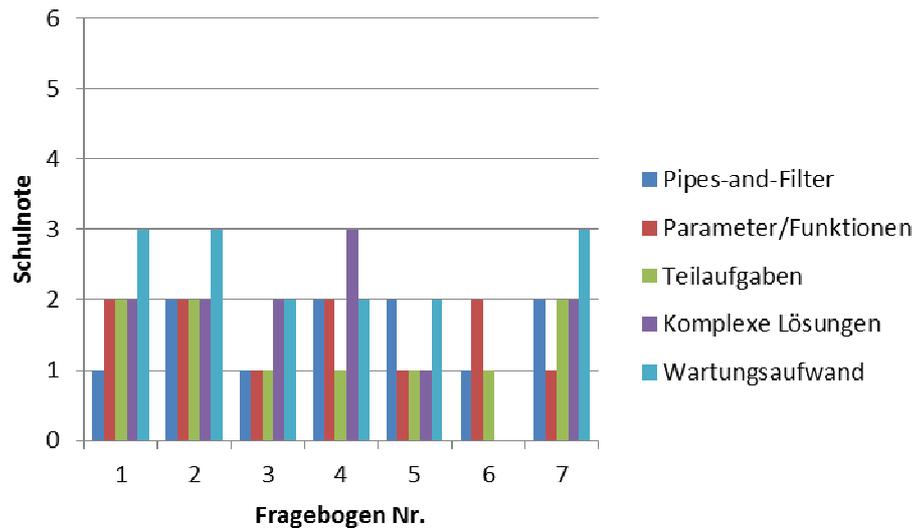


Abbildung 6-2: Bewertung der Aufgabenangemessenheit

### Selbstbeschreibungsfähigkeit

Die stark schwankenden Angaben (Standardabweichung ca. 1,0) lassen keine detaillierte Auswertung zu. Tendenziell wird die Namensgebung der Filter und Methoden allerdings schlechter bewertet als der Aufwand zum Finden geeigneter Filter. Vier Probanden kommen gut mit beidem klar, drei haben damit größere Probleme. Mit steigender Einarbeitungszeit ist allerdings damit zu rechnen, dass die Nutzer leichter mit der Namensgebung und der Wahl geeigneter Bildfilter zurechtkommen.

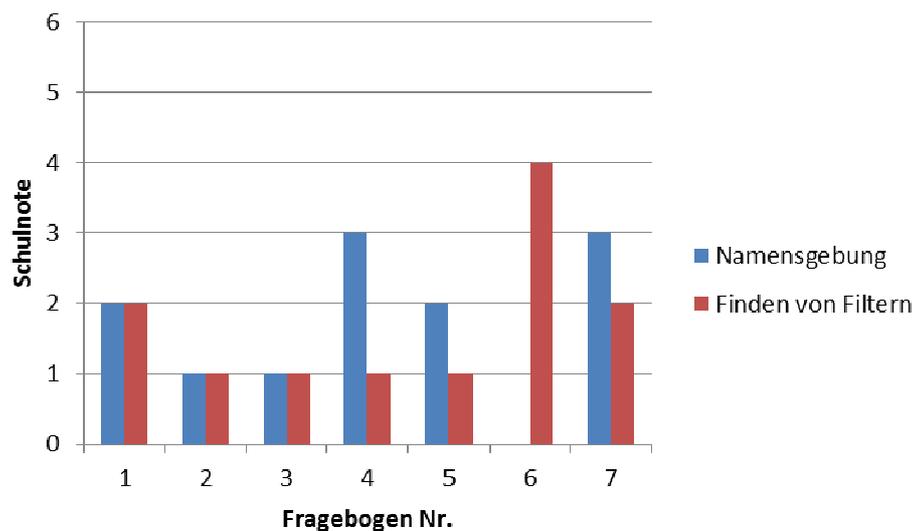


Abbildung 6-3: Bewertung der Selbstbeschreibungsfähigkeit

### Erwartungskonformität

Die Erweiterbarkeit eigener Lösungen wird sehr gut bis gut bewertet, ebenso wird der geringe Einarbeitungsaufwand geschätzt.

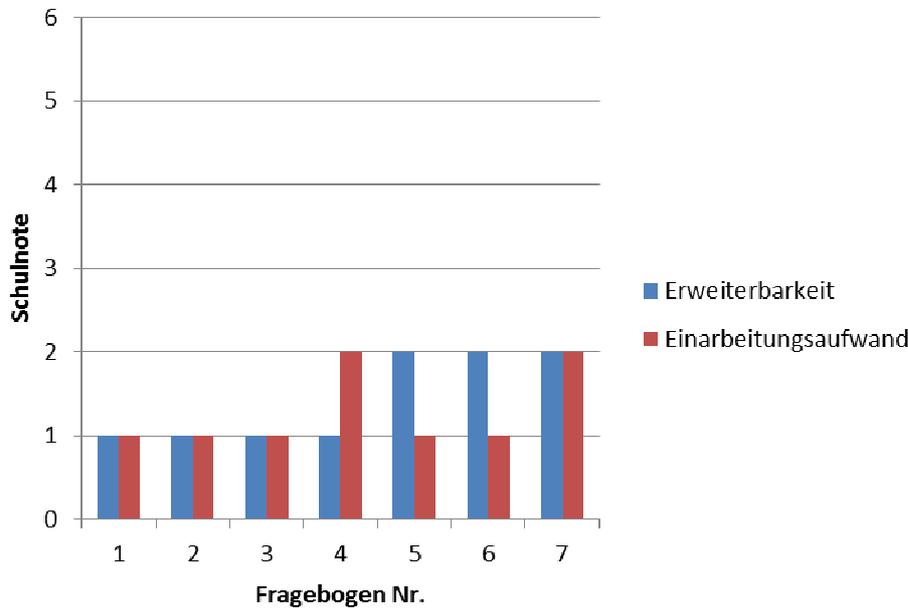


Abbildung 6-4: Bewertung der Erwartungskonformität

### Fehlertoleranz

Die Probanden haben teils Schwierigkeiten, Fehler in den selbst geschriebenen Lösungen zu finden und zwar unabhängig davon, ob sich der Fehler in einer Filterkette oder in einem konkreten Filter befindet. Wahrscheinlich ist die Ursache hierfür mangelnde Programmiererfahrung bei den Teilnehmern und daher auf den Eindruck zurückzuführen, dass es für die Teilnehmer generell schwierig ist, Fehler in eigenen Programmen zu finden. Für diese These spricht, dass die Teilnehmer durchaus die Kapselung der Teilprobleme in voneinander (unabhängige) Filter positiv empfinden (vgl. Abbildung 6-2). Mit steigender Programmiererfahrung ist allerdings damit zu rechnen, dass die Nutzer eigene Fehler generell leichter finden und beheben können.

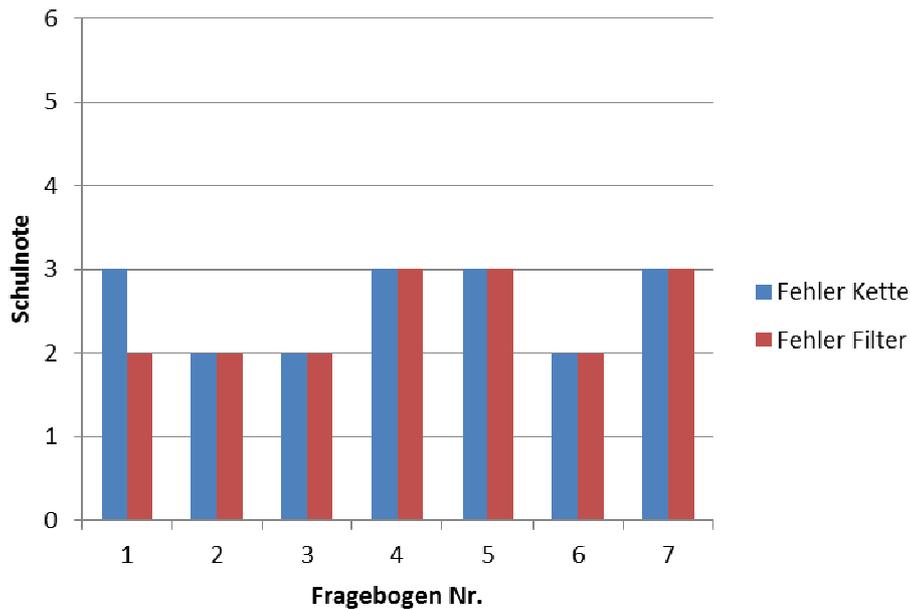


Abbildung 6-5: Bewertung der Fehlertoleranz

### Individualisierbarkeit

Die Anbindung eines mit dem Software-Framework umgesetzten Programms an andere Softwareprodukte der Firma sehen die Probanden als unproblematisch an. Bezüglich der Vielfalt der Lösungsansätze gibt es überwiegend positive Einschätzungen allerdings, auch eine deutlich abweichende Meinung. Auch hier ist für die Probanden nach so kurzer Einarbeitungszeit eine Einschätzung schwierig.

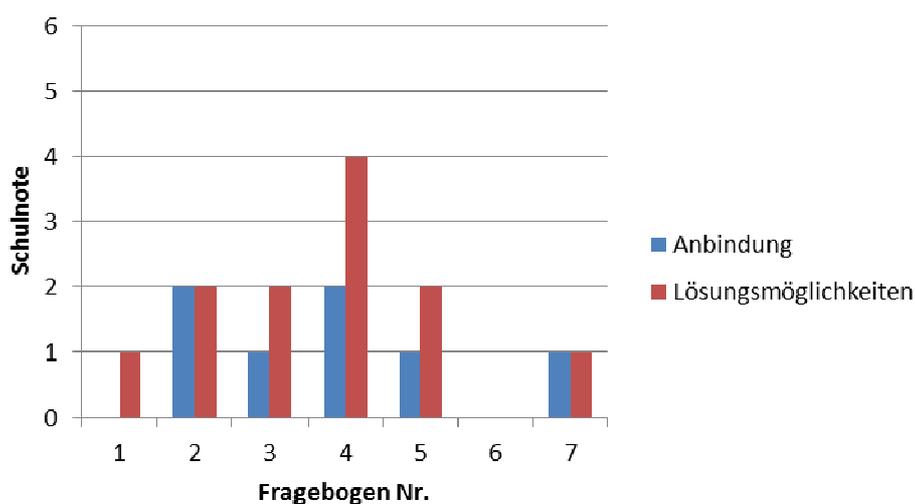


Abbildung 6-6: Bewertung der Individualisierbarkeit

### 6.1.4 Fazit

Das Nutzungskonzept des Software-Frameworks stellt für Anfänger bei der Entwicklung einfacher Bildverarbeitungslösungen eine gute Unterstützung dar. Besonders der geringe Einarbeitungsaufwand und die leichte Erweiterbarkeit selbst erstellter Anwendungen auf Basis des Software-Frameworks wird von den Probanden positiv bewertet (vgl. Abbildung 6-4). Schwierigkeiten bereitet hingegen vor allem die Suche nach Fehlern (vgl. Abbildung 6-5) – dies lässt sich teilweise durch die geringe Programmiererfahrung der Probanden erklären. In wie weit diese Bewertung sich auch auf die Lösung sehr komplexer und aufwändig zu implementierender Funktionen übertragen lässt, kann im Rahmen der Auswertung nicht beurteilt werden – dazu ist eine umfangreiche Einarbeitung in das Software-Framework und dessen Nutzung zur Lösung komplexer Probleme durch viele Anwender notwendig. Das Software-Framework wird der Öffentlichkeit zur freien Nutzung zur Verfügung gestellt, es besteht daher erst in Zukunft die Möglichkeit, die Eignung des Software-Frameworks durch Feedback der Nutzerschaft umfangreicher zu evaluieren.

## 6.2 Demonstratoren

### 6.2.1 Gabel-Belegt Erkennung

Im Rahmen der Evaluierung der Gabel-Belegt Erkennung werden praxisnahe Versuche in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml durchgeführt. Dazu wird eine Kamera mit einer Auflösung von 5 MP und einer Bildwiederholrate von maximal 15 Bildern pro Sekunde verwendet. Der Videodatenstrom wird für die Verarbeitung auf ca. 0,75 MP skaliert, die Belichtungszeit dynamisch angepasst.

Zwischen drei unterschiedlichen Orten werden Transportaufträge ausgeführt. An Position A, einem Regallagerplatz mit schlechten Lichtverhältnissen (< 50 Lux), wird ein Ladehilfsmittel (LHM) aufgenommen. Zwischen den Punkten A und B, einem Rollenförderer (mittlere Lichtverhältnisse, ca. 100 Lux), wird das Fahrzeug mit konstanter, subjektiv gewählter Geschwindigkeit verfahren. An B fährt das Fahrzeug den Lagerplatz in der erforderlichen Höhe an, um dort das LHM abzuladen. Ohne Beladung wird die Fahrt zum Ort C, einem Bodenlagerplatz mit guten Lichtverhältnissen (>150 Lux), fortgesetzt. An C wird ein LHM aufgenommen und an den Ort A verfahren, um es dort abzulegen. Es wird ohne Beladung zum Ort B gefahren, um das dortige LHM aufzunehmen und an den Ort C abzuladen.

Als Ladehilfsmittel dient entweder eine Gitterbox (GB) oder eine Europalette mit VDA-Behältern (EP), die Fahrgeschwindigkeit bei der Aufnahme wird subjektiv langsam (LF) (vorsichtige Aufnahme des LHM) oder schnell (SF) gewählt. Als Referenz für die Gabel-Belegt Erkennung wird bei Ein- und Ausfahrt das Passieren der Gabelspitze an der Vorderkante des LHM gewählt. Alle Versuche werden jeweils fünf Mal wiederholt.

Dabei auftretende Fehler werden wie folgt klassifiziert:

- false negative: Die zuvor erkannte und immer noch vorhandene Beladung wird fehlerhaft als „nicht beladen“ erkannt.
- false positive: Es wird eine Belegung erkannt, die nicht vorhanden ist.

### Leistungsfähigkeit

In keinem Versuch treten false negatives auf. Ist die Gabel belegt, wird dies auch stets korrekt erkannt.

Bei bis zu 5% der betrachteten gesamten Prozesszeit wird im unbeladenen Zustand kurzzeitig eine Beladung erkannt (false positive). Dieser Fall lässt sich durch weitere Plausibilitätsprüfungen unterbinden, z. B. durch gleichzeitige Betrachtung der Ortsveränderung des Transportmittels. Das Problem tritt bei Gitterboxen geringfügig seltener als bei Euro-Paletten mit VDA-Behältern auf.

