



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Entwicklung und Evaluierung einer kamerabasierten Lokalisierungsmethode für Flurförderzeuge

Matthias Jung

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen

der Technischen Universität München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

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

2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

3. Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag

Die Dissertation wurde am 22.11.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 10.04.2018 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2018

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

Layout und Satz: Matthias Jung

Copyright © Matthias Jung, 2018

ISBN: 978-3-941702-92-9

Printed in Germany, 2018

II

Danksagung

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl fml 2011-2016 entstanden. Die konkrete Aufgabenstellung eine kostengünstige Lokalisierung für Flurförderzeuge zu entwickeln, kristallisierte sich während der Bearbeitung des AiF-Forschungsprojektes „Das Staplerauge“ (2011-2013) heraus. Mein Dank gilt all denjenigen, die mich auf dem Weg bis zum erfolgreichen Abschluss dieser Dissertation begleitet und unterstützt haben. Glücklicherweise ist die Liste dieser Personen sehr lang, das macht es mir leider nicht möglich jeden Einzelnen hier hervorzuheben. Dies möge man mir verzeihen.

Für die Betreuung meiner Forschungsarbeit und die fachlichen Gespräche während meiner Lehrstuhlzeit möchte ich mich zu allererst bei Prof. Günthner bedanken. Prof. Freitag und Prof. Fottner danke ich für das Koreferat und Prof. Wachtmeister für die Übernahme des Vorsitzes.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml gilt mein Dank für die während der gesamten Zeit stets vertrauensvolle Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich Frank Hohenstein und Michael Mirlach mit denen ich gemeinsam Forschungsprojekte erfolgreich bearbeitet habe. Ebenfalls sehr dankbar bin ich Sebastian Habenicht und Benjamin Molter, die mich bei der Korrektur dieses Dokumentes tatkräftig unterstützt haben. Auch die Mitarbeiter der Werkstatt, die kleine Fertigungsaufgaben immer prompt durchgeführt haben und zu mechanischen Fragen mit Rat und Tat zur Seite standen, möchte ich lobend erwähnen. Nicht vergessen möchte ich auch die Studenten, die mich durch ihre Studienarbeiten tatkräftig unterstützt haben. Dr. Andreas Alpers danke ich für die vielen fachlichen Diskussionen und seinen stets kompetenten Rat in mathematischen Fragestellungen.

Besonderer Dank gebührt auch meiner Familie, die mich stets unterstützt hat und ohne die ich diese Arbeit nicht hätte fertigstellen können.

München, im November 2017

Matthias Jung

Kurzzusammenfassung

Entwicklung und Evaluierung einer kamerabasierten Lokalisierungsmethode für Flurförderzeuge

Matthias Jung

Die Bestimmung von Positionsinformationen zu Waren, Ladeeinheiten und Flurförderzeugen ist Bestandteil vieler Sensorfunktionen in der Intralogistik. Aufbauend auf diesen Sensorfunktionen können Transportprozesse im Warenlager effizient und von hoher Qualität realisiert werden. Entsprechende Lokalisierungssysteme sind für manuell bediente Flurförderzeuge bereits seit Jahren am Markt verfügbar und für den Betrieb fahrerloser Transportsysteme sogar wesentliche Voraussetzung. Die für Lokalisierungssysteme aufgerufenen Preise rechtfertigen deren Einsatz aus wirtschaftlichen Gründen aber nur in Ausnahmefällen, so dass nur ein einstelliger Prozentsatz der manuell bedienten Flurförderzeuge mit solchen Systemen ausgerüstet ist.

Diese Arbeit widmet sich daher der Entwicklung einer präzisen und zugleich kostengünstigen Lösung zur Positionsbestimmung von Flurförderzeugen in Warenlagern.

Dazu werden zunächst die Anforderungen für den Einsatz eines solchen Systems im industriellen Umfeld ermittelt und anschließend, anhand einer Schwachstellenanalyse eines bestehenden, kamerabasierten Lokalisierungssystems, dessen Optimierungspotentiale ermittelt. Durch Hebung dieser Optimierungspotentiale soll die entwickelte Auswertungssoftware eine zuverlässige und genaue Positionsbestimmung von Flurförderzeugen in Warenlagern mittels kostengünstiger Sensorik und preiswerten Recheneinheiten ermöglichen.

Um die Erfüllung der eingangs gestellten Anforderungen abzusichern, folgt eine umfangreiche theoretische und experimentelle Evaluierung des entwickelten Demonstrators. Das Ergebnis ist eine flexible, leistungsfähige und sehr kostengünstige Plattform zur präzisen Bestimmung der Position von Flurförderzeugen in Warenlagern, welche die an ihre Leistungsfähigkeit gestellten Anforderungen voll erfüllt.

Abstract

Design and evaluation of a camera-based indoor positioning system for forklift trucks

Matthias Jung

In Intralogistics positioning solutions for goods and transport vehicles are employed by a number of sensor functions, which in turn can be used to gain insight into transport processes inside warehouses and help organize these processes in a high quality and efficient manner. Such usually high-cost positioning systems have been around for years, yet are not widely used due to their inherent cost issues.

Hence this work aims at developing a precise and yet cost-effective positioning solution for forklift trucks inside warehouses. To that end, first the requirements for such a system in an industrial environment are systematically analyzed and weaknesses of an existing (expensive) positioning system determined. Eliminating such weaknesses allows the developed positioning software to fulfill the requirements despite having to rely on poor sensor data and a cheap computing unit.

To evaluate the solution regarding the requirements, an extensive theoretical and experimental analysis is performed on the designed demonstrator.

This results in a flexible, precise and low-cost indoor positioning platform for forklift trucks, which fulfills both the initially determined requirements and outperforms comparable state of the art localization approaches.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Kurzzusammenfassung	V
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Formelverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Vorgehensweise	3
1.3 Problemstellung und Forschungsfrage	5
1.4 Zielsetzung	5
1.5 Abgrenzung	5
2 Stand der Technik	9
2.1 Einsatz von Endkundenprodukten	9
2.2 Kompensation der Schwächen kostengünstiger Module	11
2.3 Indoor-Lokalisierung	13
2.3.1 Augmented Reality	14
2.3.2 Lokalisierung mobiler Roboter	19
2.3.3 Optische Fußgänger-Navigation und -Ortung	21
2.3.4 Lokalisierung von Flurförderzeugen	22
2.4 Systemintegration am Flurförderzeug	28
2.4.1 Anbringungspunkt des Sensors	28
2.4.2 Spannungsversorgung	29
2.4.3 Datenübertragung	30
2.4.4 Datenverarbeitung	32
2.5 Anforderungen zur Flurförderzeuglokalisierung	34
2.5.1 Anforderungen durch die Prozesse	34
2.5.2 Leistungsfähigkeit der Lokalisierung	35

3	Anforderungsanalyse	37
3.1	Kostengünstige Sensorik	37
3.2	Anforderungen durch die Einsatzumgebung	39
3.2.1	Flurförderzeug im Warenlager	39
3.2.2	Transportprozess	40
3.3	Abgeleitete Anforderungen	42
3.3.1	Anforderungen an die Module	43
3.3.2	Anforderungen an die Software	43
3.4	Anforderungen an den Wartungsprozess	45
4	Systementwurf	47
4.1	Technologieauswahl	47
4.1.1	Kamera	47
4.1.2	Infrastruktur	49
4.1.3	Vermessungstechnik	50
4.2	Schwachstellenanalyse	51
4.2.1	Ressourcenbedarf	52
4.2.2	Latenz	53
4.2.3	Genauigkeit	54
4.2.4	Marker Erkennbarkeit	58
4.2.5	Integrationsaufwand	63
4.2.6	Infrastrukturaufwand	63
4.2.7	Wirtschaftliche Aspekte	64
4.2.8	Zwischenstand	65
4.3	Funktionaler Entwurf	66
4.3.1	Entwurfsmethodik	67
4.3.2	Lokalisierungskonzept	67
4.3.3	Maßnahmen in der Bildverarbeitungskette	69
4.3.4	Diagnosefunktionen	72
4.3.5	Evaluierungskonzept	74
4.4	Integrationskonzept	77
4.4.1	Entwicklungssystem/Labormuster	77
4.4.2	Funktionsmuster	78
5	Technische Umsetzung	79
5.1	Implementierung	79
X		

5.1.1	Arbeitsweise	79
5.1.2	Softwarearchitektur	80
5.1.3	Verarbeitungsalgorithmen	80
5.1.4	Posenschätzung	94
5.1.5	Vermessungsalgorithmen	97
5.1.6	Diagnosefunktionen	98
5.2	Hardwareauswahl	100
5.2.1	Entwicklungssystem/Labormuster	100
5.2.2	Funktionsmuster	101
5.3	Infrastruktur	104
5.3.1	Bestandteile und Herstellung	104
5.3.2	Anordnung	106
5.3.3	Montage	107
5.4	Systemintegration	108
5.4.1	Kalibrierung	108
5.4.2	Montage	111
5.4.3	Spannungsversorgung	112
5.4.4	Datenübertragung	113
6	Theoretische Erkenntnisse	115
6.1	Richtigkeit	115
6.1.1	Vernachlässigte Neigungen	115
6.1.2	Abstand zum Marker	118
6.2	Einflussfaktoren	119
6.2.1	Gierwinkel	119
6.2.2	Messfehler in Pixeln	120
6.2.3	Markerneigung	121
6.2.4	Ladungsgewicht	122
7	Praktische Evaluierung	125
7.1	Versuchsaufbau	126
7.1.1	Untersuchung der Algorithmen anhand von Sensoraufzeichnungen	126
7.1.2	Fähigkeiten der Zielplattform in praxisnahen Versuchen	129
7.1.3	Auswertungsmethodik	131
7.1.4	Ergebnisse	132
7.2	Leistungsfähigkeit der Lokalisierung	142
		XI

7.2.1	Vermeidung von Bewegungsunschärfe	143
7.2.2	Marker Erkennbarkeit	143
7.2.3	Auswertungsgeschwindigkeit/Latenz	145
7.2.4	Auflösung	145
7.2.5	Präzision	145
7.3	Erklärungsansätze mittels synthetischer Versuche	153
7.3.1	Einfluss der Markerneigung auf den Gierwinkel	154
7.3.2	Einfluss des Gierwinkels auf die x,y-Position	156
7.4	Kritische Betrachtung	157
7.5	Markervermessung	158
7.6	Weitere Eigenschaften	164
7.6.1	Einsatz kostengünstiger Module	164
7.6.2	Autarke Energieversorgung	165
7.6.3	Portierbarkeit	166
7.6.4	Startdauer	166
7.6.5	Vermessung per Teach-in	167
7.7	Fazit	168
7.7.1	Lokalisierungssystem für Flurförderzeuge	168
7.7.2	Kritische Bewertung	168
8	Zusammenfassung und Ausblick	171
8.1	Zusammenfassung	171
8.1.1	Motivation	171
8.1.2	Entwicklung eines kostengünstigen Lokalisierungssystems für Flurförderzeuge in Warenlagern	172
8.1.3	Evaluierung des Demonstrators	173
8.1.4	Erzielte Ergebnisse	173
8.2	Ausblick	174
8.2.1	Technische Weiterentwicklung der Lokalisierung	175
8.2.2	Anwendungsmöglichkeiten in Produktion und Logistik	177
8.2.3	Sonstige Anwendungsmöglichkeiten	178
	Literaturverzeichnis	179
	Abbildungsverzeichnis	209
	Tabellenverzeichnis	213

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AR	Erweiterte Realität (engl. A ugmented R eality)
ArUco	ArUco Bibliothek [RAF-2017]
CPU	Hauptprozessor (engl. C entral P rocessing U nit)
DoF	Freiheitsgrad (engl. D egree o f F reedom)
DRM	Design Research Methodology [BLE-2009]
EFG 110k	Staplermodell Jungheinrich EFG 110k
EFG 220	Staplermodell Jungheinrich EFG 220
FFZ	Flurförderzeug
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
FPS	Bilder pro Sekunde (engl. F rames P er S econd)
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GPU	Grafikprozessor (engl. G raphics P rocessing U nit)
ID	Identifikationsnummer
LVS	Lagerverwaltungssystem
IMU	Inertialsensorik (engl. I nterial M easurement U nit)
MDF-Platte	Mitteldichte Holzfaserverplatte
MTM	Methods-Time Measurement
OpenCV	Open Source Computer Vision Bibliothek [ITS-2017]
PC	Personal Computer
RAM	Hauptspeicher (engl. R andom A ccess M emory)
ROI	Bildausschnitt (engl. R egion o f I nterest)

RPP	Robust Planar Pose Estimation Verfahren
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SSD	Solid-State-Disk
TMU	MTM-Zeiteinheit (engl. T ime M easurement U nit)
TUM	Technische Universität München
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Drahtloses Netzwerk (engl. W ireless L ocal A rea N etwork)

Formelverzeichnis

Symbol	Bedeutung
Allgemein	
P	Wahrscheinlichkeit
σ	Standardabweichung
μ	Mittelwert (Parameter der Dichtefunktion der Normalverteilung)
m	Landmarke bzw. Marker
v_{trans}, v_{rot}	Bewegungsgeschwindigkeit (Translation, Rotation)
Geometrie	
x, y	x-Koordinate, y-Koordinate
α, β, γ	Gierwinkel, Nickwinkel, Rollwinkel
z	Distanz zwischen Kamera und Objekt in z-Richtung
\vec{x}_k	Pose zum Zeitpunkt k
$z_{k,i}$	Messung der Landmarke i zum Zeitpunkt k
b	Breitenangabe
r	Abstand zwischen Kamera und im Bild sichtbarem Objekt in x,y-Ebene
xTy	Transformation von x nach y
cTm	Transformation von Kamera c zu Marker m
Zeitangaben	
Δt_A	Zeitdauer der Aufnahme/Abgabe einer Ladeeinheit
Δt_S	Startdauer des FFZ
Δt_L	Maximal zulässige Startdauer des Lokalisierungssystems

Messfehler

d_x, d_y, d_α	Positionsabweichung (x-Koordinate, y-Koordinate, Gierwinkel)
d_{xy}	Positionsabweichung in der x,y-Ebene
d_{max}	Maximaler Wert von d_{xy}
Δz	Messfehler der z-Distanz zwischen Kamera und einem Objekt

Kamera

f	Brennweite (f_x in horizontaler, f_y in vertikaler Richtung)
c_x, c_y	Kalibrierte Bildmitte
u, v	Bildkoordinaten
λ	Winkel unter dem ein Objekt im Bild erscheint
λ_{max}	Für eine konkrete Kamera maximal möglicher Winkel λ
v_B	Bewegungsgeschwindigkeit eines Objektes im Bild

1 Einleitung

Der Gabelstapler ist als manuell bedientes Flurförderzeug im Einsatz sehr flexibel, aber durch seinen Fahrer auch kostenträchtig und fehleranfällig [WIL-2006, S. 26]. Der Fahrer kann, anders als fahrerlose Transportsysteme, mit im Prozess unerwarteten Situationen umgehen und die daraus resultierenden Probleme ggf. auflösen und somit eine stabile, robuste Beförderung von Gütern auch unter schwierigen Umständen gewährleisten [ULL-2014, S. 20]. Zudem ist das Fördermittel Gabelstapler durch kurzfristige Anmietung zusätzlichen Personals und Fahrzeugen [HOF-2013] zur Bewältigung von Lastspitzen besser skalierbar und daher in Anwendungsfällen, die durch stark schwankende Leistungsanforderungen gekennzeichnet sind, ein kosteneffizientes Fördermittel. Aus diesem Grund ist der Gabelstapler noch heute sehr viel im Einsatz [ULL-2014, S. 58f.]. Allerdings können auch durch den Fahrer Fehler verursacht werden, die unmittelbar, z. B. durch Kollisionen mit Personen oder der Infrastruktur [STA-2015, S. 71; ULL-2014] oder im weiteren Verlauf der Prozesskette zu Problemen führen, z. B. durch Verbuchen der Ware auf dem falschen Platz [BEC-2011, S. 156]. Zur Vermeidung dieser Fehler und Steigerung der Effizienz des Fördermittels Gabelstapler bietet die Industrie eine Vielzahl an Assistenzsystemen zur Erkennung von durch den Fahrer verursachten Fehlern an [SAX-2012; TBM-2017; JUN-2017b; LIN-2014; STI-2017a], mit dem Ziel die Flexibilität des Fahrers und die Fehlerfreiheit fahrerloser Transportsysteme (FTS) zu kombinieren. Dadurch soll ein gleichzeitig kostengünstiges und flexibel einsetzbares Flurförderzeug bereitgestellt werden, das nahezu fehlerfrei betrieben werden kann. Unterschiedliche, am Gabelstapler verbaute Sensorsysteme bilden die Basis für derartige Assistenzsysteme.

Im Bereich Industrie 4.0 sind Sensordaten und daraus abgeleitete Informationen wesentliche Bestandteile von cyberphysischen Produktionssystemen [VOG-2014, S. 37f.]. Echtzeitinformationen, insbesondere zu Status und Position von Waren und Maschinen werden dabei häufig als wesentliche Basisinformationen für eine Umsetzung von Industrie 4.0 Konzepten gesehen [HER-2016; BUB-2014, S. 223]. Eine wichtige Sensorinformation ist die Position eines Flurförderzeugs. Auf Basis dieser Positionsdaten kann die Navigation sowohl fahrerloser [BUB-2014, S. 223ff.] als auch manuell bedienter Flurförderzeuge im Lager realisiert werden [MIR-2013]. Bu-beck et al. sehen beispielsweise fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF), für welche die Navigation eine Grundvoraussetzung ist, als eine wesentliche Basistechnologie für Industrie 4.0 [BUB-2014, S. 223].

Positionsinformationen können direkt verwendet werden, um vor Kollisionen mit der Infrastruktur oder der Flurförderzeuge untereinander zu warnen [ESS-2014b] oder indirekt, indem zusammen mit anderen Sensorinformationen eine Plausibilitätsprüfung der Transportaufträge erfolgt. Eine Identifikation einer Ladeeinheit anhand der Position [IND-2017a; IDE-2016; ALE-2013] stellt folglich eine robuste Alternative oder Ergänzung zur Warenidentifikation mittels RFID [GÜN-2016, S. 186] oder Barcode [GÜN-2016, S. 179] dar. Dazu wird bei Aufnahme bzw. Abgabe einer Ladeeinheit festgestellt, ob deren Position mit der im Lagerverwaltungssystem abgelegten Soll-Position übereinstimmt. Fehlerhaft ausgeführte Transportaufträge können so entweder von vornherein verhindert oder zumindest rechtzeitig erkannt und anschließend korrigiert werden, um die Prozessqualität zu steigern. Es handelt sich bei diesem Anwendungsfall folglich um eine Maßnahme zur Qualitätsverbesserung [JUR-2000, S. 25] des Transportprozesses. Die konsequente Anwendung dieses Ansatzes erleichtert zudem die Lagerortbestimmung und erlaubt eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Waren im Lager, wie sie für Lebensmittel gesetzlich vorgeschrieben ist [DAS-2002].

Die Sicherheit im Lager kann zusätzlich von ortsabhängigen Zustandsbeschränkungen, wie etwa einer positionsabhängigen Geschwindigkeitswarnung und/oder -reduktion [TBM-2017; ESS-2014b], einer Hubhöhenbeschränkung in Bereichen niedriger Deckenhöhe bzw. Tordurchfahrten [TBM-2017] und der Definition von für Flurförderzeuge gesperrte Bereiche [ESS-2014b] profitieren. Beiden Technologien können auch dynamisch zur Reduktion der Kollisionsgefahr zwischen Fahrzeugen genutzt werden.

1.1 Motivation

Dem offensichtlichen Nutzen der Positionsdaten von Flurförderzeugen in der Intralogistik steht der hohe Aufwand zur Bestimmung dieser Daten gegenüber. Die Lokalisierung in Innenbereichen allgemein und in Warenlagern im Besonderen gilt als anspruchsvolle Aufgabe [MAU-2012, S. 7]. Am Markt verfügbare Produkte setzen hohe Investitionen in die Infrastruktur voraus [BUB-2014, S. 225] und verlangen zusätzlich eine teure Umrüstung der Flurförderzeuge sowie den Einsatz leistungsfähiger, robuster und stabiler [INT-2014; 4LO-2017] aber dadurch auch kostenträchtiger Hardware [AIS-2017]. Für viele Anwendungen überschreiten allein die Kosten der am Gabelstapler zu verbauenden Hardware bereits das Budget potentieller Kunden für ein Lokalisierungssystem. Im Zuge der Umrüstung ist zudem mit einer mehrtägigen Ausfallzeit des entsprechenden Flurförderzeugs zu rechnen. Zusätzlich erschwert der bei Gabelstaplern hohe Anteil der Miet- und Leasinggeräte [VOL-2009] in der Praxis de-

ren Umrüstung. Die zusätzliche, kundenspezifische Anbindung der Sensorfunktion an das IT-System des Kunden hindert Systemintegratoren daran kostengünstige Angebote für eine Lokalisierungslösung zu erstellen. In der Konsequenz ist laut Aussage diverser Systemintegratoren trotz der potentiellen Vorteile einer Flurförderzeuglokalisierung nur ein geringer einstelliger Prozentsatz der Gabelstapler mit einer solchen Lösung ausgerüstet. Eine im Vergleich zu bestehenden Produkten sehr kostengünstige Lösung zur Lokalisierung von Flurförderzeugen hat folglich in der Intra-logistik großes Potential. Die Qualität der Lösung muss trotzdem den Anforderungen entsprechen, damit nicht eine einmalige Einsparung bei den Beschaffungskosten höhere regelmäßige Kosten verursacht [JUR-2000, S. 5.10–5.11]. Ein kostengünstiges Lokalisierungssystem, das z. B. nicht zuverlässig oder genau genug funktioniert, kann seinen Zweck in der Regel nicht ausreichend erfüllen. Der Transportprozess kann dann die mit den Positionsdaten einhergehenden Potentiale nicht ausschöpfen. Entstehen dadurch im Prozess Fehler und Folgekosten, kann eine unzureichende, kostengünstige Lösung sich finanziell negativ auf den Transportprozess auswirken.

1.2 Vorgehensweise

Den methodischen Rahmen für das Forschungsvorhaben liefert die Design Research Methodology (DRM) [BLE-2009]. Diese Methode stellt ein iteratives Verfahren dar, bei dem einzelne Abschnitte üblicherweise explorativ mehrfach durchlaufen werden [BLE-2009, S. 14ff.]. Um dem Leser das Verständnis der Arbeit zu erleichtern, werden einzelne, tatsächlich iterativ durchgeführte Entwicklungsschritte zu einem Schritt innerhalb jedes Abschnitts zusammengefasst und gemeinsam beschrieben.

Wesentlicher Grund für die Wahl der DRM in dieser Arbeit ist aus Sicht des Autors die hohe Flexibilität der Methodik, welche einen laufenden Entwicklungsprozess aus ggf. kleinen, inkrementellen Verbesserungen ermöglicht, von denen im Forschungsvorhaben zunächst unklar ist, ob sie wirksam sind. Dem intuitiven Versuch und Irrtum Vorgehen [HER-2014, S. 152] gibt die DRM [BLE-2009, S. 14ff.] dadurch einen wissenschaftlich strukturierten und zielgerichteten Rahmen, der den Erkenntnisprozess einfacher gestaltet [BLE-2009, S. 10f.].

Die Methode besteht konkret aus den in Abbildung 1-1 dargestellten vier Schritten in einem Schleifenrumpf, der iterativ teilweise oder mehrfach wiederholt wird.

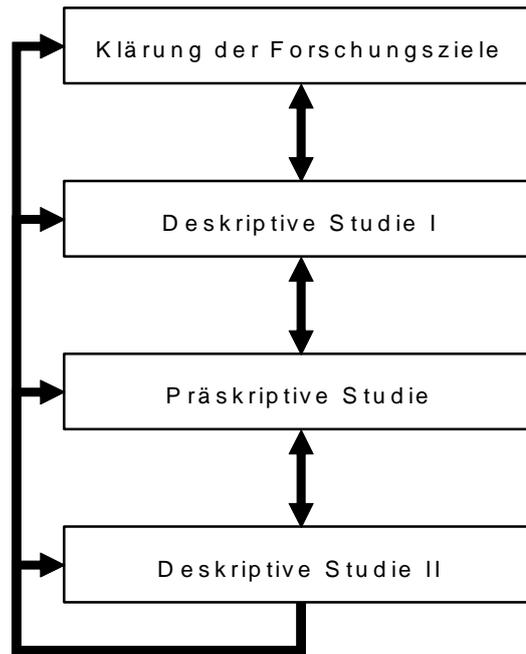


Abbildung 1-1: Teilschritte der DRM (nach [BLE-2009, S. 15])

Zur *Klärung der Forschungsziele* [BLE-2009, S. 72ff.] werden die grundlegenden Probleme aktueller Lokalisierungssysteme für Flurförderzeuge in den Unterkapiteln 1.3 und 1.4 aufgezeigt, daraus Forschungslücke und Forschungsfrage abgeleitet sowie Ist- und Soll-Zustand beschrieben.

Aus dem Forschungsprojekt „Das Staplerauge“ existiert am Lehrstuhl fml bereits ein Demonstrator eines Lokalisierungssystems für Gabelstapler [GÜN-2014a, S. 75ff.], welcher als Grundlage für die folgenden Analysen genutzt wird. In der *deskriptiven Studie I* [BLE-2009, S. 137ff.] werden zunächst die Schwachstellen des bestehenden Demonstrators analysiert und entsprechend ergründet, warum er die Anforderungen an eine kostengünstige Lokalisierung für Flurförderzeuge nur unzureichend erfüllt (Kapitel 3). Zur Hebung der Optimierungspotentiale wird darauf folgend ein Konzept für die Verbesserung dieses Lokalisierungsansatzes erstellt (Kapitel 4). Während der *präskriptiven Studie* [BLE-2009, S. 178ff.] in Kapitel 5 werden mehrere verbesserte Lösungsansätze prototypisch umgesetzt und das Ergebnis in der *deskriptiven Studie II* [BLE-2009, S. 212ff.] evaluiert (Kapitel 6 und 7). Im Rahmen der Evaluierung wird in der Versuchshalle des Lehrstuhls bestimmt, ob der entwickelte Demonstrator die eingangs gestellten Anforderungen in realitätsnahen Transportprozessen erfüllt und in welchen Bereichen weiterhin Verbesserungsbedarf besteht.

1.3 Problemstellung und Forschungsfrage

Da die hohen Kosten der am Markt verfügbaren Lokalisierungssysteme das wesentliche Hemmnis für deren weite Verbreitung darstellen, kann im Umkehrschluss nur eine kostengünstige Lösung dieses Hemmnis beseitigen und den Nutzen der Lokalisierung von Flurförderzeugen einer möglichst breiten Anwenderschicht zugänglich machen (siehe Unterkapitel 1.1). Dabei ergibt sich ein grundlegendes Dilemma: die Zielgruppe für eine teure Staplerlokalisierung ist vergleichsweise klein, daher werden aktuell nur geringe Stückzahlen dieser Lösungen vertrieben. Das vergleichsweise kleine Marktsegment erlaubt den Anbietern entsprechender Produkte für Gabelstapler allerdings keine hohen Investitionen in die Entwicklung spezieller eingebetteter Systeme, die analog zu Fahrerassistenzsystemen in der Automobilindustrie [MAR-2003, S. 5], bei Massenproduktion preiswerter sind als teure, generische Komponenten, wie Industriekameras und Industrie-PCs.

Eine Möglichkeit die Kosten unabhängig von der Zahl verkaufter Systeme zu senken, ist die Verwendung bereits vorhandener, kostengünstigerer Module. Gelingt es die Kosten für alle Bestandteile eines Lokalisierungssystems signifikant zu reduzieren, so ergibt sich folglich ein erheblich kostengünstigeres Gesamtsystem.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Forschungsfrage, wie eine dem Stand der Technik vergleichbare Lokalisierung für Flurförderzeuge in industrieller Umgebung auf Basis kostengünstiger Module zu geringen Gesamtkosten umgesetzt werden kann.

1.4 Zielsetzung

Es wird die Entwicklung und Evaluierung einer insgesamt kostengünstigen Lokalisierungslösung für Flurförderzeuge auf Basis kostengünstiger Module angestrebt, die als Nachrüstlösung in verschiedene Flurförderzeuge aufwandsarm integriert werden kann. Ziel ist es die Kosten des Lokalisierungssystems je Flurförderzeug deutlich zu reduzieren. Die Machbarkeit des Ansatzes wird durch Entwicklung und Evaluierung eines Demonstrators gezeigt.

1.5 Abgrenzung

Es wird ein Lokalisierungssystem ausschließlich für den Einsatz im Innenbereich entworfen. Die Intralogistik stellt die Anwendungsdomäne der zu entwickelnden Lö-

sung dar. Ein Warenlager ist daher der typische Anwendungsbereich für den das Lokalisierungssystem entwickelt und unter dessen Bedingungen es getestet wird.

Das Lokalisierungssystem soll dazu dienen, die Positionen von Flurförderzeugen sowohl im Stand als auch während der Fahrt zu ermitteln. Gegengewichtsstapler, im Folgenden als „Gabelstapler“ bezeichnet, werden als konkrete Instanz der Flurförderzeuge näher untersucht, da für diese Klasse der Flurförderzeuge zwei verschiedene Exemplare in der Versuchsumgebung (s. u.) verfügbar sind und für Experimente genutzt werden können. Die Leistungsfähigkeit der Lösung soll eine Verfolgbarkeit von Ladeeinheiten, konkret Europaletten, anhand der Position des Gabelstaplers ermöglichen [GÜN-2007].

Aus der Motivation (siehe Unterkapitel 1.1) ergibt sich als wesentliches Ziel die Entwicklung einer kostengünstigen Gesamtlösung, da bisher am Markt verfügbare Produkte zur Lokalisierung von Flurförderzeugen für viele Anwendungsfälle zu kostenintensiv sind. Um einen geringen Gesamtpreis zu erzielen, müssen die einzelnen Komponenten des Lokalisierungssystems folglich selbst kostengünstig sein. Damit die Lösung unabhängig von der Zahl der eingesetzten Flurförderzeuge kostengünstig ist, werden die Kosten je Flurförderzeug als Optimierungsziel festgelegt. Dieser Ansatz ist besonders für eine Eigenortung, die oft auch *Inside-out* Positionsbestimmung [BAU-2007, S. 93ff.] genannt wird, relevant, da der wesentliche Kostentreiber hier die Sensorik am Flurförderzeug ist [HOH-2014, S. 81f.]. Bei einer Fremdortung, welche auch mit *Outside-in* Ortung [BAU-2007, S. 93ff.] bezeichnet wird, sind die Komponenten am Flurförderzeug bereits sehr günstig und die Zahl der Sensoren und der zu ortenden Flurförderzeuge weitgehend voneinander unabhängig [HOH-2014, S. 81f.]. Insbesondere für Anwendungen mit einer geringen Zahl an Flurförderzeugen ist eine absolut gesehen kostengünstige Lösung wichtig, da dort der Invest für eine kostenintensive Lokalisierungslösung im Vergleich zu den Gesamtkosten des Lagers besonders hoch ausfällt.

Es werden nur optische Lokalisierungsverfahren betrachtet. Diese haben sich beim Einsatz im Lager in der Praxis bewährt [TOT-2014; ALE-2013; IDE-2016] und werden anders als funkbasierte Ortungsverfahren nicht durch Reflektionen an Metall, Mehrwegeausbreitung, Streuung oder Absorption an Flüssigkeiten beeinflusst [MAU-2012, S. 7-8,59].

Als Systemgrenze wird auf Seite der Hardwaremodule die Befestigung der Module am Flurförderzeug bzw. in der Anwendungsumgebung definiert. Die Auswertungssoftware wird bis zu dem Punkt betrachtet, an dem die Positionsinformationen zum Flurförderzeug bestimmt sind. Hohenstein unterteilt ein Lokalisierungssystem für

Flurförderzeuge in vier wesentliche Bausteine [HOH-2014, S. 47ff.]. Eine vergleichbare Definition für allgemeine Lokalisierungssysteme beschreibt Malik [MAL-2009, S. 9f.].

- *Tags* sind demnach Referenzpunkte. Bei der Eigenortung orientiert sich das Lokalisierungssystem an diesen, bei der Fremdontung kennzeichnen sie die Identität der zu lokalisierenden Objekte. [HOH-2014, S. 51]
- Der *Location Sensor* bestimmt eine Messgröße, aus der die
- *Location Engine* die Position des georteten bzw. lokalisierten Objektes ableiten kann.
- Bei der *Location Application* handelt es sich um eine Softwarelösung zur Weiterverarbeitung der ermittelten Positionsinformationen in den Prozessen der Anwendungsdomäne.

Es werden im Sinne dieser Definition daher *Tag*, *Location Sensor* und *Location Engine* betrachtet. Bezüglich der Kosten für die *Location Application* gibt es keinen Forschungsbedarf, da bestehende Lokalisierungsprodukten eine solche Softwarelösung bereits beinhalten [IND-2017a; ALE-2013; IDE-2016], die sich zu sehr geringen Kosten replizieren lässt. Gelingt es einem Systemintegrator eine größere Zahl an Kunden für eine kostengünstige Lokalisierung zu gewinnen, lassen sich folglich die Entwicklungskosten für diesen Baustein der Lokalisierungslösung auf mehr Anwender verteilen und somit ohne zusätzlichen Aufwand günstiger anbieten.

Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt bei den Bildverarbeitungsalgorithmen in *Location Sensor* und *Location Engine*. Eine weitgehend von der konkreten Hardware unabhängige Softwarelösung ist flexibel auf ähnlichen Plattformen einsetzbar und leicht auf andere Hardwareplattformen zu portieren. Die infolge kurzer Produktzyklen bei elektronischen Endkundenprodukten [KAR-2011, S. 272] notwendige Umstellung auf alternative Plattformen wird dadurch erheblich erleichtert. Auf die Entwicklung spezieller Hardwarebausteine zur Lokalisierung [HED-2008; KÖP-2014, S. 26] wird grundsätzlich verzichtet.

Die Machbarkeit des Ansatzes wird durch Entwicklung eines Demonstrators gezeigt. Dessen Evaluierung erfolgt in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml. Die aufgenommenen Sensordaten können anders als bei Versuchen direkt in der Praxis ohne Genehmigung durch Dritte genutzt und veröffentlicht werden. Typische Elemente aus Warenlager und Produktionshallen formen im Versuchsumfeld ein realitätsnahes Abbild typischer Szenarien aus der Praxis und ermöglichen dadurch realitätsgetreue Versuche. Die Versuchsfahrten werden mit in der Praxis üblicher Fahrweise ausgeführt. Das Verständnis der genutzten Algorithmen wird neben der Untersuchung der

Leistungsfähigkeit des Demonstrators als wichtiger Bestandteil der Evaluierung betrachtet. Letztlich entsteht ein Forschungsdemonstrator, der die Machbarkeit einer kostengünstigen Lokalisierung für Flurförderzeuge nachweist. Systemintegratoren können das Konzept ggf. zu einem fertigen Produkt weiterentwickeln und dadurch eine kostengünstige Lokalisierung für Flurförderzeuge einem breiten Anwenderkreis anbieten.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den technischen und wissenschaftlichen Grundlagen dieser Arbeit. Betrachtet werden dabei in jeweils einem Unterkapitel

- der Einsatz von Endkundenprodukten in Industrie und Forschung (2.1),
- Maßnahmen, die Schwächen kostengünstiger Module kompensieren (2.2),
- Ansätze zur Indoor-Lokalisierung mittels optischer Sensorik (2.3),
- Möglichkeiten zur Integration von Sensoren an Flurförderzeugen (2.4) sowie
- Anforderungen an die Lokalisierung von Flurförderzeugen (2.5).

Wesentliche Ziele dieses Kapitels sind es, den Leser mit dem Arbeitsgebiet vertraut zu machen und die Probleme, welche dieser Arbeit zugrunde liegen, zu verdeutlichen, damit die Motivation für die gewählte Problemstellung nachvollziehbar wird.

2.1 Einsatz von Endkundenprodukten

Der Einsatz von Standardkomponenten ermöglicht in der Industrie große Einsparpotentiale, da dadurch zusätzliche Entwicklungskosten für Spezialprodukte vermieden werden können. Auch im militärischen und behördlichen Bereich ist aus Kostengründen für IT-Systeme ein Trend hin zu COTS (engl. Commercial-off-the-shelf) Komponenten erkennbar. Die Entwicklungskosten für IT-Systeme, sowohl auf Seiten der Hardware als auch auf Seiten der Software, lassen sich mittels COTS-Bestandteilen senken, da diese bereits entwickelt und vom Markt finanziert sind sowie in großen Stückzahlen produziert und verkauft werden. Attraktiv ist dieser Ansatz folglich besonders für all diejenigen Fälle, in denen eine vergleichsweise geringe Stückzahl der Komponenten benötigt wird und sich deshalb hohe Entwicklungskosten für eine branchenspezifische Lösung nicht rentieren. [WIK-2017a]

Umgekehrt ist jedoch eine spezielle Lösung in der Regel besser auf das konkrete Problem angepasst und kann daher die bessere Wahl darstellen, wenn große Stückzahlen der Hard- oder Software benötigt werden [MAR-2003, S. 2f.]. In der Automobilindustrie werden folglich meist Speziallösungen, z. B. für Fahrerassistenzsysteme, bevorzugt und in großen Stückzahlen effizient und kostengünstig gefertigt [MAR-2003, S. 5].

In folgenden Anwendungsfällen sind COTS-Komponenten weit verbreitet:

- Moderne Supercomputer bestehen im Gegensatz zu früheren Großrechnern [ELL-2010] fast ausschließlich aus tausenden verteilten Recheneinheiten, die vollständig oder zumindest teilweise aus den gleichen Standardprodukten aufgebaut sind, welche auch in handelsüblichen Servern oder Desktop-PCs zum Einsatz kommen [ECK-2013; BER-2013]. Für den Einsatz unter schwierigen Umgebungsbedingungen, wie hohe oder besonders niedrige Temperatur, hohe Luftfeuchtigkeit etc., gibt es auch besonders robuste Komponenten, die meist mit dem englischen Attribut „rugged“ versehen sind¹ [SEA-2008].
- In vielen Projekten zur industriellen Bildverarbeitung werden gegen Staub und Feuchtigkeit geschützte, robuste Industriekameras genutzt [DEM-2011, S. 249], die auch für Überwachungszwecke eingesetzt werden können [KRU-2006, S. 109ff.]. Wird die Software jedoch individuell für ein Projekt entwickelt, handelt es sich dabei nicht um COTS-Software [TUR-2002, S. 1; VOA-1998].
- Insbesondere Smartphones erfahren auch unter schwierigen Bedingungen eine steigende Nutzung und sind daher zum universellen elektronischen Werkzeug von Handwerkern [HAN-2013; HAN-2017] und teilweise auch Polizisten [HAS-2017] geworden.
- Die ursprünglich als Endkundenprodukt geplante Datenbrille Google Glass [GOO-2017b] erfreut sich seit ihrer Einführung wachsender Beliebtheit in Industrie [MAN-2015] und Forschung [KAS-2017; MAY-2014, S. 488; GLA-2013; MUE-2014]. Der Hersteller adressiert daher primär die Industrie als Kundschaft [MAN-2015; GOO-2017b].

Bei COTS-Komponenten muss es sich weder zwingend um Endkundenprodukte handeln, noch müssen diese preiswert im Sinne einer bestimmten Anwendung erscheinen. Wesentliches Merkmal ist die Verfügbarkeit des Produktes am Markt für unterschiedliche Zwecke, insbesondere nicht ausschließlich für die aktuell benötigte Anwendung [WIK-2017a].

Die Forschung greift aus Kostengründen für Demonstratoren auf günstige Endkundenprodukte zurück [TRE-2013; THA-2014; GÜN-2014b, S. 123; NAR-2005, S. 5; STU-2011]. Allerdings ist das Ziel in diesen Fällen eine Technologiedemonstration, welche die Anforderungen der Industrie nicht erfüllen muss. Betrachtungsgegenstand sind normalerweise nur die Sensordaten, nicht aber wie möglicherweise bestehende Schwächen im Industrieinsatz gehandhabt werden können.

¹ siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Rugged_computer

Diverse Schwächen der Endkundenprodukte hemmen bzw. verhindern jedoch meist den Einsatz in der technischen Logistik. Eine Ausnahme bildet die Staplerlokalisierung FleetRadar von Jungheinrich. FleetRadar nutzt zur Staplerlokalisierung die Fraunhofer awiloc Technologie [PFL-2014] in Kombination mit einem (vermutlich robusten), handelsüblichen Smartphone und BLE-Beacons [FM-2017]. Mit einer Genauigkeit von 1-5 m [PFL-2014] sind die Anwendungsmöglichkeiten jedoch auf wenige Anwendungsfälle beschränkt [FM-2017]. Detaillierte Informationen zu eingesetzter Hard- und Software sowie Kosten der Module sind aktuell (noch) nicht verfügbar. Das Beispiel zeigt jedoch, dass der Einsatz robuster Endkundenprodukte für die Industrie durchaus eine Option darstellt.

2.2 Kompensation der Schwächen kostengünstiger Module

Ein wesentliches Problem stellen nicht die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften kostengünstiger Endkundenprodukte dar, sondern auch die fehlende Planungssicherheit bei Systemintegrator und Kunde. Zwar mag ein bestimmter Typ eines Moduls unter den angestrebten Bedingungen tadellos längerfristig funktionieren, eine Garantie dafür besteht jedoch nicht. Folglich verbleibt das Risiko für Fehler beim Systemintegrator. Umgekehrt erhöht ein umfangreicher Test einer größeren Menge an Modulen eines Typs die Entwicklungskosten, was gerade bei geringer Stückzahl die Kosten für ein Lokalisierungssystem stärker verteuern kann, als die geringeren Hardwarekosten einsparen. Ein solcher Test ist zudem durch kurze Produktzyklen bei vielen Elektronikprodukten [KAR-2011, S. 272] nur bedingt aussagekräftig. Es sind daher Maßnahmen nötig, die das Risiko vorzeitiger Defekte reduzieren.

Zum Ausgleich der Schwächen kostengünstiger Module können im Wesentlichen die selben Methoden angewandt werden, welche auch bei industrietauglicher Hard- und Software genutzt werden, um die Qualität der Sensordaten und die Ausfallsicherheit des gesamten Produktes zu steigern.

- Mittels Kalibrierung eines Sensors [DIN 1319-1, S. 22], z. B. einer Kamera, können systematische Fehler in den Messdaten minimiert werden.
- Leistungsfähigere Auswertungsverfahren können ggf. mit schlechteren Eingabedaten umgehen oder bessere Auswertungsergebnisse erzielen, benötigen aber oft mehr Ressourcen, wie sich gut am Beispiel verschiedener *Merkmaldetektoren* in der Bildverarbeitung erkennen lässt [OND-2012].
- Schwache Signale können von statistischen Analyseverfahren aufbereitet werden. Mittels leistungsfähiger Ausgleichsverfahren, z. B. eines Kalman-

- Filters [KAL-1960], können Sensordaten anhand eines statistischen Datenmodells deutlich verbessert werden [THR-1999, S. 5].
- Mittels Sensorfusion [ELM-2002, S. 3], also der Koppelung der Daten mehrerer Sensoren, kann das Sensorrauschen erheblich reduziert und die Genauigkeit des Messverfahrens gesteigert werden. Viele Lokalisierungstechnologien fusionieren folglich mehrere Sensoren, z. B. einen Laserscanner und die Fahrzeugodometrie [BUB-2014, S. 229f.], zu einem „besseren“ Sensor.
 - Ein wesentliches Konzept zur Erhöhung der Ausfallsicherheit von Systemen ist die Erzeugung von Redundanz [CHO-1973]. Mittels Redundanz kann ein Systemausfall im laufenden Betrieb bei Defekt einer Komponente erkannt [CHO-1984] und verhindert werden [MOB-2002, S. 329].
 - In Servern werden mehrere Festplatten in der Regel im Betriebsmodus Raid5 im Verbund genutzt und die gespeicherte Information teilweise redundant auf alle Datenträger verteilt, damit bei Ausfall einer einzelnen Festplatte die gesamte gespeicherte Information wiederhergestellt werden kann [VAD-2003, S. 24f.].
 - Prüfsummen bei der Übertragung von Daten über Kommunikationsverbindungen stellen ebenfalls eine Form der Redundanz dar, welche Übertragungsfehler erkennbar macht und teilweise zur Korrektur des Fehlers dienen kann [PET-1961].
 - Sicherheitslaserscanner nutzen redundante Logik, um den Fehlerzustand sicher festzustellen [WET-1993].
 - Eine weitere Möglichkeit mit einer höheren Ausfallrate umzugehen ist auch deren Akzeptanz. Insbesondere bei Software wird in unkritischen Bereichen eine geringere Softwarequalität akzeptiert [MAR-2015, S. 254; KHA-2015].
 - Die Nutzung geeigneter Rugged-Komponenten kann den Betrieb unter schwierigen Umgebungsbedingungen erlauben. Bei Endkundenprodukten gibt es für viele Anwendungen auch sog. Outdoorprodukte, die für den Einsatz im Freien geeignet und damit gegenüber Wasser und Staub, welche auch in industrieller Umgebung ein Problem darstellen [DEM-2011, S. 249], unempfindlicher sind [DIN EN 60529].
 - Durch geeignete Anbringung des Sensors und die Verwendung eines entsprechenden Gehäuses [DIN EN 60529] kann ein Messsystem vor Umwelteinflüssen geschützt werden, etwa indem ein Sensor in einem überdachten Bereich montiert wird und somit vor Regen besser geschützt ist.
 - Eine möglichst generische, hardwareunabhängige Umsetzung sorgt dafür, dass Ersatz- oder Nachfolgeprodukte ohne großen Entwicklungsaufwand verwendet werden können. Ein solcher Ansatz wird, z. B. von Softwareanbietern, für WLAN-Router [THE-2017b; EMB-2017] und Betriebssysteme für Smart-

phones [GOO-2017a; THE-2017a] genutzt, um möglichst viele Modelle verschiedener Hersteller zu unterstützen.

In Anwendungsfällen, in denen hingegen die Implementierung aller sinnvollen Kompensationsmaßnahmen für den Anwendungsfall nicht ausreicht oder der Einsatz der Maßnahmen nicht wirtschaftlich ist, stellt kostengünstige Hardware keinen sinnvollen Ersatz für etablierte Produkte dar [JUR-2000, S. 5.10–5.11].

2.3 Indoor-Lokalisierung

Im Alltag spielen Positionsdaten eine immer wichtigere Rolle. Nahezu jede Person kommt regelmäßig mit Lokalisierungssystemen aktiv in Kontakt. Navigationssysteme im Auto erleichtern dem Fahrer auch in ihm unbekanntem Regionen die Wegführung zum gewünschten Ziel und Fußgänger orientieren sich in fremden Städten mittels Apps auf ihren Smartphones [GOO-2017c]. Beim Sport erlauben sog. Wearables [LYM-2003; RAW-2014] die gelaufene Strecke nachzuvollziehen und den Trainingsplan zu überprüfen. Für Wanderer und Fahrradfahrer gibt es technische Unterstützung in Form von GPS-Tracks [KOC-2017]. Die wesentliche Lokalisierungstechnologie hinter all diesen Anwendungen ist das satellitenbasierte Global Positioning System [WEL-1987, S. 79], welches zu den globalen Satellitennavigationssystemen, kurz GNSS², zählt. Ein GNSS-Empfänger benötigt zur Bestimmung seiner Position eine gleichzeitige Sichtverbindung zu mindestens vier Satelliten [WEL-1987, S. 105] und ist daher innerhalb von Gebäuden in der Regel nicht einsetzbar [MAU-2009; MAU-2012, S. 8]. Weitere Informationen zu globalen Satellitennavigationssystemen finden sich z. B. in [WEL-1987; DOD-2010].

Die Indoor-Lokalisierung (engl. indoor positioning) hat daher im Wesentlichen das Ziel die durch GNSS-Systeme außerhalb von Gebäuden ermöglichte Positionsbestimmung in Gebäuden bereitzustellen [MAU-2012, S. 7].

In Produktion und Logistik ist die Lokalisierung im Innenbereich für Produktionshallen und Warenlager relevant, da mittels Positionsdaten von Waren und Werkstücken die Prozessschritte im Unternehmen nachverfolgt werden können [BIL-2014, S. 594ff.]. So können, z. B. anhand von Positionsdaten, die von Flurförderzeugen transportierten Waren lückenlos nachverfolgt [DAS-2002, S. 11] und die Prozesse transparent gestaltet werden [GÜN-2007].

² siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationssatellitensystem

Da der Fokus der Arbeit auf optischen Lokalisierungssystemen liegt, werden im Folgenden optische Technologien vorgestellt, die in der Praxis zur Lokalisierung genutzt werden. In einem ersten Schritt werden Basistechnologien aus dem Bereich *Augmented Reality* beschrieben (siehe Abschnitt 2.3.1), danach deren Einsatz in der Robotik (Abschnitt 2.3.2) und zur Ortung von Fußgängern (Abschnitt 2.3.3) näher beleuchtet und schließlich in Abschnitt 2.3.4 bereits existierende Systeme zur Lokalisierung von Flurförderzeugen dargestellt.

2.3.1 Augmented Reality

Augmented Reality kombiniert nach Azuma die Realität mit virtuellen Elementen und erlaubt so die Interaktion mit diesen virtuellen Elementen in drei Dimensionen in Echtzeit. Bereits Anfang der 1990er Jahre wurden in Forschungsprojekten industrielle und medizinische Anwendungen dieser Technologie untersucht, um Mitarbeitern kontextbezogene Zusatzinformationen zur Verfügung zu stellen. [AZU-1997]

Um eine virtuelle Szene mit einer optischen Szene zu überlagern sind drei Schritte nötig [AZU-1997]:

1. Zunächst müssen einzelne Objekte im Raum erfasst (*sensing*) und verfolgt werden (*tracking*), damit in deren Umfeld in den folgenden Schritten
2. die virtuell zu ergänzenden Objekte berechnet, in die Szene eingefügt und schließlich dem Nutzer
3. dargestellt werden können (*display*).

Für die Lokalisierung von Flurförderzeugen ist der erste Teil, also *tracking* und *sensing*, von Bedeutung [TOT-2014]. Die Forschung zur *Augmented Reality* legte in der Anfangsphase den Fokus besonders auf diesen ersten Teil und unmittelbar damit zusammenhängende Fragestellungen [ZHO-2008]. Mit der Verfügbarkeit ausgereifter Technologie rückt in der Logistik immer mehr die Anwendung in den Fokus. Der Schwerpunkt von Industrie und Forschung konzentriert sich hier auf das sog. Vision Picking bzw. Pick-by-Vision [SCH-2008b; REI-2009, S. 117ff.; RAM-2012].

Das Erfassen und Verfolgen von Objekten im Raum erfolgt im Zusammenhang mit der erweiterten Realität heute üblicherweise mittels weit verbreiteter Kameras und wird entweder durch Kennzeichnung der zu verfolgenden Objekte mit künstlichen Markern [KAT-1999] oder mittels natürlicher Umgebungsmerkmale [NEU-1999] realisiert. Eine sehr umfangreiche Abhandlung zu verschiedenen Markertechnologien sowie Arbeitsschritten der marker- und merkmalsbasierten *Augmented Reality* beschreibt Siltanen [SIL-2012, S. 38ff.; SIL-2012, S. 94ff.].

Bei markerbasierten Verfahren werden künstliche Kennzeichnungen bekannter Abmessungen, sogenannte Fiducials, in die Szene eingefügt und im Bild erkannt. Fiducials können dabei z. B. LEDs, gedruckte Muster, aber auch dreidimensionale Körper sein. [AZU-1997]

Die Extraktion der Marker im Bild erfolgt abhängig vom Markertyp mittels geeigneter Methoden der Mustererkennung [SIL-2012, S. 38]. Gedruckte Muster werden z. B. üblicherweise anhand ihrer Konturen [HIR-2008, S. 2ff.] erkannt [AZU-1997]. Dazu werden zunächst zusammenhängende Kanten im Bild gefunden, zu geometrischen Formen aggregiert (Abbildung 2-1b) und ggf. akzeptiert, wenn sie der physischen Form des Fiducials entsprechen können (Abbildung 2-1c) [HIR-2008, S. 2ff.; GAR-2014; MUN-2014].



Abbildung 2-1: Phasen der Extraktion eines Fiducials [HIR-2008, S. 2ff.; GAR-2014; MUN-2014]

Damit virtuelle Objekte in der realen Szene eingeblendet werden können, wird zusätzlich die Pose, also die Position und Orientierung relativ zur Kamera, bezüglich aller Freiheitsgrade des Fiducials benötigt [KAT-1999]. Die Bestimmung der Pose aus den 2D Bildkoordinaten des Fiducials und dessen vorab bekannter 3D Geometrie wird *Posenschätzung* (engl. pose estimation) genannt [HAR-1989]. Der *Posenschätzung* liegt das *Perspective-n-Point Problem* [FIS-1981] zugrunde. Die Lösung dieses Problems entspricht einer Pose mit 6 Freiheitsgraden (6DoF), bei der jeder 3D Punkt in der physischen Geometrie des Fiducials auf den entsprechenden 2D Punkt im Kamerabild abgebildet wird [KAT-1999]. Messungenauigkeiten, sowohl bei den realen Koordinaten als auch den ermittelten Bildpunkten, gestalten die präzise Lösung dieses Problem in der Praxis sehr schwierig, da es mehrere lokale Optima gibt [SCH-2006]. Häufig eingesetzte Algorithmen zur Lösung des *Perspective-n-Point Problem* sind P3P [GAO-2003], EPnP [LEP-2009], POSIT [DEM-1995] sowie ein iteratives Verfahren [HAR-2004, S. 114]. Für den häufig vorkommenden Spezialfall, dass alle physischen Punkte des Fiducials in einer Ebene liegen, gibt es Algorithmen, welche stabilere Ergebnisse erzielen. Beispiele hierfür sind Robust Planar Pose (RPP) [SCH-2006] und planar POSIT [OBE-1993].

Übliche Software-Implementierungen markerbasierter *Augmented Reality* verwenden eine Pipeline aus aneinandergereihten Software-Methoden [BUS-1996, S. 53ff.], welche die obigen drei Schritte der Verarbeitungskette realisieren [EMA-2012, S. 52f.; RAF-2017]. In der beliebten *Augmented Reality* Software ARToolkit, ist diese Pipeline wie folgt aufgebaut ([ART-2017], vgl. Abbildung 2-2):

1. In einem ersten Schritt werden die Marker, welche Objekte kennzeichnen, im aufgenommenen Kamerabild gesucht. Dazu wird das Bild in ein Binärbild überführt und der schwarze Markerrahmen extrahiert.
2. Aus dem Markerrahmen kann die Pose (Position und Orientierung) des Markers relativ zur Kamera ermittelt werden.
3. Der Marker wird anhand seines inneren Piktogramms identifiziert.
4. Mithilfe von Koordinatentransformationen wird aus der Pose des Markers auf die Pose des mit dem Marker assoziierten (virtuellen) Objektes geschlossen und
5. dieses in der virtuellen 3D Szene gerendert.
6. Als Letztes wird das gerenderte Video auf dem Ausgabemedium, z. B. einem Smartphone-Bildschirm oder einer Datenbrille, wiedergegeben.

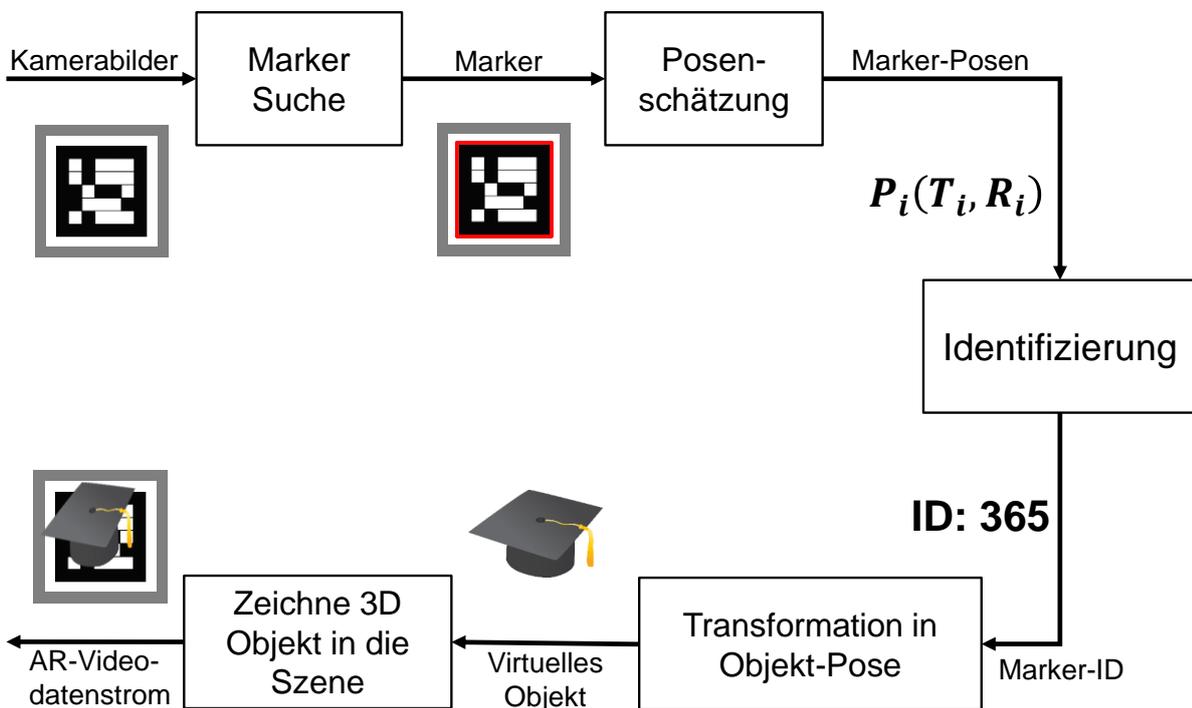


Abbildung 2-2: *Augmented Reality Pipeline in AR-Toolkit (nach [ART-2017])*

Sehr ähnliche Vorgehensweisen finden sich auch in den Bibliotheken ArUco [RAF-2017] und ArToolkitPlus [WAG-2007]. In [EMA-2012] werden die Details hinter jedem Schritt der Pipeline anhand einer Beispielimplementierung für markerbasierte [EMA-

2012, S. 47ff.] und merkmalsbasierte *Augmented Reality* [EMA-2012, S. 93ff.] umfangreich erläutert. Durch den Siegeszug der Smartphones gibt es immer mehr *Augmented Reality* Frameworks, die sich vorwiegend auf die Zielplattform Smartphone konzentrieren und daher mit der für heutige Maßstäbe geringen Rechenleistung typischer Geräte haushalten müssen [SCH-2008a; WAG-2007; YAN-2012]. Heutzutage übliche Smartphones sind jedoch deutlich leistungsfähiger als die schnellsten Desktop-PCs aus dem Jahre 1999, als z. B. die erste Version von ArToolkit [KAT-1999] veröffentlicht wurde.

Merkmalsbasierte Verfahren benötigen keine in die Umgebung eingefügten künstlichen Marker und verwenden stattdessen Umgebungsmerkmale als Referenzpunkte [SIL-2012, S. 95f.; EMA-2012, S. 95ff.]. Diese Umgebungsmerkmale werden in zwei Verarbeitungsschritte charakterisiert.

1. Zunächst werden mittels eines *Merkmaldetektors* [HAR-1992] Merkmale im Bild extrahiert und dann
2. von einem *Merkmaldeskriptor* [LOW-2004] in ein maschinenlesbares Datenformat überführt.

In einer Bildsequenz können die Informationen über die Merkmale (engl. features) zwischen je zwei Bildern zueinander in Beziehung gesetzt werden. Dieser Vorgang wird *Feature Matching* [MUJ-2012] genannt (siehe Abbildung 2-3).

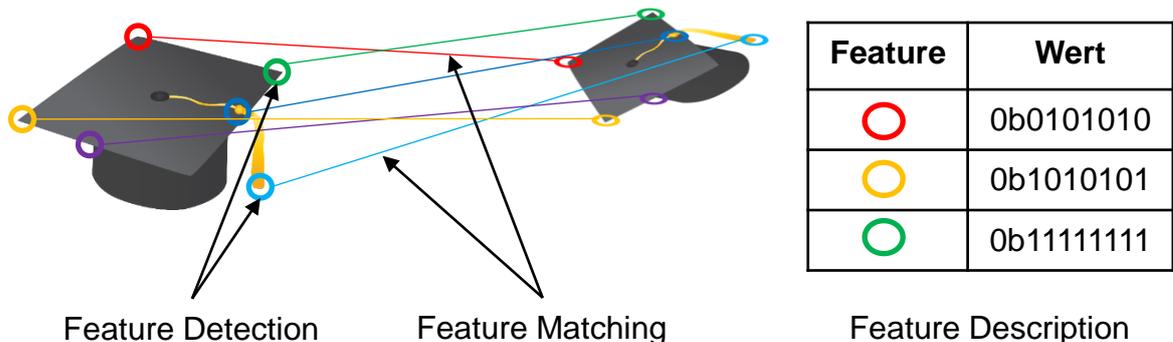


Abbildung 2-3: Feature Detection, Description und Matching (nach [EMA-2012, S. 101])

Kurz gefasst entscheidet somit der *Detektor* was als Umgebungsmerkmal ausgewählt wird, während der *Deskriptor* festlegt, welchen Wert das Merkmal bekommt. Der *Matcher* liefert die Information wie sich das Merkmal über die Zeit im Bild verhalten hat. Mittels dieser Informationen lassen sich folglich ebenfalls Objekte im Bild verfolgen und Kamerabewegungen schätzen [KLE-2007]. Merkmalsbasierte Verfahren funktionieren aus offensichtlichen Gründen zufriedenstellend, wenn

1. der zugrunde liegende *Detektor* in der gegebenen Szene genügend Merkmale finden kann und
2. der *Deskriptor* für identische Merkmale in unterschiedlichen Bildern sehr ähnliche Werte berechnet, damit der *Matcher* diese zueinander in Verbindung setzen kann. [LOW-2004]



Abbildung 2-4: Feature Matching mittels SIFT [LOW-2004]

Das Beispiel in Abbildung 2-4 zeigt, dass in komplexen Szenen der stilisiert dargestellte Idealzustand aus Abbildung 2-3 in der Praxis nicht immer erreicht wird. Stattdessen werden neben korrekten Zuordnungen auch einige falsche Zuordnungen vorgenommen [LOW-2004]. Ein weiterer wesentlicher Nachteil des Ansatzes ist der gegenüber markerbasierten Verfahren deutlich höhere Ressourcenbedarf [EMA-2012, S. 94; RUB-2011]. Die unterschiedlichen Verfahren für *Detektor* und *Deskriptor* stellen dabei in der Regel einen Trade-off zwischen benötigten Ressourcen und Robustheit der Merkmalsextraktion dar [HEI-2012]. Alternativ können statt künstlicher Merkmale auch wenige, vorab bekannte 3D Modelle in der Aufnahme der Umgebung erkannt und verfolgt werden. Dieses Verfahren wird modellbasiertes *Tracking* genannt [SIL-2012, S. 102]. Da die benötigten, hinreichend genauen 3D Modelle für die im Warenlager enthaltenen Objekte in der Praxis meist nicht zur Verfügung stehen, ist das Vorgehen jedoch zur Lokalisierung von Flurförderzeugen Prinzip bedingt nicht geeignet.

2.3.2 Lokalisierung mobiler Roboter

Die *Posenschätzung* von Objekten relativ zu einer Kamera ist jedoch nicht nur Bestandteil der *Augmented Reality* Verarbeitungspipeline, sondern kommt in ähnlicher Form auch bei der Lokalisierung mobiler Roboter zum Einsatz und wird dort für die sichere Navigation des Roboters in seinem Umfeld benötigt [PAT-2001, S. 39f.; ENG-2012].

Ein grundsätzliches Problem der Navigation besteht in der Notwendigkeit einer hinreichend genauen Karte, an der sich der Navigierende orientieren kann [DYN-2007]. Ein typisches Beispiel für solche Kartendaten ist das Navigationssystem zur Unterstützung des Fahrers im Automobil, welches heutzutage für nahezu jeden Fahrzeugtyp verfügbar ist und von Fahrern in fremder Umgebung sehr geschätzt wird. Da für mobile Roboter jede Umgebung zunächst fremd ist, wird folglich stets eine passende Karte zur Navigation benötigt. Diese kann entweder vorab auf andere Weise oder mittels SLAM-Verfahren während der Navigation erstellt werden [DUR-2006].

SLAM [SMI-1990] steht für Simultaneous Locating and Mapping, vereint das inkrementelle Erstellen der Karte sowie die Navigation darin und ist damit das Standardverfahren der Lokalisierung in der Robotik [THR-1999, S. 245ff.]. Dazu werden folgende Schritte durchgeführt [DUR-2006]:

1. Der initiale Punkt wird (zunächst) als Koordinatenursprung definiert.
2. Der Roboter bewegt sich durch die (noch) unbekannte Umgebung und vermisst dabei die Umgebung relativ zu bereits bekannten Punkten und definiert diese Punkte ebenfalls als bekannt (vgl. Abbildung 2-5).
3. Sobald ein bereits bekannter Teil der Karte erreicht wird aber die (inkrementell geschätzte) Position von der Kartenposition abweicht, wird der Widerspruch aufgelöst (engl. loop closing). Dieser Schritt ist notwendig, da bei inkrementeller Vermessung Messfehler kumulativ wirken und somit die geschätzte Position von der Wirklichkeit mit der Zeit immer stärker von der Realität abweicht. Das Ziel ist es folglich den Gesamtfehler zu minimieren und möglichst gleichmäßig auf alle betroffenen Messungen zu verteilen.

Insbesondere Schritt 3 ist Gegenstand aktueller Forschung und hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Karte [DUR-2006].

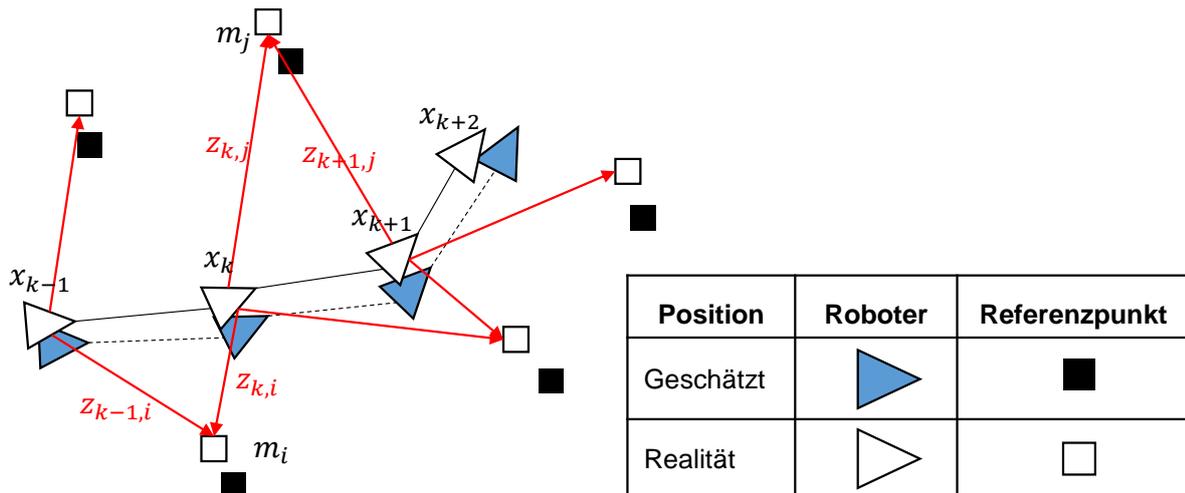


Abbildung 2-5: Navigation mittels SLAM (nach [DUR-2006])

Die relative Positionsbestimmung kann mit unterschiedlichen Sensoren erfolgen. Praxisrelevante Beispiele sind: Visual SLAM [KAR-2005; TAK-2017; CUM-2008], RGBD SLAM [HEN-2014; STU-2011] und 3D SLAM [COL-2006]. Grundsätzlich können beliebige Sensoren verwendet werden [DUR-2006].

- Bei Visual SLAM Verfahren kommen meist eine oder mehrere Kameras und Algorithmen vergleichbar der merkmalsbasierten *Augmented Reality* (vgl. Abschnitt 2.3.1) zum Einsatz [SE-2001; TAK-2017]. Es gibt aber auch Ansätze, die sich statt an Merkmalspunkten an Linien orientieren [MIC-2015] oder gänzlich ohne Merkmale auskommen und stattdessen auf den Pixelwerten direkt arbeiten [ENG-2014].
- RGBD-SLAM Algorithmen nutzen zusätzlich Tiefendaten, z. B. aus einer Time-of-Flight Kamera [HEN-2014].
- Bei 3D SLAM werden hingegen nur Tiefendaten etwa von Laserscannern oder LIDAR-Sensoren genutzt [COL-2006].
- Selbstverständlich lassen sich die oben genannten Verfahren auch mit weiteren Sensoren kombinieren [ENG-2012].

SLAM-Verfahren sind in nahezu allen gängigen mobilen Robotern implementiert, z. B. in Staubsaugerrobotern [FOR-2006] und Prototypen für autonome Autos [THR-2005; LEV-2010]. Es gibt eine große Zahl freier Implementierungen verschiedener SLAM-Verfahren, die üblicherweise von Forschungsinstituten bereitgestellt und weiterentwickelt werden [OPE-2017; ILA-2017; ILA-2017].

2.3.3 Optische Fußgänger-Navigation und -Ortung

Bei der präzisen Lokalisierung von Personen kommen im täglichen Leben vielfältige optische Technologien zum Einsatz. Dabei lässt sich zwischen der Navigation und der Ortung unterscheiden. Bei der Navigation möchte der Nutzer seine Position bestimmen, z. B. um sich innerhalb eines Gebäudes zurecht zu finden [GU-2009]. Gängige Anwendungsfälle sind folglich die Navigation in Gebäudekomplexen und das Anbieten ortsbezogener Dienstleistungen, sog. location-based Services [KÜP-2005, S. 1ff.], z. B. in Supermärkten, Bibliotheken, Messen, Konferenzen, Museen und Galerien [FOU-2002]. Die Ortung hat hingegen das Ziel die Position von beliebigen oder bestimmten Personen ohne deren unmittelbare Mitwirkung zu bestimmen [GU-2009; MIT-2003]. Die Position kann dabei zur Verfolgung von Personen in Gebäuden oder auf Plätzen im Rahmen von Systemen zur Videoüberwachung genutzt werden [COL-2000; HAM-2005], aber auch für die Analyse von Laufwegen der Kunden zur Optimierung der Warenplatzierung [AXP-2017] dienen. Im Fußball können mit vergleichbarer Technik auch Informationen zum Trainings- und Spielverhalten gewonnen werden [OHN-2000; MÜL-2004]. Weitere Anwendungsfälle sind die Ortung von Fußgängern an Ampeln [WEI-2011] und durch Fahrerassistenzsysteme [PAP-1999].

In Supermärkten werden aktuell Systeme erprobt, die Personen im Kassensbereich erkennen und nach Alter, Geschlecht und weiteren Parametern einordnen, um zielgerichtete Werbung auf dort sichtbaren Monitoren darzustellen. Die Ortung einer Person beschränkt sich in diesem Fall auf die Zuordnung dieser Person zum Kassensbereich. [SPI-2017; KAN-2017]

Zwecks Navigation werden zusätzliche Endgeräte von Seiten des Nutzers vorausgesetzt – in der Regel ein ohnehin vorhandenes Smartphone. Die Navigation erfolgt dabei üblicherweise über eine separate App, welche die Sensoren des Smartphones und eine hinterlegte Karte zur *Posenschätzung* nutzt und dem Nutzer entsprechende Anweisungen gibt. [RUP-2009; SER-2010]

Das System der Firma NavVis erstellt initial mittels eines separaten Messwagens, der mit drei Laserscannern und sechs Kameras ausgestattet ist, eine präzise Karte. Mittels eines Smartphones wird anhand von Kamerabildern die Position in dieser Karte bestimmt. [NAV-2017]

Bei Google Tango kann sowohl die Karte als auch die spätere Navigation mit demselben Gerät durchgeführt werden [GOO-2016]. Das Produkt setzt spezielle Hardware, insbesondere eine im Gerät integrierte Time-of-Flight Kamera [ZHA-1998] voraus, so dass aktuell nur wenige Smartphones mit dieser Technologie kompatibel

sind [GOL-2016a; GOL-2016b]. Einen groben Überblick über die Architektur und die Vielzahl der in Google Tango eingesetzten Verfahren gibt Sturm [STU-2015].

Mittels visible light communication, also der Auswertung dynamischer, von Lampen ausgesandter Signale im Kamerabild, kann die Position ermittelt werden [ARN-2015, S. 90ff.]. Entsprechende Lampen pulsieren mit hoher Frequenz, übertragen dadurch eine eindeutige Identifikationsnummer und stellen damit einen Referenzpunkt dar, an dem sich die Auswertungssoftware orientieren kann. Die Firmen Phillips [LAM-2014] und Osram [OSR-2017] bieten entsprechende Produkte, bestehend aus LED-Lampe und Smartphone App, an. Im ISI-Walk Projekt wurde mit einem vergleichbaren Verfahren auch eine *Posenschätzung* von Flurförderzeugen umgesetzt [HEI-2013].

Für die Lokalisierung und Ortung von Personen werden im Alltag oft Funktechnologien eingesetzt [MAU-2012, S. 9f.]. Diese entsprechen jedoch nicht dem Fokus der Arbeit und werden daher nicht näher betrachtet.

2.3.4 Lokalisierung von Flurförderzeugen

Fahrerlose Transportsysteme (engl. automated guided vehicles, AGV) sind eine spezielle Form mobiler Roboter, die für Transportzwecke genutzt werden³. Lösungen zur Lokalisierung mobiler Roboter (vgl. Abschnitt 2.3.2) lassen sich daher auf diesen Anwendungsfall übertragen [ULL-2014, S. 118ff.]. Viele Verfahren zur *Posenschätzung* fahrerloser Transportsysteme funktionieren prinzipiell auch bei manuell bedienten Flurförderzeugen, etwa bei Gabelstaplern. Folglich kommen dort teilweise auch vergleichbare Technologien zum Einsatz [HOH-2012; IDE-2016]. Anders als bei fahrerlosen Transportsystemen ist der Einsatz einer Lokalisierungstechnologie für manuell bediente Fahrzeuge optional. Da Flurförderzeuge sich auf dem Boden bewegen, genügt es in der Regel statt der sechs Freiheitsgrade eines Festkörpers nur die drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in der Bodenebene zu betrachten [GÜN-2014a, S. 83f.; HOH-2014, S. 124f.; JUN-2015; HEI-2013].

Dieser Abschnitt beschäftigt sich folglich mit Technologien, die in Industrie und Forschung zur *Posenschätzung* von fahrerlosen Transportsystemen und manuell bedienten Flurförderzeugen genutzt werden.

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle

[ULL-2014, S. 118ff.] unterteilt die verschiedenen Lokalisierungsverfahren für fahrerlose Transportsysteme in folgende Kategorien:

- Aktiv Induktive Spurführung
- Optische Spurführung
- Magnetische Spurführung
- Rasterverfahren
- Lasernavigation mit künstlichen Markern
- Lasernavigation ohne künstliche Marker
- Odometrie (Koppelnavigation)
- (GPS/DGPS – Navigation)

Mittels Odometrie und der sog. Koppelnavigation wird die Position eines fahrerlosen Transportsystems anhand der gemessenen Drehrate der Antriebsachse und dem Lenkwinkel der Lenkachse relativ zu einer bekannten Startposition inkrementell bestimmt [BOR-1996]. Bei der Trägheitsnavigation kommt ebenfalls die Koppelnavigation zum Einsatz, um die aktuelle Position relativ zu einer bekannten Position zu schätzen. Statt der Odometrie wird jedoch eine Inertialsensorik (IMU) verwendet, um Positionsänderungen aus der Änderung der Beschleunigung entlang der Freiheitsgrade des Fahrzeugs zu ermitteln [BRI-1971, S. 2].

Jede Form der Koppelnavigation unterliegt aufgrund von Messfehlern in den Sensordaten einem inkrementellen Positionsfehler, welcher über die Zeit und/oder die Fahrstrecke zu immer höheren Abweichungen zwischen Positionsschätzung und realer Position führt. Der inkrementelle Fehler kann durch Kalibrierung der Sensoren [BOR-1996] und statistische Methoden reduziert, aber nicht komplett eliminiert werden [SHO-1997]. Daher wird die Koppelnavigation bei Flurförderzeugen in der Regel mit weiteren Verfahren kombiniert, welche eine absolute Positionsmessung ermöglichen und somit regelmäßig neue Startpunkte, von denen aus inkrementell navigiert werden kann, ermitteln [ULL-2014, S. 111].

Bei der aktiv induktiven, magnetischen und optischen Spurführung erkennt das fahrerlose Transportsystem mittels eines entsprechenden Sensors eine am Boden angebrachte Linie (siehe Abbildung 2-6). Die aktiv induktive Spurführung nutzt einen induktiven Sensor zur Verfolgung eines Leitdrahtes, die magnetische Spurführung verfolgt eine magnetische Leitspur mittels eines Magnetsensors und die optische Spurführung wird in der Regel mit einem Helligkeitssensor zur Erkennung einer optisch vom Fußboden unterscheidbaren Linie realisiert. [ULL-2014, S. 109ff.]

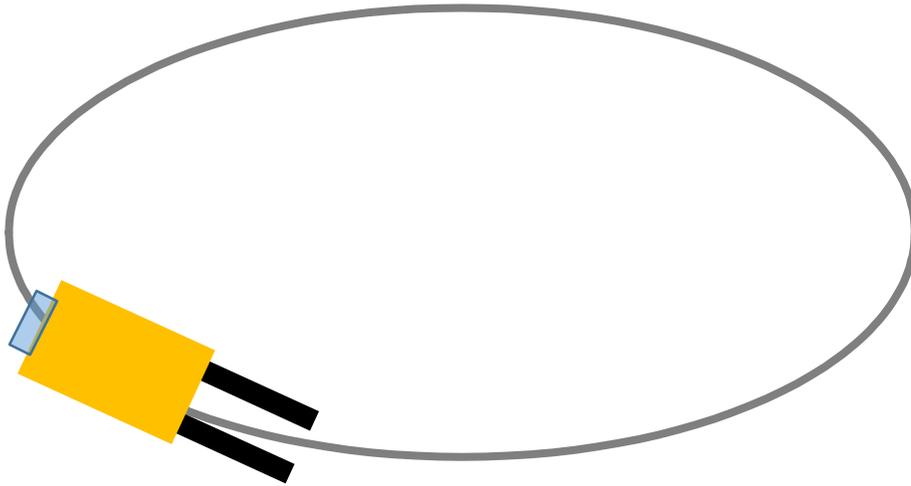


Abbildung 2-6: Fahrzeugnavigation mit einer Leitspur

Bei Rasterverfahren wird hingegen statt einer Leitspur ein regelmäßiges Gitter aus Referenzpunkten genutzt (vgl. Abbildung 2-7). Referenzpunkte können dabei optisch vom Fußboden unterscheidbare Punkte oder auf den Boden geklebte Magnete oder Transponder sein. Letztere können ggf. im Boden eingelassen werden. Die Navigation zwischen den Referenzpunkten kann mittels Koppelnavigation erfolgen. Je weiter voneinander entfernt die Referenzpunkte sind, desto wichtiger ist die Genauigkeit der Koppelnavigation. Da das Fahrzeug zwecks Navigation an keine (virtuelle) Spur gebunden ist, ermöglicht ein Rasterverfahren eine freie Navigation im Warenlager. [ULL-2014, S. 111ff.]

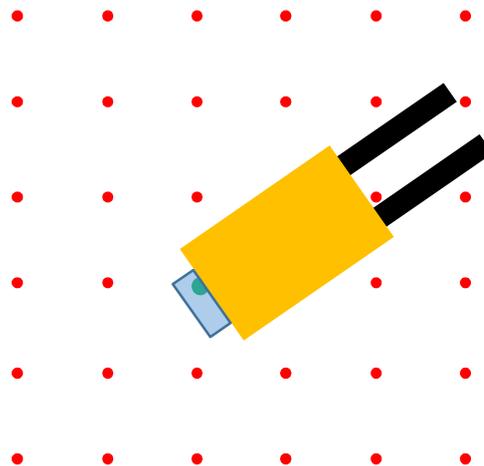


Abbildung 2-7: Fahrzeugnavigation mittels Rasterverfahren [ULL-2014, S. 111ff.]

Die Lasernavigation basiert auf der Messung von Abständen eines Laserscanner zu Reflektoren in der Umgebung des Fahrzeug mittels Trilateration [DUR-1996; AND-2013, S. 3f.]. Neuere Verfahren [ZHA-2002a; DÜR-2009; BLU-2016] verzichten auf Referenzpunkte und nutzen stattdessen Abstände zu initial kartierten Umgebungsmerkmalen (vgl. Abbildung 2-8). In der Praxis wird ein ohnehin am Fahrzeug montier-

ter Sicherheitslaserscanner ebenfalls zur Navigation verwendet und folglich kein weiterer Sensor benötigt [BUB-2014, S. 229].

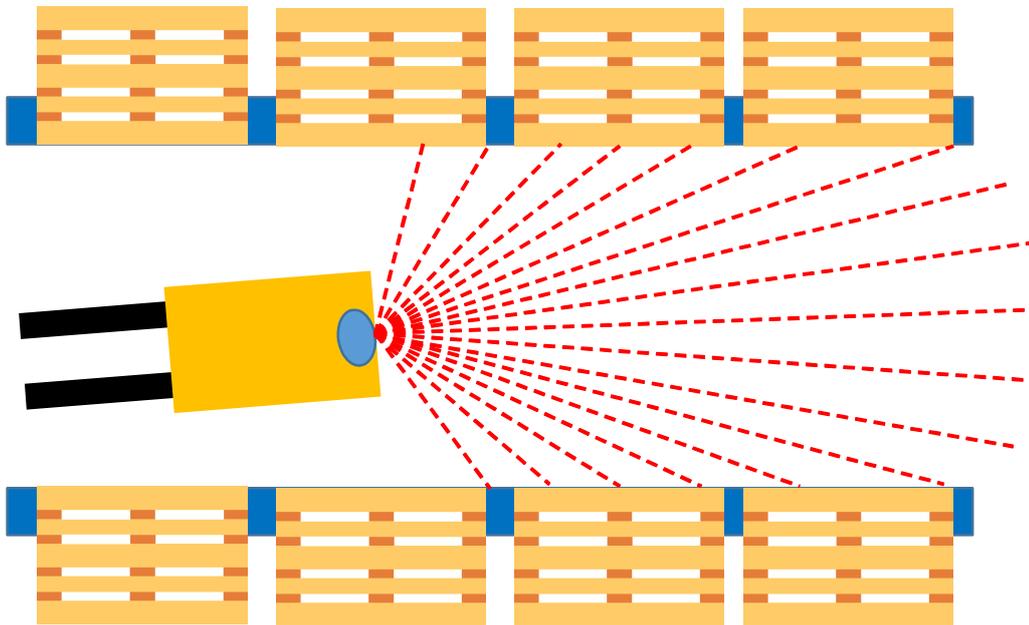


Abbildung 2-8: Lasernavigation am Gabelstapler (nach [IDE-2016])

GPS [WEL-1987, S. 79], DGPS [DOD-2010, S. 218ff.] und Real Time Kinematic (RTK) [DOD-2010, S. 192f.] gehören zu den Satellitennavigationsverfahren⁴. Diese Verfahren benötigen zur Positionsbestimmung eine zeitgleiche Sichtverbindung zu mindestens vier Satelliten und werden folglich für fahrerlose Transportsysteme nur in Außenbereichen genutzt, spielen bei der Indoor-Lokalisierung aber praktisch keine Rolle [MAU-2012, S. 8].

Mittels Bildverarbeitung kann ebenfalls eine freie Navigation umgesetzt werden. Die Position wird relativ zu natürlichen oder künstlichen Referenzpunkten bekannter Position, die mit einer oder mehreren Kameras erfasst werden, berechnet [TOT-2014]. Bei der Bildauswertung kommen die in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen Verfahren zum Einsatz.

Speziell für manuell bediente Flurförderzeuge gibt es eine Reihe von Produkten, die auf den Konzepten für die Navigation fahrerloser Transportsysteme aufbauen. Teils bieten unterschiedlichen Hersteller vergleichbare oder nahezu identische Produkte an. In manchen Fällen ist unklar, in wie weit dahinter unterschiedliche technische Lösungen stecken oder ob es sich nur um Resale eines Produktes eines anderen

⁴ siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Globales_Navigationssatellitensystem

Herstellers handelt. Daher werden im Folgenden nur einzelne Repräsentanten der jeweiligen Technologie als Beispiele aufgelistet.

- Das Track+Race System der Firma Indyon ist ein Rasterverfahren, welches im Boden versenkte RFID HF-*Tags* als Referenzpunkte nutzt [IND-2017a].
- Sky-Trax der Firma TotalTrax erkennt mit einer Kamera an der Hallendecke in einem regelmäßigen Gitter angebrachte Referenzpunkte (*Augmented Reality Marker*) und bestimmt die Position des Flurförderzeugs relativ dazu. Die Kamera besitzt eine eigene Auswertungslogik und benötigt daher keine externen Ressourcen zur Positionsbestimmung [TOT-2014].
- ZENOWAY von ZenoTrack nutzt ebenfalls Bildverarbeitung zur Positionsbestimmung [ALE-2013]. Dabei wird die Position wenn möglich relativ zu künstlichen Referenzpunkten bestimmt und sonst inkrementell zur letzten bekannten Position mittels Algorithmen zur Bestimmung des optischen Flusses [HOR-1981] ermittelt [ESS-2011]. Die Bildauswertung wird auf einem leistungsfähigen Industrie-PC durchgeführt [ULE-2011, S. 10f.].
- Bei dem System identplus von IdentPro handelt es sich um ein Verfahren zur Lasernavigation (siehe Abbildung 2-8) auf Basis von Umgebungsmerkmalen [IDE-2016]. Alleinstellungsmerkmal ist ein besonders robuster Laserscanner, welcher laut Hersteller trotz regelmäßiger Vibrationen und Erschütterungen, denen Fahrer (und Ausrüstung) am manuell bedienten Flurförderzeug ausgesetzt sind [FIS-2015, S. 4], funktionsfähig bleibt [IDE-2016].

Hohenstein vergleicht diverse Lokalisierungssysteme unter den Gesichtspunkten Einsatzbereiche, Leistungsfähigkeit und Flexibilität [HOH-2012]. Auch von Seiten der Forschung wurden diverse, teils sehr ähnliche Ansätze zur Lokalisierung von Flurförderzeugen untersucht:

- Für das Forschungsprojekt „Das Staplerauge“ [GÜN-2014a] wurde am Lehrstuhl fml ein Lokalisierungssystem in Software umgesetzt, das auf dem gleichen Verfahren wie das Sky-Trax-System [TOT-2014] beruht, aber mit einer handelsüblichen Industriekamera arbeitet und mit deutlich weniger Referenzpunkten auskommt. Die Referenzpunkte können beliebig angeordnet werden. Das System erlaubt unter bestimmten Umständen zusätzlich die Bestimmung der Gabelhubhöhe mit derselben Kamera [GÜN-2014a, S. 116f.; HOH-2014, S. 136ff.]. Jung et al. zeigen, dass zur Flurförderzeuglokalisierung ein optimales *Tracking* der Fiducial Marker entwickelt werden kann und sich die benötigte Rechenleistung des Verfahrens im worst-case deutlich reduzieren lässt [JUN-2015].

- Im Rahmen des Projekts “Markerbasierte lokale Ortung von Betriebsmitteln” (MarLo) untersucht das Fraunhofer IFF eine Fremdortung von Flurförderzeugen auf Basis von Fiducial Markern (vgl. Abschnitt 2.3.1). Die Sensoren werden dazu in die Infrastruktur im Bereich der Hallendecke integriert und erlauben die Position der gekennzeichneten Objekte mit einer Genauigkeit bis zu ± 250 mm und mit einer Latenz von unter fünf Sekunden zu bestimmen. [SCH-2011]
- Heißmeyer et al. zeigen die Eignung von Visible Light Communication (vgl. Abschnitt 2.3.3) zur präzisen Lokalisierung von Flurförderzeugen [HEI-2013].
- Das Fraunhofer IML fusioniert eine proprietäre Funkortung, eine Inertialsensorik und die Fahrzeugodometrie, um Fahrerlose Transportsysteme zur lokalisieren [ALB-2016].
- Tilch verwendet statt Fiducial Markern ein projiziertes Muster, das mittels Bildverarbeitung erkannt und zur Positionsbestimmung genutzt werden kann [TIL-2013, S. 11f.].
- Im Forschungsprojekt Marion wurde eine kooperative Ortung verschiedener Flurförderzeuge entwickelt. Schwerpunkt ist die Erkennung anderer Flurförderzeuge durch Auswertung der Daten mehrerer Laserscanner. In Kombination mit der Odometrie kann die relative Position der Flurförderzeuge zueinander ermittelt werden. [REI-2014, S. 28f.]

Für die Lokalisierung von Flurförderzeugen gibt es zudem zahlreiche Funkortungsverfahren, deren Genauigkeit für die eindeutige Identifizierung einer Europalette anhand der Position des Flurförderzeugs (vermutlich) nicht ausreicht. Oft geben die Hersteller keine Angaben zur Genauigkeit an oder es ist von einer unpräzisen Genauigkeit von „bis zu $\pm x$ m“ die Rede. Da das Messverfahren, mit dem der Hersteller diese Werte ermittelt hat, in der Regel nicht veröffentlicht oder zumindest nicht genannt wird, sind die Genauigkeitsangaben nicht seriös vergleichbar. Solche Produkte werden daher im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, wenn sie die benötigte Genauigkeit in ihren Produktbeschreibungen nicht explizit zusichern. Beispiele hierfür sind, ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- Der FleetRadar [FM-2017] von Jungheinrich, welcher auf der awiloc-Technologie des Fraunhofer IIS [FRA-2011] basiert und die empfangene Signalstärke (RSSI) von Bluetooth-Beacons zur Positionsbestimmung nutzt. Pflaum gibt eine mittlere Genauigkeit von 1-5 m für das awiloc-Lokalisierungssystem an [PFL-2014]. FleetRadar erreicht eine Genauigkeit von bis zu 3 m und benötigt mindestens je 30 m² Lagerfläche ein Beacon [FM-2017].

- [ROH-2008] nutzt Trilateration in einem drahtlosen nanoLOC [NAN-2009] Sensornetzwerk zur Ortung eines Gabelstaplers und erreicht dabei eine Genauigkeit $<\pm 1$ m bei konstanter Fahrt entlang einer geraden Linie.
- Bei Lips handelt es sich um ein proprietäres Funkortungsverfahren im 2,4 GHz Bereich, das die Position spezieller *Tags*, die z. B. an Gabelstapler montiert werden können, relativ zu Ankerpunkten in der Infrastruktur vermisst. Das Verfahren erreicht laut Hersteller eine Genauigkeit von bis zu ± 1 m. [MUL-2015]
- Das System WareTrack von Essensium arbeitet nach dem gleichen Prinzip, erreicht jedoch gemäß Produktbeschreibung eine Genauigkeit $<\pm 1$ m [ESS-2014a; ESS-2016].

2.4 Systemintegration am Flurförderzeug

Es wird eine Eigenortung des Flurförderzeugs angestrebt und die Sensoren am Flurförderzeug angebracht. Bestandteil der Systemintegration einer solchen Sensorlösung am Flurförderzeug sind die Montage der Sensorik, deren Spannungsversorgung und die Übertragung der Sensorinformationen zu einem Rechensystem zwecks Auswertung der empfangenen Daten zur Informationsgewinnung. Wird das Rechensystem ebenfalls am Flurförderzeug betrieben, ist es dort ebenfalls zu montieren und mit Spannung zu versorgen.

2.4.1 Anbringungspunkt des Sensors

Die Integration der Sensoren zur Flurförderzeuglokalisierung wird folgend am Beispiel eines Gabelstaplers betrachtet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Anbringungspunkten von am Markt verfügbaren und somit praxistauglichen Produkten zur Lokalisierung von Flurförderzeugen.

- Beim Indyon Track+Race System wird der Sensor unter dem Fahrzeug angebracht, da physikalisch bedingt eine geringe Distanz zwischen Sensor und *Tag* erforderlich ist [IND-2017a; GÜN-2007]. Dort ist zwar eine Messung problemlos möglich, allerdings ist der Sensor, in diesem Fall die HF Antenne, dort auch starken physischen Belastungen ausgesetzt.
- Kamerabasierte Systeme, wie Sky-Trax und ZENOWAY, nutzen eine am Fahrzeugdach angebrachte Kamera zur Lokalisierung [TOT-2014; ALE-2013]. Dort ist der Sensor vergleichsweise gut gegenüber Stößen geschützt und es bestehen keine oder nur geringe Sichthindernisse.
- Fahrerlose Transportsysteme nutzen für die Kollisionsvermeidung in der Regel Laserscanner an der Fahrzeugvorder- und Rückseite. Dieselbe Sensorik kann

zusätzlich zur Lokalisierung genutzt werden. Eine freie Sicht nach vorn bzw. hinten ist hier ebenfalls unabdingbar. [BUB-2014, S. 229]

- IdentPro verwendet bei identplus einen vergleichbaren Ansatz am manuell bedienten Stapler. Der Laserscanner wird am hinteren Teil des Fahrzeugdachs montiert und nach hinten ausgerichtet. [IDE-2016]
- Diverse Forschungsprojekte verwenden ähnliche Ansätze zur Lokalisierung wie bereits bestehende Produkte und nutzen aus offensichtlichen Gründen auch vergleichbare Anbringungspunkte für die Sensorik [HEI-2013; SCH-2011; GÜN-2014a, S. 75ff.].
- Im Projekt „Das Staplerauge“ wurden verschiedene Anbringungspunkte für Kameras in Bezug auf ihre Eignung für unterschiedliche Sensorfunktionen untersucht. Für die Sensorfunktion Lokalisierung wurde ebenfalls ein Anbringungspunkt am hinteren Teil des Dachs der Fahrerkabine gewählt. [GÜN-2014a, S. 39f.]
- Hohenstein nutzt zur Lokalisierung einen Anbringungspunkt am unteren Ende des Hubmastes, um eine Funktionsintegration mit einer Gabelhubhöhenenerkennung umsetzen zu können [HOH-2014, S. 148]. Für die Bestimmung der Hubhöhe wird ein Marker am Gabelträger genutzt, der daher stets im Bild erkennbar sein muss [HOH-2014, S. 140ff.]. Der Anbringungspunkt für eine Kamera ist jedoch aus verschiedenen Gründen ungünstig, u. a. ist die Kamera an dieser Stelle weniger gegen Verschmutzung geschützt [HOH-2014, S. 149] und neigt sich mit dem Hubmast, was eine Lokalisierung des Fahrzeugs erschwert [HOH-2014, S. 139f.].

2.4.2 Spannungsversorgung

Staplerbatterien liefern je nach Modell Spannungen von 24 V, 36 V, 48 V oder 72 V [MAY-2016]. Für davon abweichende Spannungen ist ein Spannungswandler notwendig. Die Boardnetze der Stapler führen jedoch in der Regel über bereits integrierte DC-DC Wandler zusätzlich 12 V.

Ist ein Stapler bereits mit einem Stapler-Terminal ausgerüstet (Eingangsspannung je nach Modell zwischen 10-60 V), so können über dessen USB-Anschlüsse zusätzlich 5 V mit bis zu 0,5 A bei USB 2.0 bzw. 0,9 A bei USB 3.0 Buchsen bezogen werden [AXE-2015, S. 376].

Für höhere Stromstärken oder andere Spannungen wird, falls nicht bereits vorhanden, ein geeigneter DC-DC-Wandler benötigt. Auf eine galvanische Trennung von der Staplerbatterie muss dabei geachtet werden, damit Schwankungen im Bordnetz

des Staplers die zusätzlich an die Batterie angeschlossenen Verbraucher nicht gefährden.

Für Demonstratoren in Forschungsprojekten kommt als Recheneinheit üblicherweise ein Laptop zum Einsatz. Eine autarke Energieversorgung sowohl für den Sensor als auch für die Recheneinheit ist somit ebenfalls möglich, aber aufgrund der geringen Batterielaufzeit in der Praxis aktuell ungeeignet.

2.4.3 Datenübertragung

Die Kommunikation zwischen einem Lokalisierungssystem und weiteren IT-Systemen, z. B. dem Lagerverwaltungssystem (LVS), kann mittels standardisierter und weit verbreiteter Kommunikationsschnittstellen erfolgen. Für eine kostengünstige Lokalisierung sind geringe Infrastrukturkosten und eine ausreichende Bandbreite des Kommunikationskanals Bedingung und somit ist eine geringe Anzahl an jeweils wiederum kostengünstigen Zugangspunkten notwendig. Aus den oben genannten Kategorien erfüllen diese Bedingungen aktuell nur Breitbandfunk-Technologien. Im Folgenden werden jedoch nur die Übertragungstechnologien betrachtet, welche Schicht 1 und 2 des OSI-Modells [ISO/IEC 7498-1] zuzuordnen sind.

Da Flurförderzeuge grundsätzlich mobile Systeme sind, kommen zur Anbindung an das LVS nur drahtlose Technologien in Frage [GÜN-2016, S. 159]. Günthner stellt die im Lager gängigen Funktechnologien Bluetooth, DECT, GSM/UMTS, WLAN und ZigBee einander gegenüber [GÜN-2016, S. 174]. Für die Kommunikation zwischen Leitsteuerung und Fahrzeugsteuerung eines FTF kommt in der Regel WLAN zum Einsatz [ULL-2014, S. 152].