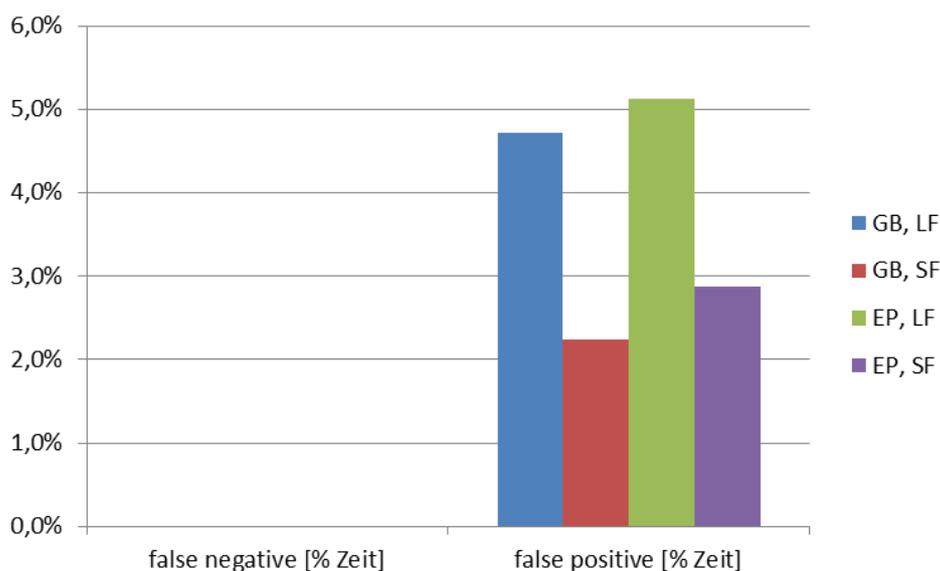
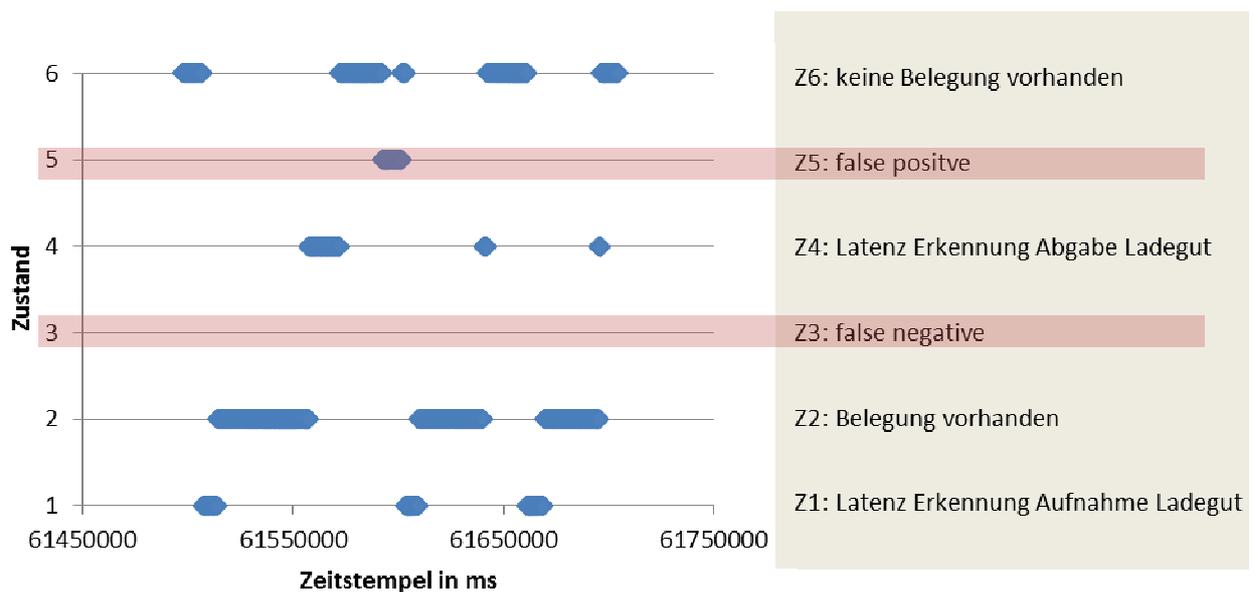


Abbildung 6-7: Anteil false positives und negatives in % der Prozesszeit

False positive Zustände treten sehr selten und hauptsächlich bei sehr langsamer Fahrt auf, da bei schnellerer Fahrt örtlich bedingte Änderungen in der Beleuchtung einen zeitlich kürzeren Einfluss haben. Im Mittel dauert ein false positive ca. 10 s an.

Abbildung 6-8 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sensorinformation einer Versuchsfahrt mit einer Europalette. Die Zustände Z1, Z2 und Z6 kennzeichnen die korrekt erfassten Belegungswerte. Z3 bezeichnet die false negatives (Diese treten wie oben beschrieben nicht auf) und Z5 zeigt eine false positive-Meldung um den Timestamp 61600000 an. Die in Z4 gekennzeichneten Abschnitte zeigen zwar formal ebenfalls einen fehlerhaften Wert an, allerdings aufgrund der auftretenden Latenz.

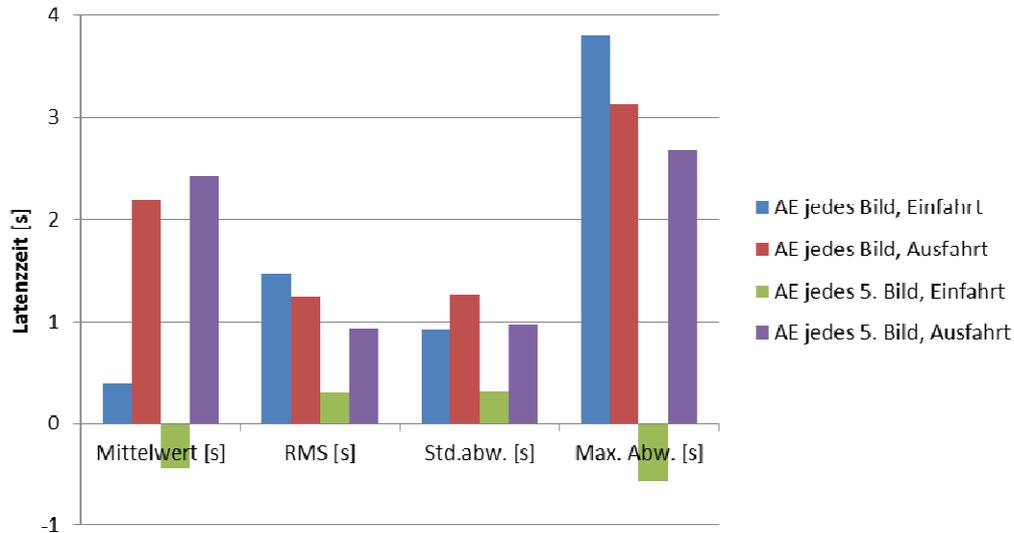


**Abbildung 6-8: Illustration des zeitlichen Verlaufs der Belegt Erkennung bei einer Europalette**

In den betrachteten Fällen kann eine stabile Erfassung der Beladung gewährleistet werden, wobei für Ein- und Ausfahrt unterschiedliche Latenzzeiten anzunehmen sind.

### Latenz

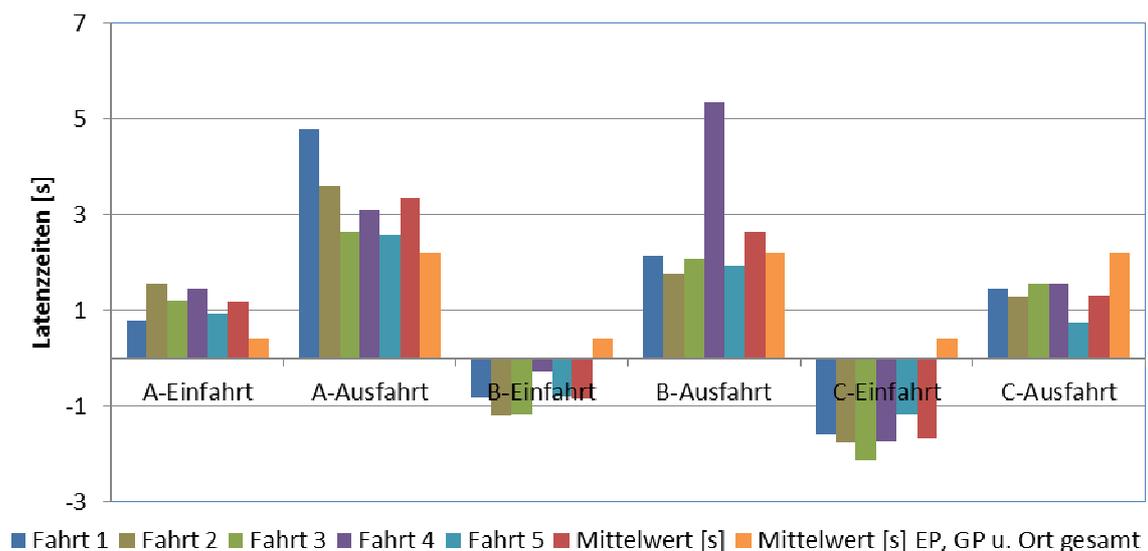
Die Latenz ist in den Versuchen mit im Mittel 0,5 s (Einfahrt) und 2,2 s (Ausfahrt) insbesondere bei der Ausfahrt signifikant und kann bis zu 3,8 s bei einer Standardabweichung von etwa 1 s betragen. Nichtreflektierende Güter (Gitterbox) an dunklen Orten (Ort A) unterscheiden sich in der Latenz grundlegend von anderen Situationen.



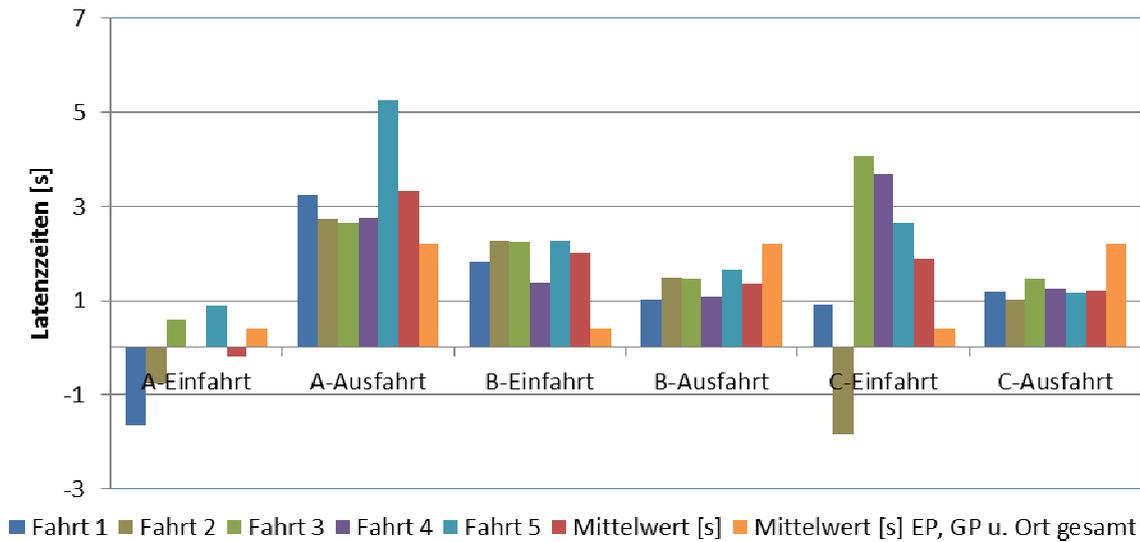
**Abbildung 6-9: Latenzzeit über alle Versuche bei unterschiedlicher Belichtungszeitanpassung (AE)**

Für die Einfahrt ist die Latenzzeit deutlich geringer als für die Ausfahrt aus dem Ladegut, was durch die größere relative Abschattung des Ladegutes aus Kamerasicht bei Einfahrt zu erklären ist.

Europaletten mit VDA-Behältern (Kunststoff, spiegelnde Oberfläche) führen zu einer insgesamt einheitlicheren und leicht niedrigeren Latenzzeit über den Ort und Prozessvorgang als es bei Gitterboxen (durchlässig, keine definierte Reflexion) der Fall ist (vgl. Abbildung 6-10, Abbildung 6-11).

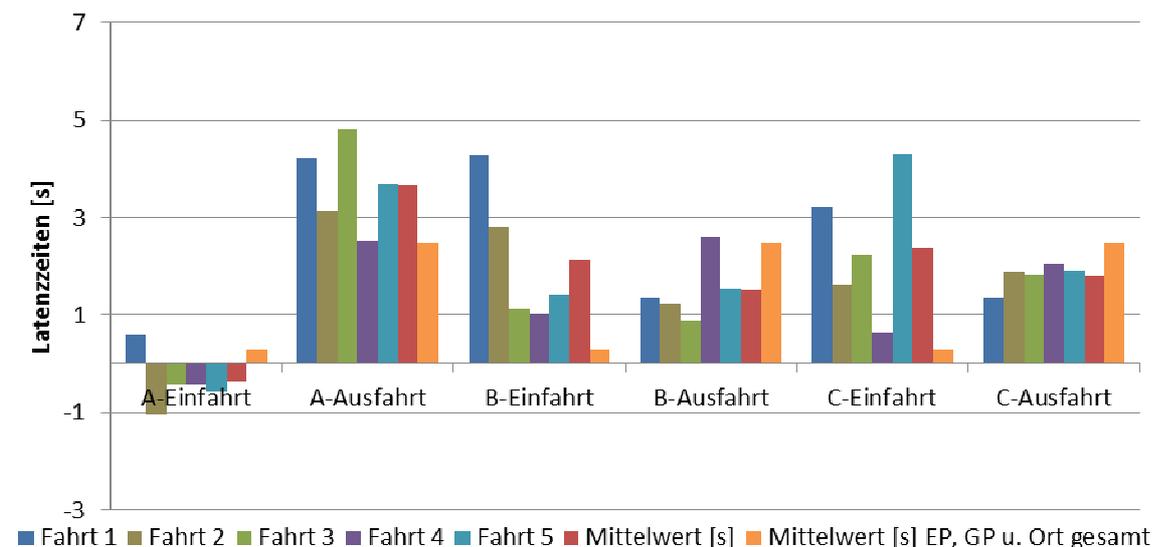


**Abbildung 6-10: Transport einer Gitterbox bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach jedem Bild**



**Abbildung 6-11: Transport einer Euro-Palette, bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach jedem Bild**

Auffallend ist, dass am Ort A bei schlechten Lichtverhältnissen das Verhalten der Latenzzeit konträr zu den Orten B und C ist. Bei der Einfahrt ist die Latenzzeit dort geringer als bei der Ausfahrt. Die Latenzzeit ist für Gitterboxen (GB) insgesamt stabil mit Ausnahmen bei der Ausfahrt am Ort B (mittlere Lichtverhältnisse). Durch die kontinuierliche Belichtungszeitanpassung mit jedem neuen Frame sinkt die Latenzzeit im Mittel knapp und die Erkennungsleistung wird stabiler als bei einer Belichtungszeitanpassung alle fünf Bilder (vgl. Abbildung 6-12, Abbildung 6-11).



**Abbildung 6-12: Transport einer Euro-Palette bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach je 5 Bildern**

Die Latenzzeit ist damit abhängig von den Faktoren Ladegut, Prozessvorgang (Ein-/Ausfahrt) und Ort/Lichtverhältnisse in der Umgebung.

Die Hauptursachen für die hohe Latenzzeit sind:

- Es dauert ca. 0,1 s bis ein 5 MP großes Bild von der Kamera zum Rechner übertragen ist. Die Verarbeitung bis zur Meldung des Zustandes nimmt ca. noch einmal doppelt so viel Zeit in Anspruch. Von der Aufnahme bis zur Bestimmung des Zustandes vergehen also ca. 0,3 s
- Schattenwurf des aufzunehmenden Ladegutes auf die Gabelzinken kann zu frühzeitiger Erkennung einer Belegung führen. Dieser Schatten sieht im Belegungsmuster insbesondere bei einer Gitterbox im Grauwertbild ähnlich aus wie das Muster einer echten Gitterbox. Der Schattenwurf kann prinzipiell sowohl bei der Ein- als auch bei der Auslagerung auftreten.
- Die Belichtungszeitanpassung benötigt mehrere Schritte zum Finden einer geeigneten Belichtungszeit. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich die Lichtverhältnisse bei der Ein- und Ausfahrt ständig ändern, da die Kamera stärker oder weniger stark durch das Ladegut verdeckt wird. Wird die Kamera nach der Beladung der Gabelzinken stark verdeckt, ist wegen des geringeren Lichteinfalls eine hohe Belichtungszeit erforderlich. Diese wird während des Entladungsvorgangs wegen der steigenden Helligkeit sinken. Innerhalb eines festen Zeitraums werden bei der Entladung deswegen weniger Bilder aufgenommen und verarbeitet als während der Beladung (Dort ist die Belichtungszeit initial niedriger und steigt während der Beladung an.). Aus diesem Grund ergibt sich der wesentliche Unterschied in der Latenz bei der Be- und Entladung.