Im industriellen Umfeld ist für die drahtlose Übertragung von Informationen IEEE 802.11 [IEEE STD 802.11-2016], umgangssprachlich auch W(ireless)LAN oder WiFi genannt, sehr weit verbreitet [HAN-2010; VDE-2017]. IEEE 802.11 bietet potentiell sehr hohe Bandbreiten bis zu mehreren Gigabit pro Sekunde [IEEE STD 802.11-2016, S. 2436] und setzt keine Funklizenz voraus. Spezielle drahtlose Zugangspunkte (engl. Wireless Access Point) für den Einsatz im industriellen Umfeld sind von diversen Anbietern verfügbar. Für den Einsatz in Warenlagern bieten viele Systemlieferanten Funksimulationen an, um bereits in der Planungsphase die für eine gute Netzabdeckung benötigte Zahl und Position der drahtlosen Zugangspunkte zu bestimmen. Die Zugangspunkte können entweder als Repeater⁵ zu einem zentralen

⁵ siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Repeater>

Zugangspunkt oder als Mesh-Knoten nach IEEE802.11s [IEEE STD 802.11-2016, S. 205ff.] betrieben werden. Ein Repeater leitet jedes empfangene Netzwerkpaket in seinem gesamten Empfangsbereich weiter. Dabei können sich die Signale verschiedener Repeater gegenseitig stören. In Mesh-Netzwerken nach IEEE802.11s wird hingegen leichter eine bessere Abdeckung erreicht, da das Signal über verschiedene Wege im Netz weitergeleitet werden kann [MET-2005].

Für den Einsatz an Flurförderzeugen ist auch ZigBee nutzbar [CHI-2011]. Bei ZigBee handelt es sich um eine schmalbandige Schnittstelle für drahtlose Netzwerke mit einer Reichweite von 10-100 m. Die Teilnehmer eines ZigBee Netzwerkes organisieren sich dezentral zu einem Ad-hoc-Netz und ermöglichen so auch Teilnehmern dieses Netzes, die sich nicht direkt erreichen können eine Verbindung untereinander [KRA-2014, S. 5].

Über Mobilfunk GSM, UMTS, LTE und künftig 5G werden im Alltag sehr große Datenmengen übertragen. Entsprechende Sende- und Empfangsmodule sind teils bereits in Staplerterminals integriert oder nachrüstbar und können somit zur Kommunikation zwischen Lokalisierungssystem und LVS genutzt werden. Wesentliche Nachteile sind die nach Datenvolumen anfallenden Übertragungskosten und die zusätzlich notwendige Verschlüsselung der Verbindung zwischen Endgerät und LVS. Demgegenüber wird jedoch keine zusätzliche Infrastruktur benötigt, sofern die Netzabdeckung des genutzten Mobilfunknetzes im Lager bereits ausreichend ist. Ansonsten ist ggf. der Betrieb einer zusätzlichen Mikro- oder Femtozelle⁶ notwendig [KAR-2008].

Unter dem Stichwort *Industrial Radio* wird von Seiten der Forschung intensiv an robusten und störungsresistenten Kommunikationsprotokollen speziell für den Einsatz im industriellen Umfeld geforscht [IND-2017b]. Konkrete Produkte stehen aktuell nicht zur Verfügung.

Die in der Logistik zur Identifizierung von Waren oder Ladeeinheiten weit verbreitete Radiofrequenz Identifikation (RFID) kann auch zur Kommunikation zwischen zwei Funkteilnehmern genutzt werden. Mit dem ISO/IEC 15961 [ISO/IEC 15961-1:2013] und 15962 [ISO/IEC 15962:2013] AIDC RFID Data Protocol steht bspw. ein Standard zur Verfügung, über den beliebige Daten zwischen Kommunikationsteilnehmern übertragen werden können. Mittels RFID UHF können dabei Reichweiten bis zu 10 m erreicht werden [GÜN-2016, S. 189]. Der Austausch von Daten über RFID-UHF kann auch von intelligenten Behältern zur Kommunikation mit Identifikationspunkten ge-

⁶ siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Femtozelle>

nutzt werden [EMM-2012; PRI-2016, S. 134f.]. Ein Einsatz zur Kommunikation zwischen Flurförderzeug und LVS ist aktuell nicht bekannt aber prinzipiell analog möglich.

Die Kommunikation zwischen Systemmodulen, die sich auf dem Fahrzeug befinden, kann drahtgebunden erfolgen – üblicherweise betrifft dies die Kommunikation zwischen Sensor und einer Auswerteeinheit, deren Schnittstelle bereits durch den Sensor vorgegeben ist. Bei Industriekameras sind GigE Vision [AIA-2014], welches Gigabit Ethernet (100/1000 Base-T) als Übertragungstechnologie nutzt und USB3 Vision, das auf USB 3.0 aufsetzt, sehr verbreitet [DEM-2011, S. 256]. USB 2.0 kommt selten bei Industriekameras mit niedriger Auflösung zum Einsatz [DEM-2011, S. 255], ist aber bei kostengünstigen Webcams immer noch der Regelfall. Manche Hersteller bieten auch Kameras an, die drahtlos über proprietäre Protokolle im 2,4 GHz ISM-Band mit IT-Systemen kommunizieren. Ein Beispiel für ein solches System ist SEETROLLER von Keytroller LLC, welches mit einer drahtlos angebundener Kamera Staplerfahrern Einblick in schlecht sichtbare Bereiche geben kann [LIF-2013]. Unter den am Markt erhältlichen Überwachungskameras verfügen mittlerweile viele ebenfalls über eine WLAN Schnittstelle.

Schmalbandige, drahtgebundene Schnittstellen (z. B. RS232⁷ o.Ä.) bieten für die angestrebten optischen Technologien keine ausreichende Bandbreite und werden daher in dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine geringe Bandbreite genügt jedoch um bereits ermittelte Posen, z. B. an ein Staplerterminal, weiterzuleiten.

2.4.4 Datenverarbeitung

Als Recheneinheiten kommen in der Praxis diverse Ansätze in Frage:

- Die vorwiegend für Schubmaststapler optional verfügbaren Gabelzinkenkameras zeigen dem Staplerfahrer einen Videodatenstrom aus Sicht der Gabelzinken an, führen dazu keine Bildauswertung durch und benötigen somit auch keine Auswertungseinheit, sondern einen Monitor zur Ausgabe des Videosignals [JUN-2016; STI-2017b].

In ersten Pilotprojekten nutzte das Lokalisierungssystem ZENOWAY [ALE-2013] (vgl. Abschnitt 2.3.4) einen Industrie-PC zur Auswertung [ESS-2011; ULE-2011, S. 10f.]. Dasselbe System verwendet in seiner aktuellen Ausbau-

⁷ siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/RS-232>

stufe stattdessen besonders leistungsfähige Staplerterminals zur Bildauswertung [MCT-2017].

- Staplerterminals bieten zusätzlich die Interaktion mit dem Fahrer und dem IT-System. Die Ein- und Ausgabe der Information kann dabei z. B. über den integrierten Touchscreen erfolgen.
- Moderne Flurförderzeuge verfügen bereits über eine integrierte Recheneinheit, welche prinzipiell für weitere Datenverarbeitung genutzt werden kann und in fahrerlosen Transportsystemen dafür auch genutzt wird [ULL-2014, S. 114].
- Sogenannte Smart-Kameras, also Industriekameras mit integrierter Auswerteeinheit, können die Signalauswertung bereits in der Kamera durchführen und benötigen daher nicht zwingend eine zusätzliche Recheneinheit zur Lokalisierung [TOT-2014].
- In manchen Produkten kommt auch ein speziell zur Verarbeitung entwickeltes, eingebettetes System zum Einsatz [ULL-2014, S. 115].
- Besteht eine stabile Netzwerkverbindung mit ausreichender Bandbreite, kann die Datenverarbeitung komplett oder teilweise in einem externen IT-System (LVS oder einer privaten Cloud) durchgeführt werden. In diesem Fall werden die Daten vom Flurförderzeug zum externen IT-System übertragen und das Ergebnis von dort ggf. zurück gemeldet. [MAL-2015, S. 23f.]
- In Forschungsprojekten wird die Datenverarbeitung üblicherweise auf einem Laptop durchgeführt. Für den Praxiseinsatz sind besonders robuste aber auch kostenintensive Laptops verfügbar [SEA-2008].
- Smartphones und Tablets sind im Alltag ebenfalls sehr weit verbreitet und verfügen über eine vergleichbare Rechenleistung wie Staplerterminals. Besonders robuste, teils wasser- und staubdichte Modelle können auch in industrieller Einsatzumgebung zuverlässig als Recheneinheit dienen [HAN-2013]. Die Firma Jungheinrich vertreibt z. B. eine Lokalisierungslösung, die als Sensor und Auswerteeinheit ein Smartphone verwendet [FM-2017].
- Beliebige Kombinationen aus oben genannten Recheneinheiten sind ebenfalls denkbar. Die Firma Indyon kombiniert z. B. ein eingebettetes System (Redbox) zur Signalauswertung mit einem Staplerterminal für die Ein-/Ausgabe und zur Anbindung an das LVS.

Es bestehen folglich viele Möglichkeiten die zur Lokalisierung benötigte Rechenleistung bereitzustellen. Nicht alle Lösungsansätze sind unter den gegebenen Randbedingungen realisierbar. Für eine kostengünstige Lokalisierung liegt die Herausforderung daher in einer besonders kostengünstigen Lösung zur Datenverarbeitung.

2.5 Anforderungen zur Flurförderzeuglokalisierung

Ein Lokalisierungssystem für Flurförderzeuge muss sowohl die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems erfüllen als auch diese Leistungsfähigkeit in industrieller Umgebung erbringen können. Der konkrete Prozess, in welchen das Lokalisierungssystem beim Anwender integriert werden soll, motiviert dabei die Mindestanforderungen an die Leistungsfähigkeit, während die Einsatzumgebung die Rahmenbedingungen festlegt, unter denen das System seine Funktion erfüllen muss.

Grundsätzlich lassen sich folglich diese Anforderungen in zwei verschiedene Teilbereiche gliedern [HOH-2012]:

1. Anforderungen durch den operativen Prozess und
2. Anforderungen durch die Einsatzumgebung

Soll ein Lokalisierungssystem auf Basis kostengünstiger Module umgesetzt werden, gelten diese Anforderungen ebenfalls. Schwächen kostengünstiger Module machen daher zusätzliche Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen notwendig (vgl. Kapitel 2).

In den folgenden Abschnitten werden die Anforderungen an ein optisches Lokalisierungssystem detailliert spezifiziert und mögliche Anknüpfungspunkte für die Kompensation von Schwächen kostengünstiger Module aufgezeigt. Des Weiteren werden zusätzliche Anforderungen aus den bestehenden Teilbereichen abgeleitet, die sich durch den Einsatz kostengünstiger Module ergeben bzw. die ein kostengünstiges Gesamtsystem garantieren sollen.

2.5.1 Anforderungen durch die Prozesse

Werden die Anforderungen der operativen Prozesse durch ein System vollständig erfüllt, ist ein uneingeschränkter Einsatz möglich. Die Leistungsfähigkeit des Systems soll eine „palettengenaue“ Lokalisierung eines Flurförderzeugs ermöglichen. „Palettengenaue“ bedeutet dabei, dass eine Ladeeinheit bei Aufnahme und Abgabe durch das Flurförderzeug eindeutig, anhand seiner Stellplatzkoordinaten und der Pose des Flurförderzeugs, identifiziert werden kann [GÜN-2007; ALE-2013]. Dazu muss die Genauigkeit mindestens kleiner oder gleich der halben, kürzeren Seite des Ladungsträgers sein und beträgt damit ± 400 mm für Europaletten [HEI-2013; HOH-2014, S. 71]. Alternativ können auch die operativen Prozesse angepasst werden, um die Anforderungen zu reduzieren und somit einen eingeschränkten Einsatz eines sonst unzureichenden Systems zu ermöglichen.

2.5.2 Leistungsfähigkeit der Lokalisierung

Wesentliche Kennzahlen zur Leistungsfähigkeit eines Lokalisierungssystems sind Abdeckung, Auflösung, Wiederholrate, Genauigkeit, Kosten, Latenz, Reichweite und Verfügbarkeit [MAU-2012, S. 17ff.].

Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Lokalisierung manuell bedienter Flurförderzeuge finden sich detailliert bei Hohenstein [HOH-2014, S. 65ff.]. Hohenstein fordert für eine eindeutige Zuordnung einer Europalette anhand der Fahrzeugposition, eine Genauigkeit von ± 400 mm und einen auf $\pm 45^\circ$ genauen Winkel. Die Präzision von 3σ begründet Hohenstein mit der in industriellen Prozessen durchschnittlichen Prozessqualität [B-W-2009]. Die Latenz rechtfertigt er anhand einer MTM-Analyse mit der rechtzeitigen Erkennung von Fehlern bei der Aufnahme einer falschen Ladeinheit. [HOH-2014, S. 73]

Tabelle 2-1: Anforderungen an die Lokalisierung von Flurförderzeugen

Anforderung	Gabelstapler [HOH-2014, S. 85]	FTF [BLU-2016]
Lokalisierungsfunktion		
Freiheitsgrade	3DoF	3DoF
Kontinuität	Kontinuierlich	Kontinuierlich
Lokisierungsleistung		
Genauigkeit	± 400 mm / $\pm 45^\circ$	± 10 mm / $\pm 1^\circ$
Präzision	3σ	
Auflösung	<100 mm	
Latenz	<0,5 s	<0,1 s
Integrationsaufwand		
Maximale Reichweite	<10 m	
Vernetzungsform	Keine	
Flexibilität		
Phys. Anpassbarkeit	Selbststeuernd	Selbststeuernd
Spannungsversorgung	aktiv	aktiv
Skalierbarkeit		
Max. Systemteilnehmer	<80	beliebig
Wirtschaftliche Anordnung	Infrastruktur	Umgebungsmerkmale
Wandlungsfähigkeit		
Funktionsintegration	ja	ja

Für fahrerlose Transportsysteme können die Anforderungen hingegen aus den Fähigkeiten aktuell verfügbarer Lokalisierungssysteme abgeleitet werden (siehe Tabelle 2-1). Detaillierte Informationen zur Leistungsfähigkeit finden sich hier in entspre-

chenden Datenblättern [BLU-2016; ULL-2014, S. 82]. Jedoch ist dort oft nicht klar unter welchen Bedingungen die jeweiligen Werte gemessen wurden, was die Vergleichbarkeit der Angaben unterschiedlicher Hersteller einschränkt.

Die Anforderungen an die Lokalisierung für fahrerlose Transportsysteme dienen in dieser Arbeit nur zum Vergleich mit dem Status quo und ggf. zum Aufzeigen von Verbesserungsbedarf. Der Schwerpunkt liegt jedoch angesichts der hohen Anforderungen an die Genauigkeit bei fahrerlosen Transportsystemen auf manuell bedienten Flurförderzeugen. Für den Spezialfall der Flurförderzeuge haben diverse Forschungsinstitute bereits vielversprechende kamerabasierte Ansätze entwickelt ([GÜN-2014a, S. 110ff.; HOH-2014, S. 153ff.; JUN-2015; HEI-2013], vgl. Abschnitt 2.3.4), welche die Anforderungen für fahrerlose Transportsysteme nicht erfüllen. Derart hohe Genauigkeiten erfordern zudem eine erheblich präzisere und sehr aufwändige Evaluierung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden kann. Die deutlich höhere Genauigkeit d_{max} gegenüber manuell bedienten Flurförderzeugen ist erforderlich, da das fahrerlose Transportfahrzeug eine Palette anhand seiner Position nicht nur zuordnen, sondern auch selbstständig korrekt anfahren können muss [ULL-2014, S. 43]. Für einen beliebigen Ladungsträger ergibt sich die Obergrenze für die Genauigkeit aus der Toleranz b_{Loch} bei der Einfahrt der Gabelzinken der Breite b_{Gabel} in den Ladungsträger (vgl. Formel (2-1), [DIN EN 13698-1]). Für eine Europalette [DIN EN 13698-1] ist nach dieser Formel $d_{max} \leq \pm 2,68 \text{ cm}$. Zusätzlich ist gemäß der Maschinenrichtlinie [DAS-2006, S. 37f.] von einer sehr hohen Wiederholgenauigkeit auszugehen, was wiederum eine hohe Zahl an Versuchen erforderlich macht.

$$d_{max} \leq \pm \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} (b_{Loch} - b_{Gabel}) \quad (2-1)$$

3 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Lokalisierung werden in Unterkapitel 2.5 betrachtet. Dieses Kapitel beschreibt neben bisher nicht definierten Anforderungen die zusätzlichen Anforderungen an ein Lokalisierungssystem, die sich ergeben, wenn kostengünstige Module zur Lokalisierung von Flurförderzeugen eingesetzt werden sollen, die für den industriellen Einsatz ursprünglich nicht vorgesehen sind. Kurz gefasst sind Maßnahmen zu treffen, welche die für die Lokalisierung relevanten Schwächen kostengünstiger Module ausgleichen (vgl. Unterkapitel 2.2). Je früher in der Verarbeitungskette dabei eine Unzulänglichkeit behoben wird, desto weniger Folgefehler kann sie produzieren, da in den auf die Korrektur folgenden Schritten zumindest die korrekte Eingabe vorliegt. Umgekehrt werden die Daten im Laufe der Verarbeitung von den umfangreichen Rohdaten systematisch auf die Positionsinformationen reduziert. Eine Korrektur auf bereits reduzierten Daten erfordert daher bei gleicher Komplexität weniger Aufwand, da die Eingabelänge für den Algorithmus geringer ist.

3.1 Kostengünstige Sensorik

Schwächen der kostengünstigen Sensorik sind dort auszugleichen, wo dies unter den gegebenen Randbedingungen (z. B. geringe Rechenleistung) möglich ist. Eine ungenügende Behebung dieser Schwachstellen hat unmittelbaren Einfluss auf die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Sensordaten.

Kostengünstige Sensoren liefern in der Regel weniger genaue Sensordaten. Für genaue Messungen ist in der Praxis eine Kalibrierung erforderlich, um systematische Fehler zu minimieren. Entsprechend ist für das Lokalisierungssystem eine gute Kalibrierung des optischen Sensors zwingend notwendig, stellt vom Umfang her aber keine zusätzliche Anforderung dar, da die entsprechenden Kalibriermodelle die in der Praxis bei kostengünstigen Kameras verstärkt auftretenden Verzerrungen bereits berücksichtigen [HEI-1997; DAT-2009; MIR-2012; ALB-2010].

Da CMOS-Sensoren kostengünstiger sind, kommen diese üblicherweise in kostengünstigen Kameras zum Einsatz. Der bei CMOS-Sensoren mit Rolling-Shutter auftretende Rolling-Shutter-Effekt verzerrt das Bild in Abhängigkeit von Belichtungszeit und Relativgeschwindigkeit zwischen Kamera und aufgenommenem Objekt, da nicht alle Pixel zeitgleich, sondern zeilen- oder spaltenweise zeitlich nacheinander belichtet

werden [BAK-2010]. Bewegt sich während der Belichtung ein Objekt im Bildbereich relativ zur Kamera, so bilden die später belichteten Pixel einen anderen Teil des Objektes ab, da dieses sich inzwischen ein wenig weiter bewegt hat [LIT-2001].

Um auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten genaue Positionsmessungen am Flurförderzeug durchführen zu können, sind daher Maßnahmen zu ergreifen, welche den Einfluss des Rolling-Shutter-Effektes minimieren. Bei teuren, üblicherweise mit CCD-Sensoren oder CMOS-Sensoren mit Global-Shutter ausgestatteten Kameras tritt dieser Effekt hingegen nicht auf [LIT-2001].

Analog verhält es sich mit der dem Laien aus Fotoaufnahmen mit Langzeitbelichtung bekannten Bewegungsunschärfe. Wird ein Bild bei hoher Relativgeschwindigkeit zwischen Kamera und aufgenommenem Objekt zu lange belichtet, erscheint das Objekt im Bild verschwommen, da es sich während der Belichtung an der Kamera vorbei bewegt. Je länger die Belichtung und je größer die Relativgeschwindigkeit im Bild, desto stärker ist dieser Effekt. [YIT-1997; JI-2008]

Entsprechender Einfluss auf das Messergebnis ist zu minimieren. Bei kostengünstigen Kameras ist dieser Effekt relevanter, da diese eine geringere Sensorfläche aufweisen und somit eine längere Belichtungszeit notwendig ist, um ein akzeptables Signal-Rausch-Verhältnis zu erzielen.

Die Kamera sollte auch in der Lage sein Bilder in unterschiedlichen Auflösungen zu liefern, damit die zu verarbeitende Datenmenge den zur Verfügung stehenden Rechenressourcen angepasst werden kann. Gleichzeitig reduziert sich bei verminderter Auflösung das Signalrauschen durch Mittelung benachbarter Pixel [JÄH-2005, S. 281f.]. Idealerweise verfügt der Sensor über eine Binning-Funktion, welche benachbarte Pixel bereits bei der Bildaufnahme im Sensor zusammenfasst [NAU-2014, S. 574].

Tabelle 3-1: Zu korrigierende Schwachstellen der Sensorik

Ziel	Ziel	Zusatzaufwand
Systematische Bildverzerrung	Minimieren	Nein
Rolling-Shutter-Effekt	Minimieren	Ja
Bewegungsunschärfe	Minimieren	Ja
Auflösung	Variabel	Ja

3.2 Anforderungen durch die Einsatzumgebung

Weitere Anforderungen resultieren aus der Bestimmung der Pose eines Flurförderzeugs während des Transportprozesses. Zum einen ergeben sich dadurch Anforderungen von Seiten des Flurförderzeugs, zum anderen Anforderungen aus dem Transportprozess.

3.2.1 Flurförderzeug im Warenlager

Der Einsatz eines Lokalisierungssystems am Flurförderzeug im Warenlager zeigt die wesentlichen zwei Kategorien von Umgebungsbedingungen auf – zum einen die durch das Flurförderzeug bedingten Einflüsse und zum anderen die Einwirkungen durch dessen Einsatzumgebung, das Warenlager. Für Erstere spielt die Integration am Flurförderzeug eine wesentliche Rolle, bei Letzteren geht es vorwiegend um die wechselnden Lichtverhältnisse und ggf. den Aufbau einer Infrastruktur zur Lokalisierung. Typische Wettereinflüsse, wie Temperatur und Feuchtigkeit, spielen im Warenlager nur in Spezialfällen eine signifikante Rolle und werden daher vernachlässigt.

Die Anbringung aller Komponenten (Sensor, Auswerteeinheit, Stromversorgung) muss aufwandsarm und schnell erfolgen, damit der Integrationsaufwand gering und das Flurförderzeug nach kurzer Zeit wieder einsatzbereit ist. Die Montage sollte reversibel sein, um einen Einsatz auch an Mietgeräten zu ermöglichen, welche durch den Anwender nicht dauerhaft modifiziert werden dürfen. Eine in der Regel notwendige Transformation von Kamerakoordinaten in Fahrzeugkoordinaten muss ohne Hintergrundwissen möglichst präzise mittels gängiger Messwerkzeuge bestimmt werden können, damit auf teures Messwerkzeug und Vermessungstechniker verzichtet werden kann. Dabei ist die Transformation entweder direkt zu bestimmen oder relativ zu einem Punkt zu vermessen, für den eine Transformation in Fahrzeugkoordinaten bereits bekannt ist und die gesamte Transformation folglich indirekt berechnet werden kann. Damit die Beziehung zwischen Fahrzeug- und Kamerakoordinaten über die Zeit konstant bleibt, ist eine stabile Anbringung zwingend notwendig und es sind entsprechende Materialien für Gehäuse und Halterung zu verwenden, die dies ermöglichen.

Werden künstliche Referenzpunkte in der Umgebung angebracht, so ist hier ebenfalls auf eine einfache, schnelle, stabile und präzise Anbringung zu achten. Die Montage sollte mittels üblicher Hilfsmittel und Werkzeuge erfolgen können. Da die Beleuchtung im Warenlager durch natürliche und künstliche Lichtquellen nicht homogen ist, muss bei der Bildaufnahme eine automatische Anpassung der Belichtungszeit

eingesetzt werden, um eine Überbelichtung oder Unterbelichtung relevanter Merkmale zu verhindern [NAU-2014, S. 571]

3.2.2 Transportprozess

Aus dem Transportprozess lassen sich ebenfalls zusätzliche Anforderungen an die Eigenschaften des Lokalisierungssystems ableiten. Die angestrebte Prozessqualität und die zeitlichen Abläufe im Prozess liefern dabei zu erfüllende Nebenbedingungen. Diese Nebenbedingungen sind nicht durch die Verwendung kostengünstiger Komponenten bedingt, aber in den bisher betrachteten Quellen nicht definiert worden und daher festzulegen.

Die Qualität eines Prozesses wird in der Six Sigma (6σ) Methode anhand der Häufigkeit der im Prozess auftretenden Fehler bewertet. Die Fehlerwahrscheinlichkeit eines Prozesses wird dabei durch eine Normalverteilung mit der Standardabweichung σ beschrieben. Für einen Prozess der Qualität $n\sigma$ wird gefordert, dass die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Prozessausführung kleiner als der Anteil ist, welcher außerhalb von n Standardabweichungen der Normalverteilung liegt. Für eine Qualität von 6σ muss die Fehlerwahrscheinlichkeit folglich $<0,00034\%$ sein. In der Praxis beträgt die durchschnittliche Qualität eines Logistik-Prozesses drei bis vier Sigma. [B-W-2009]

Ohne Zusatzinformationen bzw. Sensordaten wird stets eine fehlerfreie Ausführung des Prozesses angenommen. Im (unwahrscheinlichen) Fehlerfall trifft diese Annahme nicht zu und die Prozessausführung wird fälschlicherweise als korrekt angenommen. Mithilfe von Sensorinformationen kann die Prozessqualität gesteigert werden, indem (potentielle) Prozessfehler anhand der Messwerte rechtzeitig erkannt und korrigiert oder vermieden werden. Angenommen anhand eines (korrekten) Messwertes eines Sensors lassen sich fehlerfreie und fehlerbehaftete Prozessausführung stets erkennen und die Wahrscheinlichkeit P_m einen Messwert zu bestimmen sowie die Fehlerwahrscheinlichkeit des Prozesses P_e seien voneinander unabhängig, so verbleibt bei Einsatz des Sensors ein Prozessfehler P_r mit

$$P_r = P_e \cdot (1 - P_m) \quad (3-1)$$

Eine geringe Wahrscheinlichkeit einen Messwert zu ermitteln, senkt bereits den Prozessfehler und kann daher nützlich sein, sofern die Messung stets hinreichend genau ist. Die Anforderung an die Verfügbarkeit (nicht Korrektheit!) der Messung ist daher allein von der Erwartung des Anwenders an das System abhängig. Analog zu Hohenstein [HOH-2014, S. 72; B-W-2009] wird von einer Erwartung des Anwenders an

eine Güte von 3σ ausgegangen, was einer Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Messung von ca. 99,73 % entspricht.

Tabelle 3-2: Relevante Zeiträume für die Positionsmessung

Anwendungsfall	Zeitraum
Positionsbasierte Lagerverwaltung [GÜN-2007]	Aufnahme und Abgabe der Ladeeinheit durch das Transportfahrzeug
Navigation	Während der Fahrt
Kollisionswarnung	Dauerhaft
Positionsabhängige Dienste	Bei Bedarf

Der Zeitraum, in dem eine Messung relevant ist, hängt dabei vom Anwendungsfall ab (vgl. Tabelle 3-2). Der Zeitpunkt, ab dem die Positionsinformation des Lokalisierungssystems nach dessen Aktivierung zur Verfügung stehen muss, liefert eine zusätzliche Anforderung an die maximale Startdauer des Lokalisierungssystems. Es wird von einem zeitgleichen Start des Lokalisierungssystems und Staplers ausgegangen. Ist die Position für den Betrieb des Flurförderzeugs kritisch, z. B. bei fahrerlosen Transportsystemen, muss die Position bereits bekannt sein, bevor das Flurförderzeug bewegt werden darf. Die Startdauer des Lokalisierungssystems sollte folglich nicht wesentlich größer als die des Flurförderzeuges sein. Für manuell bediente Flurförderzeuge spielt die positionsbasierte Lagerverwaltung eine wichtige Rolle [GÜN-2007] (siehe Kapitel 1). Dort ergibt sich die maximal zulässige Startdauer Δt_L des Lokalisierungssystems als Summe der Startdauer des Flurförderzeuges Δt_S und der Dauer bis zur Aufnahme bzw. Abgabe der Ladeeinheit Δt_A (siehe Formel (3-2)). Bei der Aufnahme einer Ladeeinheit ist Δt_A minimal, wenn das Flurförderzeug bereits unmittelbar vor der Ladeeinheit steht. Falls die Ladeeinheit bereits aufgenommen wurde, ist die Quelle des Transportauftrags bereits überprüft worden und später bei der Abgabe der Ladeeinheit an der Senke erst wieder eine Prüfung notwendig.

$$\Delta t_L = \Delta t_S + \Delta t_A \quad (3-2)$$

Um ein konkretes Δt_S zu bestimmen, wird die zwischen Betätigung der Zündung und der Reaktion des Gaspedals verstrichene Zeit bei den am Lehrstuhl fml verfügbaren Teststaplern EFG 110k und EFG 220 gemessen. Δt_S beträgt hier auf beiden Modellen ca. acht Sekunden. Für andere Staplermodelle und -hersteller können andere Werte gelten. Δt_A wird mittels einer MTM-Analyse [DEU-2008] ermittelt. Dabei werden die in Tabelle 3-3 aufgelisteten Vorgänge als Grundlage verwendet. Der Vorgang zur Aufnahme einer Ladeeinheit besteht aus:

1. Gabel unter Transportgut fahren (55 TMU),
2. Joystick Hubfunktion (10 TMU),
3. Transportgut bodenfrei anheben (15 TMU),
4. Joystick Neigefunktion (10 TMU),
5. Hubgerüst 3 Grad neigen zurück (36 TMU) und
6. Joystick Rückwärtsgang (10 TMU).

Die Summe der einzelnen Aktionen beträgt 136 TMU. Um diesen Wert in Sekunden umzurechnen, muss mit einem Wert von 0,036 s/TMU multipliziert werden [LUC-1993, S. 522]. Somit beträgt $\Delta t_A = 136 \text{ TMU} \cdot 0,036 \text{ s/TMU} = 4,896 \text{ s}$. Die umgekehrt mögliche Abgabe der Ladung nach Starten eines bereits beladenen Gabelstaplers kann analog berechnet werden und benötigt nach MTM-Analyse exakt gleich viel Zeit. Die Startdauer sollte daher auf den getesteten Fahrzeugen <13 Sekunden betragen, damit die Positionsbestimmung stets rechtzeitig zur Verfügung steht. Tabelle 3-4 fasst die zusätzlichen Anforderungen aus dem Transportprozess zusammen.

Tabelle 3-3: Zeitmessinformationen für Gabelstapler nach MTM Methode [DEU-2010]

Vorgang	Code	TMU
Gabel unter Transportgut fahren / aus Transportgut ziehen	SGPKF	55
Joystick bedienen	ABJ	10
Transportgut bodenfrei anheben / absetzen	SHPAS	15
Hubgerüst 3° neigen / senkrecht stellen	SVHNF	36

Tabelle 3-4: Anforderungen aus dem Transportprozess

Eigenschaft	Ziel	Zusatzaufwand
Verfügbarkeit	Erfolgreiche Messung in 99,73 % der relevanten Fälle	Nein
Startdauer	<13 Sekunden	Nein

3.3 Abgeleitete Anforderungen

Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem Einsatz kostengünstiger Module zur Entwicklung eines insgesamt kostengünstigen Lokalisierungssystems. In der Konsequenz sind die Kosten für dessen Bestandteile, also *Tag*, *Location Sensor*, *Location Engine* und Integration am Flurförderzeug, zu minimieren. Diese aus den Kosten abgeleiteten Anforderungen betreffen indirekt auch die Auswertungssoftware. Zusätzlich wirken sich Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems auf die Bildverarbeitungskette aus.

3.3.1 Anforderungen an die Module

Sollen die einzelnen Module, die für die Lokalisierung verwendet werden, kostengünstig sein, so gilt dies rekursiv für ihre Bestandteile. Entsprechend müssen sowohl die Sensoren als auch die Recheneinheit kostengünstig sein. Aufgrund kurzer Produktzyklen bei elektronischen Endkundenprodukten [KAR-2011, S. 272] sollte der Einsatz alternativer Komponenten oder Nachfolgemodelle ohne großen Aufwand möglich sein, damit der Preisvorteil der Hardware nicht durch höheren Entwicklungsaufwand zunichte gemacht wird.

Eine Anbringung von Kabeln zur galvanisch getrennten Spannungsversorgung an Flurförderzeugen ist vergleichsweise aufwändig und teuer. Daher ist eine autarke Energieversorgung anzustreben. Die Integration am Flurförderzeug reduziert sich folglich auf die robuste Befestigung der Komponenten am Stapler. Die verwendete Energiequelle sollte kostengünstig sein, die Komponenten mindestens eine Schicht (ca. acht Stunden) versorgen und leicht austauschbar sein. Aus der autarken Energieversorgung ergibt sich in der Praxis unmittelbar die zusätzliche Anforderung nach einem geringen Energieverbrauch der Hardware.

Die Module müssen idealerweise resistent gegenüber beim Betrieb von Flurförderzeugen auftretenden physischen Belastungen (Stoß, Temperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag) sein. Da es sich aber um Komponenten handelt, die für diesen Einsatz nicht entwickelt wurden, ist hier mit Defiziten zu rechnen, die nach Möglichkeit zu minimieren sind. Auch der Anbringungspunkt ist unter Berücksichtigung der externen Einflüsse auf die Module zu wählen.

Der Infrastrukturaufwand ist aus Kostengründen zu minimieren. Werden künstliche Referenzpunkte benötigt, so müssen diese ebenfalls kostengünstig, leicht anzubringen und leicht zu vermessen sein. Die Gesamtkosten für das Lokalisierungssystem müssen deutlich geringer als die Kosten am Markt verfügbarer Konkurrenzprodukte sein.

3.3.2 Anforderungen an die Software

Aus den in Abschnitt 3.3.1 behandelten Anforderungen an die (Hardware)-Module ergeben sich Konsequenzen für die Auswertungssoftware. Der künftige Einsatz alternativer Komponenten oder Nachfolgemodelle bisher genutzter Hardwaremodule macht eine aufwandsarme Portierbarkeit der entwickelten Software auf andere Hardware notwendig. Die vergleichsweise geringen Ressourcen kostengünstiger Recheneinheiten müssen zudem für die Bildauswertung genügen.

Auch das verwendete Betriebssystem muss möglichst schlank gestaltet sein, damit eine geringe Startdauer erreicht werden kann und Fehlerquellen durch installierte, aber nicht genutzte Software im Sinne einer höheren Verfügbarkeit vermieden werden. Der Übersichtlichkeit halber werden die Details dieser Anforderungen in Tabelle 3-5 dargestellt.

Tabelle 3-5: *Allgemeine Anforderungen an die Auswertungssoftware*

Anforderung	Ziel	Motivation
Portierbarkeit	Generischer Hochsprachencode ohne hardware-spezifische Optimierungen. Flexible Software-Schnittstelle zur Kamera, Vermeidung der Nutzung individueller Fähigkeiten der Hardware	Kurze Produktzyklen der verwendeten Hardware [KAR-2011, S. 272]
Performance	Hohe Ausführungsgeschwindigkeit, geringer Speicherverbrauch	Geringe Ressourcen, Attribute zur Lokalisierungsgüte (Frequenz, Latenz)
Betriebssystem	Minimale Softwareausstattung des Betriebssystems (Entfernung nicht benötigter Komponenten)	Geringe Startdauer, Eliminierung unnötiger Fehlerquellen

Tabelle 3-6: *Anforderungen an die Bildverarbeitungsalgorithmen in den jeweiligen Verarbeitungsschritten nach Jähne [JÄH-2005, S. 15f.]*

Verarbeitungsschritt	Anforderung	Zweck
Gesamt	Die Bildverarbeitungskette liefert robust eine hinreichend präzise Position des Flurförderzeugs auch bei realistischen Fahrmanövern. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit muss die Anforderungen an Latenz und Frequenz erfüllen.	Verfügbarkeit, Präzision, Latenz, Frequenz
Bildaufnahme	Die Bildaufnahme muss eine sinnvolle Auswertung in den nachfolgenden Verarbeitungsschritten ermöglichen.	Verfügbarkeit
Bildvorverarbeitung	Maßnahmen zur Erhöhung der Robustheit gegenüber erhöhtem Signalrauschen, Bewegungsunschärfe, geringem Kontrast und dem Einfluss von Beleuchtung sind zu ergreifen.	Verfügbarkeit
Segmentierung	Referenzpunkte müssen auch bei schlechter Signalqualität mit hoher Verfügbarkeit präzise genug für die Weiterverarbeitung erkannt werden.	Verfügbarkeit, Präzision
Bildanalyse	Es ist mit einer fehlerbehafteten Segmentierung zu rechnen. Trotzdem sollte eine Positionsbestimmung auf Basis der Segmentierung möglich sein. Die Güte des bestimmten Messwertes sollte bewertet werden.	Verfügbarkeit, Fehlererkennung

Für die Bildverarbeitungsalgorithmen als Teil der Auswertesoftware ergeben sich ebenfalls konkrete Anforderungen für jeden Teilschritt der Bildverarbeitungskette (vgl. Tabelle 3-6).

3.4 Anforderungen an den Wartungsprozess

Die bisher betrachteten Maßnahmen dienen überwiegend dazu vermeidbare Fehlerquellen zu eliminieren und Unzulänglichkeiten auszugleichen, die beim Einsatz kostengünstiger Hardware auftreten können. Probleme, die hingegen nicht oder nicht mit vertretbarem Aufwand vermeidbar sind, müssen zumindest erkannt werden. Folgen für die operativen Prozesse sind zu minimieren, um die Akzeptanz der Lösung zu steigern.

Eine erhöhte, in diesem Fall durch nicht industrietaugliche Module verursachte Fehleranfälligkeit führt allgemein zu einem erhöhten Wartungsaufwand [MOB-2002, S. 3f.]. Der Wartungs- und Reparaturprozess ist daher so zu gestalten, dass der zusätzliche Aufwand gering ausfällt. Reparaturaufwand und Ausfallzeit des Flurförderzeugs während eines Defektes am Lokalisierungssystem sind im Sinne der Kundenakzeptanz und der Servicekosten zu minimieren.

Alle physischen Wartungs- und Reparaturvorgänge sollten durch den Anwender vor Ort ausgeführt werden können. Die übrigen Maßnahmen sollten per Fernwartung beherrschbar sein. Um dem Anwender die Wartungsaufgaben zu erleichtern, sollte der Austausch aller Komponenten schnell und leicht durchzuführen sein und der Anwender genügend Ersatzteile vorhalten. Eine möglichst präzise Anweisung zur Fehlerbehebung verhindert dabei den unnötigen Austausch funktionsfähiger Komponenten. Als Ultima Ratio kann aber der Austausch aller betroffenen Komponenten eine schnelle und kostengünstige Wiederherstellung des Betriebszustands darstellen. Somit sind kurze Ausfallzeiten und geringe Wartungskosten realisierbar. Der zusätzliche Aufwand durch häufigere Fehlerbehebung muss insgesamt preiswerter sein als die Ersparnis durch den Einsatz kostengünstiger Module [JUR-2000, S. 5.10–5.11].

Fehler müssen automatisch und rechtzeitig erkannt werden, bevor sie für den Prozess kritisch sind. Dazu sind die wichtigsten Betriebsparameter permanent zu überwachen und die zugehörigen Fehlerzustände zu definieren. Neben der Erkennung eines Fehlers ist vorab auch seine Auswirkung auf den operativen Prozess zu definieren, damit bereits anhand der Fehlermeldung eine angemessene Reaktion zur Behebung des Fehlers erfolgen kann. Unkritische Fehler können, z. B. bei Schichtwechsel oder im Rahmen der nächsten zyklischen Wartung, behoben werden. Im

Fälle fehlender Verfügbarkeit sollte eine Diagnosefunktion dabei helfen den Fehler einzugrenzen. Konkret ist mindestens die Verfügbarkeit der Positionsbestimmung und die Qualität der Sensordaten zu prüfen. Ersteres zeigt unmittelbaren Handlungsbedarf wegen mangelnder Verfügbarkeit auf. Wird beides über die Zeit betrachtet, so ergeben sich Hinweise auf mögliche Fehler im Setup bzw. der Hardware. Wird aufgezeichnet in welchem Verarbeitungsschritt der Fehler vorwiegend aufgetreten ist, können daraus konkretere Rückschlüsse auf die Ursache und das betroffene Modul gezogen werden. Nicht immer ist ein defektes Modul die Ursache für einen Fehler. Ein Wassertropfen auf der Kameralinse kann z. B. die aufgenommenen Bilder stark verzerren und eine Bildauswertung verhindern. Daher ist ein umfangreicher und für Laien verständlicher Leitfaden für den Umgang mit Fehlermeldungen und konkreten Abhilfen sinnvoll. Der Austausch einzelner Module ist umfassend zu dokumentieren, damit dieser durch den Anwender ausgeführt werden kann. Tabelle 3-7 fasst die Anforderungen an den Wartungsprozess zusammen.

Tabelle 3-7: *Zusätzliche Anforderungen an den Wartungsprozess*

Anforderung	Ziel	Maßnahmen
Fehlererkennung	Automatisch, rechtzeitig, zuverlässig	Betriebsparameter überwachen, Fehlerzustände definieren
Reparaturkosten	Minimieren	Fernwartung, Modultausch durch Anwender

4 Systementwurf

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Entwurf eines Konzeptes für ein kamerabasiertes Lokalisierungssystem auf Basis kostengünstiger Module. Zunächst erfolgt die Auswahl einer geeigneten Lokisierungstechnologie. Im Anschluss werden die bestehenden Schwachstellen dieser Technologie am Beispiel des Ansatzes aus dem Projekt „Das Staplerauge“ [GÜN-2014a, S. 75ff.] systematisch analysiert und ein Konzept mit dem Ziel entworfen die gefundenen Schwachstellen zu beseitigen. Dies geschieht besonders unter dem Gesichtspunkt des Einsatzes kostengünstige Module in der späteren Implementierung. Das Kapitel schließt mit Konzepten zur aufwandsarmen Integration der fertigen Lösung am Flurförderzeug.

4.1 Technologieauswahl

Die Auswahl einer konkreten Technologie kann in mehrere, voneinander abhängige Teilschritte zerlegt werden. Zu wählen sind:

1. Sensor bzw. Kamera-Typ,
2. Referenzpunkte für die Lokalisierung und
3. Kartierungsmethode.

Die Reihenfolge der Wahl hat dabei Einfluss auf die Auswahlmöglichkeiten der verbliebenen Punkte, da nicht alle Kombinationen zulässig sind. Ist für jeden Punkt eine Wahl getroffen, so können die gewählten Technologien unabhängig voneinander optimiert werden. Im Rahmen der Untersuchung wird festgestellt, dass aktuell nur 2D Kameras (vgl. Abschnitt 4.1.1) und der Einsatz künstlicher Merkmale (siehe Abschnitt 4.1.2) für das Vorhaben geeignet sind. Somit verbleibt nur die Wahl einer Kartierungsmethode und die Reihenfolge der obigen Wahl ist nicht relevant.

4.1.1 Kamera

Grundsätzlich stehen für die Wahl eines Sensors Zeilenkameras, 2D Kameras und 3D Kameras bzw. eine Kombinationen davon zur Wahl.

Zeilenkameras werden unabhängig von ihrer technischen Tauglichkeit vorwiegend in der Industrie zur Qualitätsprüfung bei der Inspektion von Bandmaterial herangezogen [STE-2013] und sind daher nicht als Endkundenprodukte zu sehen. Zu den anderen

Kameratypen bezüglich der Kosten konkurrenzfähige Sensoren dieses Typs sind daher auf dem Markt aktuell nicht verfügbar.

2D Kameras basieren auf einer bewährten Technologie und werden von mehreren Herstellern in großen Stückzahlen zu geringen Preisen für den Endkundenmarkt produziert. Die meisten der 2015 weltweit verkauften 1,4 Milliarden Smartphones [GAR-2016] beinhalten eine 2D Kamera. Von einer ausreichenden Produktvielfalt ist daher auch in Zukunft auszugehen. Prinzip bedingt können anders als bei 3D Kameras Abstandsmessungen, die für die Positionsbestimmung benötigt werden, nicht direkt aus dem Bild einer 2D Kamera gewonnen werden [JÄH-2012, S. 4].

Für 3D Kameras gibt es mehrere verschiedene Sensortechnologien. Li vergleicht die gängigen, kamerabasierten 3D Messprinzipien Stereo-Kamera, strukturiertes Licht und Time-of-Flight Kamera miteinander [LI-2014]. Unabhängig von den technischen Gegebenheiten gibt es vorwiegend aus der Unterhaltungselektronik für alle Sensoren kostengünstige Produkte für Endkunden, z. B. die Kinect von Microsoft [MIC-2017a; MIC-2017b]. Wesentliche Nachteile der Technologien liegen im höheren Preis der Hardware sowie der geringen Auswahl an Herstellern und in den Sensoren verbauten Chipsätzen. Dies kann zur Abhängigkeit von einem einzigen Chipsatz bzw. Sensorhersteller und somit Lieferproblemen führen. Zwar ist es möglich zwei kostengünstige 2D Kameras zu einer kostengünstigen Stereo-Kamera zu kombinieren, allerdings müssen die 3D Informationen durch Überlagerung der Bilder ressourcenintensiv im Rahmen der Bildaufnahme berechnet werden [BRA-2008, S. 430ff.].

Tabelle 4-1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Kameratechnologien zur Lokalisierung

Sensortechnologie	Vorteile	Nachteile
2D Kamera	Bewährte Technologie, viele Endkundenprodukte zur Auswahl, kleine Abmessungen, sehr geringer Preis	Keine direkte Abstandsmessung möglich
Stereokamera	Bestehen aus zwei 2D Kameras, Abstandsmessung möglich	Kalibrierung aufwändig und Fusion der Bilder sehr rechenintensiv
Strukturiertes Licht	Kostengünstig, Abstandsmessung möglich	Zusätzlicher Energiebedarf, Wenige Chipsatzhersteller, geringe Produktauswahl
Time-of-Flight	Kostengünstig, relativ neue Technologie, eigene Beleuchtung, Abstandsmessung möglich	Zusätzlicher Energiebedarf, aktuell nur ein kostengünstiges und geeignetes Produkt (Kinect v2), Bildberechnung bei Kinect v2 benötigt für ausreichende Bildwiederholrate eine aktuelle GPU

Gegen die strukturiertes Licht und Time-of-Flight Technologien spricht weniger der vergleichsweise hohe Preis, sondern die aktuell geringe Produktvielfalt und die damit verbundene Abhängigkeit von wenigen Herstellern. Aufgrund der geringen Kosten, großen Produktvielfalt und bewährter Technologie wird daher eine 2D Kamera als Sensor ausgewählt.

4.1.2 Infrastruktur

Im Wesentlichen besteht die Auswahl zwischen natürlichen und künstlichen Merkmalen als Referenzpunkte für die *Posenschätzung* [HOH-2014, S. 95]. Eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile des jeweiligen Ansatzes zeigt Tabelle 4-2. Hohenstein sieht in der rechenintensiven Mustererkennung eine wesentliche Herausforderung bei der Verwendung natürlicher Merkmale zur Lokalisierung. Fiala stellt zudem fest, dass künstliche Merkmale besonders dann ihre Berechtigung haben, wenn es nicht genügend natürliche Merkmale gibt bzw. diese nicht eindeutig genug sind und es ohne großen Aufwand möglich ist künstliche Marker anzubringen [FIA-2010]. Trotz zukünftig denkbarer Verbesserungen im Bereich der Lokalisierung auf Basis natürlicher Merkmale hält Fiala das Hinzufügen künstlicher Marker in bestimmten Anwendungsfällen für vorteilhaft.

Aktuelle, rein merkmalsbasierte Algorithmen wurden in einer Studienarbeit am Lehrstuhl fml auf ihre Eignung zur Positionsbestimmung in Warenlagern verglichen. Probleme wurden insbesondere bei Kurvenfahrten und einer geringen Anzahl an Merkmalen identifiziert. Eine robuste Positionsbestimmung konnte bei realistischen Fahrmanövern nicht erzielt werden [HOF-2015, S. 45f.]. Aktuelle Entwicklungen in der Robotik versuchen daher zusätzlich weitere Sensoren, z. B. eine Inertialsensorik oder die Odometrie des Fahrzeugs zu integrieren, um eine robuste Navigation zu erreichen [NÜT-2011; NIK-2014; HES-2014].

Regelmäßige Änderungen der Umgebung durch Ein-, Aus- und Umlagerungen von Waren verändern die natürlichen Merkmale und deren Ort im Warenlager, während künstliche Merkmale so angebracht werden können, dass diese stets unverändert bleiben [TOT-2014; GÜN-2014a, S. 114]. Ein weiteres Indiz für die Validität des Einsatzes künstlicher Merkmale ist die Nutzung solcher in allen aktuell verfügbaren, kamerabasierten Produkten zur Lokalisierung von Flurförderzeugen (vgl. Abschnitt 2.3.4).

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus Sicht von Wissenschaft und Praxis. Künstliche Merkmale für die Lokalisierung in Warenlagern erzeugen an allen Orten vergleichbare Bedingungen und erlauben so eine bessere Übertragbarkeit der im Rahmen der

Evaluierung ermittelten Erkenntnisse (Verfügbarkeit, Richtigkeit, Präzision, etc.) auf reale Szenarien. Systemintegratoren können somit die Einsetzbarkeit des Lokalisierungssystems unabhängig von der vor Ort verfügbaren Zahl und Eignung der natürlichen Merkmale abschätzen.

Aufgrund der besseren Übertragbarkeit der Ergebnisse und der geringen Rechenleistung kostengünstiger Recheneinheiten wird daher ein Einsatz künstlicher Merkmale angestrebt.

Tabelle 4-2: Vor- und Nachteile natürlicher und künstlicher Merkmale zur Posenschätzung

Merkmale	Vorteile	Nachteile
Natürlich	<ul style="list-style-type: none"> • Geringer Aufwand für Infrastruktur • Potentiell viele Merkmale zur Auswahl [HEI-2012] 	<ul style="list-style-type: none"> • Übertragbarkeit der Evaluierungsergebnisse nicht gewährleistet. • Algorithmen sind rechenintensiv [HIE-2016; RUB-2011; SIL-2012, S. 88]. • Prinzipielle Eignung der aktuellen Algorithmen im Anwendungsfall fraglich [HOF-2015, S. 45f.].
Künstlich	<ul style="list-style-type: none"> • Bedingungen an unterschiedlichen Orten vergleichbar • Robuste Algorithmen [JUN-2015] • Prinzipielle Machbarkeit bereits gezeigt [GÜN-2014a, S. 110ff.; SCH-2011] • Auf Basis industrietauglicher Hardware bereits im Praxiseinsatz [TOT-2014; ALE-2013] 	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten für die Produktion künstlicher Merkmale • Aufwand durch Anbringung und Vermessung der Merkmale [HOH-2014, S. 130] • ggf. Wartung der Infrastruktur notwendig, falls auf dem Lagerboden, z. B. bei ZENOWAY [ALE-2013]

4.1.3 Vermessungstechnik

Für die Vermessung der künstlichen Merkmale stehen zum einen der klassische Ansatz der Einmessung mittels gängiger geodätischer Methoden [WIE-2004] und die kamerabasierte Vermessung zur Auswahl.

Die manuelle Vermessung mittels eines Theodolits wird in der Praxis oft zur Vermessung verwendet und liefert sehr genaue Ergebnisse. Wesentliche Nachteile sind die hohen Kosten aufgrund des Personalaufwandes und der teuren Messinstrumente. [WIE-2004, S. 94f.]

Als Alternative besteht die Möglichkeit der kamerabasierten Vermessung der Merkmale. Diese Vermessung kann mit denselben Komponenten erfolgen, die später am Gabelstapler montiert werden. Mit diesem Ansatz können die Merkmale schnell und automatisch vermessen werden. Beispiele für entsprechende Verfahren finden sich in [SHA-2012; MUN-2016].

Der Einsatz eines in der Robotik oft zur Lokalisierung verwendeten SLAM-Verfahrens erfordert hingegen stets die Kenntnis einer relativen Beziehung zwischen aktuellem Ort und den in der Vergangenheit besuchten Orten [SMI-1990; THR-1999, S. 245ff.]. Eine solche Beziehung kann im betrachteten Fall nur dann bestimmt werden, wenn stets künstliche Merkmale im Bild vorhanden sind und auch extrahiert werden, was eine unnötige Einschränkung bei der Kartierung darstellt. SLAM-Verfahren bieten dafür die Möglichkeit einer Lokalisierung bereits während der Kartierung [THR-1999, S. 245ff.]. Für den manuellen Betrieb eines Flurförderzeuges bedeutet dies jedoch keinen zusätzlichen Nutzen. Auf die Implementierung eines komplexen Algorithmus kann folglich verzichtet werden.

Es wird daher die kostengünstigere Variante einer kamerabasierten Vermessung favorisiert, da die Implementierung den für die Lokalisierung verwendeten Algorithmus nutzen kann und nur geringfügig erweitern muss. Für die Beurteilung der Güte dieser Vermessung (vgl. Unterkapitel 7.5) müssen im Versuchsaufbau möglichst genaue Referenzwerte ermittelt werden. Diese Vergleichswerte werden mittels klassischer Vermessungstechnik aus der Geodäsie bestimmt.

4.2 Schwachstellenanalyse

Im Rahmen des Projektes „Das Staplerauge“ wurde unter Beteiligung des Autors bereits die Machbarkeit einer kamerabasierten Lokalisierung für Flurförderzeuge gezeigt [GÜN-2014a, S. 75-91,110-117]. Hohenstein [HOH-2014, S. 153ff.] untersucht dasselbe System etwas detaillierter unter dem Gesichtspunkt der Funktionsintegration mit einer Hubhöhenerkennung. Insgesamt erfüllt das System prinzipiell, gemäß der beiden obigen Quellen, die Anforderungen an eine positionsbasierte Lagerhaltung. Da echte Vergleichswerte in den dynamischen Versuchen fehlen, sind die dort getroffenen Aussagen jedoch zumindest zu relativieren. Laut Hohenstein „[...] leidet die Fundierung der Nachweisführung unter dem Fehlen eines Referenzsystems, dessen Lokalisierungsleistung höher als die des zu testenden Systems ist.“ [HOH-2014, S. 168]. Die einzelnen Eigenschaften der verwendeten Algorithmen werden in den vorangegangenen Arbeiten durch Messungen bestimmt. Auf die Ursachen und Fehlerquellen wird dort nicht näher eingegangen. Um belastbare Aussagen für die

Praxis zu treffen, müssen die Parameter zur Lokalisierungsleistung im dynamischen Fall abgesichert werden. Die Analyse der Fehlerquellen erlaubt dabei ein besseres Verständnis der Algorithmen. Es folgt daher zunächst eine systematische Schwachstellenanalyse der betroffenen Ansätze. Daraus lassen sich später Strategien zu Behebung dieser Schwachstellen und Methoden zur Optimierung ableiten. Ziel ist es dabei das Lokalisierungssystem so weit zu entwickeln, dass es trotz kostengünstiger Sensorik und Auswerteeinheit eine hinreichend genaue Positionsbestimmung ermöglicht.

4.2.1 Ressourcenbedarf

Um einzuschätzen welche Funktionen des Lokalisierungssystems für die Ausführung auf einer kostengünstigen Recheneinheit zu viel Rechenleistung benötigen, wird die Laufzeit der gängigen Schritte in der Bildverarbeitungskette einer *Augmented Reality* Software zunächst auf einem Laptop gemessen. So lassen sich Bereiche identifizieren, bei denen bezüglich der Ausführungsgeschwindigkeit Optimierungsbedarf besteht. Konkret gemessen wird die Zeit, die während der Ausführung des betroffenen Programnteils vergeht.

Als Grundlage für die Messung wird die ArUco Bibliothek [RAF-2017] verwendet. Die wesentlichen Schritte zur Bestimmung der Pose eines Markers relativ zur Kamera sind dort [MUN-2014]:

1. Markerextraktion,
2. Markeridentifizierung und
3. Bestimmung der Pose des Markers in Kamerakoordinaten.

Folgende Funktionen werden zur Vervollständigung der Lokalisierung hinzugefügt.

- Zwei weitere Koordinatentransformationen dienen zur Überführung der Messung in eine Pose des Fahrzeugs in Hallenkoordinaten:
 - die Transformation der Kamerapose in Hallenkoordinaten und
 - die Transformation von der Kamera zum Fahrzeug.
- Ein Bildvorverarbeitungsschritt (Histogrammausgleich [JÄH-2005, S. 276f.]) zur Verbesserung der Güte der Markerextraktion wird ebenfalls ergänzt [JUN-2015].

Die bisher auf dem vollständigen Bild angewandte Kalibrierung wird hingegen weggelassen, da sie zur Extraktion von im Bild klein erscheinenden Markern nicht notwendig ist [ATC-2010; JUN-2015]. Stattdessen wird, wie in ArUco, die Korrektur der Bildverzerrung nur auf den Eckpunkten der Marker vorgenommen [MUN-2014]. Die

Bildaufnahme wird hingegen immer benötigt und bietet daher kein Optimierungspotential. Die zusammengefassten Ergebnisse zeigt Tabelle 4-3. Bildvorverarbeitung und Markerextraktion benötigen die meiste Rechenzeit und sollten daher beschleunigt werden. Erste Ansätze zur Verbesserung wurden bereits erarbeitet [JUN-2015]. Dabei wurde erkannt, dass mittels *Tracking* nicht nur im Mittel eine Reduktion der Ausführungszeit erzielt werden kann, sondern ein Trackingalgorithmus in der Lage ist die Markerextraktion immer auf einen kleinen Bildausschnitt einzuschränken und somit erheblich zu beschleunigen.

Eine deutliche Steigerung der Ausführungsgeschwindigkeit ist notwendig, um die Auswertung auf einer kostengünstigen Recheneinheit mit geringer Rechenleistung durchführen zu können.

Tabelle 4-3: Laufzeitanalyse der Verarbeitungsschritte zur kamerabasierten Lokalisierung (nach [JUN-2015])

Bildverarbeitungsschritt	Zweck	Mittlere Laufzeit [ms]
Histogrammausgleich [JÄH-2005, S. 276f.]	Verstärkung der lokalen Kontraste. Erhöhte Verfügbarkeit der Markerextraktion	2
Markerextraktion	Finden von Kandidaten für Marker im Bild	7
Markeridentifizierung	Bestimmung der ID des Markers	<1
Posenschätzung	Berechnung der Pose des Markers relativ zur Kamera	<1
Koordinatentransformation	Transformation in Pose des Fahrzeugs in Hallenkoordinaten	≈0

Der Speicherbedarf des Programms ist mit <50 MB (laut Windows Taskmanager) sehr gering. Eine Verbesserung wird nicht als notwendig erachtet. Über einen längeren Zeitraum betrachtet werden sehr große Mengen an Bilddaten verarbeitet, aber die in jedem Bild verarbeiteten Daten sind vergleichsweise klein und der Speicherverbrauch je Bild dadurch gering. Da jedes Bild isoliert betrachtet wird, werden alle gewonnenen Informationen nach Verarbeitung des Bildes bereits wieder verworfen und derselbe Speicherplatz steht für die Verarbeitung des nächsten Bildes wieder zur Verfügung.

4.2.2 Latenz

Die Latenz ist im Kontext eines Sensors die Zeit, die zwischen realem Ereignis und dessen Messung vergeht [CIZ-2016]. Für Flurförderzeuge ist dieses Attribut für die Echtzeitfähigkeit relevant [HOH-2014, S. 73]. Günthner et al. [GÜN-2012, S. 53f.] definieren einen Prozess als echtzeitfähig, wenn der technische Prozess keine Ver-

zögerung erfährt. Das Lokalisierungssystem ist in diesem Sinne echtzeitfähig, wenn trotz der Verzögerung bis zur *Posenschätzung* daraus abgeleitete Aktionen rechtzeitig erfolgen können. Die Latenz lässt sich im konkreten Fall der Positionsbestimmung als Summe der Verarbeitungszeiten für die Einzelschritte in der Bildverarbeitung, also der Zeitdifferenz zwischen Bildaufnahme und Verfügbarkeit der Positionsinformation bestimmen [CIZ-2016].

Die Latenz wird wie folgt als Summe der folgenden Werte geschätzt:

1. Die Belichtungsdauer eines Bildes bei 30 Hz Aufnahme Frequenz beträgt maximal $1000 \text{ ms} / 30 \approx 33 \text{ ms}$ [NAU-2014, S. 583].
2. Zur Steigerung des Durchsatzes wird bei kontinuierlicher Bildaufnahme von einem Kamertreiber üblicherweise eine Pufferung der Aufnahmen vorgenommen [NAU-2014, S. 586]. Die Aufnahme des nächsten Bildes findet im Hintergrund bereits statt, während das aktuelle Bild verarbeitet wird. Je mehr Bilder im Puffer hinterlegt sind, desto größer ist die Verzögerung bis zur Entnahme des Bildes aus dem Puffer. Die durch einen Puffer der Größe n verursachte Verzögerung kann durch n mal die Belichtungsdauer abgeschätzt werden [NAU-2014, S. 583].
3. Die Dauer der Bildverarbeitungsschritte beträgt gemäß Tabelle 4-3 ca. 10 ms.

Die Verarbeitungszeit beträgt somit für einen Bildpuffer der Größe vier: $4 \cdot 33 \text{ ms} + 10 \text{ ms} = 142 \text{ ms}$ oder 0,142 s und liegt damit deutlich unter den von Hohenstein geforderten 0,5 s [HOH-2014, S. 73]. Auf Seiten der Latenz ist daher keine unmittelbare Schwachstelle auszumachen. Die geringere Rechenleistung einer kostengünstigen Recheneinheit führt zu einer reduzierten Verarbeitungsgeschwindigkeit und erhöht damit die Latenz. Dieser Effekt kann durch Senken des Ressourcenbedarfs abgemildert werden (vgl. Abschnitt 4.2.1).

4.2.3 Genauigkeit

Die bisherigen Betrachtungen der Genauigkeit des vorhandenen Demonstrators sind Machbarkeitsstudien und bestehen entweder aus Simulationen [HOH-2014, S. 126ff.] oder praktischen Versuchen ohne Referenzsystem und sind damit von geringer Aussagekraft für die Praxis [GÜN-2014a, S. 114f.; HOH-2014, S. 168f.].

Daher werden in diesem Abschnitt die üblichen und tatsächlich auftretenden Fehlerquellen systematisch analysiert. Eine grundlegende Einordnung der Fehlerquellen für AR-Trackingsysteme liefert dazu Bauer [BAU-2007, S. 57ff.]. Bauer unterscheidet zwischen

- dynamischen Fehlern, die nur während der Bewegung auftreten,
- Erkennungs- und Identifizierungsfehlern,
- systematischen Fehlern und
- zufälligem Rauschen.

In der weiteren Analyse betrachtet Bauer die einzelnen Fehler als statistische Größe und analysiert in der Folge die konkreten Einflüsse auf die Genauigkeit in Abhängigkeit von Markerorientierung und Abstand zwischen Marker und Kamera [BAU-2007, S. 80ff.]. Insbesondere der mit größer werdendem Abstand zwischen Marker und Kamera schneller als linear ansteigende Fehler [BAU-2007, S. 84; PEN-2006] zeigt eine für die Lokalisierung eines Flurförderzeugs besonders relevante Fehlerquelle auf. Zur Reduktion der Anzahl der Marker soll ein Marker möglichst große Lagerbereiche abdecken. Ein größerer Abstand zur Kamera ist dabei vorteilhaft, während die fehlerbehaftete Bestimmung des Abstandes zu immer größeren Folgefehlern bei der *Posenschätzung* führt.

Ziel dieses Abschnitts ist es auch die Ursachen der Fehler näher zu betrachten. Daher wird die bestehende Bildverarbeitungskette zur Flurförderzeuglokalisierung detaillierter betrachtet. Die mitunter schwierigen Umgebungsbedingungen im Warenlager führen zu Fehlern, die in markerbasierten AR-Systemen üblicherweise keine große Rolle spielen und somit bisher nicht näher untersucht wurden:

1. Die Bildvorverarbeitung mittels Histogrammausgleich (vgl. Tabelle 4-3) dient der Erhöhung der Robustheit der Kantenextraktion. Mit den lokalen Kontrasten wird auch das Bildrauschen verstärkt und die Position der Kante geringfügig verschoben, was die Messung der Eckpunkte des Markers verfälscht. Gängige *Augmented Reality* Software nutzt diese Bildverbesserung nicht.
2. Durch Einfall von Tageslicht stark wechselnde Lichtverhältnisse gestaltet sich die Auswertung trotz dynamischer Anpassung der Belichtungszeit [GÜN-2014a, S. 114] schwierig. Der geringe Dynamikumfang einer normalen (Industrie) Kamera führt trotz optimaler Wahl der Belichtungszeit bei nur in Teilen des Bildes wirkendem, starkem Gegenlicht zu Über- oder Unterbelichtung [MAN-2016, S. 3]. Marker, die an der Decke in der Nähe starker Lichtquellen oder einem Fenster angebracht sind, werden von der Lichtquelle teilweise überstrahlt und die Kanten daher nicht mehr zuverlässig erkannt. Analog kann in einem unterbelichteten Bereich der schwarze Teil eines Markers mit der Umgebung verschmelzen. Wird aufgrund dieser Umstände ein Marker nicht erkannt, ergeben sich keine Folgefehler für die Genauigkeit, sondern nur für die Verfügbarkeit. Werden die Ecken des Markers aber an falscher Position bestimmt, ist die daraus abgeleitete Pose fehlerhaft.

3. Zur Steigerung der Genauigkeit der *Posenschätzung* werden die Eckpunkte mittels der cornerSubPix-Methode subpixelgenau bestimmt. Der dahinterstehende Algorithmus sucht iterativ in der Umgebung des pixelgenau gemessenen Eckpunktes diejenige Stelle, an welcher der orthogonale Gradient maximal ist [BRA-2008, S. 319ff.]. Damit sind zwei weitere Fehlerquellen verbunden.
 - a. Dies ist der Punkt in der Bildverarbeitungskette, an dem das Bildrauschen und Unschärfe den Messwert signifikant verfälschen können.
 - b. Ein ArUco-Marker [GAR-2014] besteht, wie viele Fiducial Marker, aus einem schwarz-weißen inneren Bereich, der den Marker eindeutig identifiziert und einem äußeren, weißen Bereich, der den Marker von der Umgebung trennt und somit die Extraktion erleichtert. Ist dieser weiße Bereich zu klein gewählt, findet das Verfahren unter Umständen den größten Gradienten an der Außenkante zwischen weißem Trennbereich und der Umgebung des Markers und nicht, wie für die Messung benötigt, an der Grenze zwischen innerem Bereich und dem weißen Trennbereich. In diesem Fall wird die Messung mit den falschen Eckpunkten durchgeführt und der Messwert weicht entsprechend stark von dem tatsächlichen Wert ab.
4. Sind die Marker nicht exakt genug zueinander vermessen, kommt ein weiterer Fehler bei der Transformation in Hallenkoordinaten hinzu. Dies ist einer der Gründe, warum eine Mittelwertbildung über mehrere Marker die Positionsbestimmung stabilisiert [HOH-2014, S. 132]. Die bisher manuell vorgenommene Schätzung der Position der Marker in Hallenkoordinaten ist äußerst ungenau. Hohenstein beziffert den dadurch entstandenen Fehler auf ± 50 mm [HOH-2014, S. 130].
5. Die Transformation von der Kamera zum Fahrzeug birgt ebenfalls eine Fehlerquelle, wenn die Vermessung am Fahrzeug nicht genau genug vorgenommen wird.
6. Werden mehrere Marker für eine *Posenschätzung* verwendet, verschlechtert ein fehlerhaft extrahierter Marker die Messung unnötig. Die Kombination der einzelnen Messwerte stabilisiert das Ergebnis zwar [HOH-2014, S. 132], erzeugt aber einen schlechteren Wert als bei Verwendung durch die besseren Messungen allein. Die Gewichtung nach lokaler Lage, wie sie Hohenstein ebenfalls vorschlägt [HOH-2014, S. 72], verschlechtert den Messwert stärker, wenn der fehlerhaft extrahierte Marker eine geringe Distanz zur Kamera in der x,y-Ebene aufweist und somit besonders stark gewichtet wird.
7. Manche Verfahren zur *Posenschätzung* führen bei der Reduktion der Freiheitsgrade zusätzlich einen systematischen Fehler ein, der zu berücksichtigen ist. Die grundsätzliche Idee dahinter ist, dass ein bei Flurförderzeugen nicht

vorhandener Freiheitsgrad vernachlässigt werden kann und somit Messfehler bezüglich dieses Freiheitsgrades keine Folgefehler verursachen können [GÜN-2014a, S. 83; HOH-2014, S. 218f.; JUN-2015]. Das Vernachlässigen zweier Rotationsfreiheitsgrade [HEI-2013; GÜN-2014a, S. 83] und des Abstands zwischen Kamera und Marker [JUN-2015] ist nur unter idealen Bedingungen, wie ebenem Boden und perfekt parallel zum Boden ausgerichteter Marker, exakt. Bei unebenem Boden entsteht ein systematischer Messfehler bezüglich der vernachlässigten Freiheitsgrade, der aber in der Regel erheblich geringeren Einfluss auf die *Posenschätzung* hat als der Messfehler, der bei Bestimmung der Werte bezüglich dieser Freiheitsgrade entsteht. In sofern ist eine Einschränkung der Freiheitsgrade sinnvoll, aber mit zusätzlichen Fehlerquellen behaftet.

Beispiel: ein Verfahren, welches einen (vernachlässigten) Winkel, der stets kleiner als $\pm 0,2^\circ$ ist, mit 0° abschätzt, bestimmt diesen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2^\circ$. Eine tatsächliche Messung mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ$, verursacht im schlimmsten Fall einen fünf Mal so großen Fehler.

8. Bei der Eigenortung existiert eine indirekte Auswirkung der Winkelmessung auf die x,y-Position des Fahrzeugs. Der Fehler bei der Bestimmung der Winkel verschiebt die geschätzte Position erheblich [BAU-2007, S. 53-55,83]. Abbildung 4-1 veranschaulicht dies für den zweidimensionalen Fall.
9. Wird ein Marker falsch identifiziert, so wird der falsche Bezugspunkt zugrunde gelegt und die Pose grundlegend falsch ermittelt. Dieser Fehler tritt nur auf wenn der Marker, dessen ID fälschlicherweise ermittelt wird, tatsächlich im Aufbau vorhanden ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt mit der Zahl der eingesetzten Marker.

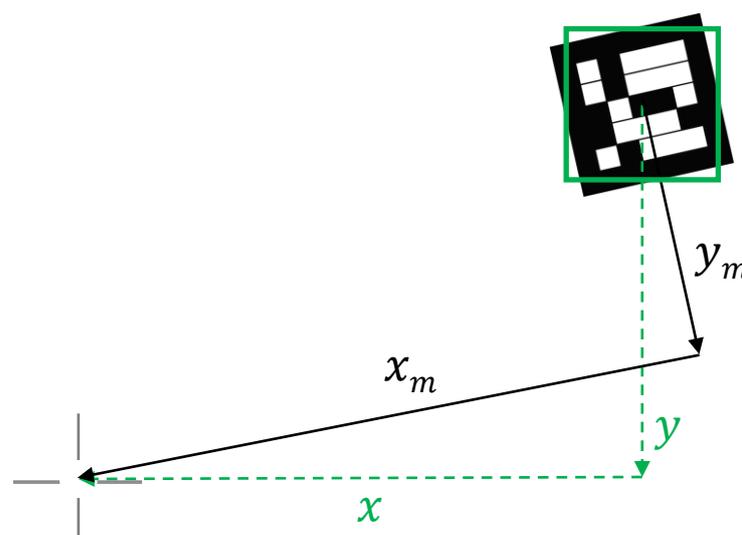


Abbildung 4-1: Folgefehler fehlerbehafteter Winkelbestimmung: korrekte Transformation (schwarz), gemessene Transformation (grün)

4.2.4 Marker Erkennbarkeit

Damit ein Lokalisierungssystem ein Messergebnis erfolgreich ermitteln kann, muss die Pose anhand mindestens eines Markers bestimmt werden. Andernfalls ist die Pose als wesentliche Messung des Lokalisierungssystems nicht verfügbar. Mautz betrachtet die Verfügbarkeit von Lokalisierungssystemen als den zeitlichen Anteil in dem das Lokalisierungssystem nutzbar ist [MAU-2012, S. 18]. Diese Definition bezieht sich auf beliebige Ausfälle, auch auf diejenigen, welche nicht mit den Algorithmen in Verbindung stehen. Für die Bewertung der Algorithmen eignet sich diese Definition der Verfügbarkeit daher nicht.

Damit die Bildauswertung eine Pose liefern kann ist es notwendig, den Marker zu erkennen und die ID zu bestimmen. Fronz et al. nennen dies im Kontext des Vergleichs zwischen *Augmented Reality* Systemen *Marker Erkennbarkeit* (engl. Marker recognizability) [ZHA-2002b].

Im Kontext dieser Arbeit wird dieser Begriff statt der Verfügbarkeit verwendet und geringfügig um die Komponente der *Posenschätzung* erweitert, da bei einem erkannten Marker eine *Posenschätzung* stets möglich ist. Ein erfolgreich erkannter Marker bedeutet daher hier automatisch eine erfolgreich bestimmte Pose. Ob diese Pose eine akzeptable Güte aufweist, ist dabei zunächst unerheblich. Der Zusammenhang zwischen *Marker Erkennbarkeit* und Genauigkeit lässt sich folglich auf die Frage reduzieren, ob eine Messung akzeptiert oder verworfen wird, worin sich ein Zielkonflikt zwischen *Marker Erkennbarkeit* und Genauigkeit erkennen lässt – eine ungenaue und deshalb verworfene Messung steigert die Genauigkeit, senkt aber gleichzeitig die *Marker Erkennbarkeit*.

Fehlerquellen können nur bei Extraktion und Identifizierung des Markers auftreten [ZHA-2002b], wobei die Extraktion der Identifizierung vorgelagert ist und somit die Voraussetzung für die Identifizierung darstellt [MUN-2014]. Eine gescheiterte Extraktion hat im Umkehrschluss auch eine fehlgeschlagene Identifizierung zur Folge. Im Staplerauge-Demonstrator [GÜN-2014a, S. 75ff.] können aus diesen Gründen nicht in allen Bildern Marker gefunden und identifiziert werden, obwohl diese im Bild vorhanden und (für Menschen) erkennbar sind. Um Optimierungspotential in diesem Bereich aufzudecken, wird für einen Beispieldatensatz von 14215 Bildaufnahmen mit einer Auflösung von je 1,3 MPixel aus Versuchsfahrten mit einem Stapler in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml (vgl. Abschnitt 7.1.1) die *Marker Erkennbarkeit* des Staplerauge-Demonstrators bestimmt (vgl. Tabelle 4-4). Ein Bild wird als erkennbar gewertet, wenn dort mindestens ein Marker gefunden wird.

Tabelle 4-4: *Marker Erkennbarkeit anhand von Testaufnahmen für verschiedene Bildvorverarbeitungsstrategien*

Variante	Marker Erkennbarkeit [%]	Mittlere Laufzeit [ms]
ArUco [MUN-2014]	46,8	13,8
Verkleinerung → ArUco	61,9	5,1
Histogrammausgleich → ArUco	91,8	31,9
Verkleinerung → Histogrammausgleich → ArUco	92,6	9,5
Histogrammausgleich → Verkleinerung → ArUco [GÜN-2014a, S. 78f.]	92,7	10,4

Aus den Daten ist zum einen zu erkennen, dass die *Marker Erkennbarkeit* für den praktischen Anwendungsfall mit <93 % nicht ausreichend gut ist und somit auch bei Einsatz industrietauglicher Hardware eine Verbesserung notwendig ist. Zum anderen zeigt der Vergleich auch den Nutzen der Vorverarbeitung: der vorab durchgeführte Histogrammausgleich [JÄH-2005, S. 276f.] verdoppelt nahezu die *Marker Erkennbarkeit*. Eine Verkleinerung des Bildes ist ebenfalls hilfreich in Bezug auf die Steigerung der *Marker Erkennbarkeit* und Reduktion der Laufzeit. Der Histogrammausgleich steigert lokale Kontraste [JÄH-2005, S. 276f.] und verstärkt damit die Kanten des Markers [GÜN-2014a, S. 71], so dass diese zuverlässiger und vollständig gefunden werden können. Ist der Kontrast hingegen nur an manchen Stellen nicht groß genug, etwa in der Nähe einer Lichtquelle, so hilft die Verkleinerung dabei kleine Lücken bei der Erkennung der Kante zu überbrücken. Daher kann im verkleinerten Bild eher ein geschlossener Polygonzug als Kandidat für einen Marker gefunden werden. Dieser Effekt hilft nur solange der weiße Rand des Markers im verkleinerten Bild das Markerrinnere vollständig umschließt. Ist dies nicht mehr der Fall, verschmilzt der Marker mit seiner Umgebung und wird nicht gefunden. Beide Maßnahmen haben zusätzlich einen Einfluss auf die Laufzeit der Algorithmen. Der Histogrammausgleich verstärkt die lokalen Kontraste im gesamten Bild [JÄH-2005, S. 276f.]. Dadurch findet der Algorithmus zur Kantenerkennung jedoch im gesamten Bild mehr Kanten. Die Berechnung und Speicherung dieser zusätzlichen Kanten und die späteren Verarbeitungsschritte auf der größeren Eingabe verursachen deutlich mehr Rechenaufwand. Die Verkleinerung des Bildes senkt hingegen den Aufwand, da weniger Daten zu verarbeiten sind. Wird der Histogrammausgleich vor der Bildverkleinerung ausgeführt, müssen die Operationen des entsprechenden Algorithmus auf dem vollen Bild statt dem verkleinerten Bild durchgeführt werden. Dieser zusätzliche Aufwand führt zu weniger Informationsverlust, daher ist die *Marker Erkennbarkeit* minimal höher.

Für die Analyse der bei der Extraktion und Identifizierung aufgetretenen Probleme ist es hingegen zunächst notwendig zu wissen, welche Marker sich wo im Bild befinden.

Um zu bestimmen welche Marker warum nicht gefunden werden, wird der Suchvorgang visualisiert. Alle prinzipiell in Frage kommenden Vierecke werden im Bild dargestellt und die ggf. dort ermittelte Marker ID angezeigt. So lassen sich qualitativ Fehler und Unzulänglichkeiten aufdecken.

Bei der Erkennung der Vierecke, die möglicherweise Marker beinhalten können, ließen sich folgende Probleme identifizieren (vgl. Abbildung 4-2).

- In dunklen oder zu hellen Bereichen reicht der Helligkeitsunterschied zwischen weißen und schwarzen Elementen des Markers für die Kantenerkennung nicht immer aus [HIR-2008, S. 20]. In diesen Fällen ermöglicht der Histogrammausgleich dennoch eine Erkennung des Quadrates. Fehlt nur eine Kante, wird das Viereck als solches nicht mehr oder nur zum Teil und dadurch verformt erkannt (vgl. Abbildung 4-2). Eine zu starke Abweichung vom erwarteten Quadrat wird folglich vom Demonstrator nicht mehr zur Lokalisierung verwendet [GÜN-2014a, S. 84f.].
- In Fällen, in denen ein Marker unmittelbar neben einem Dachfenster angebracht ist, wird bei viel Gegenlicht ein Teil des Markers überbelichtet, während der andere Teil des Markers unterbelichtet ist. Der Dynamikumfang der Kamera reicht in diesen Fällen nicht aus um den Marker auswertbar abzubilden.
- Das oben bereits beschriebene Verschmelzen eines Markers mit seiner Umgebung führt in der Regel zu zusätzlichen Ecken. Ein Polygon mit mehr als vier Ecken wird verworfen.
- Eine Überbelichtung oder (teilweise) Verdeckung verhindert die volle Sichtbarkeit des Markers im Bild.
- Eine zu lange Belichtungszeit führt bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit zu Bewegungsunschärfe im Bild. Die Kanten werden dadurch sehr verschwommen aufgezeichnet und können nicht mehr als solche vom Kantenerkennungsalgorithmus gefunden werden, weil der Kantengradient über das lokale Suchfenster des Kantenerkennungsalgorithmus hinaus gestreckt wird und innerhalb des Suchfensters unterhalb des Schwellwertes verbleibt.

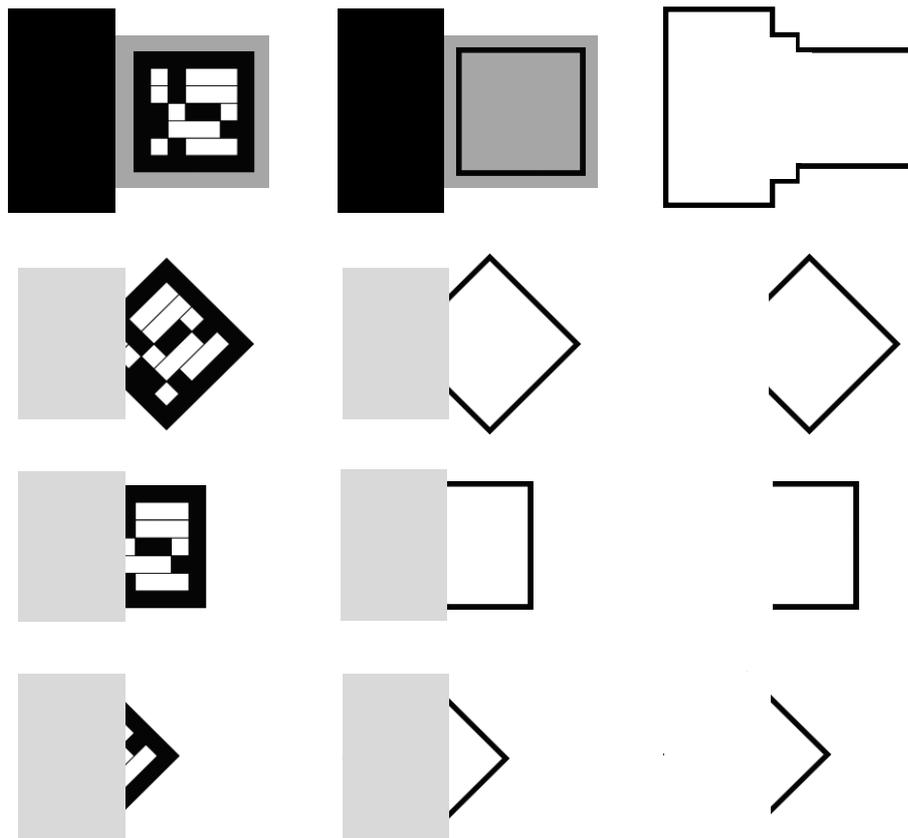


Abbildung 4-2: Mögliche Ursachen für falsch-negative Fehler bei der Extraktion von Markerkandidaten

Die Bestimmung der Marker ID unterliegt ebenfalls einigen Fehlerquellen (vgl. Abbildung 4-3).

- Der Kontrast im Markerinneren ist nicht immer groß genug. Bei der Überführung in ein Binärbild zur Bestimmung der ID werden daher manche der Quadrate, welche die ID kodieren, falsch transformiert. Die ID wird dann nicht erkannt oder eine falsche ID bestimmt und das Ergebnis verworfen.
- Bei teilweise verdeckten Markern sind die Bereiche des Markers, welche die ID kodieren, nicht alle sichtbar und die verdeckenden Bereiche weisen eine andere Struktur auf.
- In Fällen, in denen ein Marker unmittelbar neben einem Dachfenster angebracht ist, wird bei viel Gegenlicht ein Teil des Markers überbelichtet, während der andere Teil des Markers unterbelichtet erscheint. In diesen Fällen kann die ID ebenfalls oft nicht ausgelesen werden.
- Wird die ID nicht korrekt bestimmt wird zur Positionsbestimmung der falsche Marker verwendet und somit ein falscher Bezugspunkt angenommen, wenn der Marker mit der erkannten ID an anderer Stelle genutzt wird. Dieser Fehler tritt in den Versuchen nicht auf, da im Versuchsaufbau nur 14 sehr unterschiedliche Marker verwendet werden. Je mehr Marker jedoch tatsächlich ein-

gesetzt werden, desto wahrscheinlicher wird dieser Fehler aufgrund des geringeren optischen Unterschiedes zwischen je zwei Markern (siehe Abbildung 4-3, obere Zeile).

- Prinzipiell können auch falsch-positiv Fehler auftreten, also Marker erkannt werden, wo keine sind [FIA-2005] (siehe Abbildung 4-3 Mitte).
- Die ArUco-Bibliothek prüft vor der Auswertung der ID, ob an der Grenze zum weißen Rand des Markers ein vollständig schwarzer innerer Rand existiert, um die Wahrscheinlichkeit einer falsch-positiven Markerextraktion zu reduzieren [MUN-2014]. Ist dieser innere schwarze Rand an einer Stelle jedoch aufgrund von Beleuchtungseffekten nicht breit genug wird der Marker ebenfalls verworfen, obwohl der Rand zur Erkennung des Rechteckes ausgereicht hätte (siehe Abbildung 4-3 untere Zeile).

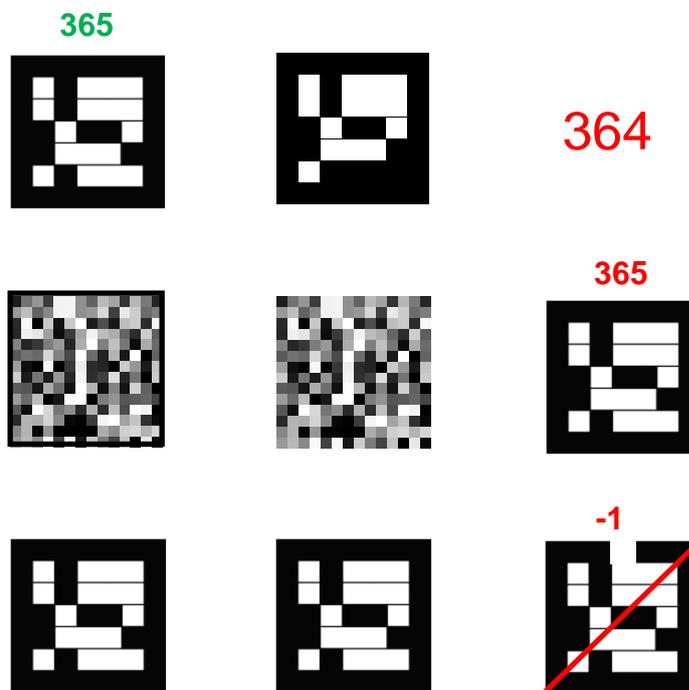


Abbildung 4-3: Fehlerquellen bei der Bestimmung der Marker ID

Die aufgezeigten Schwächen der Auswertungsalgorithmen in der ArUco-Bibliothek sind vorwiegend durch die Einsatzumgebung und eine vergleichsweise geringe Markergröße in der Bildebene bestimmt. Vor allem die ungünstigen Lichtverhältnisse senken die *Marker Erkennbarkeit* erheblich. In kontrollierten Laborumgebungen, wie sie für die Nutzung und Evaluierung von *Augmented Reality* Anwendungen üblicherweise angenommen werden, funktionieren die implementierten Algorithmen aus der ArUco-Bibliothek sehr zuverlässig [GAR-2014].

4.2.5 Integrationsaufwand

Der Aufwand für die Integration des *Location Sensors* am Flurförderzeug besteht aktuell aus Montage und Verkabelung der eingesetzten Komponenten. Sowohl Recheneinheit als auch Kamera müssen am Fahrzeug korrekt befestigt und galvanisch vom Fahrzeugstromkreis getrennt mit Spannung versorgt werden. Zusätzlich wird eine Datenverbindung zwischen Kamera und Recheneinheit benötigt. Für die Versuche wird als Recheneinheit ein Laptop verwendet, der über den integrierten Akku mit Spannung versorgt wird und mit der Kamera über ein ca. 3 m langes Cat.5e Ethernet Kabel verbunden ist [GÜN-2014a, S. 110ff.; HOH-2014, S. 72; JUN-2015]. Für den Praxiseinsatz sind stattdessen ein permanent installierter Industrie-PC und eine robuste Verkabelung notwendig.

Die Montage der Kamera ist über eine stabile Klemm- oder Schraubhalterung (siehe Abbildung 4-4) leicht umzusetzen. Die Spannungsversorgung ist über einen zusätzlichen DC-DC Wandler zu realisieren. Da im Rahmen dieser Arbeit die *Location Application* nicht betrachtet wird, kann auf die Anbindung an ein übergreifendes IT-System verzichtet werden. Bestehende Produkte verfügen bereits über entsprechende Anbindungen für den Praxiseinsatz [IND-2017a; ALE-2013].

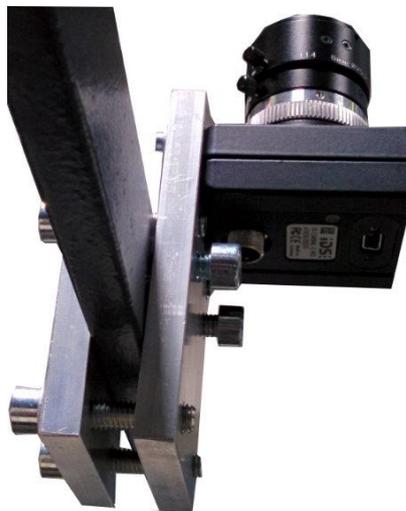


Abbildung 4-4: Klemmhalterung zur Anbringung des Sensors am Fahrerschutzdach

4.2.6 Infrastrukturaufwand

Die Infrastruktur im Staplerauge-Demonstrator [GÜN-2014a, S. 114] besteht aus an der Hallendecke in ca. 10 m Höhe angebrachten 500x500 mm großen ArUco-Markern [GAR-2014; MUN-2014]. Die Montage erfolgte jeweils an Querverstrebungen mittels einer eigens für diesen Anbringungspunkt konstruierten, stabilen, aber aufwändig herzustellenden Halterung. Die konkrete Halterung ist nur für eine Markergröße geeignet, ihre Konstruktion ist für andere Abmessungen anzupassen.

Die geringe Flexibilität der Halterung und der hohe Material- und Montageaufwand sind die wesentlichen Probleme mit der bisher verwendeten Halterung.

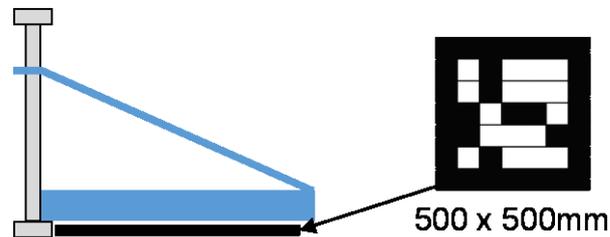


Abbildung 4-5: Markerhalterung an der Hallendecke im Projekt „Das Staplerauge“ [GÜN-2014a, S. 114]

Der Markeruntergrund aus Pappkarton verbiegt und wellt sich mit der Zeit besonders unter Feuchtigkeitseinwirkung. Dadurch können die ursprünglich eingemessenen Positionswerte zu den Eckpunkten der Marker geringfügig von der tatsächlichen Position abweichen und somit Folgefehler bei der Positionsbestimmung verursachen. Weiterhin ist der Ausdruck der Marker auf einem DIN A0 Plotter für die Produktion großer Stückzahlen vergleichsweise teuer. Schließlich haben die Größe und die Zahl der benötigten Marker einen erheblichen Einfluss auf die Kosten für die Infrastruktur.

Damit die Marker sinnvoll als Referenzpunkte zur Positionsbestimmung genutzt werden können, ist zunächst die Pose der Marker im Hallenkoordinatensystem zu ermitteln. Im Projekt „Das Staplerauge“ werden die Marker mit einfachsten Mitteln manuell relativ ungenau vermessen. Hohenstein schätzt die Güte der Positionsmessung auf ± 50 mm [HOH-2014, S. 130]. Ein wesentlicher Schwachpunkt ist in jedem Fall der hohe manuelle Vermessungsaufwand.

4.2.7 Wirtschaftliche Aspekte

Anhand der festgestellten Schwachstellen lässt sich abschätzen, welche generellen Trends sich durch Verbesserungen des Lokalisierungssystems bezüglich dieser Schwachstelle ergeben.

1. Ein reduzierter Ressourcenbedarf (vgl. Abschnitt 4.2.1) erlaubt den Einsatz weniger leistungsfähiger, kostengünstiger Hardware.
2. Eine verbesserte Signalauswertung kann die *Marker Erkennbarkeit* auch bei reduzierter Bildqualität gewährleisten. In der Folge sinken die Anforderungen an die Qualität der Sensordaten und kostengünstigere Kameras können zum Einsatz gebracht werden. Eine gewisse Mindestgüte bezüglich der *Marker Erkennbarkeit* ist dabei Voraussetzung für die Akzeptanz des Systems.

3. Gelingt es die Genauigkeit der *Posenschätzung* zu steigern, können ggf. weitere Anwendungsfälle und somit ein größerer Markt mit dem Lokalisierungssystem adressiert werden.
4. Der bisher vergleichsweise hohe Integrationsaufwand verteuert das Lokalisierungssystem erheblich und macht den Einsatz auf Mietgeräten schwierig. Geringere Integrationskosten wirken sich unmittelbar auf den Kostenanteil je Fahrzeug aus und senken die Gesamtkosten besonders bei der Umrüstung vieler Flurförderzeuge.
5. Ein verminderter Infrastrukturaufwand senkt die Kosten für die Infrastruktur. Insbesondere für eine geringe Anzahl Flurförderzeuge ist dies sehr wichtig, da die auf das Flurförderzeug umgelegten Kosten sonst wirtschaftlich nicht darstellbar sind.

4.2.8 Zwischenstand

Ein Abgleich zwischen Anforderungen und ermittelten Schwachstellen soll verbliebenen Verbesserungsbedarf aufzeigen, der sich bereits aus dem ursprünglichen Demonstrator ergibt. Dazu werden die in Kapitel 3 aufgestellten Anforderungen den in diesem Kapitel erkannten Schwachstellen in Tabelle 4-5 gegenübergestellt.

Der Staplerauge-Demonstrator [GÜN-2014a, S. 75ff.] erfüllt somit bereits bei Einsatz einer Industriekamera nicht alle angestrebten Anforderungen. Da es sich um eine Machbarkeitsstudie handelt, ist dieser Umstand durchaus nachzuvollziehen. Für einen Praxiseinsatz besteht dennoch Verbesserungsbedarf in nahezu allen Bereichen des Lokalisierungssystems und zwar bei

1. der Bildaufnahme (Belichtungszeitanpassung, Bewegungsunschärfe),
2. der Bildauswertung (*Marker Erkennbarkeit*),
3. der verwendeten Recheneinheit (Hardware und Betriebssystem),
4. der Integration am Flurförderzeug (Anbringung Kamera/Recheneinheit und Marker) und
5. der Infrastruktur (Anbringung und Einmessung der Referenzpunkte).

All diese Schwachstellen sind unabhängig vom Einsatz kostengünstiger Hardware. Die Parameter zur Lokisierungsleistung können aufgrund des Fehlens eines Referenzsystems in diesem Zusammenhang nicht überprüft werden und werden daher in der obigen Zusammenfassung nicht berücksichtigt. Es ist aber von weiterem Verbesserungsbedarf durch die Verwendung kostengünstiger Module auszugehen.

Tabelle 4-5: Gegenüberstellung von Anforderungen und Ergebnissen der Schwachstellenanalyse

Anforderung	Schwachstellen	Handlungsbedarf
Kostengünstige Sensorik	Teure Kamera	Ja
Kostengünstige Recheneinheit	Teurer Laptop	Ja
Systematische Bildverzerrung	-	Nein
Bewegungsunschärfe	In seltenen Fällen kann kein Marker erkannt werden	Ja
Rolling-Shutter-Effekt	-	Nein
Signal-Rausch-Verhältnis	-	Nein
Belichtungszeitanpassung	Marker manchmal über- oder unterbelichtet	Ja
Anbringung Module am FFZ	Verkabelung aufwändig	Ja
Anbringung Infrastruktur	Fehlende Flexibilität, hohe Kosten, hoher manueller Aufwand	Ja
Einmessung Referenzpunkte	Hoher manueller Aufwand, Güte unklar	Ja
Marker Erkennbarkeit	Zu gering	Ja
Latenz	-	Nein
Batteriebetrieb	Energiequelle Staplerbatterie	Ja
Resistenz gegenüber physischen Belastungen	-	Nein
Betriebssystem/Software	Vollständige Softwareausstattung eines Büro-PCs	Ja
Recheneinheit	Laptop	Ja
Ausführungsgeschwindigkeit	-	Nein
Speicherverbrauch	-	Nein

4.3 Funktionaler Entwurf

In Kenntnis der wichtigsten Schwachstellen des aktuellen Ansatzes wird in diesem Unterkapitel ein Gesamtkonzept entworfen, welches diese Unzulänglichkeiten verringert und die Übertragung des Ansatzes auf kostengünstige Module ermöglicht. Das dem Staplerauge zugrundeliegende Messprinzip [JUN-2014c; GÜN-2014a, S. 76ff.] wird dazu beibehalten. Dies bietet die Möglichkeit die bestimmten Schwachstellen gezielt zu adressieren und den Ansatz auf kostengünstige Hardware zu übertragen. Umgekehrt ist für einen neuartigen kamerabasierten Lokalisierungsansatz, etwa allein auf Basis natürlicher Merkmale, die Machbarkeit in der Anwendungsdomäne

nicht gesichert und wäre somit vorher als primäres Ziel einer Forschungsarbeit zu klären.

Im Vorgehensmodell entspricht dieser Schritt der *deskriptiven Studie I* [BLE-2009, S. 137ff.]. Es werden folgend Ansätze erarbeitet und zusammengestellt, die den bisherigen Lokalisierungsansatz für Flurförderzeuge soweit verbessern sollen, dass er in einem ersten Schritt für die Praxis geeignet ist und in einem zweiten Schritt trotz des Einsatzes kostengünstiger Module die relevanten Anforderungen ausreichend erfüllt.