### **Mögliche Optimierungsmaßnahmen**

Um die Zahl der false positives weiter zu senken sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Zum einen kann die Auswerte-Logik um Plausibilitätsprüfungen erweitert werden, indem ein Abgleich mit der Fahrgeschwindigkeit, dem Bewegungsprofil (z. B. Fahrtrichtungsänderung) und der aktuellen Position (Fahrweg oder Lagerzone) stattfindet. Im Prozess nicht mögliche oder unwahrscheinliche, aber vom Sensor gemeldete Zustände können so ignoriert werden. Zum anderen kann die Auswertung mittels eines Farbbildes statt des aktuell verwendeten Grauwertbildes mit Beleuchtungsänderungen besser umgehen. Eine schnellere Belichtungszeitanpassung bei der Ausfahrt könnte zusätzlich helfen die Latenz zu reduzieren.

### **Funktionsintegration**

Eine Funktionsintegration der Gabel-Belegt Erkennung wird nicht betrachtet, da keine geeignete Schnittmenge der Informationen im Bild mit anderen Demonstratoren gefunden werden kann. Prinzipiell benötigt die Waren-Identifikation mittels NVE einen ähnlichen Sichtbereich wie die Erkennung der Gabel-Belegung. Allerdings ist zur Erkennung der Gabelbelegung nach der dafür gewählten Methode eine Sicht auf einen möglichst großen Teil der Gabelzinken notwendig, die Sichtachse der Kamera ist also in Richtung Gabelzinken geneigt. Für die Waren-Identifikation mittels NVE hingegen ist eine möglichst gerade Sicht nach vorn notwendig (vgl. Kapitel 5.3.2). Ein derart großer Sichtbereich ließe sich nur unter Verwendung eines Objektivs mit sehr hohem Öffnungswinkel ( $\geq 90^\circ$ ) erreichen. Dies würde allerdings die Anforderung an die Auflösung der Kamera erheblich steigern, da das Sichtfeld der Kamera dann prinzipbedingt sehr große Bereiche enthält, in denen keine NVE enthalten sein kann, dessen Pixel also nicht zur Abbildung des Barcodes beitragen und damit zusätzlich vorhanden sein müssen. Zudem ist fraglich, ob beide Demonstratoren überhaupt zur selben Zeit benötigt werden. Eine Gabel-Belegung kann auch dann angenommen werden, wenn eine NVE gelesen wird bzw. die Belegung besteht nicht mehr, wenn (nach längerer Zeit ohne Lesevorgang) bei Abgabe des Ladehilfsmittels dieselbe NVE erneut gelesen wird.

### **6.2.2 Waren-Identifikation mittels NVE-Code**

Zur Evaluierung der Waren-Identifikation mittels NVE-Code werden praxisnahe Versuche in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml durchgeführt. Dazu wird eine Kamera mit einer Auflösung von 5 MP und einer Bildwiederholrate von maximal 15 Grauwertbildern pro Sekunde verwendet. Die Belichtungszeit der Kamera wird dynamisch an die Helligkeit der Szene angepasst. Die NVE befindet sich während des Tests gemäß GS1-Empfehlung [GS1-2009] im oberen rechten Quadranten der zugewandten Testfläche in einer Höhe von 40-80 cm über dem Boden mit einem Mindestabstand zum rechten Rand von 5 cm (siehe Abbildung 6-13). Um möglichst viele Tests gleichzeitig durchführen zu können, werden fünf unterschiedliche, jeweils ca. 16 cm breite NVE in verschiedenen, aber überwiegend horizontalen Orientierungen auf beigem Pappkarton der Abmessungen 1200 x 800 mm angebracht (vgl. Abbildung 6-13) und anschließend an der Front einer Europalette befestigt. Der Aufbau simuliert eine ca. 80 cm hoch beladene Palette.



**Abbildung 6-13: Testfläche mit 10 NVE-Barcodes in unterschiedlicher Orientierung**

In einem weiteren Aufbau wird der Karton teilweise mit Schrumpffolie überzogen und dort analog fünf NVE in der unteren linken Ecke der Testfläche platziert (nach einer Rotation um  $180^\circ$  befinden sich die NVE oben rechts wie für den Versuch benötigt). Eine Erkennung wird in zwei verschiedenen Modi untersucht:

1. Statisch in Form eines Standbildes. Der Gabelstapler steht dabei so vor der Testfläche, dass ein Abstand von ca. 50 cm zwischen Kamera und Testfläche eingehalten wird, damit der gewünschte Bereich der Testfläche vollständig abgebildet wird.
2. Dynamisch während einer vorsichtigen Anfahrt und Aufnahme der Palette.

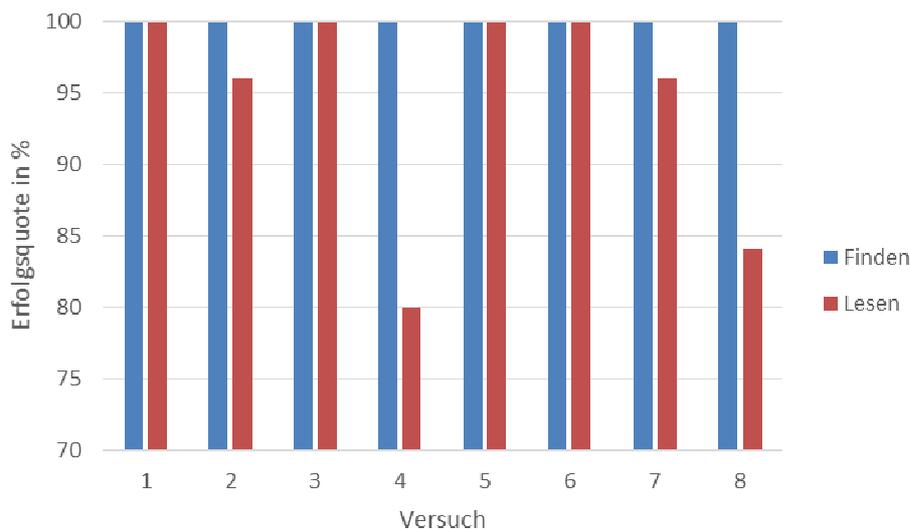
Beide Szenarien werden einmal am Tag und einmal am Abend jeweils mit der üblichen Hallenbeleuchtung fünf Mal durchgeführt. Für die Auswertung wird dabei aufgezeichnet, welche NVE bei Ein- und Ausfahrt aus der Palette gefunden werden und ob der Lesevorgang erfolgreich ist (vgl. Tabelle 6-3).

**Tabelle 6-3: Variable Versuchsparameter der NVE-Erkennung**

	Untergrund	Anfahrt	Tageszeit	Ausführungen
<b>Versuch 1</b>	Karton	statisch	Mittags	5
<b>Versuch 2</b>	Karton	statisch	Abends	5
<b>Versuch 3</b>	Karton	dynamisch	Mittags	5
<b>Versuch 4</b>	Karton	dynamisch	Abends	5
<b>Versuch 5</b>	Folie	statisch	Mittags	5
<b>Versuch 6</b>	Folie	statisch	Abends	5
<b>Versuch 7</b>	Folie	dynamisch	Mittags	5
<b>Versuch 8</b>	Folie	dynamisch	Abends	5

**Leistungsfähigkeit**

In allen Versuchen werden die Barcodes mit den NVE im Rahmen der Segmentierung wenigstens ein Mal im betrachteten Intervall erfolgreich gefunden, die Ergebnisse unterscheiden sich lediglich in der Erfolgsquote bei der Auswertung des Barcodes, wie Abbildung 6-14 entnommen werden kann. Wird eine NVE gefunden, so wird die Nummer stets auch korrekt ausgewertet.



**Abbildung 6-14: Erfolgsquote beim Finden und Lesen der NVE je Versuch**

Es fällt auf, dass bei guten Lichtverhältnissen am Mittag (Versuche 1,3,5,7) die NVE mit einer Ausnahme in Versuch 7 immer erfolgreich gelesen werden. Auch in den statischen Aufnahmen am Abend werden die NVE fast immer gelesen. Am Abend dominiert allerdings die Deckenbeleuchtung die Helligkeit der Szene. Da das künstliche Licht die Testfläche und den Bereich vor dem Gabelstapler weniger diffus ausleuchtet, kommt es zu Schattenwurf z. B. vom Hubgerüst auf die Testfläche (vgl. Abbildung 6-15). Tritt dieser Schattenwurf in dem Bereich auf, in dem der Barcode im Bild normalerweise scharf abgebildet wird und somit ansonsten gut ausgewertet werden könnte, dann scheitert hier unter Umständen der Lesevorgang, ggf. auch schon die Segmentierung. Letztere lokalisiert dann aber an einer anderen Stelle erfolgreich, daher wird die NVE in der Auswertung als gefunden aber nicht als gelesen verbucht. Dies ist die Ursache für die geringe Erfolgsquote beim Lesen der NVE in den Versuchen 4 und 8. Es sei angemerkt, dass Schattenwurf selbstverständlich auch am Tag relevant sein kann und sich diese Problematik somit nicht allein auf geringen/keinen Tageslichtanteil in der Beleuchtung beschränkt.



**Abbildung 6-15: Schattenwurf bei ausschließlich künstlicher Deckenbeleuchtung**

### **Robustheit**

In den dynamischen Versuchen ist außerdem zu beobachten, dass die Barcodes bei höherer Fahrgeschwindigkeit unschärfer aufgenommen werden. Damit dies bei in der Praxis üblichen Fahrgeschwindigkeiten nicht zum Problem für die Auswertung der NVE wird, muss die Belichtungszeit gesenkt werden. Dies führt allerdings bei geringer Helligkeit in der Szene zu stärkerem Bildrauschen, da das aufgenommene Signal durch die kürzere Belichtungszeit schwächer wird (nicht aber das durch den Sensor verursachte Rauschen).

### **Mögliche Optimierungsmaßnahmen**

Um eine robuste Lösung unabhängig von den Lichtverhältnissen zu bekommen, ist zwingend eine zusätzliche Beleuchtung der zu aufzunehmenden Szene vorzusehen. Andernfalls kann Schattenwurf das Lesen der NVE signifikant behindern. Ein weiterer Vorteil der Beleuchtung ist, dass bei gleichzeitig guter Signalqualität eine kurze und ortsunabhängige (statische) Belichtungszeit eingestellt werden kann und somit immer ähnliche Lichtverhältnisse für die Aufnahme geschaffen werden. Dieser Umstand ist besonders bei höheren Einfahrgeschwindigkeiten relevant.

### **Funktionsintegration**

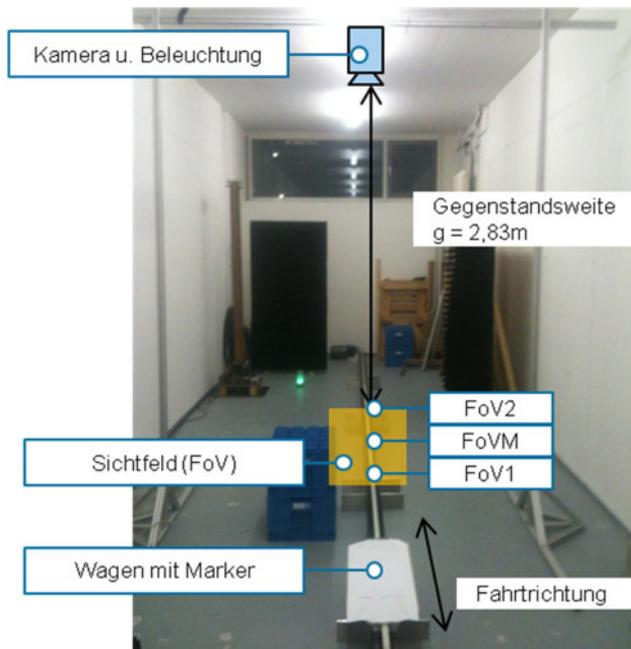
Eine Funktionsintegration der NVE-Erkennung wird nicht betrachtet, da keine geeignete Schnittmenge der Informationen im Bild mit anderen Demonstratoren gefunden werden konnte (vgl. Kapitel 6.2.1).

### **6.2.3 Lokalisierung (Voruntersuchungen)**

Im Rahmen der Evaluierung der Sensorfunktion Lokalisierung werden teilsynthetische Versuche auf einer motorbetriebenen Versuchsbahn im Labor und Praxisversuche in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml durchgeführt.

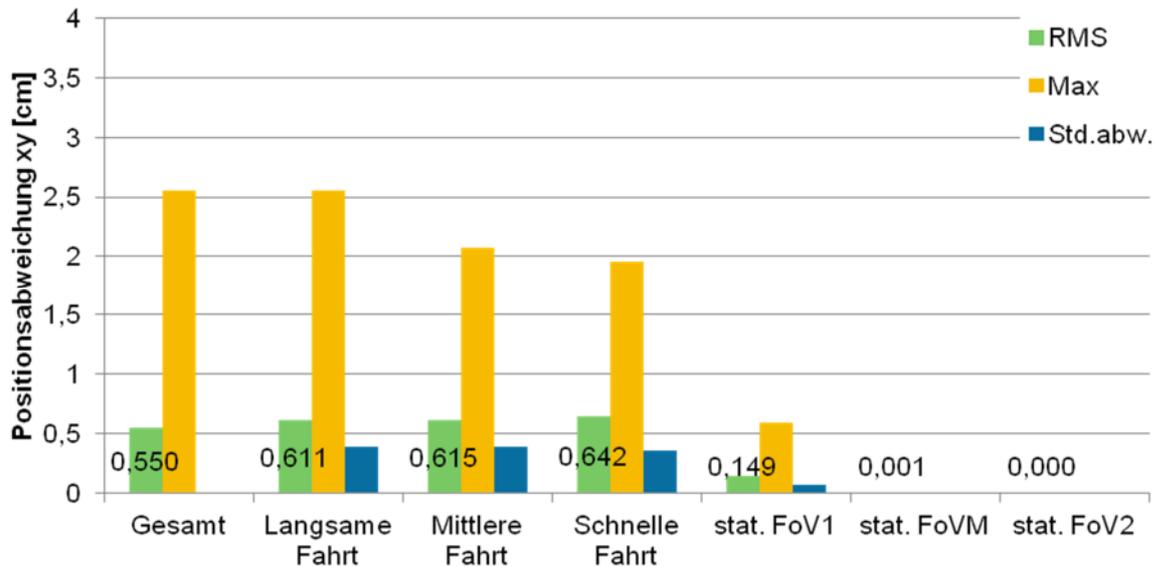
Die teilsynthetischen Versuche, die die reale Situation unter hoher Abstraktion darstellen, dienen dazu, die systeminternen Zusammenhänge zu erkennen. Abbildung 6-16 bietet einen Überblick zum Versuchsaufbau mit den drei Messpunkten FoV1, FoM und FoV2. Hierbei wird der Systemaufbau umgedreht, indem nunmehr der Marker auf dem Versuchswagen anstelle der Kamera verfährt. Ein Einfluss auf die internen Systemzusammenhänge ist nicht zu erwarten, jedoch wird dadurch der

Aufwand für den Versuchsaufbau wesentlich reduziert. Die Markergröße wird bei einer optischen Auflösung von  $1,4 \text{ MP}$  und einer Gegenstandsweite  $g = 2,83 \text{ m}$  so gewählt, dass sich eine Überabtastung nach Nyquist mit dem Faktor  $k = 5,65$  ergibt.



**Abbildung 6-16: Versuchsaufbau teilsynthetischer Versuche**

In den Versuchen (vgl. Abbildung 6-17) lässt sich für den statischen Fall eine extrem hohe Lokalisierungsgenauigkeit im Millimeter-Bereich erkennen, die sicherlich auch den idealen und konstanten Lichtbedingungen geschuldet ist. Der im dynamischen Fall hervorgerufene Effekt, dass die Lokalisierungsgenauigkeit im Mittel konstant bleibt, aber sich die maximale Positionsabweichung mit steigender Fahrgeschwindigkeit reduziert, ist statistischer Natur. Bei höherer Geschwindigkeit reduziert sich die Datenbasis auf Grund der konstanten Bildrate, so dass die sehr selten auftretende erhöhte Positionsabweichung geringer ausfällt. Grundsätzlich ist die geringere Lokalisierungsgenauigkeit im dynamischen Fall gegenüber dem statischen Fall durch erhöhtes Bildrauschen zu erklären, wodurch die Erkennung der Lage des Markers im Bild ungenauer erfolgt. Weiterführende Versuche zeigen, dass kein Einfluss auf die Lokalisierungsgenauigkeit besteht, der abhängig von der lokalen Lage des Markers im Bild ist. Somit ist zu erwarten, dass in der zukünftigen Anbringung von Markern nicht auf die Lage in Bezug auf den Fahrweg zu achten ist, sofern sichergestellt ist, dass er vom Fahrzeug auf dem Fahrweg sicher gesehen wird.



**Abbildung 6-17: Darstellung der gemessenen Positionsabweichung bei verschiedenen Geschwindigkeiten, teilsynthetischer Versuch**

In Praxisversuchen steht im Vordergrund, die Adaptivität des Lokalisierungssystems auf sich verändernde Umgebungsbedingung innerhalb einer Fahrt und zwischen verschiedenen Fahrten zu untersuchen, um dadurch die Robustheit des Systems abzuschätzen. Es wird eine Fahrstrecke in der Versuchshalle definiert, die diagonal zum globalen Koordinatensystem im Raum liegt und somit zu gleichzeitigen Positionsänderungen auf der x- und y-Achse führt. Ferner werden drei zu passierende Orte gewählt, die auf einer Geraden liegen und sich in ihrer Charakteristik grundsätzlich unterscheiden (vgl. Abbildung 6-18):

- Ort A: hohe Abschattung des Tageslichts, geringe Helligkeit (< 50 Lux)
- Ort B: künstliche und konstante Beleuchtung, mittlere Helligkeit (ca. 90 Lux)
- Ort C: natürliche (d. h. Deckenfenster) und künstliche Beleuchtung, schwankende höhere Helligkeit (>90 Lux)

Diese gerade wird auf dem Hallenboden zu Beginn markiert. Während der mit möglichst konstanter Geschwindigkeit durchgeführten Fahrt entlang dieser Geraden wird laufend die Pose bestimmt. Der Messvorgang wird durch Tastendruck zu Beginn der Geraden gestartet und am Ende der Geraden durch einen erneuten Tastendruck abgeschlossen – Start und Ende der Strecke sind somit als Referenzpunkte bekannt. Sämtliche dazwischenliegenden Soll-Punkte werden anhand der verfahrenen Zeit zwischen den beiden Referenzpunkten und den Zeitstempeln zu den aufgenommenen Bildern linear interpoliert. Die Parameter Fahrgeschwindigkeit, Beleuch-

tung und Tageszeit werden in den Versuchen variiert. Jeder Versuch wird fünf Mal wiederholt. (vgl. Tabelle 6-4). Die Position wird dabei jeweils

**Tabelle 6-4: Variable Versuchsparameter der NVE-Erkennung**

	Geschwindigkeit	Beleuchtung	Tageszeit	Ausführungen
<b>Versuch 1</b>	Langsam (LF)	An	Tagsüber	5
<b>Versuch 2</b>	Langsam (LF)	An	Abends	5
<b>Versuch 3</b>	Langsam (LF)	Aus	Abends	5
<b>Versuch 4</b>	Schnell (SF)	An	Tagsüber	5

Durch eine Vielzahl an weiteren Effekten, insbesondere durch die nunmehr nicht optimalen Lichtverhältnisse, ergibt sich in den Praxisversuchen ein deutlich geringeres Genauigkeitsniveau im Vergleich zu den teilsynthetischen Versuchen. Im quadratischen Mittel (root mean square RMS) beträgt die Lokalisierungsgenauigkeit dennoch mindestens 12,5 cm. Auffallend ist, dass die Lokalisierungsgenauigkeit sich verbessert, je konstanter die Lichtverhältnisse über die Fahrt sind. So steigt die Lokalisierungsgenauigkeit mit sinkender Fahrgeschwindigkeit und je geringer der Einfluss des natürlichen, stark streuenden Lichtes wird. Hervorzuheben ist, dass selbst bei einer praktisch dunklen Versuchshalle mit geringster Lichtstreuung (Langsame Fahrt am Abend ohne Beleuchtung bei ca. 20 Lux) noch eine Lokalisierung stabil erfolgen kann und dies auf Grund der sehr einheitlichen dunklen Lichtverhältnisse auf einem hohen Genauigkeitsniveau.

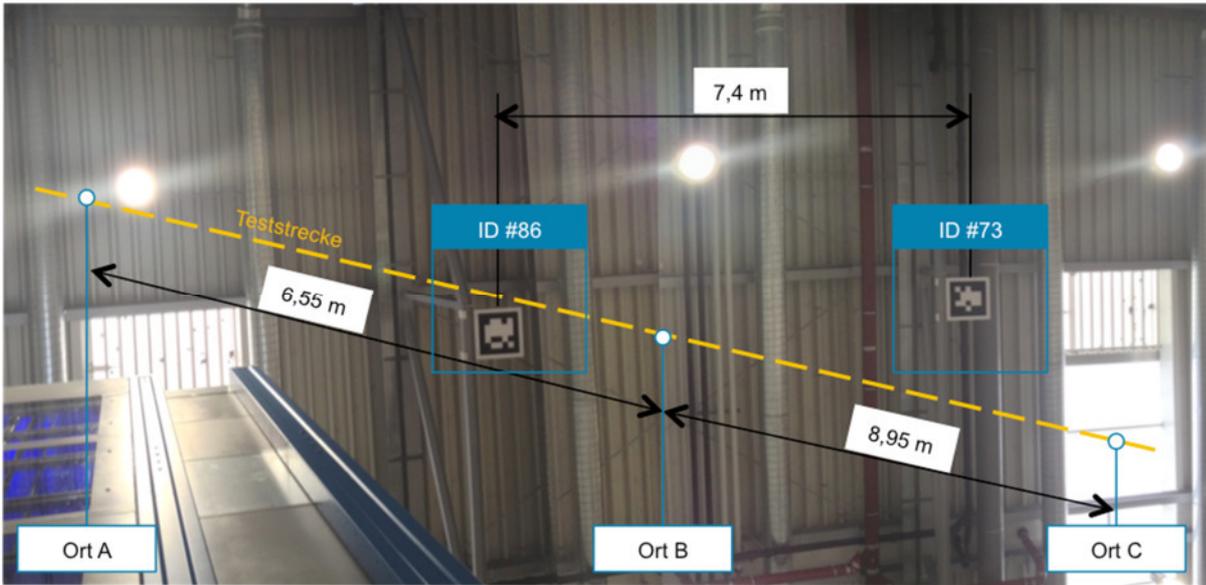


Abbildung 6-18: Darstellung der heterogenen Bedingungen auf der Fahrstrecke

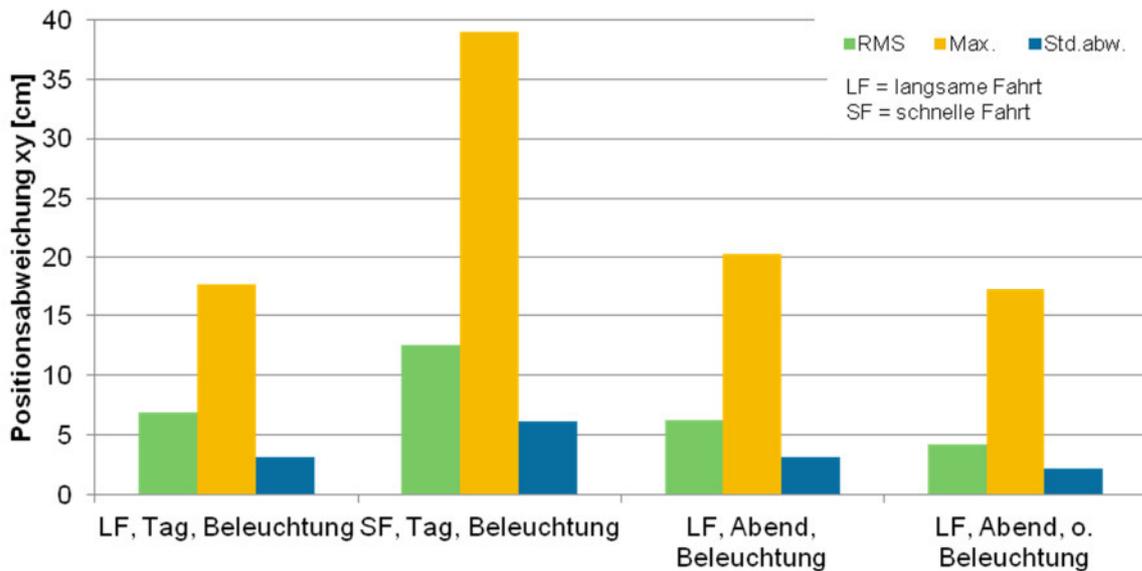


Abbildung 6-19: Darstellung der gemessenen Positionsabweichungen in Fahrt, Praxisversuch

Die ansonsten sehr hohe Maximalabweichung unterliegt einer gewissen Regelmäßigkeit. Eine Analyse der Messreihen ergibt, dass diese in einem Zyklus von 5 Messwerten auftreten kann, sofern eine Belichtungszeitanpassung erfolgt. Mit der Belichtungsanpassung wird treiberbedingt der bestehende Bildpuffer gelöscht, um mit neuen Belichtungsparametern eine neue Bilderfassung zu starten. Somit erfolgt die darauffolgende Positionsbestimmung auf der Basis eines Bildes, das nicht mehr in direkter Folge zur vorherig bestimmten Position liegt. Diese Annahme ist allerdings grundlegend für die Bildung der Soll-Position, anhand derer die Positionsabweichung bestimmt wird. Dieses Phänomen würde sich im Falle eines vollständigen

Referenzlokalisierungssystem, welches für die Versuchsdurchführung nicht zur Verfügung stand, demnach nicht zeigen.

Eine parallel zur Position erfolgte Auswertung der Orientierung des Fahrzeuges zeigt eine sehr hohe Genauigkeit in der Orientierungsbestimmung (vgl. Abbildung 6-20). Im quadratischen Mittel ist von einer Genauigkeit besser als  $1^\circ$  auszugehen, wobei im Maximum eine Abweichung  $<2,6^\circ$  zu erkennen ist. Wie bei der Positionsbestimmung zeigen sich auch ihr geringfügige Einflüsse der Lichtbedingungen und der Fahrgeschwindigkeit auf die Genauigkeit.

In der Summe können auf die Bestimmung der Pose zahlreiche Einflussfaktoren in den durchgeführten Versuchen erkannt werden, die in Abbildung 6-21 hinsichtlich ihrer tendenziellen qualitativen Wirkung eingeordnet werden. Die betrachteten Einflussfaktoren betrachten sowohl die Anwendung (Fahrgeschwindigkeit, seitlicher Abstand zum Marker, Neigung der Marker) als auch interne Parameter des Lokalisierungssystems (Bildrate, Auflösung, physische Markergröße). Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Lokalisierungsleistung für ein Palettenlager eine lagerplatzgenaue Lokalisierung stabil ermöglicht und somit eine Vielzahl heutiger Lager als Anwendungsbereich in Frage kommen.

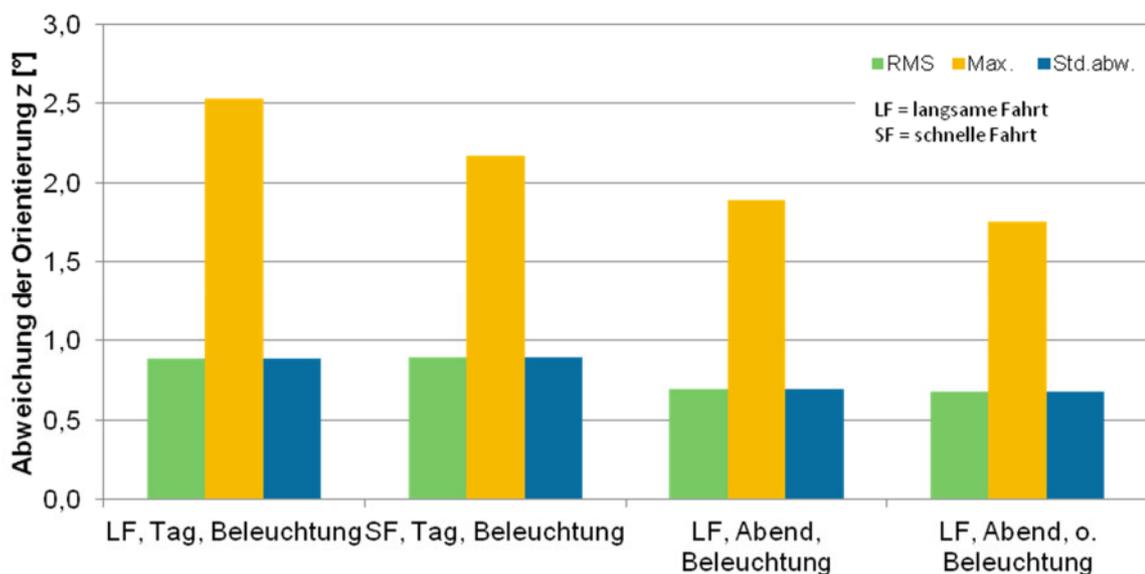
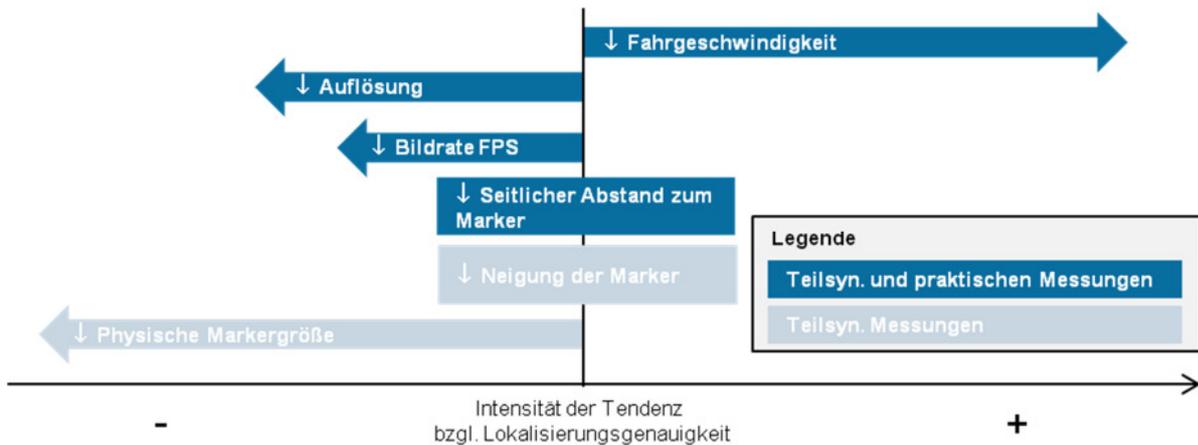


Abbildung 6-20: Darstellung der gemessenen Orientierungsabweichung in Fahrt, Praxisversuch



**Abbildung 6-21: Tendenz der Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsgenauigkeit**

### Funktionsintegration

Anhand der Hubhöhenenerkennung und der Lokalisierung wird zudem die Fähigkeit zur Funktionsintegration betrachtet. Das Ziel, mittels einer Kamera und deren erfasster Bildszene eine Vielzahl von Sensorfunktionen zu realisieren, kann durch das entwickelte System erreicht werden, ohne dass relevante Abstriche in der Leistung bzw. Genauigkeit des Systems hingenommen werden müssen. Allerdings führt die Zusammenführung der Funktionen auch zu einer Zusammenführung der Anbringungspunkte, die somit nicht mehr optimal für die jeweilige Sensorfunktion sein können. Während obige praxisnahe Lokalisierungsversuche mit einer Kamera am Anbringungspunkt ID01 (Fahrzeugdach heckseitig) durchgeführt werden, so wird nunmehr für die Funktionsintegration der Anbringungspunkt ID15 am unteren Hubmast gewählt. Wie Abbildung 6-22 zeigt, ist in der Positionsbestimmung keine signifikante Positionsabweichung zu erkennen. Allerdings ist keine kontinuierliche Lokalisierung mehr möglich, da durch Abdeckungen im Bild nicht durchgehend eine freie Sicht auf an der Decke angebrachte Marker gewährleistet ist. Dies ist z. T. auch dadurch geschuldet, dass der Hubmast zu einem Großteil das erfasste Bild ausfüllt, sofern die Kamera in paralleler Ausrichtung zu den Deckenmarkern angebracht wird. Zusätzlich ergibt sich ein Einfluss der Hubmastneigung auf die Sichtbarkeit der Marker, wie Abbildung 6-22 zusätzlich zum Ausdruck bringt. Zur Erweiterung des Sichtbereiches kann die Kamera zusätzlich leicht seitlich vom Hubmast weg geneigt werden. In diesem Fall ist die Messung um zwei Neigungswinkel zu korrigieren, indem das Kamerabild virtuell um die beiden Winkel entlang ihrer Achsen gedreht und daher eine virtuelle Parallelität zwischen Marker und Fotosensor hergestellt wird. Zum einen ist zur Erweiterung des Sichtfeldes der statische Neigungswinkel vom Hub-

mast weg und zum anderen der (dynamisch) beim Gabelstapler einstellbare Neigungswinkel des Hubmastes selbst zu berücksichtigen.