4.3.1 Entwurfsmethodik

Da die grundlegenden Schritte des bisherigen Lokalisierungs-Demonstrators bestehen bleiben bzw. verbessert werden sollen, wird das Hauptaugenmerk zunächst auf die Verbesserung der einzelnen Funktionsbausteine unabhängig voneinander gelegt. Das Ziel der Optimierung der einzelnen Funktionsbausteine ist dabei nicht zwingend eine global optimale Lösung, sondern eine Beseitigung der wesentlichen Schwachstellen, um das Konzept und seine Umsetzung dem Gesamtziel einer kostengünstigen Lokalisierung für Flurförderzeuge näher zu bringen.

Die wesentlichen Funktionsbausteine sind

1. Recheneinheit und Kamera,
2. Datenübertragungseinheit und Stromversorgung,
3. Bildverarbeitungsalgorithmen (*Posenschätzung*) sowie
4. Infrastruktur und Vermessungstechnik.

Für jeden dieser Funktionsbausteine werden, soweit notwendig, im Folgenden auf konzeptioneller Ebene Maßnahmen zur Beseitigung der in Kapitel 3 definierten Anforderungen erarbeitet.

4.3.2 Lokalisierungskonzept

Festkörper haben in der Regel drei translatorische und drei rotatorische, also insgesamt sechs Freiheitsgrade. Allgemeine Algorithmen zur *Posenschätzung* [DEM-1995; OBE-1996; GAO-2003; SCH-2006; LEP-2009] bestimmen daher die Pose bezüglich all dieser Freiheitsgrade (vgl. Abschnitt 2.3.1). Um die Pose eines Flurförderzeugs hinreichend genau zu beschreiben, reichen in der Regel jedoch drei Freiheitsgrade (zwei translatorische und ein rotatorischer) aus [GÜN-2014a, S. 83; HOH-2014, S. 85]. Hohenstein beschreibt dazu ein Verfahren, das die Pose nur bezüglich dieser drei Freiheitsgrade bestimmt. Dazu werden sowohl die Marker an der Hallen-

decke als auch die Bildebene der Kamera am Flurförderzeug parallel zum Boden ausgerichtet. In der zur *Posenschätzung* verwendeten Gleichung aus der projektiven Geometrie [HOH-2014, S. 124f.] geht jedoch zusätzlich die Distanz zum Marker als Messgröße ein. Jung et al. stellen daher fest, dass dabei streng genommen intern mit vier Freiheitsgraden gearbeitet wird, da die zwei translatorischen Freiheitsgrade von einem weiteren translatorischen Freiheitsgrad abhängen. Sie eliminieren diesen Freiheitsgrad durch einen für jeden Marker ausgemessenen, statischen Wert [JUN-2015]. Dies erfolgt mit dem Ziel Folgefehler bei der Messung der x,y-Koordinaten zu reduzieren und beschränkt den von Bauer festgestellten, überlinearen Messfehler des Distanzwertes bei Trackingsystemen [BAU-2007, S. 84] im Versuchsaufbau erheblich, da die Ebenheit des Bodens die einzige relevante Fehlerquelle dieser Koordinate verbleibt (vgl. Abbildung 4-6). Aus diesem Grund wird die Vorgehensweise von Jung et al. beibehalten und somit nur mit den drei relevanten Freiheitsgraden gearbeitet, da der hinzugefügte systematische Fehler erheblich geringer als der sonst auftretende Messfehler und damit vorzuziehen ist [JUN-2015].

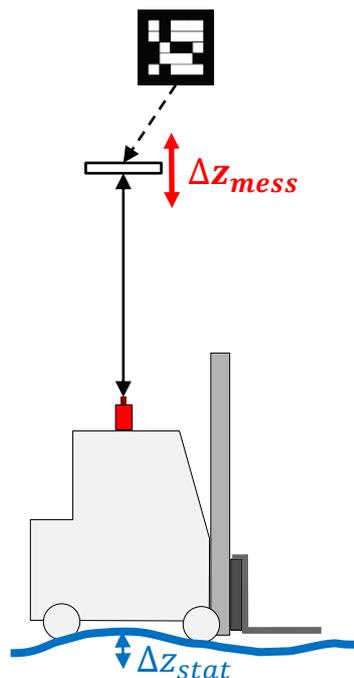


Abbildung 4-6: Fehler im Abstand zum Marker für statische Distanz (Δz_{stat}) und gemessene Distanz (Δz_{mess})

Die Transformation in Fahrzeug und Hallenkoordinaten erfolgt mittels üblicher Koordinatentransformationen [GUN-2008, S. 218ff.].

Bezüglich der Hardware werden die in Tabelle 4-6 aufgelisteten Änderungen vorgenommen. Um die Kosten des Gesamtsystems zu reduzieren, wird die Kamera gegen ein preiswertes Modell getauscht und eine zusätzliche, kostengünstige Batterie zur

Spannungsversorgung von Kamera und Recheneinheit vorgesehen. Letztere erhöht als zusätzliche Komponente zwar die Kosten zunächst, senkt aber durch die wegfalende Verkabelung mit der Staplerbatterie die Integrationskosten erheblich. Der in Abschnitt 3.3.1 geforderte Batteriebetrieb wird für die Dauer von einer Schicht ermöglicht, indem eine Recheneinheit mit geringem Energieverbrauch eingesetzt und die Batterie passend dimensioniert wird. Durch Austausch der Batterie bei Schichtwechsel ist ein dauerhafter Betrieb möglich.

Tabelle 4-6: Änderungen an den Komponenten zur Flurförderzeuglokalisierung

Komponente	Staplerauge [GÜN-2014a, S. 75ff.]	Konzept
Kamera	Eine senkrecht zum Hallenboden ausgerichtete Industriekamera	Eine senkrecht zum Hallenboden ausgerichtete, kostengünstige Kamera
Recheneinheit	Laptop/Industrie-PC	Kleine, stromsparende und kostengünstige Recheneinheit
Datenübertragung	Drahtlos (WLAN)	Drahtlos (WLAN)
Spannungsversorgung	Staplerbatterie	Zusätzliche wiederaufladbare Batterie für Kamera und Recheneinheit, welche ausreichend Leistung für mindestens 8 Stunden bereitstellt.
Infrastruktur	An Querträgern, parallel zum Boden verschraubte ArUco-Marker	An der Hallendecke, parallel zum Boden fixierte ArUco-Marker [GAR-2014]

Der Einsatz zusätzlicher Sensoren wird aufgrund der höheren Kosten und des zusätzlichen Einrichtungsaufwandes verworfen.

4.3.3 Maßnahmen in der Bildverarbeitungskette

Die folgenden Maßnahmen zur Verbesserung des bisherigen Lokalisierungsmonstrators werden in der Bildverarbeitungskette realisiert. Eine Übersicht über die Maßnahmen liefert Tabelle 4-7.

Stricker et al. verfolgen die Marker direkt im Bild, um sie dort effizient wieder zu finden, weil die Verfolgung in einem physikalischen 3D Bewegungsmodell in der untersuchten Anwendung weniger genau und trotzdem rechenintensiver ist [STR-1999]. Dorfmueller-Ulhaas [DOR-2007] verfolgt Referenzpunkte hingegen, indem er die physischen Bewegungen der Objekte berechnet, mittels eines Kalman-Filters die zukünftige Bewegung schätzt und die dortige Pose in die Bildebene der Kamera projiziert. Vergleichbare Methoden bezeichnen Uchiyama et al. als *Tracking by Tracking* [UCH-2012]. Ein solcher Ansatz ist bei der Eigenortung besonders vielversprechend, da die Referenzpunkte an statischen Positionen angebracht werden können und eine hin-

reichend genaue Bewegungsvorhersage die Position aller Marker in der Bildebene bestimmen kann. Jung et al. übertragen dieses Vorgehen erfolgreich auf die Lokalisierung eines Gabelstaplers [JUN-2015]. Eine Verfolgung der Marker anhand eines Bewegungsmodells (engl. *Tracking*) kommt daher im Rahmen dieser Arbeit als zentrale Maßnahme zum Einsatz, da die *Marker Erkennbarkeit* erheblich gesteigert und der Ressourcenbedarf gleichzeitig gesenkt wird, indem die Markerextraktion praktisch immer auf einen kleinen Teilbereich des Bildes beschränkt wird [JUN-2015]. Im Folgenden wird diese Vorgehensweise als *Markervorhersage* bezeichnet.

Auf der Vorhersage aufbauend werden Verfahren einsetzbar, die eine robustere Extraktion der Marker erlauben, indem sie entweder zusätzliche Bildverbesserungen erlauben [JUN-2015] oder den Prozess der Markerextraktion stark vereinfachen (z. B. [STR-1999]).

Von der Vorhersage kann zusätzlich auch die Positionsbestimmung profitieren. Die Abweichung der tatsächlichen Position von der Vorhersage ist gering, da nur der Messfehler der letzten beiden Positionsbestimmungen und die tatsächliche Abweichung von der geschätzten Bewegung den gesamten Fehler ausmachen [JUN-2015]. Um größere Messfehler auszugleichen kann daher die vorhergesagte Position als Referenzwert dienen. Allzu starke Abweichungen von der Vorhersage sind entsprechend ein Hinweis auf einen Messfehler. Verbindet man die Vorhersage mit der Messung, entsteht eine positive Rückkopplung, in deren Folge die Positionsbestimmung immer genauer werden kann (siehe Abbildung 4-7). Der Referenzwert der Vorhersage bedingt dabei eine genauere Messung. Durch die genauere Messung verbessert sich die Vorhersage und die wiederum führt zu einem besseren Messwert usw. Da die systematische Abweichung durch Beschleunigung oder Verzögerung am Gabelstapler sehr gering ist [JUN-2015], sollte durch diese positive Rückkopplung eine deutlich genauere Messung möglich sein.

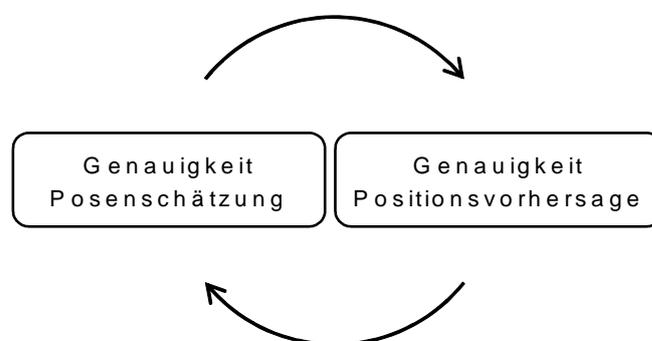


Abbildung 4-7: Positive Rückkopplung zwischen Positionsschätzung und deren Vorhersage

Integriert man in diesen Prozess ein Verfahren zur Markerextraktion, das die Extraktion mittels der *Markervorhersage* vereinfacht, so erhöht man zusätzlich die *Marker Erkennbarkeit*, da eine genauere Vorhersage der Bewegung auch zu einer präziseren Vorhersage der Position des Markers in den Bildkoordinaten führt. Dadurch wird, z. B. dem Verfahren von Stricker et al. [STR-1999], die Markerextraktion weiter erleichtert, was wiederum zu genauerer Extraktion und somit präziseren Positionsbestimmung führen kann (vgl. Abbildung 4-8).

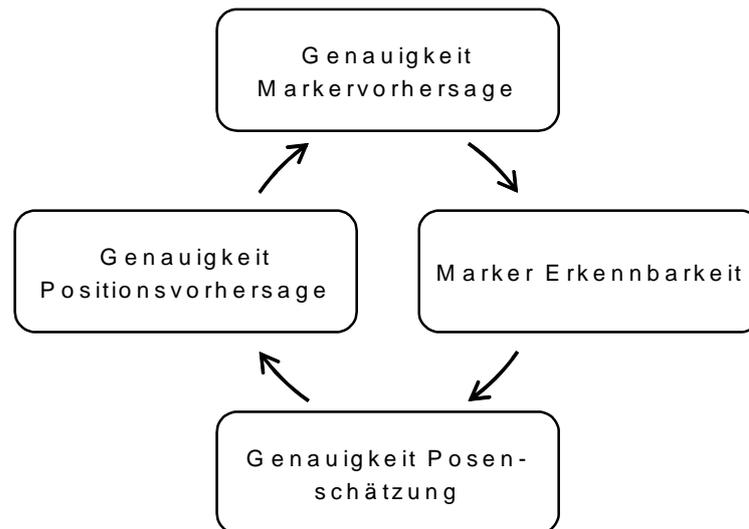


Abbildung 4-8: Positive Rückkopplung zwischen Posenschätzung, Positionsvorhersage, Markervorhersage und Marker Erkennbarkeit

Die *Markervorhersage* erlaubt eine Schätzung der Bewegungsgeschwindigkeit eines jeden Markers im Bild. Aus diesem Wert kann die Bewegungsgeschwindigkeit während der Belichtung des Bildes abgeleitet werden. Ist die Geschwindigkeit während der geplanten Belichtungsdauer zu hoch und ein Marker wird im Bild dadurch nur unscharf abgebildet, so mindert eine Reduktion der Belichtungsdauer diesen Effekt. Die relative Bewegungsgeschwindigkeit des Markers zur Kamera ändert sich dadurch nicht, nur die Dauer, über die er sich im aufgenommenen Bild bewegt, wird vermindert. Die Belichtungszeit wird daher abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit der Marker im Bild begrenzt. Eine zunächst intuitivere Alternative zur Begrenzung der Belichtungszeit sind Verfahren, welche die Bewegungsunschärfe im Rahmen der Bildvorverarbeitung entfernen [YIT-1997; JI-2008; RAJ-2014]. Alle aktuell bekannten Ansätze sind auch auf leistungsfähigen Recheneinheiten nicht echtzeitfähig [RAJ-2014, S. 28,96,180]. Dass eine aktuell verfügbare, kostengünstige und vergleichsweise langsame Recheneinheit diese Verfahren mit ausreichender Geschwindigkeit ausführen kann, ist nicht zu erwarten.

Eine weitere Schwachstelle der *Marker Erkennbarkeit* ist die Bestimmung der Marker ID (vgl. Abschnitt 4.2.4). Aufgrund der Bewegungsvorhersage ist bei der Gabelstap-

lerlokalisierung jedoch für einen Bildausschnitt vorab bekannt, welcher Marker (mit welcher ID) sich in diesem Bildausschnitt befinden sollte. Laut Jung et al. kann die Identifizierung daher vollständig entfallen und stattdessen ein geeignetes Quadrat gesucht werden, das grob dem erwarteten Markerumriss entspricht [JUN-2015]. Verallgemeinert man dieses Vorgehen, so erlaubt man eine maximale Hamming-Distanz von n zur erwarteten Markerkodierung. Entspricht n der Anzahl der kodierenden Quadrate eines ArUco-Markers [MUN-2014], so wird jede beliebige Abweichung toleriert. Wird n geringer gewählt, lassen sich die Abweichung flexibler handhaben und fehlerhafte Markeridentifizierungen, z. B. in Folge von (teilweisen) Verdeckungen des Markers, vermeiden. Die Bestimmung der Hamming-Distanz zur erwarteten Markerkodierung ist zudem weniger aufwändig als die Bestimmung der ID und kann im Fehlerfall bereits frühzeitig abgebrochen werden.

Tabelle 4-7: Zusammenfassung der Maßnahmen in der Bildverarbeitungskette

Maßnahme	Inhalt	Zweck/Anforderung
Markervorhersage	Vorhersage der Bewegung des Fahrzeugs, daraus Bildposition aller Marker schätzen und nur dort nach Marker suchen	Steigerung von <i>Marker Erkennbarkeit</i> und Geschwindigkeit
Bewertung der Posen-schätzung anhand der Vorhersage	Positive Rückkopplung zwischen Vorhersage dient als Bewertungsmaß für Messung der Position	Erhöhung der Genauigkeit, Eliminierung von Ausreißern
Markerextraktion anhand der Vorhersage	Vereinfachte Extraktion der Markereckpunkte anhand der vorhergesagten Eckpunkte [STR-1999]	Bessere <i>Marker Erkennbarkeit</i>
Geschwindigkeitsabhängige Belichtungszeit	Begrenzung der Belichtungszeit bei zu hoher Bewegungsgeschwindigkeit der Marker im Bild	Reduktion der Bewegungsunschärfe
Abweichende Marker ID erlauben	Eine gewisse Abweichung von der erwarteten Marker ID wird akzeptiert.	Gesteigerte <i>Marker Erkennbarkeit</i>

4.3.4 Diagnosefunktionen

Aufgrund der erhöhten Gefahr eines Defektes bei in industrieller Umgebung betriebenen, nicht industrietauglichen Geräten, werden zur rechtzeitigen Erkennung eines Ausfalls bzw. einer Fehlfunktion einzelner oder mehrerer Komponenten des Lokalisierungssystems in Unterkapitel 3.4 Maßnahmen zur Fehlererkennung gefordert. Wesentlicher Bestandteil dieser Erkennungsroutinen sind regelmäßige Diagnosefunktionen.

Es wird daher zum einen empfohlen zu prüfen, ob jede einzelne Komponente für sich ausreichend gut arbeitet und in wie weit das Gesamtsystem einsatzbereit ist. Da ein Fehler auch die Selbstdiagnose betreffen kann, ist zusätzlich eine Prüfung durch ein

externes System notwendig. Diese Aufgabe kann z. B. das LVS übernehmen. Für diese externe Überwachung wird geprüft, ob die Hardware aktiv ist und eine Kommunikationsverbindung besteht. Dies kann immer geprüft werden, wenn ein Auftrag erteilt werden soll, ausgeführt wurde oder die erfolgreiche Ausführung bereits erfolgt sein sollte. Das Ergebnis der letzten Selbstdiagnose kann hier ebenfalls angefordert werden, damit im LVS immer ein möglichst aktuelles Abbild des Zustandes des Lokalisierungssystems vorhanden ist. Bei einem späteren Ausfall der Komponenten auf einem Flurförderzeug lassen sich daraus bereits Hinweise auf den dort aufgetretenen Fehler und entsprechende Handlungsmaßnahmen ableiten.

Die Selbstdiagnose wird hingegen auf der Recheneinheit, welche auch die Positionsbestimmung vornimmt, durchgeführt und gespeichert. Je mehr und je detaillierter die einzelnen Komponenten geprüft werden, desto ein genaueres Fehlerbild ergibt sich. Die Prüfung bezieht sich daher auf alle für die Positionsbestimmung und Übermittlung der Positionsinformation kritischen Bestandteile des Lokalisierungssystems.

Auf Seiten der Software stellt ein Software-Watchdog [MUR-2000] sicher, dass das Betriebssystem läuft. Dieser ist für gängige Betriebssysteme verfügbar und startet das System automatisch neu, wenn es nicht mehr reagiert [COX-2002; MIC-2017c]. Zusätzlich wird ein weiterer Prozess gestartet, der sich mit dem Lokalisierungsprozess gegenseitig prüft. Das Programm zur Positionsbestimmung testet, ob der Prüfprozess aktiv ist und startet diesen ggf. neu. Analog verfährt der Prüfprozess mit dem Lokalisierungs-Prozess. Zusätzlich führt der Prüfprozess kontinuierlich weitere Diagnosen durch. Es wird geprüft,

1. ob die Kamera ein Bild liefert,
2. ob die *Posenschätzung* erfolgreich ist bzw. wann sie es das letzte Mal war, wie hoch die *Marker Erkennbarkeit* aktuell ist und
3. ob eine Kommunikationsverbindung zum LVS besteht.
4. Die Überwachung weiterer Sensorik, soweit vorhanden, kann Informationen zum aktuellen Betriebs- und Gesundheitszustand der Hardware liefern, z. B. Temperatur und Spannung der CPU.

Aufwändigere Tests können anhand der Uhrzeit, z. B. zu Schichtwechseln oder außerhalb der Betriebszeiten, ausgeführt werden, um das Lokalisierungssystem während der Einsatzzeiten nicht zu behindern. Diese Tests dienen primär der Erkennung von Hardwarefehlern, die kurz- oder mittelfristig einen Austausch einer oder mehrerer Komponenten erfordern. Zu testen sind mindestens der RAM, die CPU und das Dateisystem (Massenspeicher). Aus diesen Tests wird ein Zustandsbericht erstellt, an das LVS gesendet und dort sicher gespeichert. Aufgetretene Probleme, die auf einen

Ausfall hindeuten, werden vom LVS an Hersteller und Kunden kommuniziert. Der Kunde erhält dazu verständliche Anweisungen zur Bedeutung des Problemfalls und Handlungsempfehlungen.

Zusätzliche Maßnahmen aus den Bereichen vorbeugende und prädiktiven Wartung [MOB-2002, S. 4ff.] können die Ausfallzeiten weiter minimieren und die Kosten für die Wartung gleichzeitig gering halten [MOB-2002, S. 68f.].

4.3.5 Evaluierungskonzept

Die Evaluierung erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird eine theoretische Betrachtung der systematischen und statistischen Fehler durchgeführt. Nach [DIN ISO 5725-3, S. 10] setzt sich die Genauigkeit eines Messsystems aus der Richtigkeit, also der systematischen Abweichung, und der Präzision, also der statistischen Abweichung, zusammen. Die systematischen Abweichungen können dabei anhand einfacher Rechnungen als Konsequenz der reduzierten Freiheitsgrade theoretisch aufgezeigt werden. Auch die Präzision kann theoretisch als Fehler betrachtet werden, der sich ergibt, wenn eine Messung im Bild um eine gewisse Zahl an Pixeln verschoben und dadurch falsch ermittelt wird [HOH-2014, S. 127]. Aus diesen Fehlerquellen ergibt sich eine Untergrenze der erreichbaren Lokalisierungsleistung bei bekanntem Fehler in Pixeln. Anhand dieser Informationen kann bereits abgeschätzt werden für welche Anwendungsfälle sich der gewählte Ansatz nicht eignet. In einem zweiten Schritt werden praxisnahe Versuche durchgeführt, um die tatsächlich erreichten Attribute zu bestimmen.

Für die Evaluierung des Sensors in statischen Szenarien können vorab ausgemessene Punkte als Referenzgröße verwendet werden. Zusätzlich zu der Abweichung von diesen vermessenen Werten ist das Schwanken des Messwertes infolge des Bildrauschens für die Lokalisierungsleistung von Interesse.

Bei dynamischen Szenarien muss zu jedem Messpunkt der Referenzpunkt bekannt sein, an dem sich das Flurförderzeug gerade befindet. Hinreichend genau lassen sich diese Punkte mit einem präzisen, externen Referenzsystem bestimmen, das die Position parallel zum zu testenden System ermittelt. Aus dem Vergleich beider Werte zu jedem Zeitpunkt lassen sich Aussagen über die Lokalisierungsleistung treffen [DIN 5725-1, S. 10]. Ein Beispiel für ein solches Referenzsystem ist die Testumgebung L.I.N.K. am Fraunhofer IIS in Nürnberg [HEU-2015; FRA-2017]. Nur in seltenen Fällen ist jedoch ein solches Referenzsystem zur Evaluierung vorhanden. Oft wird, vermutlich wegen der zu hohen Kosten für ein genaues Referenzsystem, auf eine Evaluierung in dynamischen Szenarien verzichtet oder auf Referenzdatensätze zu-

rückgegriffen [SMI-2009; STU-2011]. Letztere ermöglichen zwar eine bessere Vergleichbarkeit der Algorithmen bezüglich des Referenzdatensatzes, haben aber wenig Aussagekraft in konkreten Anwendungsfällen. Die in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml aufgebaute Infrastruktur ist zudem nicht portabel. Die Nutzung eines andernorts vorhandenen Referenzsystems erfordert folglich den Aufbau und die Vermessung der Infrastruktur vor Ort.

Näherungsweise lassen sich die relevanten Kennwerte in dynamischen Versuchen jedoch auch ohne Referenzsystem bestimmen. Hohenstein [HOH-2014, S. 145] definiert eine gerade Strecke bekannter Länge und interpoliert zwischen Startpunkt und Endpunkt die dazwischen liegenden Orte zeitlich linear. Dieses Vorgehen ist auf geradlinige Bewegungen bei niedrigen Geschwindigkeiten beschränkt und vernachlässigt Beschleunigungen und Verzögerungen. Die Aussagekraft der Messwerte ist dementsprechend begrenzt [HOH-2014, S. 168f.]. Bauer verwendet den konstanten, vorab vermessenen Abstand zweier, um eine gemeinsame Achse rotierenden Kugeln als Referenzgröße [BAU-2007, S. 70f.] zur Bestimmung des Fehlers in einem *Outside-in* Trackingsystem (Fremdortung). Für die Eigenortung zur Flurförderzeuglokalisierung (*Inside-out*) ist die Distanz allein nicht aussagekräftig genug, da sich das Fahrzeug und damit auch die dort angebrachte Kamera während der dynamischen Versuche bewegt. Die gleiche Distanz zu zwei statischen Referenzpunkten kann durch unterschiedliche Abstände entlang der x- und y-Achse erreicht werden und liefert daher keine verlässliche Aussage über die konkrete Position in der x,y-Ebene. Jung et al. verwenden die Güte der Vorhersage aus dem Bewegungsmodell und die Distanz zwischen gemessenem und vorhergesagtem Punkt als Vergleichskriterium zwischen verschiedenen Algorithmen zur *Posenschätzung* [JUN-2015]. Grundsätzlich ist eine höhere Vorhersagequalität ein Indiz für eine bessere *Posenschätzung*. Absolute Werte zur Lokalisierungsleistung lassen sich daraus aber nicht berechnen, da geringe kumulative Fehler nicht erkennbar sind. Messfehler aus der Vergangenheit haben außerdem einen Einfluss auf die Bewertung der aktuellen Messung und ein Marker kann auch durch andere Ursachen als eine fehlerhafte Vorhersage nicht entdeckt werden (vgl. Abschnitt 4.2.4).

Mit den Markern an der Hallendecke existieren für die *Posenschätzung* bereits Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten. Daraus lassen sich mittels Koordinatentransformationen auch die zeitlich invarianten Posen der Marker zueinander bestimmen. Chen et al. und Munoz-Salinas et al. verwenden diesen Ansatz, um aus den Relationen aller Paare gleichzeitig in einem Bild sichtbarer Marker, die Marker zueinander zu vermessen [SHA-2012; MUN-2016]. In dieser Arbeit wird hingegen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems der umgekehrte Ansatz gewählt. Die konstanten, initial vermessenen Markerrelationen werden als Referenz-

werte benutzt, um die Qualität der Messung zu schätzen. Dazu werden zunächst alle Paare an Soll-Markerrelationen (vgl. Abbildung 4-9) bestimmt und mit den während der Fahrt gemessenen Relationen verglichen. Die Differenz beider Werte liefert ein absolutes Maß für die Abweichung der *Posenschätzung* von der Realität bezüglich jedes betrachteten Freiheitsgrades. Es werden mehr Marker an der Hallendecke angebracht als für die Positionsbestimmung von Flurförderzeugen notwendig sind, um möglichst oft mehrere Marker im selben Bild vorzufinden. Mit diesem Verfahren ist das Lokalisierungssystem quasi selbst in der Lage die Präzision auch in dynamischen Szenarien zu evaluieren. Auf ein Referenzsystem kann folglich verzichtet werden.

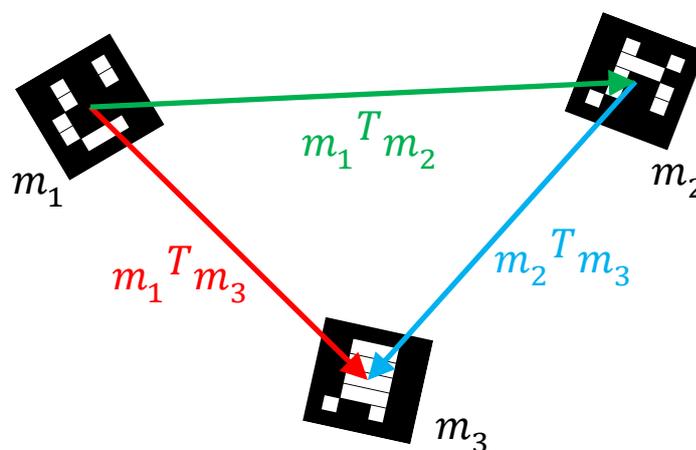


Abbildung 4-9: Relationen zwischen drei verschiedenen Markern als Referenzgrößen

Bei diesem Messverfahren werden zwei zeitgleiche Messungen gemeinsam bewertet, was den Vergleich unterschiedlicher Werte erlaubt, aber nicht den einzelnen konkreten Messfehler direkt charakterisiert, sondern die Summe zweier Fehler. Der einzelne Messfehler für ein bestimmtes Perzentil kann jedoch aus der Gesamtheit aller Messungen statistisch ermittelt werden, wenn die Messwerte einer konkreten Verteilungsfunktion unterliegen. Für Messverfahren wird üblicherweise eine Normalverteilung des Messrauschens angenommen [BAU-2007, S. 22]. Sind die Parameter der Verteilung für die kombinierte Messung bekannt, so lassen sich daraus die Parameter der Verteilung für die einzelne Messung ableiten. Angenommen die Messwerte seien normalverteilt, so ist auch die Summe je zweier unabhängiger Messgrößen aufgrund der Invarianz der Normalverteilung $N(\mu, \sigma^2)$ gegenüber der Faltung normalverteilt und es gilt⁸:

⁸ siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Normalverteilung>

$$N(\mu_1, \sigma_1^2) + N(\mu_2, \sigma_2^2) = N(\mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2) \quad (4-1)$$

Da dasselbe Messverfahren angewandt wird, ist die Verteilung der ersten Messung gleich der Verteilung der zweiten Messung und Formel (4-1) vereinfacht sich zu:

$$N(\mu, \sigma^2) + N(\mu, \sigma^2) = N(2\mu, 2\sigma^2) \quad (4-2)$$

Falls keine systematische Abweichung in den Messwerten zur Bestimmung der Präzision existiert, so ist der Mittelwert $\mu = 0$ und der σ -Wert der Einzelmessung ergibt sich durch Division mit dem Faktor $\sqrt{2}$ aus dem entsprechenden Wert der kombinierten Messung.

Sämtliche Messungen werden an einem Versuchsgabelstapler des Lehrstuhls fml durchgeführt. Die Ergebnisse können unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten auf andere Flurförderzeuge übertragen werden. Aus den theoretischen Überlegungen und praxisnahen Versuchen lässt sich ableiten wie viel Verbesserungspotential bezüglich der Lokalisierungsleistung mit den gewählten Vereinfachungen besteht bzw. welche Anforderungen sich mit dem gewählten Ansatz nicht erreichen lassen.

4.4 Integrationskonzept

Für die Integration am Gabelstapler werden zwei Varianten betrachtet. Ein Entwicklungssystem wird genutzt, um die Algorithmen zu erproben und Versuchsdaten aufzuzeichnen. Dieses entspricht dem Konzept aus dem Staplerauge-Projekt [GÜN-2014a, S. 75ff.], es kommen noch keine kostengünstigen Komponenten zum Einsatz. Das zweite System (Funktionsmuster) arbeitet mit derselben Software und besteht ausschließlich aus kostengünstigen Komponenten.

4.4.1 Entwicklungssystem/Labormuster

Wesentliche Vorteile des Entwicklungssystems sind die hohe Flexibilität während der Entwicklung und Erprobung der Algorithmen. Das Lokalisierungssystem besteht aus einem Laptop und einer Industriekamera, welche an einer Halterung an der Heckseite des Fahrzeugdachs angebracht wird. Diese Variante des Lokalisierungssystems wird primär benutzt, um die wesentlichen Eigenschaften der Algorithmen genauer zu analysieren und die Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit der Lokalisierung zu untersuchen. Um eine genauere Analyse des Verhaltens der einzelnen Bildverarbeitungsschritte zu ermöglichen und eine bessere Vergleichbarkeit der alternativen Ver-

fahren zu ermöglichen, werden mit dieser Entwicklungsstufe Videoaufnahmen angefertigt, die in einem zweiten Schritt zur *Posenschätzung* offline benutzt werden können. Sämtliche Algorithmen werden dadurch auf exakt denselben Eingabedaten ausgeführt und fair miteinander verglichen.

Um das Entwicklungssystem in der Praxis einzusetzen, müssen Recheneinheit und Verkabelung gemäß der Anforderungen aus Kapitel 3 angepasst werden. Ein möglicher Ansatz ist den Laptop durch ein leistungsfähiges Staplerterminal zu ersetzen und robust mit der Kamera zu verbinden. Ein vergleichbares Integrationskonzept nutzen bereits ZENOWAY [ALE-2013] und Sky-Trax [TOT-2014], daher besteht diesbezüglich kein Forschungsbedarf.

4.4.2 Funktionsmuster

Das Funktionsmuster soll denselben Messaufbau wie das Labormuster mittels sehr viel kostengünstigerer Komponenten realisieren und die in Kapitel 3 erarbeiteten Anforderungen berücksichtigen. Der Anbringungsort wird möglichst beibehalten. Die Stromversorgung wird über eine eigene, wieder aufladbare Batterie realisiert. Die Kommunikation mit der IT-Infrastruktur des Anwenders erfolgt drahtlos. Diese Ausbaustufe stellt zugleich die letzte Iteration der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Demonstratoren dar. Weitere Schritte der Entwicklung hin zu einem Produkt können auf den mit diesem Demonstrator gewonnenen Erkenntnissen aufbauen, sind jedoch nicht mehr Teil dieser Arbeit.

Tabelle 4-8 stellt die beiden Entwicklungsstufen der Demonstratoren bezüglich ihrer, am Gabelstapler verbauten, Komponenten gegenüber.

Tabelle 4-8: Wesentliche Komponenten von Labor- und Funktionsmuster



5 Technische Umsetzung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der konkreten Umsetzung der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Konzepte. Dabei werden die im jeweiligen Konzept grob beschriebenen Ansätze weiter detailliert und zusammengefügt. Im gewählten Vorgehensmodell entspricht dieser Schritt der *präskriptiven Studie* [BLE-2009, S. 178ff.]. Zunächst werden die Softwarekomponenten beschrieben, in Unterkapitel 5.2 folgt darauf die Auswahl geeigneter Hardwaremodule. Schließlich werden die Umsetzung der Infrastruktur (Unterkapitel 5.3) und die Systemintegration am Flurförderzeug (Unterkapitel 5.4) dargestellt.

5.1 Implementierung

Im Rahmen der Implementierung wird zunächst der Informationsfluss zwischen den einzelnen Modulen analysiert und dazu eine passende Software-Architektur ausgewählt. Im nächsten Schritt werden zur Umsetzung der Konzepte Algorithmen gewählt und ggf. weiterentwickelt, die möglichst viele der in 4.2 aufgedeckten Schwachstellen beheben oder abmildern.

5.1.1 Arbeitsweise

Grundsätzlich werden bei Anwendungen aus dem Bereich der digitalen Bildverarbeitung ähnliche Schritte durchgeführt. Jähne [JÄH-2005, S. 15f.] unterteilt das Gesamtverfahren in die vier sequentiellen Arbeitsschritte:

1. Bildaufnahme,
2. Bildvorverarbeitung,
3. Merkmalsextraktion und
4. Bildanalyse.

Die Verarbeitung in jedem dieser Schritte ist, von ihren Eingaben abgesehen, weitgehend voneinander unabhängig [JÄH-2005, S. 15f.]. Tabelle 5-1 ordnet die für die Flurförderzeuglokalisierung benötigten Verfahren den von Jähne beschriebenen Kategorien zu und beschreibt damit auch die Abhängigkeiten in der Verarbeitungssequenz. Die zeitliche Reihenfolge innerhalb einer Kategorie wird durch das „→“ Symbol repräsentiert.

Tabelle 5-1: Zuordnung der Verfahren aus dem Konzept zu den wesentlichen Arbeitsschritten in der Bildverarbeitung nach Jähne [JÄH-2005, S. 15f.]

Arbeitsschritt	Verfahren
Bildaufnahme	Wahl und Beschränkung der Belichtungszeit → Abholen des Bildes von der Kamera
Bildvorverarbeitung	Histogrammausgleich, Nachschärfen
Merkmalsextraktion	Kandidaten für Marker im Bild finden → Marker ID bestimmen → Eckpunkte der Marker präzise bestimmen
Bildanalyse	Posenschätzung → Tracking (Bewegungsmodell, Markervorhersage)

5.1.2 Softwarearchitektur

Die in dieser Arbeit verwendeten, grundlegenden Verarbeitungsschritte unterscheiden sich nur geringfügig vom Staplerauge-Demonstrator [GÜN-2014a, S. 75ff.]. Daher wird die dort gewählte [GÜN-2014a, S. 86] *Pipes-and-Filter Architektur* [BUS-1996, S. 53ff.] um folgende Komponenten erweitert (siehe Abbildung 5-1).

- Eine *Markervorhersage* erfordert eine Rückkopplung [JÄH-2005, S. 16] der Positionsinformation aus der Bildanalyse in die Vorhersage der Fahrzeugpose [JUN-2015].
- Ebenso wird eine Rückkopplung hinzugefügt, welche die aktuelle Geschwindigkeit der Marker im Bild an die Bildaufnahme übermittelt, damit eine geschwindigkeitsabhängige Steuerung der Belichtungszeit vorgenommen werden kann.

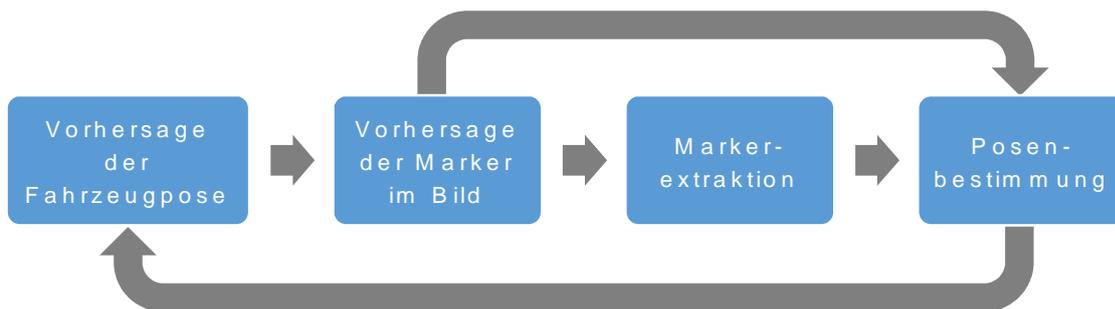


Abbildung 5-1: Softwarearchitektur des Demonstrators

Für die Umsetzung des Demonstrators wird im Übrigen objektorientierte Programmierung verwendet.

5.1.3 Verarbeitungsalgorithmen

Entlang der oben beschriebenen Bildverarbeitungskette werden die im Konzept (vgl. Abschnitt 4.3.3) vorgeschlagenen Optimierungen umgesetzt. In diesem Abschnitt

werden vorwiegend die Änderungen und zusätzlichen Maßnahmen erläutert, die sich daraus für die einzelnen Schritte der Bildverarbeitungs pipeline ergeben.

Bilddaufnahme

Die Aufnahme eines Bildes erfolgt im Staplerauge-Demonstrator mit einer adaptiven Belichtungszeitsteuerung, damit ein adäquater Umgang mit unterschiedlichen Lichtstärken, z. B. im Bereich natürlicher Lichtquellen, sichergestellt ist [GÜN-2014a, S. 114]. Die gefundenen Regionen der Marker dienen als Eingabe für die Wahl der Belichtungszeit [GÜN-2014a, S. 86]. Dadurch sollen besonders die Regionen, in denen sich Marker befinden, möglichst nicht über- oder unterbelichtet werden.

Diese Anpassung wird um zwei Maßnahmen ergänzt. Zum einen wird eine statische Obergrenze festgelegt, welche die Belichtungszeit nicht überschreiten darf, damit eine Aufnahme mit der gewünschten Bildwiederholrate dauerhaft möglich ist. Dazu darf die Belichtungszeit nicht länger dauern als die durch die Bildwiederholrate definierte Zeit bis zur nächsten Aufnahme. Sollen 30 Bilder pro Sekunde verarbeitet werden, ist die maximale Belichtungszeit folglich auf $1/30 \text{ s}$ limitiert [NAU-2014, S. 583]. Zum anderen wird die Belichtungszeit in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit der Marker im Bild begrenzt. Dazu wird zunächst die Bewegung der Marker im Bild geschätzt:

1. Bestimme die Geschwindigkeiten v_{trans} und v_{rot} des Flurförderzeugs.
2. Bestimme die kleinste Distanz z_{min} zwischen Kamera und Marker in z-Richtung zu allen im nächsten Bild sichtbaren Markern.
3. Die translatorische Komponente der Bewegung im Bild folgt aus der optischen Gleichung des Lochkammermodells [JÄH-2005, S. 203f.].
4. Bestimme den maximalen Abstand r_{max} eines Markers zur Kamera.
5. Die maximale rotatorische Komponente der Bewegung im Bild folgt aus dem Bewegungsradius r_{max} und der Winkelgeschwindigkeit v_{rot} .
6. Da beide Bewegungen zeitgleich auftreten, wird die maximale Bewegungsgeschwindigkeit im Bild v_B mittels der Wurzel der Quadrate beider Anteile geschätzt (vgl. Formel (5-1)).

$$v_B = \sqrt{\left(\frac{f \cdot v_{trans}}{z_{min}}\right)^2 + (r_{max} \cdot v_{rot})^2} \quad (5-1)$$

Die maximal zulässige Belichtungszeit kann für jedes Bild so festgelegt werden, dass eine konfigurierbare Geschwindigkeit der relevanten Pixel im Bild während der Be-

lichtung nicht überschritten wird. Aufgrund der Arbeitsweise der weiter unten vorgestellten Algorithmen zur Markerextraktion wird hier ein maximaler Wert von vier Pixeln festgelegt. Durch die Wahl der Belichtungszeit kann sich die Breite der Kante eines Markers aufgrund der Bewegungsunschärfe nur auf vier oder weniger Pixel im Bild verteilen. Somit verbleibt ein wesentlicher Teil des Gradienten einer Kante innerhalb des Suchfensters der Markerextraktion durch Kantenverfeinerung [STR-1999] (siehe Abschnitt 4.3.3) und kann dort trotz Bewegungsunschärfe gefunden werden. Wesentlicher Nachteil dieses Ansatzes ist ein mit der reduzierten Belichtungszeit einhergehendes, ungünstigeres Signal-Rausch-Verhältnis [PHO-2010].

Bildvorverarbeitung

Wie Tabelle 4-4 zu entnehmen ist, steigert der Histogrammausgleich die *Marker Erkennbarkeit* erheblich und wird aus diesem Grund übernommen. Auf eine ebenfalls in derselben Tabelle untersuchte, softwareseitige Verkleinerung kann verzichtet werden, wenn die Auflösung der Kamera auf den gewünschten Wert konfiguriert werden kann. Grundsätzlich werden die Maßnahmen in der Bildvorverarbeitung nur auf die betrachteten Bildbereiche angewandt, um den Ressourcenaufwand zu reduzieren. Der Histogrammausgleich wird zunächst nur zur Verbesserung der von der *Marker-vorhersage* bestimmten Bildregionen angewandt [JUN-2015].

Merkmalsextraktion

Die Aufgaben der Merkmalsextraktion im Lokalisierungssystem sind nach Garrido-Jurado et al. [GAR-2014]:

1. geeignete Kandidaten für Marker im Bild zu finden,
2. die zugehörige Marker ID zu ermitteln und
3. die für die *Posenschätzung* relevanten Eckpunkte des Vierecks präzise zu extrahieren.

Um geeignete Algorithmen für jeden Schritt zu wählen oder zu entwickeln, ist zunächst zu klären welche Eingaben dem jeweiligen Verarbeitungsschritt übergeben werden und welche Ausgaben zu erwarten sind. In Kenntnis dieser Schnittstellen können geeignete (mathematische) Transformationen gefunden werden, welche die gewünschte Überführung der gegebenen Eingaben in die gewünschten Ausgaben herstellen.

Geeignete Kandidaten für Marker im Bild sind in *Augmented Reality* Anwendungen konvexe Vierecke [MUN-2014]. Im Lokalisierungskonzept (vgl. Abschnitt 4.3.2) sind

die Marker jedoch stets parallel zur Bildebene angeordnet und erscheinen damit bei einer Lochkamera [BRA-2008, S. 372] als Quadrat. Durch optische Verzerrungen in einer realen Kamera [BRA-2008, S. 377] kann dieses Quadrat insbesondere in den Randbereichen verformt sein. Aufgrund der relativ geringen Größe der Marker im Bild sind die dort erwarteten Verzerrungen jedoch klein, es müssen folglich nur geringfügig deformierte, einem Quadrat sehr ähnliche Vierecke (wieder) gefunden werden. Dabei ist es unerheblich, ob das Viereck direkt gefunden werden kann oder aus seinen Bestandteilen, den vier einzelnen Seiten, zusammengesetzt wird. Abbildung 5-2 zeigt zwei verzerrte Quadrate unterschiedlicher Größe. Während beim größeren Quadrat deutliche Abweichungen von der ursprünglichen Form zu erkennen sind, sind diese im inneren, kleineren Quadrat optisch kaum wahrnehmbar.

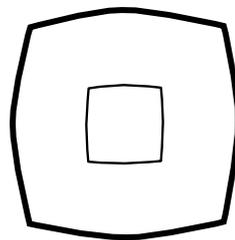


Abbildung 5-2: Verzernte Quadrate unterschiedlicher Größen

Es sind zunächst zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Durch die Bewegungsvorhersage (vgl. Abschnitt 4.3.3) liegt eine Schätzung vor, welcher Marker sich wo im Bild befindet oder
2. es ist nicht bekannt, wo sich die Marker befinden, da
 - a. keine Vorhersage getroffen werden konnte bzw.
 - b. die Vorhersage zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis geführt hat.

Liegt eine Schätzung vor, so kann zunächst versucht werden diese Schätzung durch eine Messung zu überprüfen. Stricker et al. nutzen dafür ein Verfahren, welches die Kanten eines Markers anhand der vorhergesagten Position wiedererkennt [STR-1999]. Dazu werden entlang der vermuteten Kanten in regelmäßigen Abständen Stützpunkte definiert und in diesen Punkten senkrecht zur vorhergesagten Kante die korrekte Position desjenigen Punktes gesucht, der auf dem Schnittpunkt von Senkrechte und echter Markerkante liegt. Für jeden Stützpunkt misst das Verfahren somit einen Punkt auf der Markerkante. Eine Ausgleichsgerade durch diese Punkte kann eine genaue Messung der Markerkante liefern. Anders gesagt nutzt das Verfahren die Vorhersage als Startwert und wendet übliche Strategien zur subpixelgenauen Kantenverfeinerung [STE-2000; FAB-2012; FAB-2015; HAG-2011] an, um die richtige Position der Markerkante zu bestimmen ohne die Kanten dabei explizit zu erken-

nen. Da der Prozess des Erkennens der Kante de facto entfällt, kann er nicht mehr fehlschlagen und benötigt keine Ressourcen mehr, mit dem Effekt einer effizienteren Berechnung bei höherer *Marker Erkennbarkeit*. Stricker et al. erreichen daher auf für heutige Verhältnisse sehr langsamen Rechnern eine Bildwiederholrate in der Markerextraktion von bis zu 23 Hz. [STR-1999]

Die von Stricker et al. eingesetzte Markerextraktion durch Kantenverfeinerung bietet zwei weitere Vorteile [STR-1999]:

- Die Extraktion ist resistent gegenüber lokalen Störungen.
- Die Messung ist skalierbar in der Zahl der Stützpunkte und dadurch potentiell präziser, da bei erhöhter Zahl der Stützpunkte einzelne Messfehler einen geringeren Anteil an der Gesamtmessung haben.

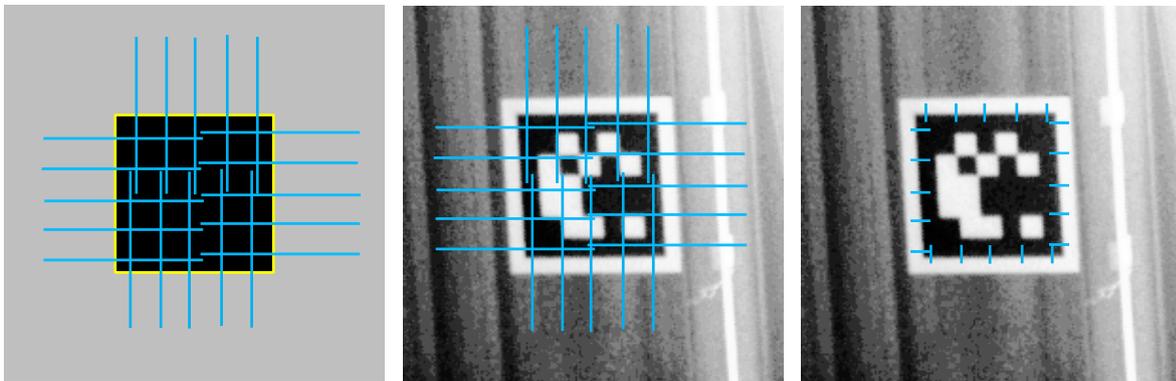


Abbildung 5-3: *Adaption des Verfahrens von Stricker et al. [STR-1999] an die Anforderungen im Warenlager*

Um dieses Verfahren auf die Flurförderzeuglokalisierung übertragen zu können sind einige Modifikationen notwendig. Stricker et al. betrachten z. B. sehr dunkle Marker auf sehr hellem Hintergrund in kontrastarmer Umgebung [STR-1999] (siehe Abbildung 5-3 links). Die Gefahr einer fehlerhaften Verfeinerung der vorhergesagten Kanten ist dadurch vergleichsweise gering. Die bisher für die Lokalisierung genutzten ArUco Marker [GÜN-2014a, S. 114] weisen einen relativ kleinen weißen Rahmen auf und verfügen über innere weiße (und schwarze) Elemente, welche die Marker ID kodieren. Zudem ist die Umgebung vergleichsweise kontrastreich, Fehler bei der Kantenverfeinerung sind daher sehr wahrscheinlich, wenn die vorhergesagten Markereckpunkte nicht nahe genug an den tatsächlichen Markereckpunkten liegen (vgl. Abbildung 5-3 Mitte). Um diese Probleme zu beheben, wird der Prozess der Markerextraktion in vier Schritten durchgeführt.