Demnach ist eine Funktionsintegration mittels Kamerasensor am Gabelstapler durchaus realistisch, wenn auch die Anbringung der Kamera sehr genau zu betrachten ist. Hier ist ein Kompromiss zwischen den zu realisierenden Sensorfunktionen und der jeweils mit nur einer Kamera erreichbaren Qualität zu finden.

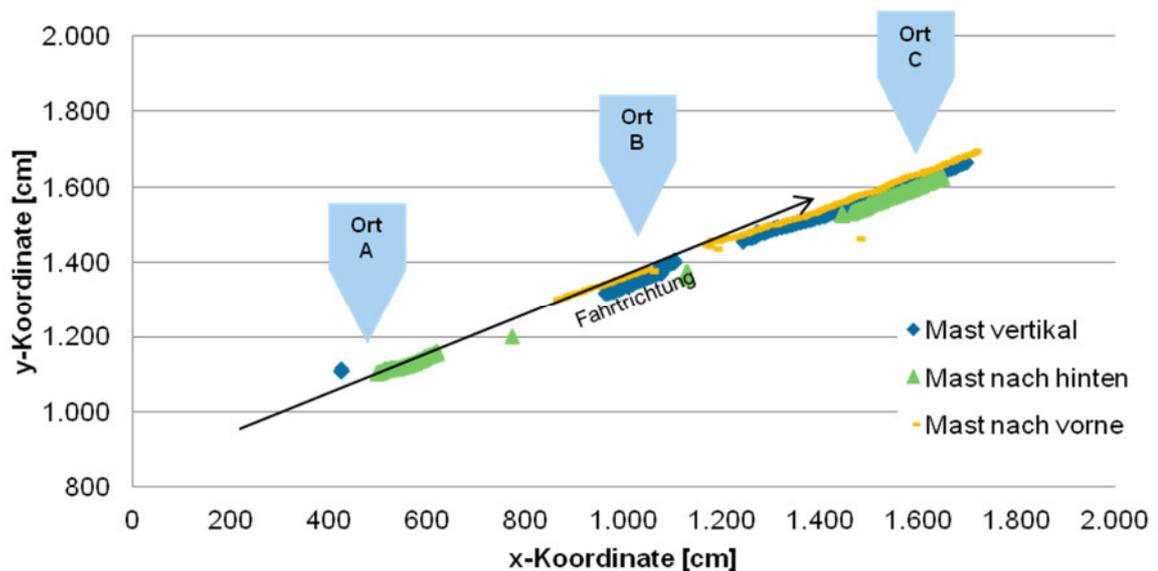


Abbildung 6-22: Kontinuität der Lokalisierung bei funktionsintegrierter Lokalisierung

#### 6.2.4 Gabelhubhöhen-Erkennung

Im Rahmen der Evaluierung der Gabelhubhöhen-Erkennung werden praxisnahe Versuche in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml durchgeführt. Dazu wird eine Kamera mit einer Auflösung von 1,4 MP und einer Bildwiederholrate von maximal 30 Bildern pro Sekunde verwendet. Die Belichtungszeit wird dynamisch angepasst.

Der Höhenmarker weist eine Höhe und Breite von je 6,4 cm auf. Ein größerer Marker lässt sich am Gabelträger des verwendeten Staplers nicht anbringen, ohne dass er die Fahrzeugkonturen überragt und damit in der Praxis schnell beschädigt werden würde. Der Neigungsmarker hat wie in Kapitel 5.5.2 beschrieben eine Größe von 2,45 cm x 2,45 cm.

Zur Evaluierung wird wie bei der Evaluierung der Gabel-belegt Erkennung (Kapitel 6.2.1) zwischen drei Orten A, B und C verfahren. An Position A (Regallagerplatz, 2. Ebene) wird ein Ladehilfsmittel (LHM) aufgenommen. Zwischen den Punkten A und

B wird das Fahrzeug mit konstanter, subjektiv gewählter Geschwindigkeit verfahren. An Ort B (Rollenbahn) fährt das Fahrzeug den Lagerplatz in der erforderlichen Höhe an, um dann wieder zurück zu setzen und den Hub auf Normalstellung zu nehmen. Von B wird die Fahrt zu C (Bodenlagerplatz) mit konstanter Geschwindigkeit fortgesetzt, um dann an C ebenso eine Ein-/Auslagerung vorzunehmen. Die Fahrt wird anschließend wieder zu A fortgesetzt und der bisherige Ablauf fünf Mal wiederholt. Die Fahrgeschwindigkeit wird subjektiv langsam (vorsichtige Fahrt mit geringer Geschwindigkeit) oder schnell gewählt. Alle Versuche werden zudem bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen am Mittag und am Abend immer bei aktivierter Deckenbeleuchtung durchgeführt (vgl. Tabelle 6-5).

**Tabelle 6-5: Variable Versuchsparameter**

	Tageszeit	Geschwindigkeit	Ausführungen
<b>Versuch 1</b>	Mittag	Langsam	5
<b>Versuch 2</b>	Mittag	Schnell	5
<b>Versuch 3</b>	Abend	Langsam	5
<b>Versuch 4</b>	Abend	Schnell	5

### Leistungsfähigkeit

Am Tag (bei guten Lichtverhältnissen) ist kein signifikanter Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Genauigkeit der Hubhöhen-Bestimmung festzustellen.

Im oberen Hubbereich ( $> 2\text{m}$ ) steigt die Ungenauigkeit der Hubhöhenbestimmung generell stark an. Die steigende Distanz der Kamera zum Marker führt dazu, dass der Marker im Bild kleiner wird. Geringfügige Fehlmessungen (z. B. durch geringfügig falsche Kantenbestimmung beim Marker) haben dann einen relativ großen Einfluss und verfälschen damit die Messung erheblich. Besonders Fehlmessungen aufgrund von Gegenlicht durch Deckenlampen sind problematisch (vgl. Abbildung 6-24), da deren Leuchterscheinung im Bild den Marker teilweise überstrahlen und regelrecht „zusammenschmelzen“ kann (dunkler Marker neben hellem Licht). Ist der Marker hingegen im Bild sehr groß, also bei geringer Hubhöhe, machen sich kleinere Fehler kaum bemerkbar, daher sind die Messungen im unteren Bereich genauer. Im unteren Bereich ist der Marker allerdings unscharf dargestellt, da nur ein bestimmter

Bereich scharf gestellt werden kann. Die sich daraus ergebenden Abweichungen sind jedoch gering.

Bei schneller Fahrt am Abend (vgl. Abbildung 6-25) sind die bezüglich der Lichtverhältnisse problematischen Zonen (Gegenlicht der Deckenlampen vor sonst dunklem Hintergrund), in denen die Hubhöhe unzureichend bestimmt wird, deutlich kürzer im Bild.

Dies hat zwei Vorteile:

1. Die Belichtungszeit wird in diesen Bereichen nicht oder nicht vollständig angepasst. Überstrahlt die Lampe nun den Marker und ist dieser dementsprechend nicht sichtbar, kommt es zu keiner (erfolgreichen) Messung und damit auch zu keiner Fehlmessung (stattdessen wird keine Änderung der Hubhöhe angenommen).
2. Es werden generell in einem solchen Bereich weniger problematische Messwerte bestimmt, deren Anteil am gesamten Prozess sinkt also, die Prozesszeit bei Aufnahme und Abgabe des Ladegutes überwiegt.



Abbildung 6-23: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Langsame Fahrt am Mittag)

## 6 Evaluierung des Software-Frameworks und der Demonstratoren

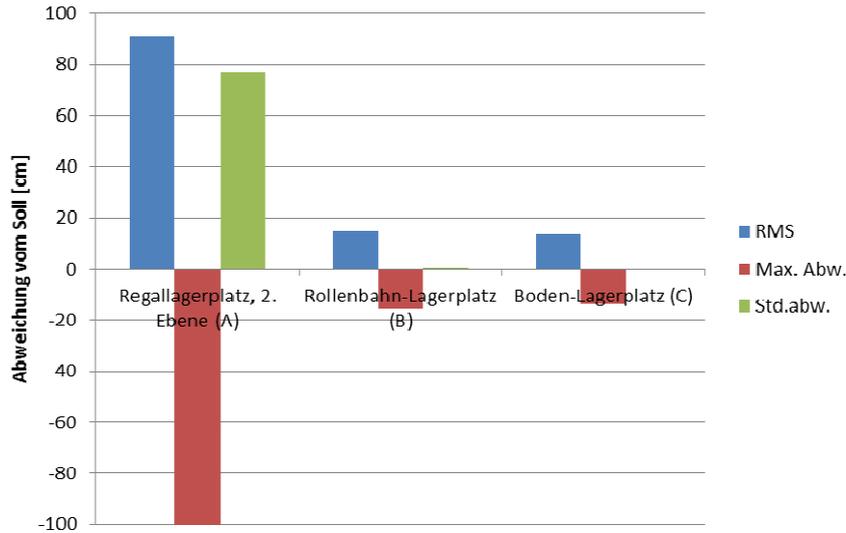


Abbildung 6-24: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Langsame Fahrt am Abend)

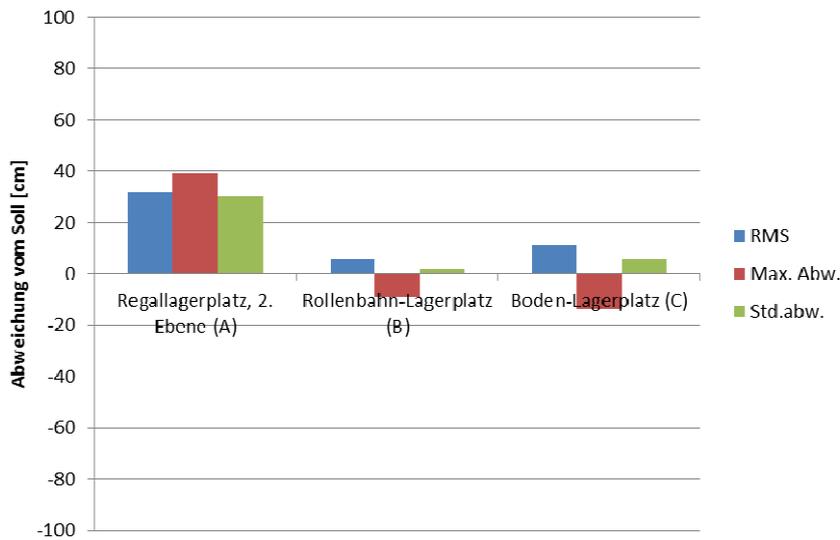


Abbildung 6-25: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Schnelle Fahrt am Abend)

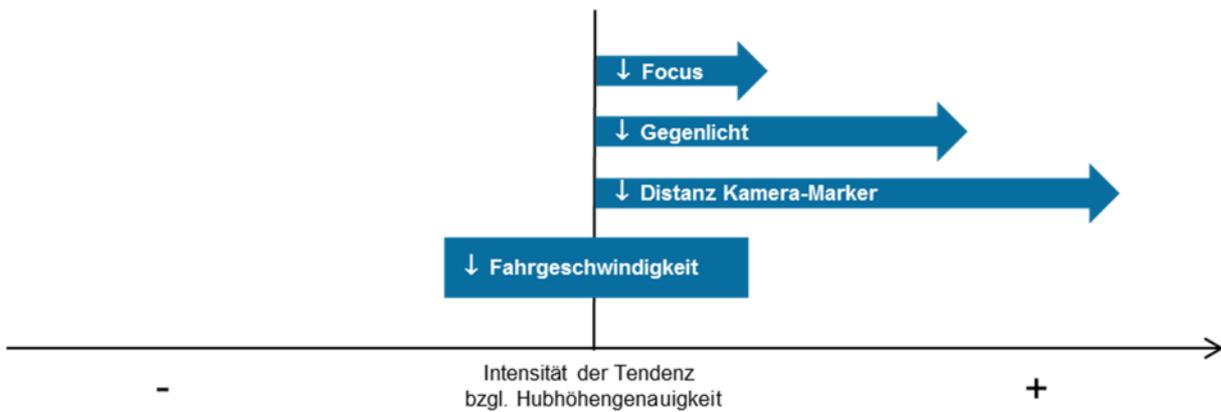


Abbildung 6-26: Tendenz der Einflussfaktoren auf die Hubhöhen Genauigkeit

Die theoretisch sehr exakt mögliche Hubhöhen-Bestimmung zeigt sich in der Praxis mit dem aktuellen Aufbau nicht ausreichend für eine automatische Hubhöhenvorwahl, eignet sich aber zur Unterscheidung von Lagerfächern mit einer Fachhöhe  $> 1$  m. In Abbildung 6-26 werden die wichtigsten Einflussgrößen auf die Genauigkeit der Hubhöhe hinsichtlich ihrer tendenziellen qualitativen Wirkung eingeordnet.

### Robustheit

Die Hubhöhenbestimmung leidet in seltenen Fällen, meist bei Hubhöhen  $> 2$  m und gleichzeitigem Gegenlicht in der Nähe des Markers, unter kurzzeitigen Abrissen in der Marker-Erkennung (siehe Abbildung 6-27). Wird kein Marker erkannt, wird keine Änderung der Hubhöhe angenommen, daher haben Messungen ohne bzw. mit nur sehr kurzer Unterbrechung die höchste Genauigkeit.

Beim schnellen Absenken der beladenen Gabeln aus großer Höhe kann der Mast kurzzeitig in Schwingung versetzt werden. Je nach Stärke dieser Schwingung und der aktuellen Belichtungszeit wird das Bild dadurch verschwommen aufgenommen und der Marker möglicherweise kurzzeitig nicht gefunden – auch dadurch können sich entsprechende Aussetzer ergeben.

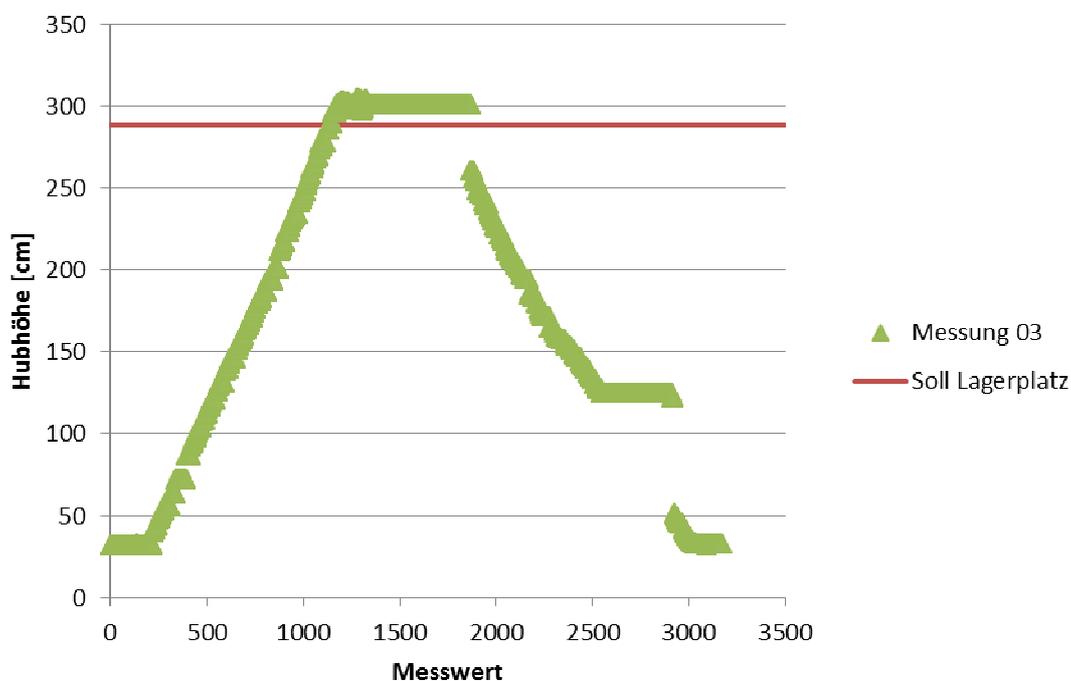


Abbildung 6-27: Hubverlauf bei einer Auslagerung an Platz A (Langsame Fahrt am Mittag)

### **Mögliche Optimierungsmaßnahmen**

Sowohl Robustheit als auch Genauigkeit lassen sich erheblich steigern, indem die Kamera nach unten zeigend am Gabelträger und mehrere Marker in unterschiedlichen Höhen am Hubgerüst angebracht werden. Gemessen werden kann dann die Distanz zum jeweils am höchsten liegenden, sichtbaren Marker. Diese Distanz ist im schlimmsten Fall erheblich geringer als in der aktuellen Anordnung. Außerdem besteht kein Problem mehr mit zu viel Gegenlicht der Deckenlampen. Wesentlicher Nachteil dieses Ansatzes ist allerdings, dass eine dynamische Hubmastverkabelung notwendig wird und keine Funktionsintegration mit der Lokalisierung möglich ist.

Soweit möglich könnte der Einsatz größerer Marker die Genauigkeit der Messungen verbessern. Die aktuell verwendeten Markergrößen befinden sich am unteren Limit des noch Erkennbaren (Nyquistfaktor  $k \approx 3$ ), am Versuchsstapler können auf Grund fehlenden Bauraums allerdings keine größeren Marker angebracht werden.

Die Robustheit ließe sich durch Verwendung einer aktiven Lichtquelle (z. B. ein Leuchtring um das Objektiv) verbessern. Ein Tracking der Marker im Bild könnte zumindest eingeschränkt bei der Bildverbesserung helfen, da bei Kenntnis des Ortes eines Markers dieser Bereich geeignet aufbereitet werden kann.

Die Kamera kann prinzipiell weiter oben am Hubmast befestigt werden, um den maximalen Abstand zwischen Kamera und Marker zu reduzieren. Dies hätte allerdings einen größeren Totbereich über dem Boden zur Folge.

Zusätzlich würde die Eliminierung unnötiger, im Demonstrator zwar für die Bestimmung der Pose berücksichtigter aber für die Bestimmung der Hubhöhe nicht relevanter Freiheitsgrade, die Genauigkeit der Hubhöhenermittlung steigern, indem der Einfluss potentieller Messfehler reduziert wird.

### **Funktionsintegration**

Eine Funktionsintegration der Gabelhubhöhen-Erkennung mit der Lokalisierung kann wie in Kapitel 6.2.3 beschrieben umgesetzt werden.

## **7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick**

### **7.1 Zusammenfassung**

Effiziente und wandelbare Transportprozesse erfordern eine weitere (Teil-) Automatisierung des Transportmittels sowie technische Lösungen zur Zustandserfassung für die echtzeitbasierte Steuerung von Prozesses und Fahrzeug. In diesem Projekt erfolgt die Analyse entsprechender Anforderungen an eine Kamera mit anschließender Bildverarbeitung. Sie stellt einen in diesem Projekt zu bestätigenden technischen Ansatz für die erforderliche wandelbare Zustandserfassung im innerbetrieblichen Transportprozess am Gabelstapler dar.

Durch die Betrachtung von typischen Einsatzszenarien am Gabelstapler werden Rahmenbedingungen für die Zustandserfassung erfasst und in Anforderungen an das Kamerasystem und die Bildverarbeitung übersetzt. Hierbei steht im Vordergrund, die Anforderungen dahingehend festzulegen, dass eine Vielzahl logistischer Anwendungen realisiert werden kann. Entsprechend erfolgt die Auswahl einer Industriekamera.

Das Software-Framework ermöglicht eine effiziente Bildverarbeitung, durch die schlussendlich erst die Sensorfunktionalität der Kamera hergestellt wird. Hierzu wird bereits im Entwurf des Software-Frameworks auf eine wandlungsfähige Nutzung der Bildverarbeitung Wert gelegt, indem zur Bildung von Bildverarbeitungsvorgängen auf das Pipes-and-filter Konzept gesetzt wird. Damit wird ermöglicht, für einzelne Sensorfunktionen gleiche Verarbeitungsschritte zusammenzuführen und somit Synergien im Rechenaufwand zu erzielen. Ferner wird hierdurch der Grundstein für eine Funktionsintegration in der Kamera durch die Anwendung des Software-Frameworks gelegt.

Ebenso bietet eine modulare Anbindung der Kamerahardware über etablierte Schnittstellenstandards eine herstellerunabhängige Steuerung und Parametrisierung des Kamerasystems in seinen relevanten Grundfunktionen wie z. B. der Belichtungszeit.

Um eine schnelle und für die weitere Umsetzung vollständige Funktionalität der Bildverarbeitung zu realisieren, werden Open Source Bildverarbeitungsbibliotheken wie z. B. OpenCV, Zxing und Aruco integriert.

Die Konzeption und Umsetzung von Sensorfunktionen in Demonstratoren dient dem Nachweis der technischen Machbarkeit des Kameraeinsatzes am Gabelstapler zur wandlungsfähigen Zustandserfassung. Hierzu werden bereits etablierte Funktionalitäten in den Demonstratoren Gabel-belegt Erkennung, NVE-Erkennung, Lokalisierung und Gabelhubhöhen-Erkennung abgebildet, die bisher allerdings keine Umsetzung im Rahmen des hier verfolgten technischen Konzeptes erfahren. Die Zusammenführung dieser Sensorfunktionen in einer Technologie dient einer höheren Wirtschaftlichkeit und Flexibilität in der Zustandserfassung. Die Funktionalität der Demonstratoren wird abschließend durch teilsynthetische und praxisnahe Versuche evaluiert.

Damit ergibt sich eine Vielzahl an Teilergebnissen, die den Projektverlauf definieren. Tabelle 7-1 stellt die verfolgten Teilergebnisse dar, setzt sie in Bezug zu den jeweiligen Arbeitspaketen und nennt den erreichten Umsetzungsstand im nunmehr abgeschlossenen Projekt „Das Staplerauge“.

**Tabelle 7-1: Überprüfung der Umsetzung der im Forschungsantrag genannten Teilergebnisse**

	Erläuterung	Arbeitspaket	Umsetzungsstand
<b>Anforderungskatalog</b>	Es ist eine Liste an Anforderungen zu erstellen, die durch die optische Sensorik am FFZ erfüllt werden sollen. Hierbei ist auf eine universelle Einsetzbarkeit zu achten, eine Eigenschaftsabsicherung soll anhand typischer Einsatzszenarien erfolgen.	<b>AP 1</b>	✓ (vgl. Kapitel 3)
<b>Auswahl Hardware</b>	Es gilt eine den Anforderungen konforme Hardware zur optischen Erfassung zu bestimmen.	<b>AP 2</b>	✓ (vgl. Kapitel 5.1.4)
<b>Entwicklung Software-Framework</b>	Das Software Framework bietet einen Zugang zur Hardware-Einheit und gibt eine Struktur vor, die es Entwicklern ermöglicht, ohne tiefe Bildverarbeitungskennnisse kamerabasierte Sensorfunktionen umzusetzen.	<b>AP3</b>	✓ (vgl. Kapitel 4)
<b>Bereitstellung Software-Bibliotheken zur Bildverarbeitung</b>	Mit dem Software-Framework ist zur Ausübung der Bildverarbeitungs-aussage auf Software-Bibliotheken zurückzugreifen, um schnell einen hohen Funktionsumfang zu realisieren.	<b>AP4</b>	✓ (vgl. Kapitel 4)
<b>Konzepterstellung u. Umsetzung Gabel-</b>	Nutzung des digitalen Kamerabildes zur Detektion einer Gabelzinken-Belegung bzw. ei-	<b>AP5</b>	✓ (vgl. Kapitel 5.2)

<b>Belegt-Sensor</b>	ner Änderung des Belegungs-Zustandes.		
<b>Konzepterstellung u. Umsetzung Hubhöhenbestimmung</b>	Nutzung des digitalen Kamerabildes zur Bestimmung der Gabelzinkenhubhöhe über dem Boden	<b>AP5</b>	✓ (vgl. Kapitel 5.5)
<b>Konzepterstellung u. Umsetzung NVE-Erkennung</b>	Nutzung des digitalen Kamerabildes zur Bestimmung der Warenidentität durch die Bildanalyse des auf dem Warenbegleitschein abgebildeten NVE-Codes.	<b>AP6</b>	✓ (vgl. Kapitel 5.3)
<b>Konzepterstellung Lokalisierung</b>	Erarbeitung eines Verfahrens für die markerbasierte Lokalisierung des FFZ im Raum durch die Nutzung des digitalen Kamerabildes von der Hallendecke.	<b>AP7</b>	✓ zzgl. Umsetzung (vgl. Kapitel 5.4)

Somit bietet das Projekt „Das Staplerauge“ durch die Implementierung des Software-Frameworks, dessen Anwendung in Demonstratoren und deren Evaluierung eine quantifizierte Darstellung der Eignung des technischen Ansatzes der Bildverarbeitung. Darüber hinaus ist es möglich, weitere Entwicklungspotenziale und resultierende Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung des technischen Ansatzes zur Serienreife zu formulieren.

## 7.2 Nutzung und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Grundlegend für die industrielle Anwendungsmöglichkeit der Projektergebnisse ist die Open Source Bereitstellung des im Projekt entwickelten Software-Frameworks unter einer BSD-ähnlichen Lizenz. Hierbei enthält das Software-Framework auch die umgesetzten Filterketten der betrachteten Demonstratoren, wobei zum praktischen Nachvollzug der Funktionalität der an der Forschungsstelle verbleibende Versuchsstapler mit getätigten Aufbauten für die Demonstratoren Interessierten zur Begutachtung zur Verfügung steht. Hiermit ist der Grundstein für eine Weiterentwicklung der Sensorfunktionalitäten bzw. Ident-Funktionen für die industrielle Anwendung gelegt. Das modular gestaltete Software-Framework bietet darüber hinaus die Möglichkeit softwaretechnischer Erweiterungen (z. B. eine Visualisierung), um ein noch breiteres Entwicklungspublikum anzusprechen. Insbesondere auf Grund der Rückmeldung von Unternehmen im Projektbegleitenden Ausschuss besteht die Erwartung, dass dieser technische Ansatz der kamerabasierten Funktionsintegration zur Zustandserfassung im flurförderzeuggeführten Transportprozess eine Verbreitung im industriellen Einsatz erfährt.

Um diese Verbreitung herbeizuführen, ist für die in diesem Projekt getätigte Entwicklung des Software-Frameworks zwischen folgenden Zielgruppen zu unterscheiden:

- **Systemintegratoren:** Ihre Aufgabe ist i.d.R. die Nachrüstung von Flurförderzeugen mit Sensorsystemen zur Zustandserfassung unter der Berücksichtigung anwendungsspezifischer Gegebenheiten. Das Software-Framework liefert eine vollständige Entwicklungsumgebung und Basisfunktionalität zum Management der Bildverarbeitung, mit der die weiter integrierte Algorithmenbibliothek zur Bildverarbeitung projektspezifisch genutzt werden kann. Die Demonstratoren des Projekts „Das Staplerauge“ liefern hierzu erste Implementierungen, die flexibel an örtliche Gegebenheiten bei Bedarf adaptiert werden können. Der Systemintegrator erhält hiermit eine leicht zu beherrschende Entwicklungsbasis für neue, innovative Lösungen zur Zustandserfassung, die diesem KMU-geprägten Industriezweig ermöglicht, neue Produkte anzubieten und Märkte zu erschließen.
- **Flurförderzeug-OEM:** Hersteller setzen bereits auf eine Vielzahl an Sensorsystemen, die sich durch eine hohe Integration in die Fahrzeugsteuerung auszeichnen und zum Teil redundant vorhanden sind, um eine z. B. in Maschinenrichtlinien geforderte Funktionssicherheit zu bieten. Dies trifft nicht nur auf manuell geführte Flurförderzeuge zu, sondern insbesondere auch auf automatisierte Systeme wie z. B. Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF). Die in diesem Projekt getätigte Entwicklung bietet, einen technischen Ansatz, der in entsprechende Fahrzeuge bereits ab Werk eine Integration erfahren kann und somit eine neuartige Möglichkeit bietet weitere Zustandserfassungsaufgaben am Fahrzeug bildbasiert zu bewerkstelligen. Entsprechend positiv fällt die Rückmeldung beteiligter Unternehmen im Projektbegleitenden Ausschuss vor allem hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der kamerabasierten, funktionsintegrierten Zustandserfassung aus.
- **Industrielle Anwender:** Hier sind insbesondere Betreiber von Staplerflotten und Lagerbetreiber hervorzuheben, die mit ihrem Bedürfnis nach effizienten und sicheren Transportprozessen Lösungen, wie sie in diesem Projekt entwickelt werden, aktiv nachfragen. Es ist zu erwarten, dass für einzelne Sensorfunktionen die Anforderungen an die Hardware (Kamerasystem) zu reduzieren sind, so dass insbesondere kostengünstige Kamerasysteme in Verbindung mit dem entwickelten Software-Framework einen breiten Einsatz erfahren können. Mit wachsendem Angebot an Sensorfunktionen durch Systemintegratoren und auch Flurförderzeug-OEMs wird einem wachsenden Bedürfnis

industrieller Anwender nach kostengünstigen Assistenzsystemen begegnet. Entsprechend der Analysen und Diskussionen im Projektbegleitenden Ausschuss ist zu erwarten, dass industrielle Anwender auch die Rolle eines Pilotanwenders übernehmen werden.

Hiermit ist zu erkennen, dass mit dem Projektergebnis ein wichtiger Nachweis zur technischen Machbarkeit des verfolgten Ansatzes der funktionsintegrierenden kamerabasierten Zustandserfassung realisiert ist. Ferner ist das entwickelte Software-Framework die entscheidende Grundlage für die Entwicklung innovativer Zustandserfassungssensoren.

### **7.3 Ausblick**

Im Zuge des technischen Fortschritts durch die Evolution von Kamera-, Rechen- und Bussystemen ist in Zukunft mit günstigen Veränderungen zu rechnen, die in diesem Projekt erfahrene Zielkonflikte und Einschränkungen abschwächen werden.

So ist an erster Stelle das Kamerasystem zu nennen, dessen fortschreitende Miniaturisierung Probleme in der Wahl des Anbringungsortes am Flurförderzeug erleichtern wird. Gerade für die Integration am Gabelträger und in der Gabelzinke ist hier mit einer günstigen Entwicklung zu rechnen, die auch durch eine höhere Verbreitung von Kamerasystemen im Consumer-Bereich gefördert wird. So finden Kameras in der Vergangenheit vermehrt ihren Einsatz in PC-Spielkonsolen (z. B. Microsoft Kinect), die sich durch einen starken Skaleneffekt und somit auch sinkenden Komponentenpreisen auszeichnen. Ferner setzen entsprechende Kamerasysteme nicht alleine auf die 2D-Bilderfassung, sondern ermöglichen ebenso leistungsfähige und kosteneffiziente 3D-Bilderfassungen. Damit werden neuartige Kamerasysteme in Zukunft eine Vielzahl weiterer Sensorfunktionen ermöglichen können, deren Umsetzung am Gabelstapler durch die Nutzung des bestehenden Software-Frameworks maßgeblich unterstützt wird. Insbesondere eine zusätzliche 3D-Bilderfassung wird es ermöglichen, durch Abstandsbetrachtungen zusätzliche Sicherheitsfunktionen zu realisieren.