1. Zunächst wird versucht die vorhergesagten Marker, analog zu Stricker et al, im unmittelbaren Umfeld wiederzuerkennen [STR-1999]. Die dabei zum Einsatz kommenden orthogonalen Suchlinien werden immer nach oben und unten auf eine Distanz von jeweils drei Pixeln begrenzt, damit nicht versehentlich stärkere Gradienten innerhalb oder außerhalb des Markers verfeinert werden (siehe Abbildung 5-3 rechts). Der Stützpunkt der ersten Suchlinie beginnt immer bei ca. 10 %, der letzte endet bei 90 % der Kantenlänge des Markers. Diese Maßnahme soll Ausreißer am Rand vermeiden, wenn die dortigen Stützpunkte, z. B. aufgrund einer Abweichung von der Vorhersage, deutlich außerhalb des Markers liegen und dort kein Punkt auf der Markerkante zu finden ist. Aufgrund der geringen Suchdistanz werden jeweils zwei Iterationen dieser Verfeinerung durchgeführt und dadurch indirekt ein größerer Suchbereich ermöglicht. Um eine schnelle Suche zu ermöglichen, werden drei Suchlinien je Kante verwendet. Da eine Gerade bereits über zwei Punkte eindeutig definiert ist, dient der dritte Punkt der Erhöhung der Verfügbarkeit der Suche. Zusätzliche Suchlinien reduzieren zwar den Einfluss von Ausreißern, bedeuten aber auch mehr Auswertungsaufwand, insbesondere da dieser Verarbeitungsschritt in bis zu acht Suchfenstern und für alle vier Kanten je zweimal, also insgesamt 64 Mal für jeden Marker ausgeführt wird. Da es zunächst nur um eine grobe Schätzung der Kanten geht, werden die Punkte auf den Suchlinien zugunsten höherer Auswertungsgeschwindigkeit pixelgenau ausgewählt. Scheitert die Extraktion auf diesem Weg, werden die vorhergesagten Eckpunkte so verschoben, dass die Suche jeweils südlich, nördlich, östlich, westlich, süd-östlich, süd-westlich, nord-westlich und nord-östlich von der ursprünglichen Position im Bild wiederholt wird (vgl. Abbildung 5-4). Für jedes Suchfenster wird die ID des Markers mit der erwarteten ID verglichen. Bei Übereinstimmung ist der Marker gefunden und die Suche kann abgebrochen werden. Ansonsten wird die Suche fortgesetzt, aber der Markerkandidat gespeichert, welcher die geringste Abweichung von der erwarteten ID besitzt. Mittels dieser Information lassen sich später teilweise verdeckte oder im Randbereich liegende Marker erkennen, die akzeptiert werden, wenn die Abweichung vom erwarteten Wert nicht zu groß ist.
2. Wird bis hierhin kein Marker akzeptiert, war möglicherweise die Vorhersage nicht genau genug oder der Marker liegt in der Nähe der vorhergesagten Stelle, kann aber im Bild nicht erkannt werden. Für ersteren Fall schließt sich ein ähnliches Verfahren an. Da die Abweichung des Winkels von der Vorhersage in der Praxis klein ist [JUN-2015], liegen die zu messenden Punkte für eine Markerkante ähnlich weit von der Vorhersage entfernt. Dieser Umstand lässt sich nutzen, um bei der Suche orthogonal zur vorhergesagten Linie aus mehreren in Frage kommenden Gradientenmaxima das Richtige auszuwählen. Die

Suche erfolgt dabei wie bereits unter Punkt 1. Jetzt wird jedoch mit einem sehr viel größeren Suchfenster gearbeitet und nicht der maximale Intensitätsgradient orthogonal zur vorhergesagten Linie gesucht, sondern alle die Punkte abgespeichert, an denen die Gradientensumme im Suchfenster ein (lokales) Maximum annimmt, welches größer als ein bestimmter Schwellwert ist. Zu jedem Punkt wird zusätzlich der Abstand zur vorhergesagten Kante abgespeichert. Anhand des Abstands lässt sich die größte Gruppe Punkte finden, deren Distanz zueinander ähnliche Werte annimmt (siehe Abbildung 5-5). Bei der Bestimmung der ID wird mit einer gewissen Toleranz überprüft, ob es sich um den erwarteten Marker handelt. Das Verfahren ähnelt somit ebenfalls dem Ansatz von Stricker et al. [STR-1999], findet die Kante aber auch, wenn mehrere Gradientenmaxima auf den Suchlinien liegen.

3. Konnte kein Marker gefunden werden, wird der Marker in der vorhergesagten Region gesucht. Dabei kommt dasselbe Verfahren zur Erkennung der Quadrate zum Einsatz, wie bei der Suche im gesamten Bild (s. u.). [JUN-2015]
4. Ist hingegen eine Vorhersage nicht möglich, weil keine Positionsinformationen vorliegen oder konnte an den vorhergesagten Stellen kein Marker gefunden werden, so wird im gesamten Bild nach Markern gesucht.

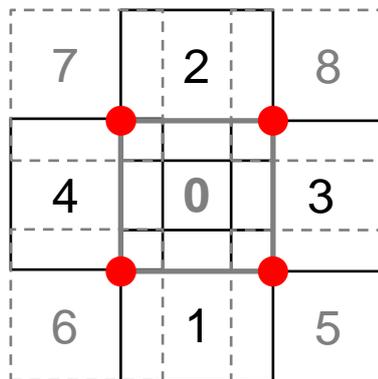


Abbildung 5-4: Lokale Suche mittels Kantenverfeinerung

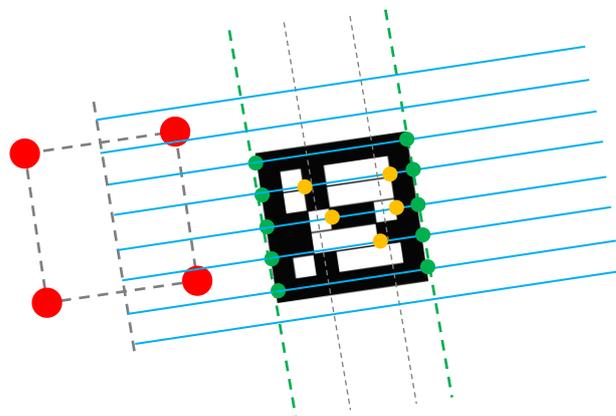


Abbildung 5-5: Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld

Für diese Suche wird im Staplerauge-Projekt [GÜN-2014a] der Ansatz aus der ArU-co-Bibliothek [RAF-2017] zur Markerextraktion verwendet, welcher aus folgenden Schritten besteht [MUN-2014]:

1. Ein adaptives Schwellwertverfahren wandelt das Grauwertbild in ein Schwarz-Weiß Bild um [BRA-2008, S. 138ff.].
2. Im Schwarz-Weiß Bild werden Konturen gesucht [BRA-2008, S. 234ff.] und anhand geometrischer Kriterien geeignete Kandidaten ausgesucht und als Polygon approximiert [BRA-2008, S. 245].
3. Die gefundenen, konvexen Vierecke werden ggf. anhand ihrer Marker ID identifiziert.

Dieser Ansatz hat sich als sehr robust gegenüber Lichteinfluss bei starkem Gegenlicht gezeigt [GÜN-2014a, S. 110ff.; HOH-2014, S. 112]. Teilweise verdeckte oder überblendete Marker erkennt das Verfahren allerdings nicht zuverlässig.

Diese Vorgehensweise wird wie folgt modifiziert:

1. Das adaptive Schwellwertverfahren wird beibehalten. Die Implementierung berechnet den dynamischen Schwellwert und den daraus abgeleiteten Binärwert in einem Durchlauf. Dadurch wird gegenüber OpenCV ein Durchlauf durch das Bild eingespart [BRA-2008, S. 138ff.].
2. Wie bereits oben festgestellt, werden im wesentlichen Quadrate gesucht. Infolge von Über- oder Unterbelichtung bzw. Verdeckungen können die Quadrate jedoch teilweise entartet sein (vgl. Abschnitt 4.2.4). Um auch mit nicht vollständig abgebildeten Rechtecken umgehen zu können, wird statt der Suche nach den Konturen der Quadrate ein *connected-component labeling* [PFA-1966] Algorithmus für die Suche von Markerkandidaten verwendet. Atcheson et al. nutzen einen entsprechenden Algorithmus zur Extraktion potentieller Markerkandidaten in der Software CalTag [ATC-2010]. Shibata et al. implementieren ein ähnliches Verfahren auf Grafikkarten und erzielen so eine schnellere Markerextraktion [SHI-2014]. Konkret kommt ein zweistufiges 8-connectivity *connected-component labeling* Verfahren zum Einsatz [DIL-1992]. In der zweiten Stufe werden aber nur diejenigen Komponenten beibehalten, welche weder zu groß noch zu klein sind, um Marker beinhalten zu können. Die dafür notwendigen Schwellwerte lassen sich vorab berechnen, da für jeden Marker der Abstand in z-Richtung sowie seine physische Größe bekannt sind und mittels Projektion in die Bildebene [BRA-2008, S. 405f.] die erwartete Größe im Bild geschätzt werden kann. Da die äußeren Kanten des Markers gesucht werden, ist der innere Bereich für das Auffinden von Kandidaten nicht

von Bedeutung. Daher wird die konvexe Hülle der zusammenhängenden Punkte einer Komponente bestimmt [BRA-2008, S. 259f.] und diese als Polygon approximiert [BRA-2008, S. 245]. Da bereits vorab die konvexe Hülle bestimmt wird, ist jedes gefundene Polygon automatisch konvex und alle Vierecke Kandidaten für einen Marker.

3. Vor der Bestimmung der ID werden diejenigen Marker verworfen, die analog zu Punkt 2 zu klein, zu groß oder einem Quadrat nicht ähnlich genug sind [GÜN-2014a, S. 75ff.]. Letzteres Kriterium wird anhand der ähnlichen Länge der gegenüberliegenden Seiten und der Länge der Diagonalen überprüft, bevor die ID des Markers als letztes Kriterium verwendet wird.

Tabelle 5-2 zeigt die wesentlichen technischen Unterschiede bei der Markerextraktion im gesamten Bild auf.

Tabelle 5-2: Vergleich der Markerextraktion im Vollbild mit der ArUco-Bibliothek

Arbeitsschritt	ArUco [MUN-2014]	Modifiziertes Verfahren
Umwandlung in s/w Bild	<i>adaptiveThreshold</i> [BRA-2008, S. 138ff.] (durchläuft Bild 2x)	Implementierung analog zu <i>adaptiveThreshold</i> [BRA-2008, S. 138ff.] (durchläuft Bild 1x)
Kantenerkennung	<i>findContours</i> [BRA-2008, S. 234ff.]	Konvexe Hülle [BRA-2008, S. 259f.] der Zusammenhangskomponenten
Polygone	<i>approxPolyDP</i> [BRA-2008, S. 245]	<i>cvApproxPoly</i> [BRA-2008, S. 245] (C-API)
Kandidatenwahl	<ul style="list-style-type: none"> • Konvexe Vierecke • Min. Länge • Min. Abstand zueinander 	<ul style="list-style-type: none"> • Konvexe Vierecke • Min. Länge • Max. Länge • Länge Diagonalen • Verhältnis Kante/Diagonale • Verhältnis Kanten

Die oben genannten Maßnahmen zielen auf eine erhöhte Verarbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig gesteigerter *Marker Erkennbarkeit* ab. Dabei soll die erhöhte Verarbeitungsgeschwindigkeit durch Einsatz eines alternativen Verfahrens zur Konturfindung erreicht werden, welche nach der Laufzeitanalyse (siehe Tabelle 4-3) hauptverantwortlich für die Laufzeit der Markerextraktion ist. Da die konvexe Hülle der gefundenen Komponenten vor der Polygonapproximation berechnet wird, werden unterbrochene Konturen „repariert“ und führen bei der jetzt nachgelagerten Polygonapproximation für ein Viereck nicht mehr zu mehr als vier erkannten Ecken. Potentiell können so auch mehr Kandidaten entstehen, die in Wirklichkeit keine Vierecke sind, aber durch die Verarbeitungsfolge als solche erkannt werden.

Eine mögliche Verbesserung stellt das Verfahren von Hirtzer [HIR-2008] dar, da es in der Lage ist Unterbrechungen in den Markerkanten sehr gut zu korrigieren und dadurch eine erhöhte *Marker Erkennbarkeit* erzielen sollte. Allerdings eignet sich das Verfahren offenbar nicht bei kleinen Markern in der Umgebung typischer Deckenstrukturen in Warenlagern. Bei ersten Tests erkannte die frei verfügbare Implementierung des Algorithmus [DEN-2010] nur sehr wenige Marker in der realen Umgebung. Dies ist vermutlich auf den kleinen weißen Rand der Marker und die vielen linienartigen Dachstrukturen wie etwa Wellblech, Fenster, Trägerbalken etc. zurückzuführen. Statt der korrekt geformten Strukturen des Markers werden die Markerkanten oft mit anderen Linien in der Umgebung des Markers verschmolzen und der Marker in eine größere Struktur integriert, welche nicht mehr die Kriterien für einen Marker erfüllt und folglich verworfen wird. Vor diesem Hintergrund erscheint der Ansatz von Hirtzer, beliebige benachbarte Linien ähnlicher Ausrichtung miteinander zu verschmelzen [HIR-2008, S. 8ff.], für den Anwendungsfall der Flurförderzeuglokalisierung nicht sinnvoll.

Ist ein Marker gefunden und akzeptiert worden, kann die Messung subpixelgenau geschätzt werden [FAB-2012]. In den Standardeinstellungen der ArUco Bibliothek [MUN-2014] wird die *cornerSubPix*-Methode [BRA-2008, S. 319ff.] verwendet. Die bereits oben genutzte Markerextraktion durch Kantenverfeinerung [STR-1999] wird hier erneut ausgeführt. Es werden zwei Schritte durchlaufen:

1. Mit drei Stützpunkten und linear interpolierten Punkten auf den Suchlinien werden die Kanten in zwei Iterationen erneut verfeinert [STR-1999]. Da die geometrische Form und Abmessung im Bild aufgrund des statischen Aufbaus bekannt ist, können grob fehlerbehaftete Messungen korrigiert werden. Nach der jeweiligen Korrektur folgt eine erneute Verfeinerung, jedoch ohne erneute Korrektur.
 - a. Zu große Markerkandidaten, die entstehen, wenn nicht eine äußere Markerkante, sondern eine andere Kante außerhalb des Markers erkannt wird, werden bei gleichbleibendem Mittelpunkt auf die erwartete Größe des Markers verkleinert (vgl. Abbildung 5-7b).
 - b. Eine nicht der Erwartung entsprechende Form wird durch Verschiebung der Eckpunkte des Markers ausgeglichen. Dazu werden zunächst die Innenwinkel des Markervierecks bestimmt. Bei idealem Aufbau entspricht die projektive Abbildung des Markers (vgl. Abschnitt 4.3.2) einem Quadrat und für eine korrekte Messung sind stets rechte Winkel in den Markerecken zu erwarten. Es wird zunächst angenommen, dass derjenige Winkel mit der geringsten Abweichung von diesem Soll-Wert, die beste Messung darstellt. Danach wird ausgehend von diesem Win-

kel das Soll-Quadrat vervollständigt (siehe Abbildung 5-7a). Neben fehlerhaften Messungen lassen sich so problemlos auch Marker berücksichtigen, die in Teilen aus dem Bild oder der vorhergesagten Region herausragen.

2. Am Ende wird eine möglichst exakte Messung angestrebt und dazu zwei Iterationen der Verfeinerung mit zwölf Stützpunkten je Markerseite durchgeführt und der Mittelwert der Residuen der linearen Regressionsanalyse⁹ für jede Ausgleichsgerade, respektive Kante, abgespeichert. Der Mittelwert der Residuen beschreibt in diesem Fall für jede Markerseite die Abweichung der bestimmten Ausgleichsgerade von den Messwerten in den Stützpunkten und wird als Gütemaß für die Messung der Kante genutzt. Die hohe, aber konstante Zahl an Stützpunkten soll bei konstantem Rechenaufwand den Einfluss des Rauschens unabhängig von der Markergröße im Bild reduzieren. Der konkrete Wert 12 wird gewählt, damit die Werte der einzelnen Stützpunkte vollständig unabhängig voneinander sind. Ein Stützpunkt ist dadurch so weit von seinen benachbarten Stützpunkten entfernt, dass kein Pixel in die bilineare Interpolation [PRE-1992, S. 123f.] der Punkte entlang der Suchlinien zweier Stützpunkte eingeht. Diese Bedingung ist erfüllt, wenn der Abstand beider Stützpunkte mindestens zwei Pixel beträgt, was ab einer Markergröße von 30 Pixeln im Bild erfüllt ist. Abbildung 5-6 verdeutlicht die Problematik: die blauen Linien repräsentieren die Stützpunkte auf der (schwarzen) Markerkante. Beträgt der Abstand der Stützpunkte nur ein Pixel, so können bei der bilinearen Interpolation [PRE-1992, S. 123f.] der (roten) Messpunkte auf den (blauen) Linien zweier benachbarter Stützpunkte teils dieselben (gelben) Pixel genutzt werden. Erst ab einem Abstand von zwei Pixeln ist dies für die bilineare Interpolation ausgeschlossen.

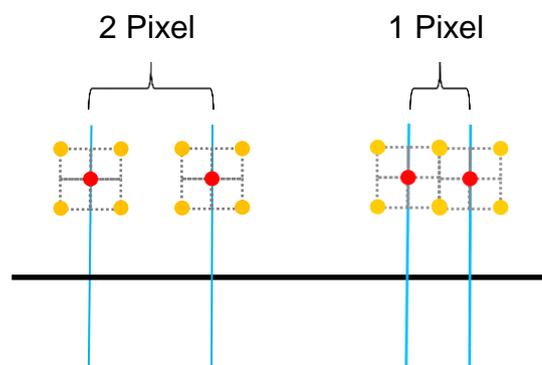


Abbildung 5-6: Mindestabstand der Stützpunkte zur Verfeinerung der Markerseite

⁹ siehe https://de.wikipedia.org/wiki/Einfache_lineare_Regression

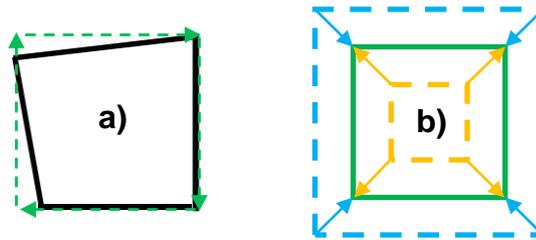


Abbildung 5-7: Rekonstruktion eines fehlerbehafteten Vierecks anhand a) der Innenwinkel und b) der Seitenlänge zum erwarteten Quadrat

Die Bestimmung der ID eines Markers wird im obigen Text bereits vorausgesetzt. Für Marker, deren zugeordnete ID durch die Vorhersage bereits bekannt ist (vgl. Abschnitt 4.3.3), genügt es, die Abweichung des vorliegenden Kandidaten von dieser ID zu bestimmen. Die ArUco-Marker weisen zur Kodierung ihrer ID ein 5x5 Gitter kleiner Quadrate auf, deren Farbe jeweils Schwarz oder weiß sein kann [MUN-2014]. Die Abweichung entspricht der Anzahl unterschiedlicher Farben im jeweils gleichen Quadrat bei Messung und Soll-Marker. Wird die Farbe Schwarz als „0“ und die Farbe Weiß als „1“ interpretiert, so lässt sich der Code des Markers als binäre Sequenz der Länge 25 beschreiben. Die Abweichung entspricht dann der Hamming-Distanz [HAM-1950] zwischen Soll-Wert und Messung.

Um die Wahrscheinlichkeit der Bestimmung der richtigen Marker ID zu steigern, wird der schwarze Rahmen um das Markerinnere ignoriert und der Markerkandidat bei unterbrochenem Rahmen beibehalten. Potentiell steigert dies die Wahrscheinlichkeit für fälschlicherweise erkannte (falsch-positive) Marker im Bild, die ArUco sonst vermeidet [MUN-2014]. Ist die Marker ID durch Vorhersage bekannt, wird bereits durch den eingeschränkten Suchbereich und den Vergleich mit der vorhergesagten ID eine falsch-positive Erkennung des gesuchten Markers sehr unwahrscheinlich. Stricker et al. identifizieren die Marker daher in ihren Versuchen gar nicht [STR-1999]. Eine falsch-positive Erkennung bei der Suche im gesamten Bild ist absolut gesehen unwahrscheinlich, da eine sehr hohe Trefferquote bei der Vorhersage zu erwarten ist und damit diese Form der Suche nur äußerst selten vorkommt [JUN-2015]. Es wird eine Verbesserung hin zur Vermeidung falsch-negativer Messungen auf Kosten zusätzlicher, aber sehr unwahrscheinlicher falsch-positiver Messungen angestrebt.

Starke Helligkeitsunterschiede (z. B. ein Teil des Markers ist hell angestrahlt und ein anderer Teil nicht) stellen ein Problem bei der Bestimmung des zur Dekodierung bestimmten Schwarz-Weiß-Bildes dar. Um bei ungleichen Lichtverhältnissen im Bereich des Markers die ID zuverlässig bestimmen zu können, wird vor der Bestimmung der ID folgende Bildverbesserung durchgeführt:

1. Der Marker wird in vier Quadranten zerlegt.
2. Jeder Quadrant wird einzeln auf den Helligkeitsbereich $[0; 255]$ normalisiert [BRA-2008, S. 70f.].

Ziel dieser Maßnahme ist es möglichst aufwandsarm die schwarz-weiß Kontraste in jedem Teilbereich des Markers zu erhöhen und dadurch dessen Dekodierung zu erleichtern.

Bildanalyse

Wesentliche Verbesserungen im Rahmen der Markerextraktion (s. o.) setzen eine Vorhersage der Markereckpunkte in zukünftigen Bildern voraus. Diesen Ansatz liefert bereits der Stand der Technik umfangreich. Wie bereits in Abschnitt 4.3.2 motiviert, soll zunächst die Bewegung des Fahrzeugs vorhergesagt werden und daraus die Position der Marker im Bild abgeleitet werden. In diesem Abschnitt wird daher eine Umsetzung bewährter Bewegungsmodelle für Festkörper vorgenommen, die bereits im AR-Umfeld umfangreich eingesetzt werden. Dabei werden zwei Algorithmen betrachtet, die ressourcenschonend und schnell in der Ausführung sind.

Eine einfache und leistungsfähige Form der Bewegungsvorhersage ist die lineare Vektoraddition. Ist die Beschleunigung gleich null, lässt sich der nächste Ort nur aus Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit vorhersagen (vgl. Formel (5-2)). Stricker et al. verwenden diese Form der Vorhersage, da das Bewegungsmuster im dort betrachteten Anwendungsfall zu ungleichmäßig ist [STR-1999].

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + (\vec{x}_k - \vec{x}_{k-1}) = 2 \cdot \vec{x}_k - \vec{x}_{k-1} \quad (5-2)$$

Wesentliche Vorzüge sind die einfache Implementierung, die hohe Ausführungsgeschwindigkeit und die ausschließliche Abhängigkeit von den letzten zwei Messungen \vec{x}_k und \vec{x}_{k-1} , wodurch frühere Messfehler keinen Einfluss haben. Ein grundlegender Nachteil ist die geringe Genauigkeit, falls bei den zwei betrachteten Vergangenheitswerten ein signifikanter Messfehler aufgetreten ist.

Eine weitere, gängige Methode zur Bewegungsvorhersage ist das Kalman-Filter [KAL-1960]. Es wird in mehreren Veröffentlichungen zum *Tracking* in AR-Systemen erfolgreich eingesetzt [KOL-1997; YOU-2001; ABA-2004; DOR-2007]. Die statistische Modellierung von Messfehlern im Vorhersagemodell macht das Kalman-Filter robuster gegenüber einzelnen, fehlerbehafteten Messungen [KAL-1960; THR-1999, S. 170]. Besonders geschätzt wird die unter bestimmten Voraussetzungen geltende

Optimalität des Schätzers [KAL-1960]. Die Ausführungsgeschwindigkeit ist zwar geringer als bei der vektor-basierten Vorhersage, aber ausreichend hoch, was unter anderem daran zu erkennen ist, dass die Technik hinter dem Kalman-Filter bereits sehr alt ist und schon in den 70er Jahren in der Raumfahrt genutzt wurde [SCH-1981]. Trotz dieser Argumente wird oft anderen Vorhersagemodellen der Vorzug gegeben, da für den erfolgreichen Einsatz des Kalman-Filters der Messfehler vorab charakterisiert werden muss [KAL-1960]. Oft ist diese Charakterisierung sehr aufwändig [BUL-2010]. Die konkrete Implementierung eines Kalman-Filters ist in OpenCV bereits enthalten [BRA-2008, S. 358ff.].

Pentzenrieder beschreibt ein fertig entwickeltes Kalman-Filter für *Augmented Reality* Anwendungen und benutzt dabei alle sechs Freiheitsgrade eines Festkörpers sowie dessen Geschwindigkeit und Beschleunigung [PEN-2005]. Auch wenn nur drei Freiheitsgrade benutzt werden, kann man diesen Ansatz direkt übernehmen und die nicht verwendeten Freiheitsgrade gleich null setzen. Im Konzept werden die Beschleunigungen explizit ausgeschlossen und sind aus den entsprechenden Matrizen ebenfalls zu entfernen. Um unnötigen Berechnungsaufwand zu vermeiden, ist es sinnvoller die Freiheitsgrade für Translation und Rotation separat zu betrachten und bereits vorhandene Kalman-Gleichungen für den jeweiligen Teil zu benutzen [MUR-1998]. Der Winkel kann dabei analog zur Translation betrachtet werden, wenn der Überlauf bei $\pm 180^\circ$ bzw. $\pm \pi$ gesondert berücksichtigt wird. Die Fehlermatrizen können wie folgt aufgestellt werden:

Die Werte für den statistischen Messfehler werden durch den Messfehler der vektor-basierten Vorhersage approximiert. Die x- und y-Fehler werden als voneinander unabhängig und normalverteilt angenommen. Daraus lässt sich die Matrix R_k ableiten. Die Vorhersage beinhaltet zwei Fehlerquellen, eine für den Messwert zum Zeitpunkt t und $t - 1$. Der Fehler der Messung zum Zeitpunkt t wird im nächsten Schritt zum Fehler zum Zeitpunkt $t - 1$. Daher sind die Verteilungen beider Fehler identisch, denn die Messwerte in diesen Verteilungen sind bis auf den letzten Wert identisch. Der einzelne Fehler d_{xy} bzw. d_γ entspricht dem Vorhersagefehler geteilt durch $\sqrt{2}$. Für eine genaue Herleitung siehe Abschnitt 7.1.3.

$$R_{k,xy} = \begin{pmatrix} d_{xy} & 0 \\ 0 & d_{xy} \end{pmatrix} \text{ und } R_{k,\gamma} = (d_\gamma) \quad (5-3)$$

Der Prozessfehler wird nicht modelliert und die entsprechenden Werte in der Matrix Q_k durch sehr kleine Werte ersetzt. In ersten Tests wurde der Prozessfehler mittels der Betrachtungen aus Unterkapitel 6.1 berücksichtigt, was jedoch zu einer schlechten Vorhersagequalität führte, da die Verteilung des Fehlers nur über einen sehr lan-

gen Zeitraum gesehen einer Normalverteilung ähnelt. Kurzfristig und damit für die unmittelbare Vorhersage des nächsten Zustands relevant, ergeben sich aus zwei Gründen sehr starke Abweichungen von dieser Verteilung:

1. Wenn das Flurförderzeug steht, ist der systematische Fehler für die Vorhersage konstant.
2. Im dynamischen Fall spielt, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, die Trägheit des Fahrzeugs eine große Rolle und sorgt dafür, dass Unebenheiten des Lagerbodens teilweise „übersprungen“ werden und somit auf den systematischen Fehler einen geringeren Einfluss haben, als dies bei langsameren Geschwindigkeiten der Fall ist.

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten ist die Änderung des systematischen Fehlers erheblich geringer als es die Verteilung sonst erwarten ließe und wird daher vernachlässigt.

Sowohl die vektorbasierte Vorhersage als auch das Kalman-Filter werden umgesetzt und miteinander verglichen. Sobald die physische Pose der Kamera zur nächsten Bildaufnahme fest steht, kann durch Projektion auf die Bildebene mittels der OpenCV Funktion *projectPoints* [BRA-2008, S. 405f.] die Position jedes Markereckpunktes im Bild bestimmt werden und die Vorhersage ist abgeschlossen. Zur Bildanalyse gehört auch die Bestimmung der Pose, welche im nächsten Abschnitt genauer erläutert wird.

5.1.4 Posenschätzung

Aus den Bildkoordinaten u und v des Markermittelpunktes kann mittels des Lochkameramodells unmittelbar auf die x und y -Koordinaten geschlossen werden [HOH-2014, S. 124f.; JUN-2015]:

$$u = f_x \cdot \frac{x}{z} + c_x \text{ und } v = f_y \cdot \frac{y}{z} + c_y \quad (5-4)$$

Umgeformt nach der Zielgröße x bzw. y ergeben sich:

$$x = \frac{z}{f_x} (u - c_x) \text{ und } y = \frac{z}{f_y} (v - c_y). \quad (5-5)$$

Der Gierwinkel ist unabhängig von der Distanz und wird von Hohenstein direkt in der Bildebene für jede Kante einzeln über den Winkel zwischen einer Horizontalen durch den ersten Bildpunkt der Kante und der Kante selbst berechnet. Da es vier Kanten

und damit auch vier mögliche Messwerte für den Winkel gibt, wird der Mittelwert dieser Winkel als Messergebnis betrachtet. [HOH-2014, S. 125]

Tabelle 5-3: Mögliche Messungen des Mittelpunktes und der Winkel in einem Quadrat

Mittelpunkt eines Quadrats	Winkel
• 2 Eckpunkte: Mittelpunkt einer Diagonalen	• 1 Winkel: jeder Winkel einzeln und die Winkel der Diagonalen
• 3 Eckpunkte: Schnittpunkt einer Diagonalen mit einer Winkelhalbierenden	• 2 Winkel: Mittelwert zweier Winkel
• 4 Eckpunkte: Schnittpunkt der Diagonalen und Mittelwert der Koordinaten aller Eckpunkte	• 3 Winkel: Mittelwert dreier Winkel
	• 4 Winkel: Mittelwert vierer Winkel

Das Konzept (vgl. Abschnitt 4.3.2) sieht vor die Genauigkeit dieses Verfahrens zu steigern, indem die Güte einzelner Messwerte, welche zur Positionsbestimmung herangezogen werden, anhand der Vorhersage bewertet wird. Dafür müssen zunächst einzelne Messwerte zur Bestimmung des Mittelpunktes bzw. des Winkels generiert werden. Das gewichtete Mittel dieser Werte ergibt den verbesserten Messwert, die Abweichung vom vorhergesagten Mittelpunkt bestimmt das Gewicht. Damit dieses Vorgehen einen Vorteil verspricht, sollten die jeweiligen einzelnen Werte auf unterschiedlichen Ausgangsdaten basieren, welche jeweils mehr oder weniger von Messfehlern betroffen sind als das bisherige Ergebnis. Wird eine Kante z. B. nicht genau erkannt, so ist die gegenüberliegende Kante von diesem Problem in der Regel nicht betroffen. Ausgehend von der erwarteten quadratischen Form des Markers im Bild, werden daher Möglichkeiten gesucht aus Teilmengen der Eckpunkte auf den Mittelpunkt bzw. die Winkel zu schließen. Tabelle 5-3 zeigt eine solche, unvollständige Liste möglicher Messungen, Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 illustrieren die konkreten Varianten zur Berechnungen des Mittelpunkts bzw. Winkels.

Um Ausreißer zu eliminieren, fließen nur die besten n Werte ein. Die Zahl n wird dabei so gewählt, dass die Fehlmessung eines Knotens ausgeglichen werden kann. Dazu wird o.B.d.A. angenommen eine beliebige Kante sei fehlerhaft und es wird deren Anteil an der Gesamtmessung bestimmt. Dieser Anteil wird von der Zahl der Messungen abgezogen und das Ergebnis ggf. abgerundet. Daraus ergeben sich sechs von acht Messungen für den Mittelpunkt des Quadrats und neun von 17 Messungen für den Winkel, die in den gewichteten Mittelwert eingehen. Die übrigen Werte werden verworfen.

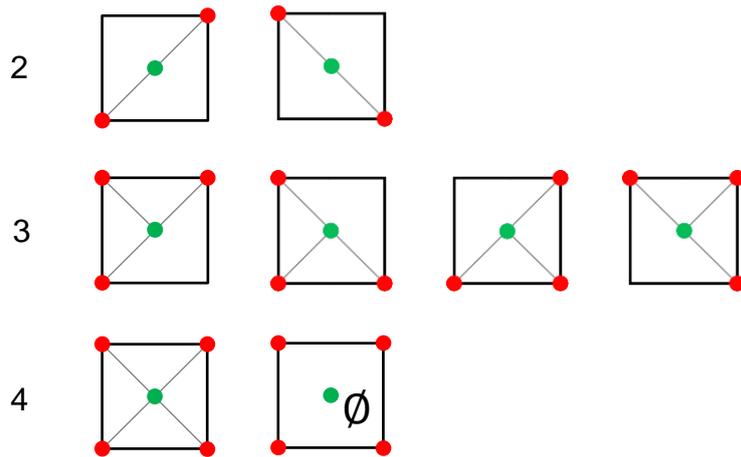


Abbildung 5-8: Varianten zur Bestimmung des Mittelpunktes eines Quadrates

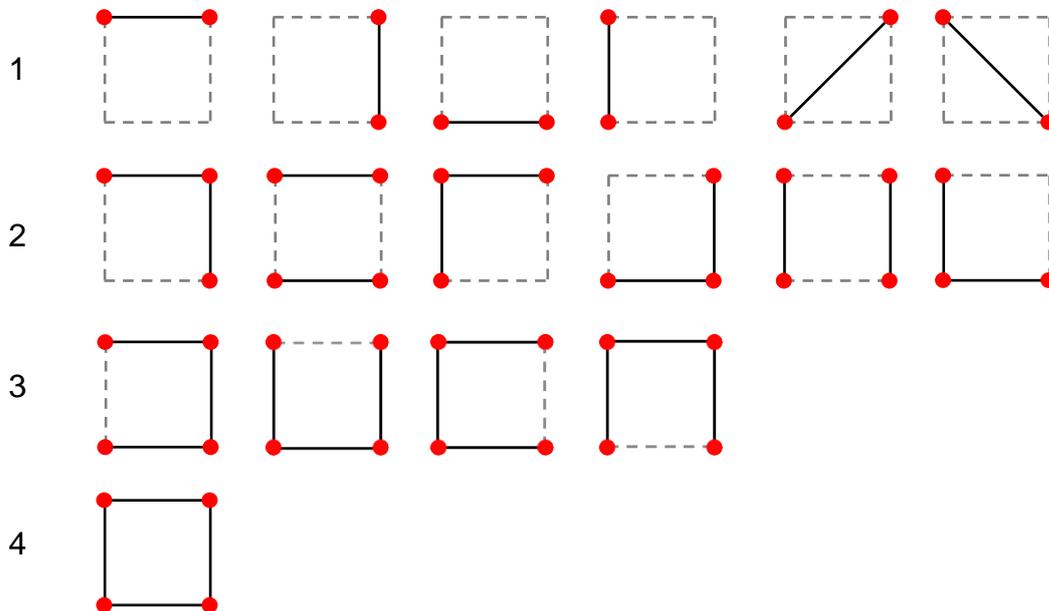


Abbildung 5-9: Varianten zur Bestimmung des Winkels eines Quadrates in der Ebene

Da der so bestimmte Messwert einer positiven Rückkopplung unterliegt (vgl. Abschnitt 4.3.3), hat eine Fehlmessung an dieser Stelle negative Auswirkungen auf die Markerextraktion und die *Posenschätzung* zukünftiger Messungen. Steht das Fahrzeug beispielsweise, suggeriert das Messrauschen eine Bewegung, welche sich durch Bevorzugung von Messungen, welche diese vermeintliche Bewegung wieder spiegeln, weiter verstärken kann. Diese Verstärkung kann begrenzt werden, indem die *Posenschätzung* iterativ mehrfach durchgeführt wird. Zunächst geht die Vorhersage als Referenzwert in die *Posenschätzung* ein, in der zweiten und dritten Iteration wird das Messergebnis der vorherigen Iteration verwendet. Zwar werden auch beim iterativen Vorgehen unter Umständen zunächst fehlerbehaftete Messungen bevorzugt, allerdings gehen auch die der Vorhersage entgegengesetzten Messungen mit in die Betrachtung ein und schwächen einen falschen Trend mit jeder Iteration weiter

ab. Mehr als drei Iterationen zeigten in explorativen Versuchen keinen messbaren zusätzlichen Effekt.

5.1.5 Vermessungsalgorithmen

Die initiale Bestimmung der Posen sämtlicher Marker in Hallenkoordinaten soll gemäß der Anforderungen mit demselben Versuchsaufbau erfolgen, mit dem auch die spätere *Posenschätzung* des Flurförderzeugs durchgeführt wird. Ansätze zu einem solchen Verfahren existieren bereits [SHA-2012; MUN-2016]. In beiden Verfahren werden zunächst mittels *Posenschätzung* (siehe Abschnitt 5.1.4) die Relationen zwischen allen Markern bestimmt und daraus ein Graph erzeugt, bei dem die Knoten die Marker repräsentieren und die Kanten die relativen Posen zwischen adjazenten Knoten beschreiben. Dieser Graph liefert über den Weg von einem Startknoten zu jedem weiteren Knoten dessen Position durch Hintereinanderschalten der Markerrelationen. Munoz-Salinas et al. verwenden einen zusätzlichen Optimierungsschritt, um die aufgetretenen Messfehler über alle Kanten zu verteilen und erzielen so bessere Ergebnisse [MUN-2016].

Aus der Robotik sind weitere Ansätze bekannt, die unter dem Begriff GraphSLAM [THR-2005] die Messwerte aus SLAM-Verfahren mittels Optimierungstechniken verfeinern [GRI-2007; GRI-2010; KUM-2011]. Gegenüber dem Verfahren von [SHA-2012] sind diese besonders leicht anwendbar, da es bereits frei verfügbare, fertige Anwendungen gibt, die mit leicht zu bestimmenden Informationen den Graphen selbstständig und ohne viel Aufwand für den Systemintegrator optimieren [GRI-2010; KUM-2011]. Ein tieferes Verständnis der Verfahren ist für den Anwender nicht notwendig und somit die Einstiegshürde gering. Besonders die Software g2o [KUM-2011] unterstützt eine Vielzahl an linearen und nicht-linearen Optimierungsverfahren, die aufwandsarm auf Eignung im konkreten Anwendungsfall getestet werden können. Die Erstellung der Karte wird daher wie folgt umgesetzt:

1. Während einer Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit werden alle Markerrelationen aufgenommen und abgespeichert. Dazu wird zunächst im gesamten Bild nach Markern gesucht. Die Marker werden dabei zwischen den Bildern verfolgt und die Position der Marker im Bild vorhergesagt, um die *Marker Erkennbarkeit* zu erhöhen und möglichst viele Relationen zwischen gleichzeitig im Bild gefundenen Markern zu berechnen:
 - a. Die Position im nächsten Bild wird anhand der Bewegung in der Bildebene vorhergesagt, da mangels Positionsbestimmung in dieser Phase keine Verfolgung der Marker mittels eines Bewegungsmodells möglich ist [STR-1999]. Wird ein Marker nicht im gesamten Bild entdeckt, ge-

lingt möglicherweise die Extraktion in einem Bildausschnitt anhand dieser Vorhersage.

- b. Zusätzlich werden aus bisher bestimmten Relationen zwischen den Markern die Nachbarn im Umfeld der bereits erkannten Marker ausgewählt. Dabei handelt es sich um Marker, die bereits zu einem anderen Zeitpunkt gemeinsam mit, schon im aktuellen Bild gefundenen Markern gemessen wurden. Aufgrund der Relationen zu im Bild gefundenen Markern werden die Orte ausgewählt, an welche die fehlenden Marker abgebildet werden und es wird dort nach weiteren Markern gesucht (vgl. Abschnitt 5.1.3).
2. Aus allen Relationen wird ein initialer Posengraph erzeugt [MUN-2016]. Zusätzlich wird für jede Markerrelation die Inverse der Kovarianzmatrix bestimmt. Beide Informationen dienen als Eingabe für die Optimierung.
3. Mittels gängiger Frameworks zur Graph-Optimierung wird anschließend der verbesserte Posengraph berechnet [GRI-2007; GRI-2010; KUM-2011].

5.1.6 Diagnosefunktionen

Für Wartungsaufgaben werden Diagnosefunktionen benötigt (vgl. Abschnitt 4.3.4). Die Implementierung dieser Funktionen wird nur theoretisch betrachtet und nicht im Demonstrator umgesetzt oder evaluiert. Es handelt sich somit um Empfehlungen wie die erforderlichen Informationen gewonnen werden können. Erst echte Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz erlauben die Zusammenhänge zwischen Fehlerdaten und Fehlern umfangreich zu beschreiben. Eine Evaluierung dieser Diagnosefunktionen benötigt folglich eine umfangreiche Datenbasis zum tatsächlichen Auftreten der Fehler und kann je nach Zahl der Pilotanlagen mehrere Jahre in Anspruch nehmen.

Daher werden hier nur Maßnahmen erarbeitet, die prinzipiell dazu geeignet sind bekannte Probleme zu erkennen. Es wird zwischen zwei wesentlichen Funktionstests unterschieden:

1. Der Selbstdiagnose (siehe Tabelle 5-4) und
2. der Diagnose im Kontext des übergeordneten IT-Systems (siehe Tabelle 5-5).

Mögliche Funktionen zur Prüfung einzelner Hardware- und Softwarebausteine zeigt Tabelle 5-4. Zeitintensive Diagnosemaßnahmen, wie etwa die Überprüfung der CPU, des RAM und des Massenspeichers, können zeitgesteuert zum Schichtwechsel, nach Betriebsschluss und während des Ladevorgangs der Batterie durchgeführt werden. Die Prüfung, ob

- das Betriebssystem einsatzbereit ist,
- die Software zur *Posenschätzung* gestartet ist,
- die Kamera Bilder liefert und
- die Lokalisierungsinformationen beim LVS ankommen, muss hingegen in regelmäßigen Abständen im Hintergrund erfolgen.

Konkrete Handlungsanweisungen für die Behebung erkannter Probleme hängen von der verwendeten Hardware und den Ansprüchen von Kunden und Systemintegratoren ab und sind daher durch diese gemeinsam zu definieren.

Zur Signalisierung eines Fehlers eignen sich z. B. akustische Signale direkt am Sensor oder Textnachrichten. Akustische Signale werden durch die Recheneinheit am Stapler ausgelöst, während das LVS Nachrichten an die für das System verantwortlichen Personen zustellt. Diesen Nachrichten können von der Recheneinheit übermittelte Diagnoseprotokolle angehängt werden. Optische Hinweise am Flurförderzeug sind ebenfalls möglich, wenn an der Auswertungseinheit ein Darstellungsmedium, etwa ein Bildschirm verfügbar ist.

Tabelle 5-4: Selbstdiagnosemaßnahmen durch die Recheneinheit

Bausteine	Maßnahme
CPU	Funktionsprüfung, z. B. prime95 und Temperaturüberwachung mittels LM-Sensors [DEL-2017]
RAM	Speichertest, z. B. memtester [CAZ-2009]
Massenspeicher	Dateisystemüberprüfung, z. B. fsck ¹⁰ und F3 [MAC-2010]
Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • Prüfung der Kommunikationsverbindung, z. B. ping [RFC 1208] zum LVS • Sende regelmäßig Heartbeat-Signal [KAW-1997] mit aktuellem Zeitstempel und Position an LVS
Kamera	Messdaten vorhanden und Rauschen erkennbar, z. B. Differenz zweier aufeinanderfolgender Posen des selben Markers im Bild >0
Betriebssystem	Linux Software watchdog [COX-2002]
Prozess (Lokalisierung) läuft	Regelmäßige gegenseitige Prüfung mittels eines zweiten Prozesses. Ggf. Neustart des jeweils fehlenden Prozesses
Weitere Sensorik	Überwachung nach Bedarf

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Fsck>

Tabelle 5-5: Diagnose durch das IT-System

Bausteine	Maßnahme
Prozess (Lokalisierung) läuft	LVS erwartet regelmäßig Heartbeat-Signal [KAW-1997] mit aktuellem Zeitstempel und Position des Flurförderzeugs
Netzwerkverbindung	Prüfung der Kommunikationsverbindung zu allen Recheneinheiten am Stapler, z. B. ping [RFC 1208] zu den Adresse der Recheneinheiten

5.2 Hardwareauswahl

Die auszuwählenden Hardwarekomponenten sollen deutlich kostengünstiger als industrietaugliche Hardware sein (siehe Abschnitt 3.3.1). Benötigt werden eine Recheneinheit und eine Kamera. Das für den späteren Betrieb in der Praxis benötigte drahtlose Kommunikationsmodul ist nicht Bestandteil des *Location Sensors* oder der *Location Engine*. Bei der Wahl der Recheneinheit wird daher Wert auf eine möglichst große Auswahl an Funktechnologien¹¹ gelegt, an die der Sensor zukünftig angebunden werden kann.

5.2.1 Entwicklungssystem/Labormuster

Das Entwicklungssystem bzw. Labormuster wird so beibehalten wie es im Staplerauge-Demonstrator [GÜN-2014a, S. 75ff.] und auch von Hohenstein [HOH-2014, S. 147ff.] eingesetzt wurde. Die Komponenten sind bereits am Lehrstuhl vorhanden und am Versuchsstapler befestigt. Dadurch ergibt sich eine direkte Vergleichbarkeit der Messdaten mit den bisher durchgeführten Untersuchungen (siehe Kapitel 7).

Tabelle 5-6: Eigenschaften des Entwicklungssystems

Komponente	Produkt
Laptop	Fujitsu CELSIUS H710
CPU	Intel Core i7-2620M
GPU	NVIDIA Quadro 1000M (2 GB DDR3)
RAM	4 GB DDR3 PC3-10600
Massenspeicher	256 GB SSD
Betriebssystem	Microsoft Windows 7 Professional x64
Kamera	Smartek GC1392C [SMA-2015]
Objektiv	TAMRON 219 HB [TAM-2013]

¹¹ siehe https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_wireless_data_standards

Die verwendeten Hardwarekomponenten zeigt Tabelle 5-6. Der Einsatz einer Solid-State-Disk (SSD) anstelle einer Festplatte (HDD) hat sich für die Aufnahme der unkomprimierten Rohdaten bei früheren Versuchen bereits bewährt, da eine SSD nicht gegenüber Erschütterungen während dynamischer Versuche empfindlich ist und eine höhere Schreibgeschwindigkeit bietet [SAN-2017].

5.2.2 Funktionsmuster

Für das Funktionsmuster sind eine Recheneinheit und eine Kamera auszuwählen. Da eine gegenseitige Kompatibilität bzgl. Hardware- und Softwareschnittstellen Voraussetzung für den Betrieb einer Kamera an einer Recheneinheit ist, wird zunächst eine Recheneinheit ausgewählt und danach eine dazu passende Kamera.

Bei der fundierten Auswahl einer solchen Recheneinheit besteht ein Dilemma in der großen Auswahl an Endkundenprodukten, der sprichwörtlichen „Qual der Wahl“. Viele Produkte unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, oft in Bereichen, deren Nutzen während der Entscheidungsfindung unklar ist. Umgekehrt weist ein Produkt selten alle gewünschten Eigenschaften auf. Analog zur mehrkriteriellen Optimierung existieren daher viele Lösungen, welche miteinander bezüglich aller Kriterien prinzipiell unvergleichbar sind [PIE-2017, S. 39]. Eine optimale Auswahl erscheint daher vorab nicht möglich. Für den Praxiseinsatz ist aufgrund der kurzen Produktzyklen bei elektronischen Endkundenprodukten [KAR-2011, S. 272] die Empfehlung eines konkreten Produktes von begrenztem Nutzen, da eine vom Autor getestete Recheneinheit mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits bei Veröffentlichung dieser Arbeit nicht mehr erhältlich ist. Daher wird eine Produktklasse ausgewählt, die sich für den Einsatz am Flurförderzeug besonders gut eignet. Die Vielfalt der Produkte in dieser Produktklasse bietet dem Systemintegrator die maximale Flexibilität und Zukunftssicherheit, aber auch die „Qual der Wahl“.