Weiterhin ist auch mit einer gesteigerten Leistungsfähigkeit der Kamerasysteme zu rechnen, die sich durch höhere optische Auflösungen, höhere Bildraten, flexiblere Belichtungssteuerungen und höhere Lichtempfindlichkeit auszeichnet. Als Beispiel sind hier vermehrt auf dem Markt erscheinende Hochgeschwindigkeitskameras zu

nennen, die bereits eine deutlich leistungsfähigere Warenidentifikation mittels NVE-Erkennung realisieren, als es in diesem Projekt durch die gewählte Standard-Industriekamera möglich ist [BÄR-2014].

An zweiter Stelle wird von Leistungssteigerungen in der Bildverarbeitung durch neuartige, intelligente Bildverarbeitungsalgorithmen basierend auf Methoden der künstlichen Intelligenz in Verbund mit höheren zur Verfügung stehenden Rechnerleistungen auszugehen sein. Entsprechende Algorithmen werden es erleichtern, die Zustandserfassung in heterogenen und zeitlich instabilen Einsatzbereichen zu realisieren, die insbesondere im Lagerbereich und somit am Gabelstapler vorzufinden sind.

An dritter Stelle ist die Fortentwicklung der Datenübertragung von Bilddaten zu nennen, die durch Bussysteme bewältigt wird. Diesem Projekt stehen Kamerasysteme zur Verfügung, die auf einen Ethernet-Bus mit limitierter Datenübertragungskapazität setzen. In jüngster Zeit sind vermehrt USB 3.0 Kamerasysteme als Neuerscheinung auf dem Markt zu beobachten, die durch eine höhere Bildübertragungsrate tendenziell die Verwendung von höher auflösenden Bildern mit höherer Bildrate in Echtzeit ermöglichen. Insbesondere für die Lokalisierung, sofern höhere Ansprüche an die Lokalisierungsgenauigkeit gestellt werden, ist diese Entwicklung von Vorteil.

Diese Entwicklungen begünstigen im Allgemeinen den breiteren Einsatz von Kamerasystemen als Sensortechnologie zur Realisierung von Erfassungsaufgaben, die im Besonderen die Zustandserfassung am Gabelstapler im innerbetrieblichen Transportprozess unterstützen. Damit bietet die Kamerasensorik für innovative Systemintegratoren und weitere Sensorhersteller ein herausforderndes und vielversprechendes Aktionsfeld für neue Produkte und Märkte, wobei das Projekt „Das Staplerauge“ durch das Software-Framework eine relevante Hilfestellung liefert und durch den Nachweis der technischen Machbarkeit zur Risikominimierung in der Produktentwicklung beiträgt.

## Literaturverzeichnis

- [ACA-2013] Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Herausgegeben von: Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften-2013
- [AIA-2014a] AIA: AIA - Vision Online - Vision Technology. Herausgegeben von: AIA. Ann Arbor, Michigan 48108 USA: AIA, 2014. URL: <http://www.visiononline.org/> (Aufruf am 11.04.2014).
- [AIA-2014b] AIA: Vision Standards. Herausgegeben von: AIA. Ann Arbor, Michigan 48108 USA: AIA, 2014. URL: <http://www.visiononline.org/vision-standards.cfm> (Aufruf am 11.04.2014).
- [ARN-2006] Arnold, D.: Intralogistik - Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Berlin: Springer Verlag-2006
- [ARN-2008] Arnold, D.; Furmans, K.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.: Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg-2008. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-72929-7>
- [BAR-2008] Bartneck, N.; Klaas, V.; Schönherr, H.: Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID - Grundlagen, Problemlösungen und Anwendungsbeispiele. 1 Auflage. Erlangen: Publicis Corporate Publishing; Publicis Corporate Publ.Siemens AG-2008
- [BÄR-2014] Bär, G.: Wann ist der Einsatz von Kameratechnik sinnvoller als Laserscanner. Herausgegeben von: Vitronic Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH Vitronic Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH-2014. URL: <http://www.vitronic.de/news/fachbeitraege/kamera-vs-scanner/> (Aufruf am 15.01.2014).
- [BOR-2011] Borstell, H.; Kirch, M.; Richter, K.: Echtzeitnahe Prozessfreigabe durch bildbasierte Gabelstaplerortung. In: Verein Deutscher Inge-

- nieure e.V. (Hrsg): 16. Flurförderzeugtagung: Verein Deutscher Ingenieure e.V.-2011
- [BRA-2008] Bradski, G.; Kaehler, A.: Learning OpenCV. 1st ed Auflage. Sebastopol (CA): O'Reilly, 2008.
- [BUS-1996] Buschmann, F.: Pattern-oriented software architecture. Chichester: Wiley, op. 1996.
- [BUT-2008] Butz, S.; Kany, H.-P.; Stöckl, K.; Zelt, F.: Unternehmer-Handbuch Gabelstapler. Herausgegeben von: Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution. Mannheim: Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution-2008 (Aufruf am 09.01.2013).
- [CHA-2005] Chai, D.; Hock, F.: Locating and Decoding EAN-13 Barcodes from Images Captured by Digital Cameras. In: 2005 5th International Conference on Information Communications & Signal Processing, S. 1595–1599.
- [CUM-2007] Cummins, M.; Newman, P.: Probabilistic Appearance Based Navigation and Loop Closing. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): International Conference on Robotics and Automation: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)-2007
- [DEL-2010] Delfmann, W.; Dangelmaier, W.; Günthner, W.; Klaus, P.; Overmeyer, L.; Rothengatter, W.; Weber, J.; Zentes, J.: Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin. In: Strukturwandel in der Logistik - Wissenschaft und Praxis im Dialog (-2010), S. 3–10.
- [DEM-1995] DeMenthon, D.; Davis, L. S.: Model-based object pose in 25 lines of code. In: Kluwer Academic Publishers (Hrsg): International Journal of Computer Vision. Boston: Kluwer Academic Publishers-1995, S. 123–141.
- [DEM-2011] Demant, C.; Springhoff, A.; Streicher-Abel, B.: Industrielle Bildverarbeitung - Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. 3., aktualisierte Aufl Auflage. Heidelberg [u.a.]: Springer-2011
- [DIN 5031-7] Norm DIN 5031 Blatt 7:1984: Strahlungsphysik im optischen Be-

- reich und Lichttechnik - Benennung der Wellenlängenbereiche. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 8373] Norm ISO 8373:22.03.2011: Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN 1726-1] Norm DIN EN 1726 Teil 1:25.11.1999: Sicherheit von Flurförderzeugen - Teil 1. Deutsche Norm. Berlin: Beuth Verlag.
- [DOD-2010] Dodel, H.; Häupler, D.: Satellitennavigation. 2 Auflage. Heidelberg: Springer Verlag-2010
- [ECL-2004] Eclipse Foundation: Eclipse Public License, 2004. URL: <http://www.eclipse.org/legal/epl-v10.html>
- [ECL-2014] Eclipse Foundation: Eclipse. Herausgegeben von: Eclipse Foundation, 2014. URL: <http://www.eclipse.org>
- [EMV-2009] EMVA: GenICam Standard - Generic Interface for Cameras. Herausgegeben von: EMVA 2, 2009.
- [EUR-2014] European Pallet Association e.V.: European Pallet Association e.V. Herausgegeben von: European Pallet Association e.V. Düsseldorf, Germany, 2014 (Aufruf am 11.04.2014).
- [EVE-2005] Evers, L.; Bijl, M. J. J.; Marin-Perianu, M.; Marin-Perianu, R.; Havinga, P. J. M.: Wireless Sensor Networks and Beyond - A Case Study on Transport and Logistics. Technical Report. Enschede: Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente-2005
- [FIA-2010] Fiala, M.: Designing Highly Reliable Fiducial Markers. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jg. 32 (-2010)7, S. 1317–1324.
- [FML-2013] Bigontina, A.: Marker-based absolute 3D positioning with a computer vision system. Interdisziplinäres Praktikum; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München-2013. Betreut durch Hohenstein, Frank.
- [FML-2014] Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der TU München: Logistikkompodium - Begriff Lokalisierungssystem. Her-

ausgegeben von: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der TU München. Garching: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der TU München-2014. URL: <http://serverfml.fml.mw.tu-muenchen.de/Kompendium/index.php?title=Lokalisierungssystem> (Aufruf am 04.02.2014).

- [FUE-2008] Fuentes, J. C. M.; Millner, H.; Vossiek, M.: A Novell Wireless Forklift Positioning System for Indoor and Outdoor Use. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); Kaiser, T.; Jobmann, K.; Kyamakya, K. (Hrsg): 5th Workshop on Positioning, Navigation, and Communication 2008 (WPNC'08). Hannover: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)-2008, S. 219–227.
- [FUH-2010] o.V.: Mehr als nur Funktionseinheit - Torsteuerung als Schlüssel zum Energie sparen und für ungehinderten Materialfluss. In: f+h Fördern und Heben (-2010)5, S. 180–181.
- [GAL-2009] Gallo, O.; Manduchi, R.: Reading Challenging Barcodes with Cameras. In: Proceedings / IEEE Workshop on Applications of Computer Vision. IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Jg. 2009 (2009), 7-8, S. 1–6.
- [GAO-2003] Gao, X.-S.; Hou, X.-R.; Tang, J.; Cheng, H.-F.: Complete solution classification for the perspective-three-point problem - Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence-2003, S. 930–943.
- [GAR-1998] Garibotto, G.; Masciangelo, S.; Bassino, P.; Coelho, C.; Pavan, A.; Marson, M.: Industrial exploitation of computer vision in logistic automation: autonomous control of an intelligent forklift truck. In: Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)-1998, S. 1459–1464.
- [GS1-2009] Hohenecker: EPC/ RFID-Transportetikett. Köln: GS1 Germany GmbH.GS1 Germany GmbH-2009

- [GS1-2013] GS1 Austria, GS1 Germany und GS1 Schweiz: Allgemeine GS1 Spezifikationen. Herausgegeben von: GS1 Austria, GS1 Germany und GS1 Schweiz GS1, 2013. URL: <http://www.gs1.ch/docs/default-source/gs1-system-document/genspecs/genspec-kapitel5.pdf> (Aufruf am 11.04.2014).
- [GÜN-2010a] Günthner, W.; Hohenstein, F.; Fischer, R.: Forschungsprojekt zur integrierten Ortung von Flurförderzeugen. In: Logistik für Unternehmen (-2010)1-2, S. 60–63.
- [GÜN-2010b] Günthner, W.; Ten Hompel, M.: Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin: Springer-2010
- [GÜN-2012] Günthner, W.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München-2012
- [HAR-2010] Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge, UK, New York: Cambridge University Press-2010
- [HEI-2006] Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Dissertation; Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München-2006. Betreut durch Günthner, Willibald.
- [HEI-2012] Heißmeyer, S.; Overmeyer, L.; Müller, A.: Indoor Positioning of Vehicles using an Active Optical Infrastructure. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Proceedings on the 3rd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 2012 (IPIN): Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)-2012
- [HES-2009] Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion - Ausführung - Anwendung. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner-2009 erschienen 2008
- [HEU-2011] Heuberger, A.: BLACKFIR 2.4. Herausgegeben von: Heuberger, A. Erlangen: Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, 2011.

URL:

[http://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/dokumente/In/Bla ckfir\\_2.4\\_2012.pdf](http://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/dokumente/In/Bla ckfir_2.4_2012.pdf) (Aufruf am 11.04.2014).

- [HOH-2012] Hohenstein, F.; Günthner, W.: Anforderungen und Fähigkeiten gegenwärtiger Stapler-Lokalisierung. In: Bruns, R. (Hrsg): Tagungsband. Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität-2012, S. 5–21.
- [HOL-1998] Holst, G. C.: CCD Arrays, Cameras and Displays. 2nd ed Auflage. Bellingham: The International Society of Optical Engineering; JCD Pub.; SPIE Optical Engineering. The International Society of Optical Engineering-1998
- [HON-2011] Ho, N.: OpenCV port of 'Robust Pose Estimation from a Planar Target'-2011. URL: <http://nghiaho.com/?p=447> (Aufruf am 03.01.2014).
- [HOR-2004] Horberry, T.; Larsson, T. J.; Johnston, I.; Lambert, J.: Forklift safety, traffic engineering and intelligent transport systems: a case study. In: Applied Ergonomics (-2004)35, S. 575–581.
- [ISO 9241-110] ISO , 9241-110:2006: EN ISO 9241-110. ISO.
- [JÄH-2005] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. 6 Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag-2005
- [JÄH-2005] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. 6., überarbeitete und erw. Aufl Auflage. Berlin: Springer, 2005.
- [JÜN-1989] Jünemann, R.; Daum, M.; Piepel, U.; St. Schwinning: Materialfluss und Logistik - Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin: Springer Verlag-1989
- [JUN-2010] Deierling, A.; Ertl, H.; Höfinghoff, J.-F.; Jungk, A.; neuhäuser, D.; Nitschke, C.; Spengler, S.; Werder, M. von; Overmeyer, L.: Ident-ProLog. Herausgegeben von: Jungk, A.; Overmeyer, L. Hannover: Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Leibniz Universität Hannover-2010 (Aufruf am 27.09.2010).
- [KAN-2010] Kany, H.-P.: Unfallgeschehen und mögliche Präventionsmaßnahmen. In: Materialfluss. Landsberg a.L.: Verlag Moderne Industrie

- GmbH-2010, S. 48–49.
- [KNO-2011] Knoll, M.: Von Aristoteles zu Dewey, 2011. URL: <http://www.mi-knoll.de/128401.html> (Aufruf am 11.04.2014).
- [KÖH-2010] Köhler, J.; Pagani, A.; Stricker, D.: Detection and Identification Techniques for Markers Used in Computer Vision. In: Middel, A.; Scheler, I.; Hagen, H. (Hrsg): Proceedings on the IRTG Workshop Visualization of Large and Unstructured Data Sets. Waden: Dagstuhl Publishing-2010, S. 36–44.
- [KUH-2005] Kuhlin, B.; Thielmann, H.: Real-Time Enterprise in der Praxis - Fakten und Ausblick. Berlin: Springer-2005
- [LAH-2011] Lahres, B.; Rayman, G.: Objektorientierte Programmierung - Das umfassende Handbuch. In: Objektorientierte Programmierung (2011)
- [LEP-2009] Lepetit, V.; Moreno-Noguer, F.; Fua, P.: EPnP: An Accurate  $O(n)$  Solution to the PnP Problem. In: Springer Verlag (Hrsg): International Journal of Computer Vision. New York: Springer Verlag-2009, S. 155–166.
- [LIA-2012] Liard, M.: Understanding RTLS. In: VDC Research-2012
- [LIN-2011] Lin, D.-T.; Lin, C.-L.: Multi-symbology and Multiple 1D/2D Barcodes Extraction Framework. In: Hutchison, D.; Kanade, T.; Kittler, J.; Kleinberg, J. M.; Mattern, F.; Mitchell, J. C.; Naor, M.; Nierstrasz, O.; Pandu Rangan, C.; Steffen, B.; Sudan, M.; Terzopoulos, D.; Tygar, D.; Vardi, M. Y.; Weikum, G.; Lee, K.-T.; Tsai, W.-H.; Liao, H.-Y. M.; Chen, T.; Hsieh, J.-W.; Tseng, C.-C. (Hrsg): Advances in Multimedia Modeling. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 401–410.
- [MAL-2009] Malik, A.: RTLS for dummies. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc.-2009
- [MAN-2009] Mannel, A.: Mautelle Transporte in der Intralogistik - Lösungen für intelligente Objektverfolgung. In: RFID im Blick (-2009)Jahrbuch 2009
- [MAR-2009] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 7 Auflage.