Hennesy und Patterson [HEN-2012, S. 5] unterscheiden in ihrem Standardwerk zur Rechnerarchitektur zwischen persönlichen Mobilgeräten, Desktops, Servern, Rechnerclustern und Embedded-Geräten und stellen diese Typen von Recheneinheiten bezüglich Kosten und Designzielen gegenüber (vgl. Tabelle 5-7). Nach dem Ausschlussprinzip können aufgrund der zu hohen Kosten drei Klassen von Rechnern als untauglich betrachtet werden:

1. Server und
2. Rechnercluster sind um Größenordnungen zu teuer, ein längerer Batteriebetrieb unrealistisch.

3. Desktops, zu denen auch Laptops zählen [HEN-2012, S. 6], sind zwar deutlich kostengünstiger als Server und verfügen über einen eigenen Akku, sind aber für eine kostengünstige Lokalisierung am Flurförderzeug zu kostenintensiv.

Tabelle 5-7: Die fünf wesentlichen Computer-Klassen nach Hennesy und Patterson [HEN-2012, S. 5]

Eigenschaft	Persönliche Mobilgeräte	Desktop	Server	Cluster	Embedded
Preis gesamt	100-1000 \$	300-2500 \$	5000-10.000.000 \$	100.000-200.000.000 \$	10-100.000 \$
Preis CPU	10-100 \$	50-500 \$	200-2000 \$	50-250 \$	0,01-100 \$
Kritische Systemdesign Ziele	Preis, Energieverbrauch, Mediennutzung, Performance, Reaktionsgeschwindigkeit	Preis / Performance, Energieverbrauch, Grafikleistung	Durchsatz, Verfügbarkeit, Skalierbarkeit, Energieverbrauch	Preis / Performance, Durchsatz, Energieeffizienz	Preis, Energieverbrauch, Anwendungsspezifische Performance

Besonders attraktiv erscheinen die kostenoptimierten, energieeffizienten Embedded-Geräte. Auch persönliche Mobilgeräte sind prinzipiell geeignet. Letztere verfügen bereits oft über eine eingebaute, für die manuelle Fotografie vorgesehene, Kamera. In den meisten Betriebssystemen für Smartphones ist ein Abschalten des Bildschirms während der Bildaufnahme normalerweise nicht vorgesehen, was zu sehr hohem Stromverbrauch und somit geringer Akkuleistung führt. Einige Apps im Google Playstore scheinen diese Beschränkung jedoch erfolgreich zu umgehen [CME-2017]. Dafür lässt sich bei diesen Kameras der Fokus und ggf. auch der optische Zoom elektronisch verstellen [DEV-2017]. Eine zusätzliche Kamera als Zubehör ist aufgrund der bereits integrierten Kamera und dem Fehlen einer geeigneten Schnittstelle nicht möglich. Die hochintegrierte Bauweise erlaubt keinen einfachen Austausch einzelner Komponenten und nur an wenigen aktuellen Smartphones ist der Tausch einzelner Komponenten durch den Endkunden vorgesehen [WÖL-2015; DRE-2017]. Robuste und leistungsfähige Mobilgeräte sind zudem mit Kosten von 500 € und mehr vergleichsweise teuer und erscheinen daher insgesamt zur kostengünstigen und flexiblen Bildauswertung an Flurförderzeugen nicht geeignet.

Embedded-Geräte kommen hingegen heutzutage in vielen Fahrzeugen in Assistenzsystemen zum Einsatz [MAR-2003, S. 5] und müssen sich dort unter schwierigen Umgebungsbedingungen bewähren. Eine Eignung dieser Geräteklasse erscheint daher gegeben. Für die Entwicklung der Prototypen solcher Embedded-Geräte gibt es eine Vielzahl an Hardwaremodulen, die alle benötigten Bausteine auf einer Platine vereinen, sog. Single-Board-Computer (SBC) [DOE-1978]. Kostengünstige Vertreter

dieser Klasse dienen daher als Hardwareplattform für das Funktionsmuster und können in einem späteren Produkt aus Kostengründen direkt verwendet werden. Ein umfangreicher Vergleich vieler Single-Board Computer ist auf Wikipedia zu finden [WIK-2017b].

Der Raspberry Pi Model B [RS-2013] wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Die wesentlichen Gründe dafür sind:

- Das Gerät ist mit ca. 35 € sehr kostengünstig.
- Es gibt eine Vielzahl an Erweiterungsmöglichkeiten, u. a. kostengünstige Kameras [RAS-2017].
- Die Abmessungen sind gering, der Sensor daher an vielen Stellen des Flurförderzeugs montierbar [RS-2013].
- Es gibt eine sehr umfangreiche Dokumentation.
- Leistungsfähigere, kompatible Nachfolgemodelle sind bereits erschienen.
- Die Leistungsaufnahme ist gering.
- Die Betriebsspannung von 5 V macht den Einsatz gängiger Powerbanks als Spannungsquelle möglich.
- Viele Forschungs- und Bastelprojekte setzen ihre Demonstratoren mit dem Raspberry Pi um [TSO-2013; STR-2013].
- Der Raspberry Pi wird in großen Stückzahlen produziert. Größere Bestellmengen für den Praxiseinsatz erscheinen daher möglich. [KUN-2016]
- Es gibt eine große Auswahl an Kommunikationsmodulen für die Anbindung an das LVS, z. B. WLAN-Adapter, Bluetooth-Adapter, Mobilfunk-Module, Zig-Bee-Adapter u.v.a.m. Über die vorhandenen Anschlüsse kann eine große Anzahl an Linux-kompatiblen Kommunikationsmodulen genutzt werden. Eine IEE-E802.11s-basierte Kommunikation aus mehreren Raspberry Pi wurde bereits in einem anderen Projekt unter Mitwirkung des Autors erfolgreich installiert [JUN-2014b].
- Am Lehrstuhl fml sind bereits ausreichend Exemplare aus diesem Projekt verfügbar.

Die Raspberry Pi Camera [RAS-2017] in Version 1.3 und der RaspiCam Treiber [RAF-2015] für diese Kamera werden zur Bildaufnahme genutzt. Für die Portierung auf die gewählte Plattform werden keine Optimierungen am Quellcode durchgeführt. Mit Ausnahme der Anbindung des Kameratreibers sind zur Portierung keine Anpassungen am Quellcode notwendig.

5.3 Infrastruktur

Die Infrastruktur besteht aus an der Hallendecke befestigten Markern (siehe Abschnitt 5.1.4). Damit die aus dem Staplerauge-Projekt bereits vorhandene Infrastruktur aus ArUco-Markern [GÜN-2014a, S. 114] weiter verwendet werden kann, werden zusätzliche Marker ergänzt, um in allen aktuell für Gabelstapler zugänglichen Bereichen der Versuchshalle des Lehrstuhls eine Positionsbestimmung zu ermöglichen. Entsprechend wird auch die Kodierung beibehalten, damit die Identifizierung einheitlich erfolgen kann und kein zusätzlicher Rechenaufwand durch verschiedene Identifizierungsalgorithmen entsteht. Die *Posenschätzung* erfolgt anhand der Eckpunkte des Markers und ist daher von der ID der Marker unabhängig [GAR-2014]. Solange die Identifizierung der Marker robust gelingt, lassen sich die Ergebnisse auch auf beliebige andere quadratische Marker übertragen – die Wahl der Kodierung kann folglich vernachlässigt werden.

5.3.1 Bestandteile und Herstellung

Die verwendeten Marker bestehen aus folgenden Elementen (siehe Abbildung 5-10).

- Eine 500x500x3 mm große MDF-Platte dient als Grundfläche.
- Das 389x389 mm große Markerbild wird auf eine Deckschicht aus 90 g/m² Normalpapier gedruckt. Die äußere Kante des weißen Randes wird mit einer gestrichelten Linie markiert.
- Zwei Neodym-Topfmagneten mit einer Haltekraft von zusammen 6 kg dienen der Befestigung an der Hallendecke.

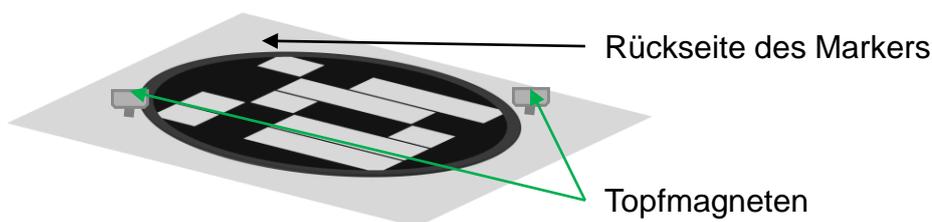


Abbildung 5-10: Montage eines Markers an der Hallendecke

Die MDF-Grundplatte ist stabiler und weniger feuchtigkeitsempfindlich als die bisher genutzte Grundplatte aus Pappe. Eine Grundfläche von 500x500 mm wird gewählt, da im Fachhandel bereits 500x1200 mm große MDF-Platten kostengünstig verfügbar sind und somit nur ein Schnitt zur Abtrennung eines Markers von der Grundplatte notwendig ist. Die Breite des weißen Randes eines Markers (Ruhezone) wird so groß gewählt wie die Breite seines inneren schwarzen Randes. Der Marker besteht aus

einem 9x9 Gitter gleich großer Quadrate, von denen sieben zum Markerbild eines ArUco Markers [MUN-2014] gehören (siehe Abbildung 5-11). Das Markerbild ist folglich $7/9 \cdot 500 \text{ mm} \approx 389 \text{ mm}$ groß. Die Marker sind damit geringfügig kleiner als die bereits an der Hallendecke befindlichen Marker aus dem Staplerauge-Projekt. Da eine feste Anzahl an Stützpunkten für die Messung jeder Markerkante genutzt wird, spielt die Markergröße bezüglich der Positionsmessung nur eine untergeordnete Rolle (siehe Abschnitt 5.1.3).

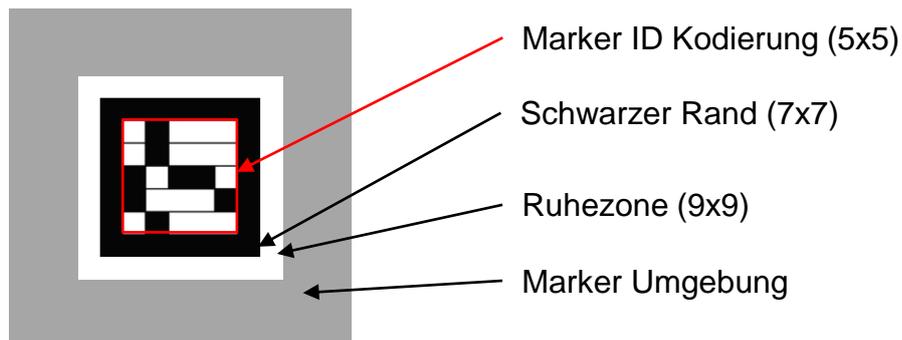


Abbildung 5-11: Aufbau eines ArUco Markers [MUN-2014]

Die Haltekraft der Topfmagneten wird bewusst überdimensioniert, da der Preisunterschied zu Magneten mit geringerer Haltekraft vernachlässigbar gering ist. Herabfallende Gegenstände stellen jedoch eine Unfallgefahr dar [STA-2015, S. 69], daher ist eine stabile Anbringung der Marker an der Hallendecke sehr wichtig. Durch den Sicherheitsfaktor >6 wird ein unbeabsichtigtes Lösen oder Verrutschen eines Markers auch dann unwahrscheinlich, wenn eine optimale Auflage der Magneten an den Fixierungspunkten nicht gewährleistet ist oder das Gewicht eines Markers durch Absorption von Feuchtigkeit steigt.

Es werden zwei diagonal gegenüberliegende Fixierungspunkte favorisiert. Zwei unterschiedliche Anbringungspunkte ermöglichen eine Fixierung bezüglich zweier Rotationsfreiheitsgrade und befinden sich dennoch stets auf einer Geraden, so dass auch eine Anbringung an linearen Elementen, z. B. Trägerbalken oder Rohren, möglich ist. An wellblechartigen Deckenstrukturen ist dies ebenfalls von Vorteil, da der konstante Abstand zwischen den Magneten, durch Drehung des Markers, an die Abstände der Wellblechstruktur angepasst werden kann (vgl. Abbildung 5-10). Wird ein Marker hingegen an nur einem Punkt fixiert, bleiben potentiell alle drei Rotationsfreiheitsgrade erhalten, während drei oder mehr Punkte entweder auf einer Geraden liegen und keinen Vorteil gegenüber zwei Punkten entsteht oder unter Umständen nicht alle Auflagepunkte an linearen Elementen anzubringen sind. Zwei Fixierungspunkte werden daher als guter Kompromiss zwischen Reduktion der Freiheitsgrade, Flexibilität in der Anbringung und Montagekosten gewählt.

Die Herstellung wird in folgenden Schritten vorgenommen:

1. Aussägen der Grundplatte auf das Maß 500x500 mm.
2. Ausdrucken des Markerbildes (Deckschicht) mittels eines A0 Plotters.
3. Ausschneiden des Markers inkl. weißem Rand in der Größe 500x500 mm.
4. Befestigen der Deckschicht auf der Grundplatte mittels Sprühkleber.
5. Bohren der Löcher zur Befestigung der Topfmagneten.
6. Befestigen der Topfmagneten an der Grundplatte mittels Schrauben, Unterlegscheiben und Mutter.

Tabelle 5-8 zeigt die wesentlichen Eigenschaften der hergestellten Marker und liefert einen groben Überblick über deren Zusammensetzung.

Tabelle 5-8: Wesentliche Eigenschaften eines Markers im entwickelten Lokalisierungssystem

Eigenschaft	Wert
Abmessung	Ca. 500x500x3 mm
Gewicht	Ca. 0,7 kg <ul style="list-style-type: none"> • 1x MDF-Platte 500x500x3 mm: 0,68 kg [SCH-2017] • 2x Neodym-Topfmagnet: 0,006 kg • A0 Plotterpapier 90 g/m² à 0,25 m²: 0,02 kg
Kosten Material	Ca. 6 € <ul style="list-style-type: none"> • 1x MDF-Platte 500x500x3 mm: ca. 2,5 € • 2x Neodym-Topfmagnet: 3 € • Schrauben, Muttern, Unterlegscheiben (<0,5 €)
Kosten Druck	Ca. 4 € <ul style="list-style-type: none"> • Papier A0: <0,3 € • Tinte Plot A0 s/w: 4 €

5.3.2 Anordnung

Die bereits bestehenden Marker werden durch zusätzliche Marker ergänzt. Für Hochregallager ist in jedem Gang in regelmäßigen Abständen ein Marker vorzusehen. Der konkrete Abstand der Marker voneinander ist dabei abhängig vom Öffnungswinkel der Kamera und dem Abstand zwischen Kamera und Marker (vgl. Formel (5-5)). In Blocklagern sollte für maximale Flexibilität ein Gitter aus Markern an der Hallendecke befestigt werden, wie dies auch bei Sky-Trax gehandhabt wird [TOT-2014].

In einer vom Autor betreuten Studienarbeit wurde untersucht, in wie weit die Zahl der eingesetzten Marker mittels Optimierungsverfahren reduziert werden kann. Zunächst wird eine initiale Markerplatzierung so festgelegt, dass an allen möglichen Aufent-

haltsorten des Flurförderzeugs im Lager stets ein Marker vollständig im Blickfeld der Kamera ist. Die Markerplatzierung wird danach mittels gängiger Optimierungsalgorithmen modifiziert, damit einzelne Marker im Sinne des obigen Kriteriums nicht mehr notwendig sind und somit entfernt werden können. In vielen Fällen lässt sich die Zahl der benötigten Marker deutlich reduzieren. Der Montageprozess wird jedoch erheblich komplizierter, da Marker an den optimierten Punkten exakt und vergleichsweise präzise montiert werden müssen. Ein deutlich höherer Zeit- und Vermessungsaufwand ist die Folge, welcher zusätzliche Kosten verursacht. [GEI-2016, S. 47f.]

Eine einfache und schnell durchführbare Montage wird daher, auf Kosten ggf. redundanter Marker, bevorzugt. Zusätzliche Marker erleichtern die Vermessung der Marker und erhöhen potentiell die *Marker Erkennbarkeit*. Für den konkreten Aufbau in der Versuchshalle ist das absolute Einsparpotential durch Reduktion der Marker sehr gering, da nur zehn zusätzliche Marker benötigt werden und für die Komponenten aller hinzugefügten Marker Kosten in Höhe von weniger als 150 € anfallen.

5.3.3 Montage

Die Montage der konfektionierten Marker erfolgt an ferromagnetischen Elementen der Hallendecke in relativ großer Höhe möglichst parallel zur Bodenebene. Aus Sicherheitsgründen ist daher eine mobile Arbeitsbühne oder ein am Gabelstapler befestigter Arbeitskorb notwendig. In der betrachteten Versuchshalle beträgt die Deckenhöhe ca. 12 m und damit erheblich mehr als die Hubhöhe der verfügbaren Gabelstapler. Zur Montage der Marker an der Hallendecke wird folglich eine mobile Arbeitsbühne genutzt. Die Parallelität der Marker zur Bodenebene wird mit einer Wasserwaage überprüft.

Falls eine Befestigung mittels Magneten nicht möglich ist, bestehen diverse kostengünstige Alternativen. Der Einsatz von Magneten ist nach Möglichkeit zu bevorzugen, da die Montage der Marker damit sehr leicht und schnell erfolgen kann. Alternativ kann die Montage wie folgt durchgeführt werden.

- Kabelbinder können zur Befestigung an Rohren, Querbalken oder ähnlichen Deckenstrukturen dienen. Als Ankerpunkte können die für die Magnethalterung vorgesehenen Löcher genutzt werden.
- Starke ein- oder doppelseitige Klebebänder eignen sich zur Fixierung der Marker an glatten, ebenen Flächen.
- Eine Verschraubung an Deckenelementen ist ebenfalls möglich.

5.4 Systemintegration

Der zweite Teil der Integration in die Anwendungsumgebung entspricht der Systemintegration von *Location Sensor* und *Location Engine* am Flurförderzeug. Bestandteile dieser Arbeiten sind die Kalibrierung der Kamera, die Montage am Flurförderzeug sowie die Spannungsversorgung der Komponenten. Die zusätzlich notwendige Datenanbindung an das Lagerverwaltungssystem ist nicht Bestandteil dieser Arbeit und wird daher nur für Demonstrationszwecke vorgesehen (vgl. Abschnitt 4.2.5).

5.4.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung von Kameras nach einem Kameramodell ist ein Standardverfahren, das eingesetzt wird um mit einer Kamera hinreichend genau messen zu können. Ein definiertes Kalibriermuster wird dabei als Referenz verwendet. [BRA-2008, S. 381f.]

Notwendig ist die Kalibrierung aufgrund optischer Verzerrungen in der Kamera. Bei kostengünstigen Kameras fallen diese Verzerrungen in der Regel besonders stark aus [BRA-2008, S. 375], da der geringe Preis preisgünstiger Kameras, z. B. bei Webcams, durch die Hersteller erzielt wird, indem das Produkt aus kostengünstigen Komponenten in einem kostengünstigen und unpräzisen Produktionsprozess gefertigt wird. Thrun beschreibt daher den Aufbau einer kostengünstigen Kamera („cheap camera“) als Aggregation einer preisgünstigen Linse („cheap lense“) und eines preisgünstigen CMOS-Chips („cheap CMOS chip“), welcher mit minderwertigem Kleber („cheap glue“) unpräzise befestigt ist [THR-2004] (siehe auch Abbildung 5-12).

Die Vorgehensweise eines softwaregestützten Kalibrierprozesses zur Kalibrierung einer 2D Kamera beschreibt Bradski sehr umfangreich [BRA-2008, S. 370ff.]. Eine Beschreibung vergleichbarer Vorgehensweisen findet sich in der OpenCV API-Dokumentation [ITS-2014] und bei Datta et al. [DAT-2009]. In der Regel wird ein Kalibrierbrett mit einem Muster bekannter Abmessungen verwendet. Für hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Kalibrierung werden üblicherweise hochpräzise gefertigte, teure Kalibriernormalen verwendet [DEM-2011, S. 223f.], während gedruckte Schachbrettmuster bei geringeren Anforderungen normalerweise ausreichen. Wesentlicher Nachteil der gedruckten Muster ist deren geringe Präzision, die zu systematischen Messfehlern bei der Kalibrierung führt [ALB-2010]. Neuere Verfahren modellieren daher auch Fehler im Kalibriermuster, um mit selbst gefertigten Kalibriermustern gute Ergebnisse zu erzielen [MIR-2012; ALB-2010]. Auch eine automatische Kalibrierung ist prinzipiell möglich [ARM-1996], aber für die vorgesehenen Rechenleistungen zu ressourcenintensiv. Daher wird die Kalibrierung „klassisch“ mit der von

Higuchi et al. [MIR-2012] zur Verfügung gestellten Software unter Verwendung eines Ringmusters durchgeführt (siehe Abbildung 5-13).

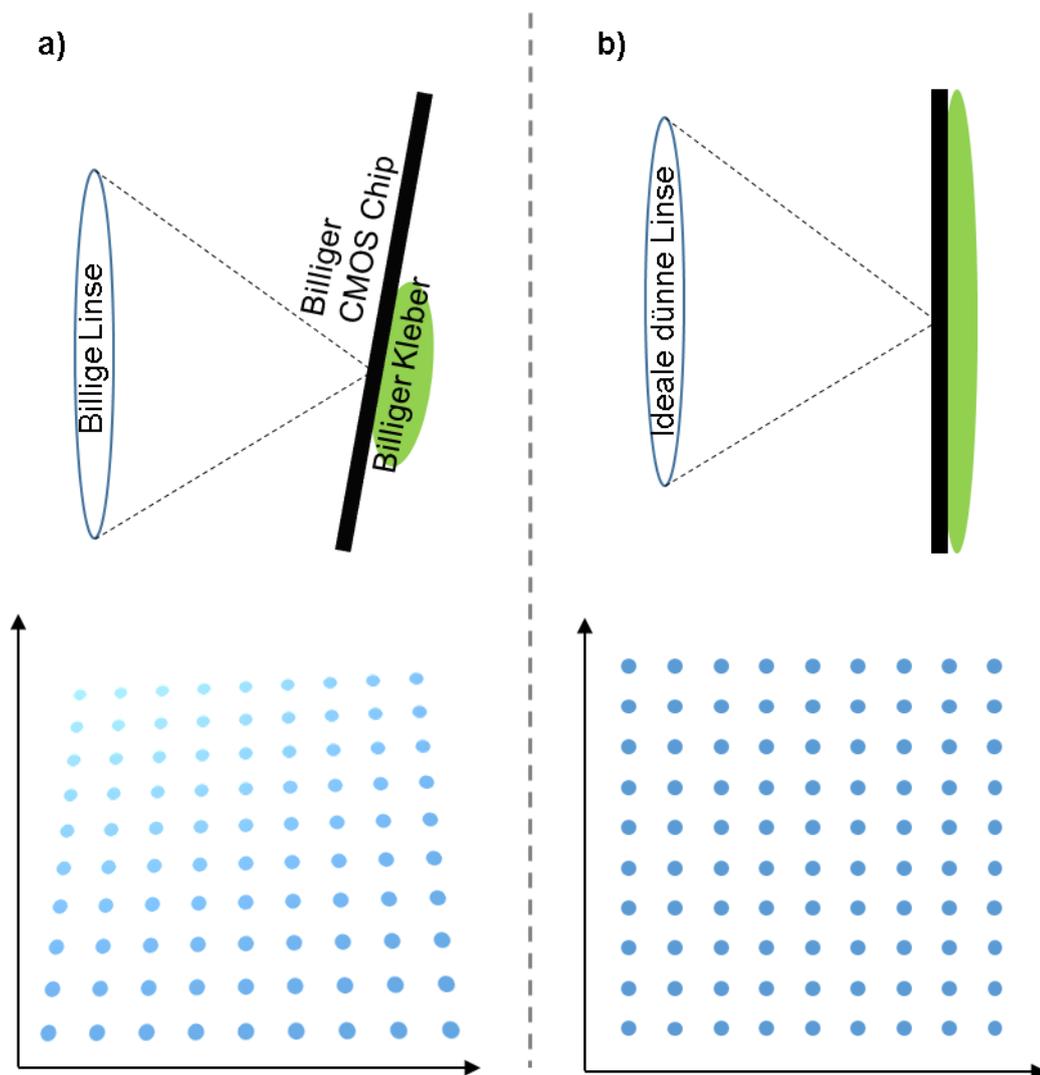


Abbildung 5-12: Produktionsmängel einer Webcam (nach [THR-2004]). Teil a) zeigt den realen Zustand, b) den idealen Zustand. Der untere Teil deutet die resultierende Verzerrung des aufgenommenen Bildes an.

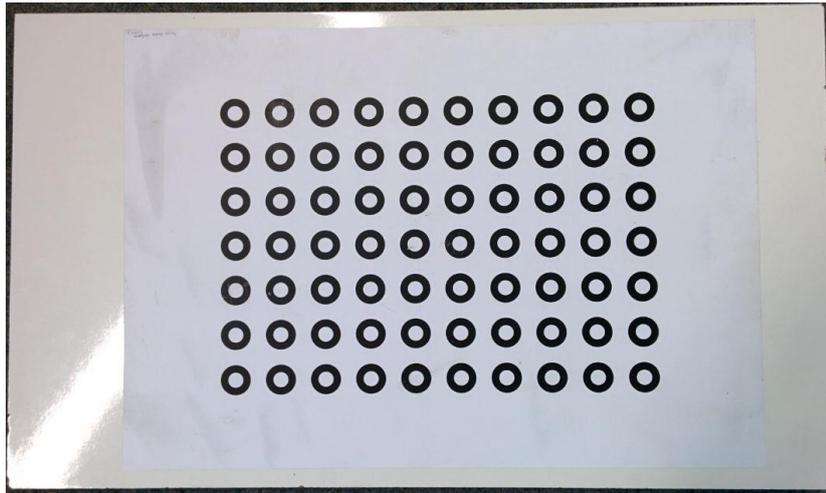


Abbildung 5-13: Auf eine Holzplatte aufgeklebtes Kalibriermuster [DAT-2009]

Die Aufnahme der notwendigen Bilder mit der Kamera des Raspberry Pi erfolgt nach folgendem Prinzip:

1. Mittels einer Python-Anwendung werden die Live-Bilder der Kamera auf dem Raspberry Pi zum Streaming bereitgestellt [JON-2017].
2. Auf einem Laptop wird dieser Datenstrom mittels des Medienwiedergabeprogramms VLC [VID-2017] vom Raspberry Pi über die Ethernet-Schnittstelle abgerufen, dargestellt und mittels der Bildschirmaufnahmefunktion von VLC als Einzelbilder abgespeichert. Die Aufnahme eines Bildes wird über die Hotkey-Funktion des Medienwiedergabeprogramms ausgelöst. Als Auslöser dient der Knopf eines handelsüblichen Presenters¹², welcher auf der Rückseite des Kalibrierbrettes befestigt wird (siehe Abbildung 5-14). Dadurch ist es möglich das Bild vor dem Abspeichern auf gewünschte Entfernung und gewünschte Ausrichtung des Kalibrierusters im Bild zu prüfen.
3. Nach diesem Vorgehen werden pro Kamera 20 Bilder mit jeweils unterschiedlichen Abständen und Ausrichtungen zwischen Kamera und Kalibrierbrett aufgenommen und dem Kalibrierprogramm als Eingabe übergeben [DAT-2009].
4. Das Matlab-Programm dieser Kalibrieranwendung ermittelt daraus die zur Korrektur durch das Lochkameramodell benötigten intrinsischen Kameraparameter [MIR-2012].

Statt Schritt 1 und 2 werden für die Industriekamera die Aufnahmen direkt über die Treiberschnittstelle des Herstellers abgerufen.

¹² siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Presenter>



Abbildung 5-14: Rückseite des Kalibrierbrettes mit Presenter¹² als Fernbedienung

5.4.2 Montage

Die Anbringung der Industriekamera für das Entwicklungssystem erfolgt an der Rückseite des Fahrerschutzdaches mittels einer einfachen Schraubhalterung (siehe Abbildung 5-15) am Anbringungspunkt ID01 [GÜN-2014a, S. 60]. Diese Schraubhalterung wird für die Montage des Raspberry Pi um ein Winkelstück erweitert. Das Gehäuse mit der Recheneinheit wird auf der oberen Seite parallel zum Boden, z. B. mit Hilfe einer Wasserwaage, ausgerichtet und festgeschraubt. Die Kamera wird auf der Oberseite des Raspberry Pi Gehäuses mit doppelseitigem Klebeband befestigt und ist durch die parallele Ausrichtung des Gehäuses ebenfalls korrekt im Sinne des Messaufbaus angebracht. Damit keine unnötigen systematischen Fehler durch die falsche Ausrichtung der Kamera entstehen können, sollte das Flurförderzeug möglichst waagrecht zum Boden stehen. Eine alternative Möglichkeit der Montage ist eine einfache Klemmhalterung am Fahrerschutzdach (siehe Abbildung 4-4). Die abgebildete Halterung wird dazu, wie die Halterung am Heck, um ein Winkelstück erweitert.

Bei einer geschlossenen Fahrerkabine oder anderen Aufbauten am Fahrzeugdach kann die Recheneinheit auch an ebenen Flächen dieser Aufbauten befestigt werden. Auf dem EFG 220 kommt aus diesem Grund für den Demonstrator eine provisorische Befestigung mit Gewebeklebeband zum Einsatz. Aufgrund des geringen Gewichts der Recheneinheit und der Kamera ist diese Form der Anbringung für den Demonstrator ausreichend stabil und genügt für Tests oder Prototypen.



Abbildung 5-15: Schraubhalterung am Heck der Fahrerkabine (Anbringungspunkt ID01 [GÜN-2014a, S. 39])

Die Höhe der Kamera über dem Boden wird mittels eines Laserdistanzmessers bestimmt. Zur Bestimmung der relativen Beziehung zwischen Kamera- und Fahrzeugkoordinatensystem wird ein Meterstab verwendet. Je nach Genauigkeitsanforderungen können auch komplexere Messverfahren sinnvoll sein. Mittels geodätischer Messverfahren lässt sich die Transformation mit Genauigkeiten <1 mm bestimmen [WIE-2004, S. 88]. Da in dieser Arbeit die Genauigkeit der Kamerapose bewertet wird, sind Fehler in der nachgelagerten Transformation in Fahrzeugkoordinaten für die Auswertung nicht relevant.

5.4.3 Spannungsversorgung

Die Industriekamera aus dem Entwicklungssystem wird durch einen 12 V DC-DC Wandler über die Staplerbatterie mit Energie versorgt sobald der Stapler eingeschaltet ist. Der Laptop kann während der Versuche aus dem integrierten Akku gespeist werden.

Die Raspberry Pi 2 und 3 benötigen laut einer Messung des c't Magazins je nach Last ca. 2-3 Watt. Das entspricht etwa 600 mA bei 5 V [STO-2016]. Für die Dauer einer Schicht von acht Stunden ergibt sich daraus ein Bedarf von 4000 mAh, am Tag ca. 12000 mAh.

Das Funktionsmuster wird durch handelsübliche Akkumulatoren mit Strom versorgt. Es werden drei Repräsentanten von Akkumulatoren getestet:

1. Vier in Reihe geschaltete, wieder aufladbare AA-Akkus mit einer Nennkapazität von 4000 mAh. Die Kapazität und damit die Nutzungsdauer lassen sich prinzipiell durch Parallelschaltung mehrerer solcher Gruppen erhöhen. Ein Austausch der Zellen ist bei dieser Lösung besonders einfach und schnell möglich.
2. Eine große Powerbank mit einer Nennkapazität von 20000 mAh erlaubt einen Betrieb des Lokalisierungssystems voraussichtlich länger als einen Tag ohne zwischenzeitliche Aufladung.
3. Eine besonders kleine Powerbank mit einer Nennkapazität von 3350 mAh reicht für den Betrieb über eine Schicht nicht aus, ist aber besonders klein und dadurch sehr flexibel anzubringen. Zukünftig verfügbare Modelle mit höherer Kapazität können daher den Einsatz besonders kleiner Powerbanks rechtfertigen.

5.4.4 Datenübertragung

Die Datenübertragung der Bilder von der Kamera zur Auswerteeinheit erfolgt mit dem von der Kamera unterstützten Bus. Handelsübliche Kabel kommen hier zum Einsatz. Besonders abgeschirmte Kabel sind empfehlenswert, um eine robuste und stabile Übertragung sicherzustellen. Die ermittelten Sensordaten werden nicht an externe IT-Systeme, z. B. das LVS, übermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass die Positionsinformationen nur lokal auf dem Gabelstapler benötigt werden. Eine explizite Weitergabe der Daten kann analog zu bisherigen Lokalisierungssystemen gehandhabt werden.

Die Prüfung der korrekten Ausführung eines Transportauftrages kann auf dem Stapler durchgeführt werden. Dazu müssen die Quell- und Zielkoordinaten mit dem Transportauftrag übermittelt werden. Software auf dem Stapler kann dann anhand der Sensorinformationen, z. B. Gabelhubhöhe, Pose und Gabel-belegt-Erkennung, entscheiden, ob der Vorgang erfolgreich abgeschlossen wurde oder ein Fehler aufgetreten ist [GÜN-2007; ALE-2013]. Lediglich diese Information zum Prozess ist für das LVS entscheidend. Die Übermittlung der korrekten Ausführung eines Transportauftrages an das LVS ist nicht Bestandteil dieser Arbeit, kann aber z. B. mit dem MQTT-Protokoll [OAS-2015] realisiert werden.

Für die Evaluierung ist keine Datenübertragung notwendig. Die erfassten Daten werden auf die SD-Karte im Raspberry Pi gespeichert. Für Demonstrationszwecke werden die Posen des Fahrzeugs über ein Protokoll via UDP im WLAN verfügbar gemacht und können so auf einem Laptop visualisiert werden. Zu diesem Zweck wurde für das Staplerauge-Projekt [GÜN-2014a] eine Java Anwendung zur Darstellung der

Pose des Flurförderzeugs auf einem Hallenplan entwickelt (siehe Abbildung 5-16). Die übertragenen Daten umfassen u. a. eine Fahrzeug-Identifikationsnummer, den aktuellen Zeitstempel, die x,y-Koordinaten und den Gierwinkel des Flurförderzeugs. Das Flurförderzeug wird auf dem Hallenplan als blaues Quadrat dargestellt. Ein Strich vom Mittelpunkt zum äußeren Rand dieses Quadrates zeigt zusätzlich die Fahrzeugrichtung an.

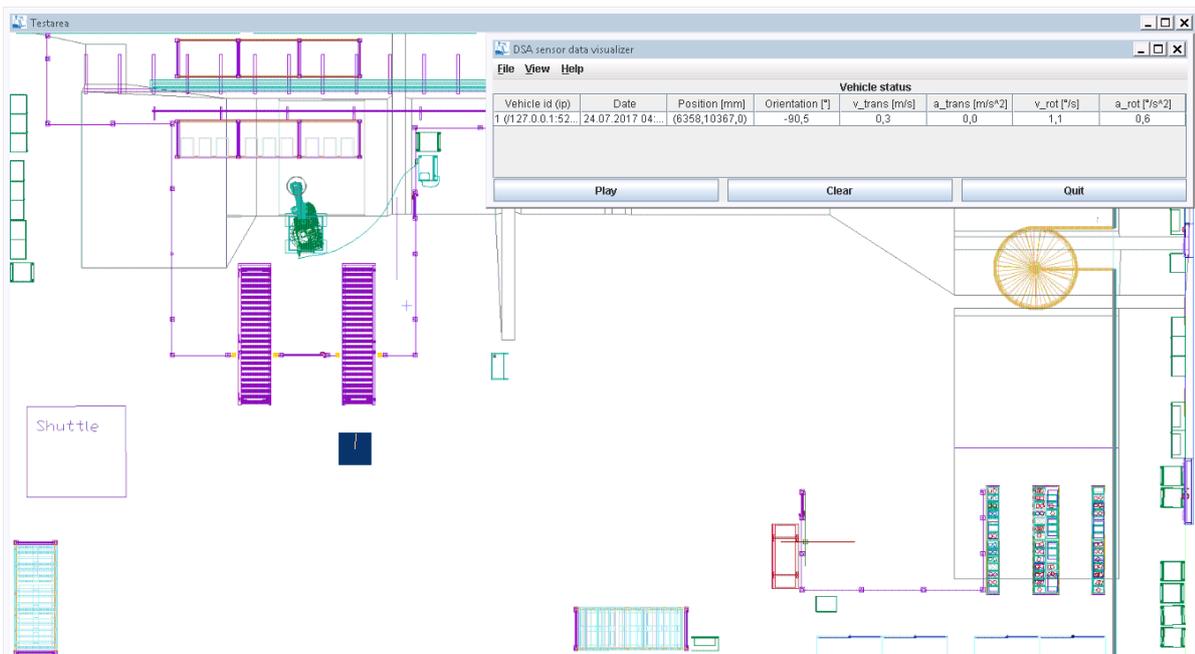


Abbildung 5-16: Bildschirmfoto der Anwendung zur Darstellung der aktuellen Staplerpose

Alternativ kann das Übertragungsprotokoll die Lokalisierungsdaten über das Loop-back-Interface an andere Prozesse auf derselben Recheneinheit übermitteln und dadurch eine aufwandsarme Integration in bestehende Lokalisierungslösungen ermöglichen.

6 Theoretische Erkenntnisse

In diesem Kapitel werden die theoretischen Eigenschaften des entwickelten Lokalisierungssystems betrachtet. Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems ist, wie bereits in Abschnitt 4.3.5 aufgezeigt, die Richtigkeit der ermittelten Messwerte (siehe Unterkapitel 6.1) von Interesse. Für das Verständnis der entwickelten Verfahren sind hingegen die Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsleistung wichtig und werden in Unterkapitel 6.2 näher analysiert.

6.1 Richtigkeit

Die Richtigkeit beschreibt die Abweichung einer Messung durch systematische Fehler [DIN ISO 5725-3, S. 10]. Wesentliche Ursachen für solche systematischen Abweichungen stellen in dem betrachteten Lokalisierungssystem die vernachlässigten Roll- und Nickwinkel des Sensors sowie die statische Approximation des z-Abstands zwischen Sensor und Marker dar.

6.1.1 Vernachlässigte Neigungen

Es wird zunächst der systematische Fehler betrachtet, der entsteht, wenn Roll- und Nickwinkel der Kamera bei der *Posenschätzung* vernachlässigt werden. Günthner et al. legen anhand experimenteller Untersuchungen den Erfolg dieses Ansatzes nahe, ohne jedoch auf die Ursachen dafür im Detail einzugehen bzw. den Effekt näher zu quantifizieren [GÜN-2014a, S. 83; HOH-2014, S. 218f.; JUN-2015]. In der Realität können entsprechende Neigungen der Kamera durchaus auftreten, z. B. durch

- Bodenunebenheiten, Rampen,
- nicht exakt lotrechte Anbringung der Kamera,
- Transport hoher Gewichte und
- Vibrationen des Fahrzeugs.

Zunächst wird im Folgenden der Messfehler in Abhängigkeit der vernachlässigten Neigungswinkel (Rollwinkel γ und Nickwinkel β) analytisch berechnet. Anhand konkreter Werte können im Anschluss praxisrelevante Beispielwerte ermittelt werden.

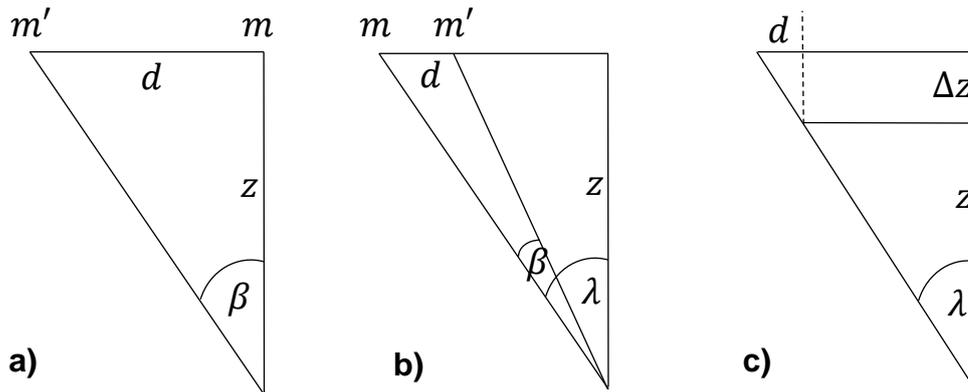


Abbildung 6-1: Systematische Fehler durch Rotationsunterdrückung und statische Distanz zum Marker

Schon eine geringe Neigung der Sichtachse der Kamera führt aufgrund der in praktischen Szenarien angestrebten hohen z-Distanz zwischen Kamera und Marker (vgl. Abschnitt 4.2.3) zu einer verhältnismäßig großen Abweichung der Pose, da diese Distanz als Hebelarm bei der Bestimmung der x-, bzw. y-Koordinate wirkt (siehe Abbildung 6-1a). Befindet sich der Markermittelpunkt ohne Neigung des Bildsensors lotrecht über der kalibrierten Bildmitte, beträgt der systematische Fehler d bei einer Neigung des Bildsensors um β :

$$d = z \cdot \tan(\beta) \quad (6-1)$$

Für einen festen Neigungswinkel β ist der Fehler linear abhängig vom Abstand zwischen Marker und Bildsensor. Für eine beliebige Position des Markers im Bild ist die Berechnung etwas aufwändiger, da der Winkel λ , unter dem der Markermittelpunkt im Bild ohne Neigung erscheint, eine Rolle spielt (siehe Abbildung 6-1b). Der Fehler beträgt in diesem Fall

$$d = z \cdot (\tan(\lambda) - \tan(\lambda - \beta)) \quad (6-2)$$

In der vereinfachten Betrachtung (6-1) ist λ gleich null. Der Fehler d nimmt aufgrund der Monotonie der Tangens-Funktion sein Maximum bei λ_{max} an. Es handelt sich daher um ein Randextremum. Für ein reales Kamerasystem entspricht λ_{max} etwa dem halben Öffnungswinkel des Objektivs. Für den Neigungswinkel β sind besonders Bodenunebenheiten des Einsatzortes von Bedeutung. Diese sind für die *Posenschätzung* bei positionsbasierter Lagerverwaltung [GÜN-2007] zum einen relevant und zum anderen sind die oben genannten, für den Winkel β verantwortlichen Fehlerquellen durch den Systemintegrator nicht vermeidbar. Aufschluss über zulässige Bodenunebenheiten im Hochbau geben die Normen DIN 18202 [DIN 18202, S. 12]

und DIN EN 15620 [DIN EN 15620, S. 18]. Die zulässigen Höhenunterschiede im Abstand von einem Meter vom Messpunkt betragen normgerecht 4 mm bzw. 2,5 mm. Daraus ergibt sich ein maximal möglicher Neigungswinkel von $0,23^\circ$ bzw. $0,14^\circ$ für ein ruhendes Flurförderzeug in Folge der Unebenheiten normkonformer Lagerböden.

Der durch beide Neigungswinkel verursachte Fehler kann mittels der euklidischen Distanz aus den einzelnen Komponenten ermittelt werden. Tabelle 6-1 zeigt ein paar typische Beispielwerte. Der lineare Zusammenhang mit der Höhe wird dabei bewusst beibehalten, um eine schnelle Berechnung für individuelle Hallendeckenhöhen zu ermöglichen. Durch Einsetzen des Abstands zwischen Kamera und Marker in mm wird der gesuchte Wert für die systematische Abweichung ermittelt.

Tabelle 6-1: Systematische Fehler durch Vernachlässigung der Roll- und Nickwinkel

Parameter	Fehler (vereinfachtes Modell)	Fehler (genaues Modell)
$\lambda_{max1} = 25^\circ, \lambda_{max2} = 20^\circ, \text{DIN 18202}$	$0,0057 \cdot z$	$0,0067 \cdot z$
$\lambda_{max1} = 25^\circ, \lambda_{max2} = 20^\circ, \text{EN 15620}$	$0,0035 \cdot z$	$0,0041 \cdot z$
$\lambda_{max1} = 30^\circ, \lambda_{max2} = 25^\circ, \text{DIN 18202}$	$0,0057 \cdot z$	$0,0072 \cdot z$
$\lambda_{max1} = 30^\circ, \lambda_{max2} = 25^\circ, \text{EN 15620}$	$0,0035 \cdot z$	$0,0044 \cdot z$

Der durchschnittliche Wert für z liegt in der Versuchshalle des Lehrstuhls ungefähr bei 9000 mm. Je nach verwendeter Kamera und zugrunde gelegter Norm ergibt sich ein Wert für die Richtigkeit von 37-65 mm. Das vereinfachte Modell liegt gegenüber der genauen Betrachtung 15 % bis 20 % unter dem tatsächlich zu erwartenden Wert. Daher sind der Öffnungswinkel der Kamera und der dadurch mögliche Abstand eines Markers zur Kamera in der x,y-Ebene auch in realen Szenarien von signifikanter Bedeutung für die Bestimmung der Richtigkeit des Lokalisierungssystems. Marker mit geringem z-Abstand zur Kamera erlauben folglich genauere Messungen. Eine höhere Genauigkeit ist ebenso bei Markern zu erwarten, deren Distanz zur Kamera in der x,y-Ebene geringer ist.

In der Realität sind geringe Neigungen um die vernachlässigten Achsen zwar möglich, aber mit $<0,2^\circ$ sehr gering. Der Versuch der Messung dieser Neigungen mittels der angewandten Messmethode verursacht folglich einen größeren Fehler als durch das Vernachlässigen der Neigung entsteht. Bauer stellt hierzu fest, dass gerade bei Koplanarität zwischen Marker und Sensorebene die Genauigkeit der bestimmten Neigungswinkel besonders gering ist [BAU-2007, S. 82f.]. Das vereinfachte Messprinzip erlaubt daher tatsächlich einen Gewinn an Genauigkeit, indem es die Präzision stärker verbessert als es die Richtigkeit verschlechtert.

6.1.2 Abstand zum Marker

Analog kann der entstehende Fehler d durch die statische Bestimmung des Abstands zwischen Marker und Kamera abgeschätzt werden, wie Abbildung 6-1c zu entnehmen ist. Aus dem Fehler der Höhe Δz und dem Winkel des Markers zur Sichtachse der Kamera λ ergibt sich im eindimensionalen Fall folgende Gleichung:

$$d = \Delta z \cdot \tan(\lambda) \quad (6-3)$$

Fasst man den Einfluss beider Winkel zusammen, im zweidimensionalen Fall λ_x und λ_y , erhält man den durch den Abstandsfehler Δz verursachten Gesamteinfluss auf die x- und y-Koordinate (siehe Formel (6-4)). Die Maxima von λ_x und λ_y entsprechen etwa dem halben horizontalen bzw. vertikalen Öffnungswinkel des Objektivs.

$$d = \Delta z \cdot \sqrt{\tan(\lambda_x)^2 + \tan(\lambda_y)^2} \quad (6-4)$$

Tabelle 6-2 zeigt praxisnahe Beispielwerte für geeignete Objektive. Da der Abstand eines Markers über dem Boden mit einem Laserdistanzmesser sehr genau ermittelt wird, können nur Höhenunterschiede durch Bodenunebenheiten in der näheren Umgebung eines Markers eine signifikante Fehlerquelle darstellen. DIN 18202 [DIN 18202, S. 12] fordert einen maximalen Höhenunterschied bei ebenen Flächen von 15 mm bei einer Distanz von <15 m. Legt man diese Toleranz und eine Messgenauigkeit des Laserdistanzmessers gemäß Datenblatt von 1,5 mm zugrunde, ergibt sich eine maximale Abweichung $\Delta z_{stat} = 16,5\text{mm}$. Der Folgefehler durch einen falschen Distanzwert liegt damit im schlimmsten Fall bei etwa einem Zentimeter. Dies ist einer der wesentlichen Gründe für die erhöhte Genauigkeit der *Posenschätzung*, die Jung et al. erzielen [JUN-2015]. Der von Bauer [BAU-2007, S. 84] bestimmte überlineare Einfluss von z auf den Messfehler der x- und y-Koordinaten wird in diesem Fall durch einen sehr geringen, nach oben durch eine Konstante begrenzten und von z unabhängigen Fehler ersetzt.

Tabelle 6-2: Systematische Fehler durch ungenaue Distanzwerte

Parameter	Fehler [mm]
$\lambda_{max1} = 25^\circ, \lambda_{max2} = 20^\circ$	$0,59 \cdot \Delta z$
$\lambda_{max1} = 30^\circ, \lambda_{max2} = 25^\circ$	$0,74 \cdot \Delta z$

6.2 Einflussfaktoren

In diesem Unterkapitel werden die Einflüsse diverser Größen auf die Leistungsfähigkeit der Lokalisierungslösung analytisch betrachtet.