Wiesbaden: Vieweg + Teubner-2009

- [MAU-2008] Mautz, R.: Combination of Indoor and Outdoor Positioning. In: ETH Zürich (Hrsg): Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control & Guidance // 1st International conference on machine control & guidance. Zürich: ETH Zürich-2008, S. 1–9.
- [MAU-2010] Mautz, R.; Tilch, S.: Innenraumpositionierung mit optischen Methoden. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (-2010)7, S. 250–255.
- [MIC-2012] Microsoft Robotics: Kinect Sensor. Herausgegeben von: Microsoft Developer Network, 2012. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh438998.aspx> (Aufruf am 11.04.2014).
- [MIC-2014a] Microsoft: DirectShow (Windows). Herausgegeben von: Microsoft, 2014. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd375454%28v=vs.85%29.aspx> (Aufruf am 11.04.2014).
- [MIC-2014b] Microsoft: Visual Studio. Herausgegeben von: Microsoft Developer Network, 2014. URL: <http://www.visualstudio.com/> (Aufruf am 11.04.2014).
- [MIN-2013] MinGW team: MinGW - Minimalist GNU for WindowsMinGW.org, 2013.
- [ONO-2009] Ôno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Frankfurt, M, New York, NY: Campus-Verl.-2009
- [OPE-2013] opencv dev team: OpenCV API Reference, 2013. URL: [http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural\\_analysis\\_and\\_shape\\_descriptors.html#minarearect](http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html#minarearect) (Aufruf am 11.04.2014).
- [ORA-2014] Oracle Corporation: Java Platform, Standard Edition (Java SE). Santa Clara, California, USA: Oracle Corporation, 2014.
- [OTS-1979] Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transactions on Systems, Man and Cybernetics-1979, S. 62–66.
- [OWE-2013] Owen, S.: zxing. Multi-format 1D/2D barcode image processing

- library, 2013.
- [PRA-2013] Prasse, C.; Weichert, F.: Schlussbericht des AiF-Forschungsvorhabens 16916N. Herausgegeben von: Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. Dortmund, 2013. URL: [https://www.bvl.de/files/441/481/522/578/AiF\\_16916N\\_Schlussbericht.pdf](https://www.bvl.de/files/441/481/522/578/AiF_16916N_Schlussbericht.pdf) (Aufruf am 11.04.2014).
- [QIA-2011] Qian, H.; Wu, X.; Xu, Y.: Intelligent Surveillance Systems. Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V., 2011.
- [SCH-2005] Schreer, O.: Stereoanalyse und Bildsynthese - Mit 6 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer-2005
- [SCH-2006] Schweighofer, G.; Pinz, A.: Robust Pose Estimation from a Planar Target. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence-2006, S. 2024–2030.
- [SCH-2011] Schäfer, R.: Kamerasysteme für die Datenerfassung machen Intralogistik produktiver. Herausgegeben von: Vogel Business Media. Würzburg: Maschinenmarkt-2011. URL: [http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/fertigungsautomatisierung\\_prozessautomatisierung/articles/313266/](http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/fertigungsautomatisierung_prozessautomatisierung/articles/313266/) (Aufruf am 23.09.2013).
- [ŠIM-2011] Šimurda, P.: Barcode Localization in Image. ACM Student Project; Faculty of Information Technology, Brno University of Technology. Brno, Czech Republic, 2011. Betreut durch Herout, Adam.
- [STR-2008] Strang, T.; Schubert, F.; Thöler, S.; Oberweis, R.; Angermann, M.; Belabbas, B.; Dammann, A.; Jost, T.; Kaiser, S.; Kelter, H.; Khider, M.; Krach, B.; Lehner, A.; Noack, T.; Remi, P.; Rippl, M.; Robertson, P.; Wagner, H.-P.; Weber, C.; Wendlandt, K.: Lokalisierungsverfahren. Oberpfaffenhofen: DLR.Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt-2008
- [TRO-2006] Tropf, A.; Chai, D.: Locating 1-D Bar Codes in Dct-Domain. In: 2006 IEEE International Conference on Acoustics Speed and Signal Processing, S. II-741.
- [UCO-2014] University of Cordoba, Aplicaciones de la Vision Artificial: ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on

- OpenCv. Herausgegeben von: University of Cordoba, Aplicaciones de la Vision Artificial University of Cordoba, Aplicaciones de la Vision Artificial-2014. URL: <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26> (Aufruf am 14.01.2014).
- [VDA 4504] VDA 4504-6:6. Oktober 2013: Elektrostatisch ableitendes Kleinladungsträger (KLT)- System. VDA. Berlin: Verband der Automobilindustrie.
- [VDI 2199] Richtlinie VDI 2199:18.01.2007: Empfehlung für bauliche Planungen beim Einsatz von Flurförderzeugen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2510] Richtlinie VDI 2510:31.08.2005: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 3586] Norm VDI 3586:11.2007: Flurförderzeuge: Begriffe, Kurzzeichen, Beispiele. VDI-Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 4451-6] Richtlinie VDI 4451 Blatt 6:28.11.2002: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Sensorik für Navigation und Steuerung. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [WAG-2008] Wachenfeld, S.; Terlunen, S.; Jiang, X.: Robust recognition of 1-D barcodes using camera phones. In: 2008 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), S. 1–4.
- [WAG-2007] Wagner, D.; Schmalstieg, D.: ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices. In: Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop. Graz: Graz Technical University-2007
- [WEI-2010] Weichert, F.; Fiedler, D.; Hegenberg, J.; Müller, H.; Prasse, C.; Roidl, M.; Ten Hompel, M.: Marker-based tracking in support of RFID controlled material flow systems. In: Logistics Research, Jg. 2010 (-2010)
- [YIL-2006] Yilmaz, A.; Javed, O.; Shah, M.: Object tracking. In: ACM Computing Surveys, Jg. 38 (2006)4, S. 13–es.
- [ZIV-2004] Zivkovic, Z.: Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. In: Proceedings of the 17th International

Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004, S. 28–31  
Vol.2.



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Sensorsysteme als Basis für IT-Systeme in produzierenden Unternehmen (nach [ACA-2013])	2
Abbildung 1-2: Methodische Aufteilung des Forschungsvorhabens in drei Teilpakete und neun Arbeitspakete	7
Abbildung 2-1: Bestandteile des Transportsystems [GÜN-2012]	9
Abbildung 2-2: Systemaufbau im Forschungsprojekt ISI-Walk [HEI-2012]	13
Abbildung 2-3: Systemaufbau im Forschungsprojekt CLIPS [MAU-2010]	14
Abbildung 2-4: Beispielbild für die weitere Bestimmung der relativen Lage des Gabelstaplers im Bild, Forschungsprojekt MarLO [BOR-2011]	15
Abbildung 2-5: Modell zur Bilderfassung	22
Abbildung 2-6: Schachbrettmuster zur Kalibrierung einer Kamera [OPE-2013]	27
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Anbringungspunkte für Sensorik	37
Abbildung 3-2: Übersicht betrachteter und favorisierter Anbringungspunkte für die Kamera	39
Abbildung 4-1: Einordnung relevanter Systembestandteile in das Gesamtsystem "Das Staplerauge"	48
Abbildung 4-2: Vereinfachtes Klassendiagramm (die zentralen Komponenten sind eingekreist)	49
Abbildung 5-1: Überblick der betrachteten Anbringungspunkte	59
Abbildung 5-2: Anordnung der Kommunikations- und Energieanbindung	60
Abbildung 5-3: Konstruktionszeichnung der Kamerahalterung mit Schraubverbindung für die Stapleranbringung	61
Abbildung 5-4: Binärbild mit Gabelzinkenkandidaten und ROI (Gabelzinken grün umrandet)	65
Abbildung 5-5: Belegungsmuster nach Abzug des Referenzbildes (links: unbelegt, rechts belegt)	66
Abbildung 5-6: Berechnung der Kennwerte in jedem Abschnitt separat	67
Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Erkennung der Gabelzinken	68
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Gabel-belegt Erkennung	69
Abbildung 5-9: Szenario der NVE-Erfassung	71
Abbildung 5-10: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die NVE-Erkennung	75
	141

Abbildung 5-11: Beispiele für Barcodes und Referenzmarker	78
Abbildung 5-12: Grundprinzip einer Lochkamera	80
Abbildung 5-13: Schematische Darstellung der Bild- und Kamerageometrie im Kontext erforderlicher Transformationen zur Pose Estimation (nach [SCH-2005])	81
Abbildung 5-14: Mittlere Positionsabweichung zzgl. Standardabweichung für verschiedene Verfahrenskombinationen bei einer variierenden Anzahl sichtbarer Marker	84
Abbildung 5-15: Schematische Darstellung der Bildverarbeitungs-Filterkette für die Lokalisierung	86
Abbildung 5-16: Höhenunterschied zwischen Gabelträger und -zinkenspitze bei Mastneigung	87
Abbildung 5-17: FOV mit Hubhöhenmarker (rechts) und Neigungsmarker (links)	88
Abbildung 5-18: Gemessene und konstante Abstände	89
Abbildung 5-19: Rotationsmarker bei $W_{\max}$ (oben), $W_0$ (Mitte) und $W_{\min}$ (unten)	90
Abbildung 6-1: Vorkenntnisse der Probanden des Software-Workshops (Selbsteinschätzung)	96
Abbildung 6-2: Bewertung der Aufgabenangemessenheit	97
Abbildung 6-3: Bewertung der Selbstbeschreibungsfähigkeit	97
Abbildung 6-4: Bewertung der Erwartungskonformität	98
Abbildung 6-5: Bewertung der Fehlertoleranz	99
Abbildung 6-6: Bewertung der Individualisierbarkeit	99
Abbildung 6-7: Anteil false positives und negatives in % der Prozesszeit	101
Abbildung 6-8: Illustration des zeitlichen Verlaufs der Belegt Erkennung bei einer Europalette	102
Abbildung 6-9: Latenzzeit über alle Versuche bei unterschiedlicher Belichtungszeitanpassung (AE)	103
Abbildung 6-10: Transport einer Gitterbox bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach jedem Bild	103
Abbildung 6-11: Transport einer Euro-Palette, bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach jedem Bild	104
Abbildung 6-12: Transport einer Euro-Palette bei langsamer Fahrt und Anpassung der Belichtungszeit nach je 5 Bildern	104
Abbildung 6-13: Testfläche mit 10 NVE-Barcodes in unterschiedlicher Orientierung	107
Abbildung 6-14: Erfolgsquote beim Finden und Lesen der NVE je Versuch	108
Abbildung 6-15: Schattenwurf bei ausschließlich künstlicher Deckenbeleuchtung	109
Abbildung 6-16: Versuchsaufbau teilsynthetischer Versuche	111

---

Abbildung 6-17: Darstellung der gemessenen Positionsabweichung bei verschiedenen Geschwindigkeiten, teilsynthetischer Versuch	112
Abbildung 6-18: Darstellung der heterogenen Bedingungen auf der Fahrstrecke	114
Abbildung 6-19: Darstellung der gemessenen Positionsabweichungen in Fahrt, Praxisversuch	114
Abbildung 6-20: Darstellung der gemessenen Orientierungsabweichung in Fahrt, Praxisversuch	115
Abbildung 6-21: Tendenz der Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsgenauigkeit	116
Abbildung 6-22: Kontinuität der Lokalisierung bei funktionsintegrierter Lokalisierung	117
Abbildung 6-23: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Langsame Fahrt am Mittag)	119
Abbildung 6-24: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Langsame Fahrt am Abend)	120
Abbildung 6-25: Abweichung des Messwertes vom Hubhöhen Soll (Schnelle Fahrt am Abend)	120
Abbildung 6-26: Tendenz der Einflussfaktoren auf die Hubhöhengenaugkeit	120
Abbildung 6-27: Hubverlauf bei einer Auslagerung an Platz A (Langsame Fahrt am Mittag)	121



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht zum Stand der Forschung in der Staplerlokalisierung	17
Tabelle 3-1: Erläuterung der Auswahl favorisierter Anbringungspunkte	39
Tabelle 3-2: Anforderungskatalog NVE-Erkennung	41
Tabelle 3-3: Anforderungskatalog Gabel-Belegt Erkennung	41
Tabelle 3-4: Anforderungskatalog Gabelhubhöhen-Erkennung	42
Tabelle 3-5: Anforderungskatalog Sensorfunktion Lokalisierung	42
Tabelle 3-6: Anforderungskatalog Kamera-Body	43
Tabelle 3-7: Anforderungskatalog Objektiv	44
Tabelle 3-8: Anforderungskatalog Software-Framework	45
Tabelle 3-9: Anforderungskatalog Bildverarbeitungsbibliothek	46
Tabelle 3-10: Anforderungskatalog Entwicklungsumgebung	46
Tabelle 5-1: Bewertungskriterien der sicheren Anbringung einer Kamera	58
Tabelle 5-2: Abstimmung der Anforderungen aus den Sensorfunktionen an das Kamerasystem (Kamera-Body und Objektiv)	62
Tabelle 5-3: Durchgeführte Bildverarbeitungsschritte im NVE-Demonstrator	70
Tabelle 5-4: Beispiele für natürliche und künstliche Merkmale	77
Tabelle 5-5: Bewertung von Open Source Bibliotheken zur Markererkennung	79
Tabelle 5-6: Bewertung zur Auswahl stehender Posenbestimmungsverfahren	82
Tabelle 6-1: Grundsätzliche Fragestellung zu den Evaluierungskriterien	95
Tabelle 6-2: Bewertung der Probanden je Kriterium (in Schulnoten)	96
Tabelle 6-3: Variable Versuchsparameter der NVE-Erkennung	108
Tabelle 6-4: Variable Versuchsparameter der NVE-Erkennung	113
Tabelle 6-5: Variable Versuchsparameter	118
Tabelle 7-1: Überprüfung der Umsetzung der im Forschungsantrag genannten Teilergebnisse	124
Tabelle 7-2: Fragebogen zur Evaluierung des Software-Frameworks	A-1



# Anhang A Informationen zum Software-Framework

Tabelle 7-2: Fragebogen zur Evaluierung des Software-Frameworks

	Benotung nach Schulnoten					
	1	2	3	4	5	6
	Trifft voll zu	Trifft weitgehend zu	Trifft überwiegend zu	Trifft selten zu	Trifft sehr selten zu	Trifft gar nicht zu
<b>Aufgabenangemessenheit</b>						
Das Pipes-and-filter Konzept erfordert keine überflüssigen Schritte zur Erfüllung der gestellten Aufgaben						
Der Nutzer muss sich nur mit den wirklich benötigten Parametern und Funktionen auseinandersetzen, die für die Aufgabe gebraucht werden.						
Die Teilaufgaben innerhalb der Bildverarbeitungskette werden sauber voneinander abgetrennt						
Komplexe Lösungen können mit diesem Konzept umgesetzt werden						
Der Wartungsaufwand komplexer Lösungen ist gering						
Anmerkungen						
<b>Selbstbeschreibungsfähigkeit</b>						
Die Namen der Methoden und Parameter sowie der zugehörigen Codedokumentation sind verständlich und führen nicht zu Fehlinterpretationen						
Es ist einfach einen geeigneten Filter zu finden und einzubinden						

## Anhang A Informationen zum Software-Framework

Anmerkungen						

<b>Erwartungskonformität</b>						
Die erzeugten Lösungen lassen sich leicht um zusätzliche Funktionen erweitern						
Das Framework lässt sich ohne großen Einarbeitungsaufwand nutzen, wenn man mit der Problemstellung und dem Lösungsziel vertraut ist						
Anmerkungen						
<b>Fehlertoleranz</b>						
Eigene Programmierfehler in einer erstellten der Filterkette sind leicht zu finden						
Eigene Programmierfehler in einem selbst programmierten Filter sind leicht zu finden						
Anmerkungen						
<b>Individualisierbarkeit</b>						
Das Software Framework kann leicht an eigene Softwareprodukte angebunden werden						
Es existieren mehrere Lösungsmöglichkeiten für eine Aufgabe						
Anmerkungen						