- Der Fehler des Gierwinkels verursacht bei der Invertierung der Pose einen Folgefehler in der x,y-Ebene [BAU-2007, S. 83].
- Eine um n Pixel unpräzise Extraktion eines Markers im Bild führt ebenfalls zu einem Fehler in der x,y-Ebene [BAU-2007, S. 64ff.].
- Die Einflüsse der vernachlässigten Neigungen der Marker gegenüber der Lagerbodenebene und der Neigungen des Flurförderzeugs durch das Gewicht der Ladeeinheit werden ebenfalls analysiert.

6.2.1 Gierwinkel

Der Gierwinkel definiert die Ausrichtung des Flurförderzeugs in der Lagerbodenebene. Der Wert des Gierwinkels unterliegt in den anvisierten Anwendungsfällen an Flurförderzeugen nur sehr geringen Anforderungen (vgl. Unterkapitel 2.5).

Sein tatsächlicher Wert hat in dem eingesetzten Algorithmus zur *Posenschätzung* zusätzlich einen Einfluss auf die x- und y-Koordinate der Pose. Dieser Fehler entsteht durch Fehlerfortpflanzung in einem *Inside-out* Lokalisierungssystem bei der Invertierung der Pose des Markers in Kamerakoordinaten, also der Operation $(cTm)^{-1}$. [BAU-2007, S. 83]

Der konkrete Fehler d_x bzw. d_y kann unmittelbar aus der Formel für die Invertierung der Matrix entnommen werden (siehe Formeln (6-5) und (6-6)).

$$|d_x| = |x - x \cdot \cos(d_\alpha) + y \cdot \sin(d_\alpha)| \quad (6-5)$$

$$|d_y| = |y - y \cdot \cos(d_\alpha) + x \cdot \sin(d_\alpha)| \quad (6-6)$$

Für kleine d_α ist die Cosinus-Funktion ungefähr gleich 1, die obigen Gleichungen lassen sich in diesem Fall durch

$$|d_x| \approx |y \cdot \sin(d_\alpha)| \text{ und } |d_y| \approx |x \cdot \sin(d_\alpha)| \quad (6-7)$$

abschätzen. Konkret hat ein Messfehler bei der Bestimmung des Gierwinkels einen umso größeren Einfluss auf die x- bzw. y-Koordinate, je weiter der Marker von der Kamera in der x,y-Ebene entfernt ist. Eine Multi-Marker Strategie sollte daher Markern mit größerem Abstand zur Kamera in der x,y-Ebene eine geringere Gewichtung beimessen [GÜN-2014a, S. 83]. Neben dem Messfehler d_α sind weitere Stellschrauben für den maximal möglichen Fehler folglich der Öffnungswinkel der Kamera sowie die Anbringungshöhe der Marker. Beide Parameter bestimmen letztlich den maximal möglichen Hebelarm des Gierwinkelfehlers bei der Invertierung der Pose. Schon ein geringer Winkelfehler von 1° verursacht in einem Abstand von 5 m entlang beider Koordinaten einen gesamten Messfehler von >100 mm. Für eine präzise *Posenschätzung* ist daher eine präzise Bestimmung des Gierwinkels von sehr großer Bedeutung. Es spielt dabei keine Rolle, ob es sich um eine systematische oder statistisch bedingte Abweichung handelt.

6.2.2 Messfehler in Pixeln

Neben dem indirekten Einfluss des Gierwinkels haben auch direkte Messfehler einen Einfluss auf den Fehler der x- und y-Koordinate. Diese Messfehler können z. B. durch ungenaue Segmentierung oder Kalibrierung verursacht werden. Im Folgenden wird daher der Zusammenhang zwischen einem Messfehler im Bild und dem daraus resultierenden Positionsfehler in der Lagerebene untersucht. Da die Berechnung der Koordinaten auf Basis der Bestimmung des Markermittelpunktes und der Lochkameragleichung erfolgt (siehe Abschnitt 5.1.4), kann die gesuchte Beziehung direkt aus der Lochkameragleichung abgeleitet werden. Für eine Abweichung des Markermittelpunktes um n Pixel ergibt sich folgender Messfehler:

$$d_x = \frac{z}{f_x} \cdot n \text{ und } d_y = \frac{z}{f_y} \cdot n \quad (6-8)$$

Der Faktor z/f definiert die beiden Einflüsse auf die Verstärkung des Messfehlers im Bild. Je weiter der Marker von der Kamera entfernt ist, desto stärker fällt die Abweichung aus. Ein großer Wert von f , z. B. bei hoher Kameraauflösung und geringem Öffnungswinkel des Objektivs, senkt den Fehler jedoch wieder. Beträgt $z=9000$ mm und $f=1000$, so ergibt sich ein Fehler von 9 mm/Pixel. Da der Mittelpunkt subpixelgenau extrahiert werden kann [FAB-2012], ist bei guter Aufnahmequalität der Messfehler bei der Bestimmung des Markermittelpunktes von vergleichsweise geringer Bedeutung. Zudem pflanzt sich dieser Messfehler während der *Posenschätzung* nicht fort. Kritisch an dieser Analyse ist jedoch zu sehen, dass ein Fehler bei der Bestimmung des Markermittelpunktes grundsätzlich auf Messfehlern in den Markereckpunkten beruht. Diese Messfehler wirken sich in den meisten Fällen ebenfalls auf die Bestimmung des Gierwinkels aus. Ein Fehler bei der Bestimmung des Markermittel-

punktes tritt aus diesem Grund nicht isoliert auf. Eine möglichst präzise Extraktion der Markereckpunkte ist daher in jedem Fall wünschenswert und reduziert den statistischen Fehler bezüglich aller Koordinaten.

6.2.3 Markerneigung

Ist ein Marker gegenüber der Kamera- bzw. Bodenebene geneigt (Abbildung 6-2b), so erscheint seine Projektion in die Bildebene anders als dies ohne Neigung der Fall ist (siehe Abbildung 6-2a). Daher wird der Einfluss einer Neigung des Roll- und Nick-Winkels gegenüber der zum Boden parallelen Soll-Ebene auf die *Posenschätzung* betrachtet. Der Gierwinkel ist in diesem Szenario nicht relevant, da es sich um eine Drehung in der Soll-Ebene handelt und diese auf die Abmessungen des Markers in der Projektion keinen Einfluss hat, sondern die Ausrichtung des Markers im Bild bestimmt.

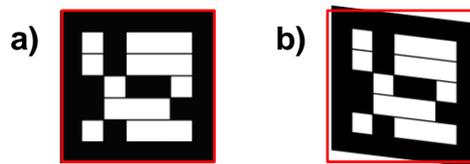


Abbildung 6-2: Marker gegenüber der Bodenebene a) koplanar und b) geringfügig geneigt

Die Neigungen gegenüber der Bildebene lassen sich als Rotationen um den Markermittelpunkt darstellen. Der Einfluss dieser in der *Posenschätzung* ebenfalls vernachlässigten Neigungen kann als eine Verschiebung des Mittelpunktes d_{xy} und ein Fehler des Gierwinkels d_α betrachtet werden. Um d_{xy} bestimmen zu können wird zunächst der Spezialfall betrachtet, bei dem sich der Markermittelpunkt genau in der kalibrierten Bildmitte befindet und die Achsen des Markerkoordinatensystems mit den Achsen des Kamerakoordinatensystems übereinstimmen. Wird jetzt der Marker genau um seinen Mittelpunkt geneigt, so verschiebt sich der Mittelpunkt des projizierten Vierecks in der Bildebene gemäß Konstruktion nicht. Der Fehler bei der Bestimmung des Markermittelpunktes aufgrund der Markerneigung ist somit gleich Null. Eine Rotation um den Gierwinkel ändert an dieser Betrachtung ebenfalls nichts, da sich die Form des Quadrates in der Bildebene dadurch nicht verändert. Eine, ggf. zusätzliche, physische Verschiebung des Markermittelpunktes führt zu einer Projektion an einen anderen Ort in der Bildebene. Die Entfernung z zum Objekt bleibt dabei gleich, Größe und Form des projizierten Objektes bleiben erhalten und die Änderung des Markermittelpunktes hängt von der Verschiebung, nicht aber von der Neigung ab. Daher ist der Markermittelpunkt von der Neigung des Markers stets unabhängig.

Für den Gierwinkel lässt sich dieser Beweis nicht so leicht führen. Analog kann aber zumindest angenommen werden, dass d_α von der Position im Bild und dem Gierwin-

kel unabhängig ist. Ebenso spielt der Abstand z keine nennenswerte Rolle, da dieser für alle Markereckpunkte bei in der Praxis üblichen Neigungen und Distanzen nahezu gleich ist. Um d_α analytisch betrachten zu können, ist es zunächst notwendig auf einen Marker, dessen Mittelpunkt auf die Bildmitte projiziert wird, zwei Rotationen anzuwenden, danach die Eckpunkte perspektivisch in die Bildebene zu projizieren und mit den Koordinaten der projizierten Eckpunkte anhand des Algorithmus zur *Posenschätzung* den Rotationswinkel zu bestimmen. Aufgrund der komplexen geometrischen Operationen ist das Ergebnis nicht sehr intuitiv und somit schwierig zu interpretieren. Da der Algorithmus zur *Posenschätzung* zusätzlich diverse Fallunterscheidungen durchführt, ergibt sich letztlich auch keine eindeutige Formel. Konkrete Werte ließen sich folglich nur durch Einsetzen bestimmter Werte ermitteln. Da das beschriebene Vorgehen ohnehin einer Simulation der einzelnen Verarbeitungsschritte gleicht, werden typische Werte stattdessen in synthetischen Versuchen betrachtet (siehe Unterkapitel 7.3).

6.2.4 Ladungsgewicht

Neigt sich ein Gegengewichtsstapler durch das Gewicht der Ladung während des Transports zusätzlich, so wird auch diese Neigung für die *Posenschätzung* vernachlässigt. Der daraus folgende, systematische Fehler wird bereits in Abschnitt 6.1.1 betrachtet. Für die positionsbasierte Lagerverwaltung [GÜN-2007] ist dieser Fehler nicht relevant, da während der Aufnahme und Abgabe der Ladeinheit das Gewicht der Ladung normalerweise nicht (mehr) auf dem Flurförderzeug lastet. Falls eine Ladeinheit je Flurförderzeug transportiert wird, z. B. mittels einer Europalette auf einem Gabelstapler mit zwei einfach tiefen Gabelzinken, gilt:

1. Vor der Aufnahme einer Ladeinheit transportiert der Gabelstapler keine Ladung, da er sonst keine weitere Ladeinheit mehr aufnehmen kann.
2. Nach der Abgabe einer Ladeinheit befindet sich keine Ladeinheit mehr auf dem Flurförderzeug, da diese bereits abgestellt wurde.

Somit ist in den zur Verbuchung eines Transportauftrags anhand der Positionsdaten relevanten Szenarien das Fahrzeug unbeladen und ein Einfluss des Ladungsgewichtes nicht gegeben. Für Flurförderzeuge, die mehrere Ladeinheiten auf einmal transportieren können, gilt dies jedoch nicht. Ebenso hat die zusätzliche Neigung einen Einfluss auf die Position des Flurförderzeugs während der Transportfahrt. In diesem Fall, z. B. zur Navigation, liegen jedoch geringere Anforderungen an die Genauigkeit des Lokalisierungssystems zugrunde [FM-2017].

Die unbeabsichtigte Positionsänderung infolge der zusätzlichen Neigung bei der Aufnahme oder Abgabe einer Ladeinheit kann weitere indirekte Messungen ermöglichen. Aus der Positionsverschiebung kann die zusätzliche Neigung geschätzt werden und diese in Bezug zu Ladungsgewicht und ggf. Hubhöhe gesetzt werden. So kann auch eine Funktionsintegration mehrerer Sensorfunktionen mit einer einzigen Kamera realisiert werden, ohne dass die Information aller Funktionen im selben Bild sichtbar sein muss [GÜN-2014a, S. 4]. Gelingt es auf diese Weise, z. B. mittels einer Ereigniserkennung [GUR-1999], aus den Positionsdaten den Zeitpunkt der Ladungsaufnahme und die dabei eingestellte Hubhöhe zu bestimmen, so kann eine positionsbasierte Lagerverwaltung ohne weitere Sensoren umgesetzt werden.

Fahrerlose Transportsysteme, welche die Ladung in der Mitte des Fahrzeugs transportieren, sind von dieser Problematik wenig oder gar nicht betroffen, da keine oder nur eine sehr geringe Neigung auftreten sollte. Beispiele für derartige Flurförderzeuge sind das Multishuttle Move [KAM-2011] und die Kiva Robots [GUI-2008].

Maximale Reichweite

Die Reichweite des Lokalisierungssystems ist durch zwei wesentliche Faktoren nach oben beschränkt. Zum einen muss ein Marker durch das Kamerasystem so abgebildet werden, dass die Algorithmen aus der Merkmalsextraktion diesen erkennen und identifizieren können. Dazu sollten nach dem Abtast-Theorem [NYQ-1928] die Quadrate zur Kodierung der ID eines Markers mindestens 2×2 Pixel betragen [ATC-2010]. Für ArUco-Marker mit einer 9×9 Quadrate Grundfläche inklusive des weißen Randbereiches [MUN-2014] bedeutet dies eine Mindestgröße von 18 Pixeln für eine Seitenlänge im Bild. Die physisch mindestens notwendige Seitenlänge des Markers ergibt sich unmittelbar aus der Gleichung des Lochkammermodells (siehe Formel (5-4)). Die mindestens notwendige Markergröße beträgt demzufolge $18 \cdot z/f$ mm. Eine Konstruktion beliebig großer Marker erlaubt damit prinzipiell eine beliebig große Reichweite.

Interessanter ist jedoch, ab welcher Distanz eine höhere Reichweite nicht mehr sinnvoll ist, da der Messfehler der Richtigkeit, welcher mit zunehmender Distanz ansteigt, größer wird als die Genauigkeitsanforderungen zulassen. Streng genommen ist eine unzureichende Richtigkeit ab einer gewissen Reichweite ausschließlich der Richtigkeit und nicht der Reichweite anzulasten [DIN ISO 5725-3, S. 10]. Um dennoch eine sinnvolle Grenze der Reichweite festzulegen, wird folgend die obere Grenze für die Distanz zwischen Marker und Kamera berechnet, ab der allein die Anforderung an die Genauigkeit durch die Richtigkeit nicht mehr erfüllt ist, also der Fehler >400 mm beträgt. Nach Tabelle 6-1 ist dies für die dort aufgeführten Öffnungswinkel frühestens

bei 55 m der Fall. Der Marker weist in diesem hypothetischen Szenario eine Seitenlänge von mindestens 1,5 m auf. Für die Intralogistik ist diese Distanz nur von geringer Bedeutung, da der Abstand zwischen Boden und Hallendecke in Hochregallagern nur sehr selten 15 m überschreitet. Die Reichweitenanforderung (siehe Unterkapitel 2.5) wird somit ohne Probleme erfüllt und Marker mit einer Seitenlänge von weniger als 500 mm genügen für alle gebräuchlichen Hallendeckenhöhen.

7 Praktische Evaluierung

Die Inhalte dieses Kapitels entsprechen der *deskriptiven Studie II* in der Vorgehensmethodik. Ziel dieser Phase ist es zu prüfen, ob der Demonstrator die Anforderungen erfüllt. [BLE-2009, S. 212ff.]

Zunächst wird eine quantitative Analyse der Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems durchgeführt. Darin werden die quantifizierbaren Anforderungen empirisch betrachtet und Stärken und Schwächen der eingesetzten Verfahren untersucht. Praxisnahe Versuche liefern dabei Aufschluss über die Summe aller in der Realität auftretenden Fehler. Aus diesen Versuchen lassen sich die Einflüsse der einzelnen Fehler nicht immer direkt ableiten. Daher werden zusätzlich synthetische Versuche in Form von Simulationen durchgeführt, in denen qualitativ bekannte Fehlerursachen einzeln fehlerfreien Szenen hinzugefügt werden und der jeweilige Einfluss auf die Güte des Lokalisierungssystems analysiert wird. Im Anschluss werden die abgeleiteten Anforderungen qualitativ betrachtet, für die eine quantitative Analyse nicht möglich oder sinnvoll ist.

Für den Vergleich der Leistungsfähigkeit mit anderen Lokalisierungssystemen werden zunächst die für die Leistungsfähigkeit relevanten Parameter ermittelt. Durch diesen Schritt können die Fähigkeiten des entwickelten Lokalisierungssystems in den Kontext der Anwendungsdomäne eingeordnet werden. Tabelle 7-1 zeigt die wichtigsten Parameter und die dahinter stehende Evaluierungsmethodik.

Tabelle 7-1: Evaluierungsmethoden zur Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (vgl. Kapitel 3)

Eigenschaft	Anforderung [HOH-2014, S. 85]	Evaluierung
Marker Erkennbarkeit	99,73 %	Experimentell
Richtigkeit	± 400 mm / $\pm 45^\circ$	Theoretisch
Präzision	3σ	Experimentell
Auflösung	<100 mm	Experimentell
Frequenz		Experimentell
Latenz	<0,5 s	Experimentell
Maximale Reichweite	<10 m	Theoretisch

Für die Analyse des Lokalisierungssystems anhand praxisnaher Versuche werden zwei wesentliche Schritte durchgeführt:

1. Eine detaillierte Untersuchung des Verhaltens der jeweiligen evolutionären Teilschritte in der Entwicklung erfolgt anhand von Bildaufnahmen mit dem Labormuster. Auf Basis der Ergebnisse werden geeignete Verfahren für das Funktionsmuster ausgewählt.
2. Mit dem Funktionsmuster wird im Anschluss in umfangreichen Versuchen und Berechnungen die Erfüllung der Anforderungen an eine palettengenaue Lokalisierung für Flurförderzeuge [GÜN-2007] nachgewiesen.

7.1 Versuchsaufbau

Zunächst werden mit dem Entwicklungssystem Aufnahmen typischer Fahrten eines Gabelstaplers erstellt und die *Posenschätzung* offline anhand der gespeicherten Aufnahmen durchgeführt. Dies bezweckt eine detaillierte und reproduzierbare Analyse der entwickelten Algorithmen und soll Aufschluss darüber geben, welche Ansätze hilfreich sind bzw. welche konkreten Fehler auftreten können. Die aufgezeichneten Bilddaten werden der Forschergemeinschaft zur Verfügung gestellt und können später auch von anderen Entwicklern zum Test eigener Verfahren verwendet werden. Dadurch sind künftig die (Weiter-)Entwicklung und der Test in praxisnaher Umgebung auch ohne eigenes Testumfeld möglich. Aufgrund der geringen Ressourcen des Funktionsmusters ist eine verlustfreie Aufnahme längerer Bildsequenzen nicht möglich, weshalb dieser Schritt mit dem Labormuster durchgeführt wird.

7.1.1 Untersuchung der Algorithmen anhand von Sensoraufzeichnungen

Die Versuchsfahrten in dieser Kategorie entsprechen den von Jung et al. vorgestellten Experimenten und bestehen aus drei verschiedenen Versuchstypen [JUN-2015]. Zwei der Versuche beinhalten dynamische Szenarien, während der dritte auf das Verhalten des Systems bei Stillstand des Fahrzeugs und damit in erster Linie auf das Rauschverhalten des Sensors abzielt. Alle Versuche werden bei Tageslicht mit aktivierter Hallenbeleuchtung durchgeführt und ca. 25 Bilder pro Sekunde aufgenommen sowie unkomprimiert gespeichert.

1. Zur Untersuchung der *Markervorhersage* während der Fahrt wird eine Strecke in Form einer Acht gefahren (Abbildung 7-1a), welche aus zwei linearen Teilstrecken und jeweils einer Links- und Rechtskurve besteht und somit alle Basiselemente eines Fahrmanövers abdeckt. Das lineare Teilstück ist mindestens so lang gewählt, dass das Fahrzeug auf maximale Geschwindigkeit beschleunigt werden kann und möglichst viel Fahrt in der anschließenden Kurve beibehält. Ziel ist es die Fahreigenschaften des Fahrzeugs auszureizen und somit aussagekräftige Ergebnisse für in der Praxis übliche Fahrweisen zu erzielen.

- Dieser Versuch wird zehn Mal wiederholt und liefert insgesamt 4984 Bilder, ca. 500 Aufnahmen je Wiederholung. Eine einzelne Fahrt dauert etwa 20 Sekunden.
2. Um das Lokalisierungssystem in tatsächlichen Fahrmanövern zu überprüfen wird ein Doppelspiel durchgeführt [JUN-2015]. Eine leere Europalette wird im Wareneingang aufgenommen und in ein Hochregal eingelagert. Aus einem anderen Hochregal wird unmittelbar danach eine andere leere Europalette abgeholt und auf einer Rollenbahn abgesetzt (vgl. Abbildung 7-1b). Auch hier wird, wo möglich, eine sehr zügige und damit praxisnahe Fahrweise angestrebt. Dieser Versuch wird fünf Mal wiederholt. Es werden insgesamt 9321 Einzelbilder abgespeichert, ca. 1860 für jede ungefähr 75 Sekunden dauernde Wiederholung.
 3. Um den Einfluss des Bildrauschens auf die *Posenschätzung* abzuschätzen, werden zusätzlich Aufnahmen mit einem einzigen Marker durchgeführt. Das Fahrzeug wird dabei so positioniert, dass der Marker an neun verschiedenen Positionen, die in einem regelmäßigen 3x3 Gitter (siehe Abbildung 7-1c) angeordnet sind, im Bild erscheint. Die unterschiedlichen Positionen im Bild sollen alle denkbaren Positionen, in welche der Marker abgebildet werden kann, repräsentativ abdecken. Des Weiteren soll überprüft werden, ob bereits infolge des Bildrauschens Messfehler bei der Bestimmung des Gierwinkels auftreten können, die einen signifikanten Einfluss auf die gesamte Pose haben (siehe Abschnitt 6.2.1). Für jede der neun Positionen wird eine Bildsequenz aus 100 Bildern aufgenommen, was einem Zeitraum von etwa vier Sekunden entspricht.

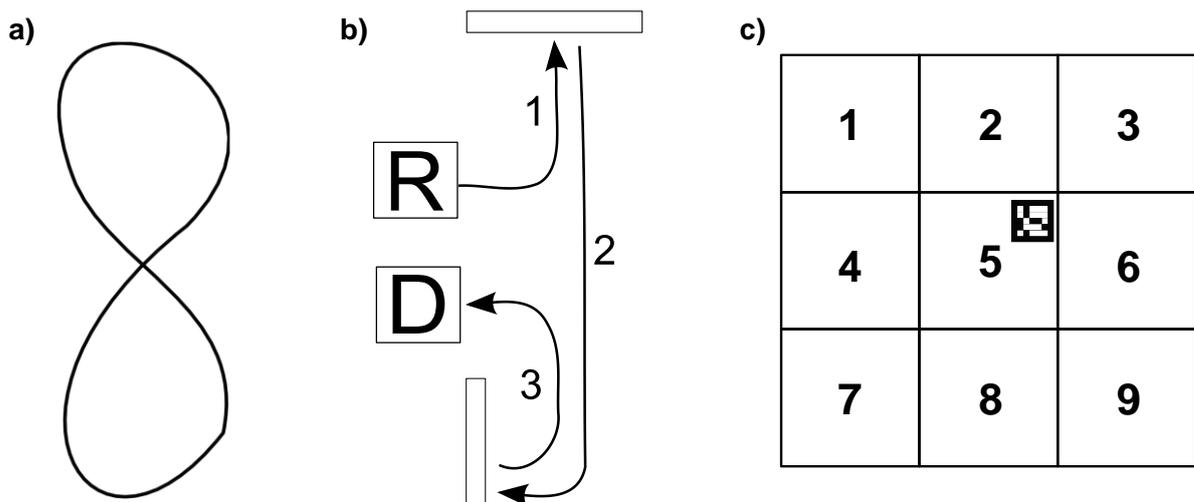


Abbildung 7-1: Schema der Fahrstrecken in den praktischen Versuchen a) 8-Kurs, b) Doppelspiel und statische Positionen zur Messung des Bildrauschens (nach [JUN-2015])

Zur Analyse der Effekte einzelner Maßnahmen werden die unterschiedlichen Verfahren jeweils auf den erhaltenen Datenbestand angewandt. Tabelle 7-2 beschreibt hierzu die Details der jeweiligen Verfahren, während Abbildung 7-2 die Zusammenhänge zwischen den Verfahren visualisiert. Die grün gekennzeichneten Schritte 1-9 stellen jeweils eine Evolutionsstufe in der Entwicklung der Algorithmen dar. Jeder dieser Schritte entspricht dabei einer Iterationsschleife zwischen *deskriptiver Studie I* und *präskriptiver Studie* in der angewandten Entwicklungsmethodik DRM [BLE-2009, S. 15]. Der Übersichtlichkeit halber werden diese Schritte jedoch erst im Rahmen der Evaluierung beschrieben. Die einzelnen Algorithmen werden in Kapitel 5 erläutert. Ab Schritt 10 (gelbe Färbung) wird die Eignung anderer Posenschätzverfahren in verschiedenen Konfigurationen untersucht, um bestehende Ansätze mit den neu entwickelten Verfahren zu vergleichen. Dabei geht es im Wesentlichen um die Eignung herkömmlicher Verfahren für schlechte und gute Eingabewerte sowie die Wirkung der *Markervorhersage*. Anhand der Auswertung dieser Versuche werden die geeigneten Verfahren bestimmt und auf die Zielplattform übertragen. In separaten Versuchen muss sich das Gesamtsystem dort umfangreich bewähren.

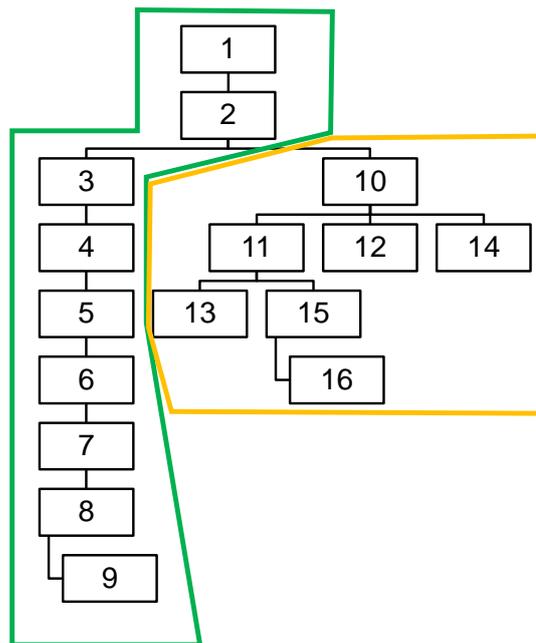


Abbildung 7-2: Zusammenhang der Algorithmenvariationen

Tabelle 7-2: Reihenfolge und angewandte Verfahren in den jeweiligen Versuchsläufen

Nr.	Verfahren	Zweck
1	Suche im gesamten Bild, subpixelgenaue Bestimmung der Ecken mit cornerSubPix [BRA-2008, S. 319ff.]	Vergleich mit Ergebnissen Hohenstein [HOH-2014, S. 157ff.]/Staplerauge [GÜN-2014a, S. 110ff.]/Aurco (Tabelle 4-4)
2	Wie 1, jedoch mit Kantenverfeinerung von Stricker et al. [STR-1999]	Wahl geeigneter Kantenverfeinerung
3	Wie 2, jedoch Suche von Zusammenhangskomponenten statt findContours [BRA-2008, S. 234ff.]	Wahl eines Suchverfahrens im gesamten Bild
4	Wie 3, jedoch um <i>Markervorhersage</i> erweitert	Einordnung Zwischenstand [JUN-2015]
5	Wie 4, zusätzlich Rückkopplung der Vorhersage in die <i>Posenschätzung</i>	Überprüfung, ob Rückkopplung sinnvoll
6	Wie 5, ergänzt um Eliminierung der Rückkopplung	Überprüfung, ob nachträgliche Eliminierung der Rückkopplung sinnvoll
7	Wie 6, Markerextraktion wird um Kantenverfeinerung ergänzt [STR-1999]	Überprüfung Nutzen der Markerextraktion durch Kantenverfeinerung
8	Wie 7, Markerextraktion wird um Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld (vgl. Abbildung 5-5) erweitert	Überprüfung des Effekts der zusätzlichen Suche
9	Wie 8, jedoch mit Kalman-Filter [KAL-1960] statt vektorbasierter Vorhersage	Vor- und Nachteile des Kalman-Filters im Anwendungsfall
10	Wie 2, aber Differenz der Seitenlängen eines Markers im Bild <20 % und Standardposenschätzverfahren aus OpenCV 2.4 [ITS-2014]	Prinzipielle Eignung anderer Posenschätzverfahren
11	Wie 10, mit Posenschätzverfahren RPP [SCH-2006]	
12	Wie 10, zusätzlich <i>Markervorhersage</i>	Trade-off <i>Marker Erkennbarkeit</i> vs. Präzision bei üblichen Posenschätzverfahren aufzeigen
13	Wie 11, zusätzlich <i>Markervorhersage</i>	
14	Wie 10, mit dynamisch bestimmter z-Koordinate	Überlinearen Messfehler bei der Bestimmung der z-Koordinate veranschaulichen
15	Wie 11, mit dynamisch bestimmter z-Koordinate	
16	Wie 15, mit Posenschätzverfahren PPP [HOH-2014, S. 124f.]	

7.1.2 Fähigkeiten der Zielplattform in praxisnahen Versuchen

In den praxisnahen Versuchen soll die Eignung des fertigen Lokalisierungssystems auf Flurförderzeugen unter Umgebungsbedingungen untersucht werden, die in der Praxis relevant sind. Dazu wird neben den Versuchsaufbauten in manchen Versu-

chen auch die Fahrgeschwindigkeit des Gabelstaplers in drei Stufen (langsam, mittel, maximal) variiert, um den Einfluss optischer Effekte, wie z. B. schnelle Hell-Dunkel Wechsel, Bewegungsunschärfe und Rolling-Shutter-Effekt, zu untersuchen sowie starke Beschleunigungen und Verzögerungen zu testen. Zudem werden einige Fahrversuche bei unterschiedlichen Lichtbedingungen wiederholt, die für die Praxis relevant sind und daher von einem Lokalisierungssystem an Flurförderzeugen bewältigt werden müssen:

1. bei Tageslicht und aktivierter Hallenbeleuchtung („Tag+Licht“),
2. bei Tageslicht ohne zusätzliche Hallenbeleuchtung („Tag“),
3. bei Dunkelheit mit aktivierter Hallenbeleuchtung („Nacht“) und
4. bei Dunkelheit ohne Hallendeckenbeleuchtung, also nur geringer diffuser Beleuchtung.

Die in der Dunkelheit durchgeführten Versuche dienen dazu die Grenzen des entwickelten Lokalisierungssystems aufzuzeigen. Eine geringe diffuse Beleuchtung ist hier notwendig, um verwertbare Bildaufnahmen mit einer Kamera zu erzielen und den manuell bedienten Versuchsstapler sicher zu manövrieren.

Zusätzlich zu den bereits mit dem Labormuster durchgeführten Versuchsdurchläufen werden folgende Versuchsfahrten ausgewertet:

1. Eine reine Vorwärtsfahrt wird bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Lichtverhältnissen jeweils dreimal wiederholt. Analog wird bei dem bereits oben beschriebenen 8-Kurs verfahren.
2. Es werden zwei Europaletten [DIN EN 13698-1] mit der 1200 mm langen Seite unmittelbar nebeneinander gestellt. Der Stapler fährt nacheinander in die erste Palette und danach in die zweite Palette an der jeweils kurzen, 800 mm langen Seite ein. Anhand der Position des Staplers in der ersten und der zweiten Palette kann ermittelt werden, ob und wie gut die Paletten durch die *Posenschätzung* auseinander gehalten werden können. Dieser Versuch wird zehn Mal wiederholt.
3. Der Einfluss des Gewichts der Ladung auf Fahrzeugneigung bzw. die *Posenschätzung* wird mittels unterschiedlicher Gewichte ermittelt. Hierzu werden in einer ersten Versuchsreihe 100, 500, 1000, 1500 und 2000 kg schwere Gewichte von einem Gabelstapler aufgeladen, auf Verfahrenhöhe (30-50 cm) angehoben und die Positionen vor und nach dem Anheben der Gewichte gegenübergestellt. In einer zweiten Versuchsreihe wird die Ladung bei senkrechtem Hubmast auf die maximal mögliche bzw. zulässige Hubhöhe angehoben und dabei die Positionsänderung aufgezeichnet. Jede Kombination wird dabei

ebenfalls dreimal wiederholt. Der Gabelstapler verbleibt während dieser Versuchsreihe in derselben Pose.

Mit Ausnahme des Versuchs zur Bestimmung des Bildrauschens und der zwei Europaletten werden alle Versuche mit zwei unterschiedlichen Gabelstaplern durchgeführt, welche eine unterschiedliche Traglast, Hubhöhe und Beschleunigung aufweisen. Bei den Gabelstaplern handelt es sich um die am Lehrstuhl vorhandene Modelle EFG 110k [JUN-2014a] und EFG 220 [JUN-2017a] der Firma Jungheinrich. Da das Bildrauschen der Kamera und das Verhalten des Lokalisierungssystems bei Einfahrt in Paletten unabhängig vom Flurförderzeug sind, wird in diesen Versuchen nur auf das Modell EFG 110k zurückgegriffen.

7.1.3 Auswertungsmethodik

Um die Leistungsfähigkeit des Messsystems zu bewerten, werden verschiedene Kennzahlen berechnet. Tabelle 7-3 zeigt welche Kennziffern für welche Eigenschaften des Lokalisierungssystems verwendet werden.

Tabelle 7-3: Zuordnung der Kennzahlen zu Lokalisierungseigenschaften

Anforderung	Ausprägung (nach [HOH-2014, S. 85])	Evaluierungs-Methode
Marker Erkennbarkeit	99,73 %	Marker Erkennbarkeit, Anteil erkannter Marker, Vorhersagequalität
Präzision	$<\pm 300$ mm (3σ)	Differenz zwischen Markerrelationen im Bild und klassisch vermessenen Markerrelationen (siehe Abschnitt 4.3.5)
Auflösung	<100 mm	Schätzung über Mindestabstand zweier physisch unterschiedlicher Positionen
Latenz	$<0,5$ s	Zeit zwischen Bildaufnahme und Vorliegen des Auswertungsergebnisses.

Die *Marker Erkennbarkeit* kann einzeln für jeden Versuch, aber auch über alle Versuche gemeinsam betrachtet werden. Von Interesse ist hier auch der relative Vergleich zwischen unterschiedlichen Algorithmen unter Berücksichtigung der notwendigen Rechenleistung. So lassen sich Aufwand und Nutzen bewerten und Empfehlungen für die weitere Verbesserung der entwickelten Algorithmen ableiten.

Die experimentell bestimmte Präzision sollte zusammen mit der theoretisch bestimmten Richtigkeit die Genauigkeitsanforderung erfüllen. Anhand von Tabelle 6-1 wird daher die Richtigkeit für eine im Versuchsaufbau maximale Distanz von 10 m zwischen Kamera und Markern geschätzt und auf volle Dezimeter gerundet. Somit ergibt sich als Anforderung für die Präzision ein einzuhaltender Grenzwert von

300 mm. Die Genauigkeitsanforderung an die Orientierung des Gabelstaplers ist sehr gering (vgl. Tabelle 2-1). Ein derart hoher Fehler führt im gewählten Messaufbau automatisch zu einer sehr großen Abweichung der x- und y-Koordinaten (vgl. Abschnitt 6.2.1). Bereits bei einer Distanz von 2 m zum Marker in x- oder y-Richtung wird durch einen Messfehler des Gierwinkel von nur 12° die Genauigkeitsanforderung von ± 400 mm unerreichbar (siehe Formel (6-7)). Die Anforderung an die Präzision des Gierwinkels ist damit für den gewählten Messaufbau bereits in der Anforderung an die Präzision der verbliebenen Koordinaten enthalten.

Die Auflösung beschreibt den minimalen Abstand zweier physisch verschiedener Messpunkte, die das Messsystem als unterschiedliche Orte bestimmen kann [EUR-1998, S. 8f.] und wird nicht in einem separaten Versuch bestimmt. Stattdessen wird der Bereich, also eine Ober- und Untergrenze zwischen denen sich der konkrete Wert befinden muss, aus den übrigen Versuchen geschätzt. Die Obergrenze ergibt sich gemäß der obigen Definition als minimale Distanz zweier aufeinander folgender Messpunkte während eines Fahrversuchs. Um zu gewährleisten, dass es sich bei den Messpunkten um physisch verschiedene Orte handelt, wird der Wert bestimmt während der Gabelstapler in Bewegung ist. Die Untergrenze kann durch die geringste Distanz zweier Messpunkte bei stehendem Fahrzeug aus den Versuchen zum Messrauschen ermittelt werden.

Für die Ermittlung der Latenz werden die Daten zur Laufzeit der Algorithmen ausgewertet und die Latenz als der Zeitraum ermittelt, der ab der Bildaufnahme beginnt und mit der Bestimmung der Pose endet.

7.1.4 Ergebnisse

Tabelle 7-4: Übersicht über die Leistungsfähigkeit der einzelnen evolutionären Zwischenstufen

Nr.	Marker Erkennbarkeit [%]	Anzahl Marker	Präzision (3σ) [mm]/[$^\circ$]	Mittlere Laufzeit [ms]	Max Rauschen [mm]/[$^\circ$]
1	96,1	31700	120,8/1,60	10,4	18,5/0,41
2	96,3	32065	66,4/0,51	10,4	6,7/0,16
3	96,7	32257	66,9/0,53	6,10	6,7/0,16
4	100	35072	125,6/1,40	0,89	6,7/0,16
5	100	35019	68,0/0,42	0,87	10,1/0,24
6	100	35066	68,6/0,35	0,87	7,6/0,19
7	100	39083	69,1/0,35	0,36	7,6/0,19
8	100	39162	69,1/0,35	0,36	7,6/0,19
9	100	39170	68,0/0,34	0,39	4,8/0,15

Zunächst werden anhand der Aufnahmen des Labormusters geeignete Algorithmen ausgewählt und diese mit dem Funktionsmuster umfangreich getestet. Die Zuordnung der Versuchsnummer zu den entsprechenden Verfahren kann Tabelle 7-2 entnommen werden. Tabelle 7-4 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse für die Algorithmen 1-9.

Algorithmus 1 (Suche im gesamten Bild)

Mit der ArUco-Bibliothek [RAF-2017] wird eine *Marker Erkennbarkeit* von ca. 92,7 % erreicht (siehe Tabelle 4-4). Werden die Anforderungen an die Kandidaten bezüglich der Seitenverhältnisse reduziert (von max. 20 % Abweichung auf max. 50 % Abweichung), so steigt die *Marker Erkennbarkeit* auf 96,1 %. Der höhere Anteil lässt sich dadurch erklären, dass nur halb bzw. schlecht, aber prinzipiell erkannte Kandidaten akzeptiert und in der weiteren Verarbeitung bei der subpixelgenauen Eckenverfeinerung zu ihrer korrekten Form vervollständigt werden. Mit einer Präzision von 121 mm bei 3σ entspricht die Genauigkeit bereits der Anforderung, die *Marker Erkennbarkeit* reicht aber nicht aus.

Algorithmus 2 (1 + Kantenverfeinerung)

Die Kantenverfeinerung senkt die maximale Schwankung der Pose im statischen Fall bei den folgenden Algorithmen deutlich: auf 36 % (x,y) bzw. 39 % (Gierwinkel). Die Laufzeit verändert sich dabei nicht. Der Verfeinerungsprozess hat nur einen sehr geringen Anteil an der Gesamtlaufzeit (ca. 0,1 ms). Die Kantenverfeinerung erlaubt eine Vervollständigung nur zu geringen Teilen erkannter Marker und weist daher eine geringfügig höhere *Marker Erkennbarkeit* auf. Die Präzision sinkt durch genauere Messung auf 66 mm für die Translation und $0,5^\circ$ für die Rotation. Die gemessene Abweichung ist damit nahezu nur halb bzw. ein Drittel so hoch wie bei Einsatz von cornerSubPix und liegt damit bereits weit unter den Anforderungen von 400 mm bzw. 45° . Der Kantenverfeinerung wird folglich der Vorzug gegenüber einer Eckenverfeinerung gegeben.

Algorithmus 3 (2 + Zusammenhangskomponenten)

Der Algorithmus auf Basis der ZHK steigert die *Marker Erkennbarkeit* noch einmal geringfügig auf fast 97 % und benötigt dafür im Mittel nur etwa 60 % der Rechenzeit, was einem Speedup [GEN-1967] von 1,7 entspricht. Die Präzision bleibt dabei unverändert. Bei näherer Betrachtung stellt sich heraus, dass der Großteil des Speedups gegenüber ArUco [MUN-2014] hier durch eine effiziente Implementierung

erreicht wird. Durch Umstellung auf die in der Programmiersprache C geschriebenen OpenCV Methode `cvFindContours` [BRA-2008, S. 234ff.] statt ihrer C++ Version [OPE-2013], lassen sich vergleichbare Geschwindigkeiten erzielen. Der Speedup beträgt in diesem Fall nur 1,1. Die Vorteile des Algorithmus sind folglich auf dem Labormuster geringer als erwartet, aber dennoch vorhanden und werden daher genutzt.

Algorithmus 4 (3 + Markervorhersage)

Die *Markervorhersage* steigert die Zahl der erkannten Marker durch Bildverbesserung im lokalen Suchfenster um fast 9 %. Die *Marker Erkennbarkeit* beträgt nun 100 %. Es wird in jedem Bild mindestens ein Marker gefunden und die entsprechende Anforderung damit erfüllt. Die mittlere Laufzeit sinkt gleichzeitig fast auf 1/7 des Wertes ohne *Markervorhersage*, da nur ein kleines Suchfenster statt des kompletten Bildes ausgewertet werden muss [JUN-2015]. Infolge schlecht extrahierter Markereckpunkte bei vorher nicht gefundenen Markern wird die Präzision reduziert – der Wert erhöht sich um fast 90 % auf 126 mm und für den Gierwinkel um mehr als 160 %. Es werden eine akzeptable *Marker Erkennbarkeit* und sonst ähnliche Werte wie bei Algorithmus 1 erreicht. Die absoluten Werte der Präzision entsprechen den Anforderungen an die Genauigkeit. Die *Markervorhersage* wird wegen der hohen *Marker Erkennbarkeit* und des großen Geschwindigkeitsvorteils übernommen. Diese Vorteile überwiegen in der Praxis klar die Nachteile einer geringeren, aber ausreichenden Präzision.

Algorithmus 5 (4 + positive Rückkopplung)

Der Einsatz der positiven Rückkopplung steigert die Präzision wieder auf das bereits vorher erreichte Niveau (Algorithmus 2) und vereint damit die Vorteile der *Markervorhersage*, also hohe *Marker Erkennbarkeit* bei geringer Laufzeit, mit der hohen Präzision der Vollbildsuche. Ein Nachteil ist die ca. 50% höhere Schwankung der Messwerte in statischen Szenen (vgl. Abschnitt 5.1.4). Die Schwankungen sind jedoch absolut gesehen in allen Versuchen gering und daher nur von nachrangiger Bedeutung für die Praxis.

Algorithmus 6 (5 + Eliminierung der Rückkopplung)

Die Eliminierung der Rückkopplung senkt diese Schwankungen wieder. Das vorherige Niveau ohne Rückkopplung (Algorithmus 2) wird allerdings nicht vollständig erreicht. Die Leistungsfähigkeit bezüglich der übrigen Kennwerte bleibt nahezu gleich. Die nachrangige, aber dennoch vorhandene Verbesserung ohne Mehrkosten wird

daher beibehalten. Eine Implementierung dieser Maßnahme besteht aus einer iterativen Wiederholung der effizienten *Posenschätzung* und ist sowohl leicht umzusetzen als auch schnell in der Ausführung.

Algorithmus 7 (6 + Markerextraktion durch Kantenverfeinerung)

Die Markerextraktion durch Kantenverfeinerung [STR-1999] steigert die Zahl der gefundenen Marker um weitere 11 % und senkt die Laufzeit gleichzeitig auf ca. 40 % des vorherigen Wertes. Da bezüglich der anderen Kennwerte keine Nachteile entstehen, ist diese Maßnahme sehr hilfreich. Die Geschwindigkeit verbessert sich durch die stark beschleunigte Suche. Die höhere Zahl der erkannten Marker ist hingegen ein Resultat des geänderten Ansatzes: auch Marker bei denen die Suche nach Kanten scheitert, etwa da die Marker teilweise verdeckt sind, teilweise außerhalb des Bildes liegen oder aufgrund der Lichtverhältnisse schlecht abgebildet werden, weisen an den sichtbaren Kanten in der Regel einen Gradienten auf, der gemessen werden kann, aber nicht ausreicht, um ihn als Kante zu klassifizieren. Marker, die teilweise außerhalb liegen, werden vervollständigt und aus den im Bild liegenden Daten geschätzt, was den bisher betrachteten Verfahren nicht gelingt, da diese alle vier Kanten zur Markerextraktion benötigen. Fehler bei der Verfeinerung, die durch teilweise Verdeckungen oder Überbelichtung entstehen, haben oft nur einen geringen Einfluss auf die extrahierten Markerkanten. Die Präzision bleibt daher unverändert.

Algorithmus 8 (7 + Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld)

Die zusätzliche Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld (siehe Abbildung 5-5) hat hingegen nur einen geringen Einfluss auf die Marker Erkennbarkeit. Die Zahl der gefundenen Marker steigt durch diese Maßnahme nur minimal. Die Rechenleistung bleibt jedoch in etwa gleich. Hier gibt es zwei gegenteilige Effekte. Die zusätzliche Suche muss auch ausgeführt werden, wenn gar kein Marker in der jeweils betrachteten Region gefunden werden kann und erhöht so zunächst die Gesamtlaufzeit durch den zusätzlichen, aber erfolglosen Verarbeitungsschritt. Allerdings ist bei Erfolg der lokalen Suche eine Suche auf Basis der Zusammenhangskomponenten in der Region of Interest (ROI) oder im gesamten Bild nicht mehr notwendig und dies senkt die Kosten für die Suche wieder. Die Markerextraktion durch Kantenverfeinerung ist im Vergleich dazu so erfolgreich, dass nur wenige Daten zu diesem Verarbeitungsschritt vorliegen und daher die Aussagekraft der Analyse gering ist. Dennoch scheint die Suche zumindest in manchen Fällen vorteilhaft.

Algorithmus 9 (8 + Kalman-Filter)

Der Einsatz eines Kalman-Filters senkt das Rauschen in den Posen weiter. Der zusätzliche Rechenaufwand ist mit ca. 20 μ s nicht relevant und ist großteils auf die ineffiziente Umsetzung zurückzuführen. Obwohl die Messgrößen (x,y,α) in diesem Fall im Kalman-Filter unabhängig voneinander konfiguriert sind, wird eine gemeinsame Matrix für alle Messgrößen verwendet, statt einzelne, für jede Größe separate Matrizen zu betrachten. Dieses Vorgehen soll eine Sensorfusion mit weiteren Sensoren erleichtern.

In Abbildung 7-3 sind die Ergebnisse für die Algorithmen 1-9 zusammengefasst. Um die unterschiedlichen Wertebereiche und Einheiten in einem Diagramm darstellen und miteinander vergleichen zu können, werden die Daten aus Tabelle 7-4 bezüglich jeder Anforderung auf das Intervall [Min/Max; 1] normiert, wobei 1 stets dem besten erreichten Wert entspricht. Anhand des Verlaufs lässt sich erkennen, welche Maßnahmen auf welche Leistung einen Einfluss haben. Der besseren Sichtbarkeit der Zusammenhänge halber werden die einzelnen, zu jeweils einer Anforderung gehörenden Punkte miteinander verbunden, obwohl es sich ausdrücklich nicht um eine kontinuierliche Funktion handelt. Anhand dieser Kurven lassen sich die wesentlichen Zusammenhänge erkennen.

1. Eine ausreichende *Marker Erkennbarkeit* wird nur mit *Markervorhersage* erreicht (ab Algorithmus 4).
2. Die Zahl der erkannten Marker wird durch die *Markervorhersage* und die Markerextraktion durch Kantenverfeinerung wesentlich gesteigert (Algorithmus 4 und 7).
3. Der Zielkonflikt zwischen erkannten Markern und Präzision existiert tatsächlich und kann durch die positive Rückkopplung in der Praxis aufgelöst werden (Algorithmen 3 bis 5).
4. Die Laufzeit sinkt sehr stark durch Einsatz der *Markervorhersage* und wird durch die Markerextraktion durch Kantenverfeinerung weiter reduziert (Algorithmen 4 und 7).
5. Das Messrauschen wird durch die Verfeinerung der Kanten statt der Eckpunkte erheblich reduziert (Algorithmus 2). Die positive Rückkopplung steigert das Messrauschen wieder (Algorithmus 5) und alle folgenden Maßnahmen mildern diesen Effekt wieder ab. Erst mit Kalman-Filter wird die beste Bewertung erreicht (Algorithmus 9).
6. Das Rauschen der x,y -Werte korreliert mit dem Rauschen des Gierwinkels.

Summiert man die normierten Werte bezüglich eines Algorithmus auf, so ergibt sich für alle sieben Eigenschaften ein Wert im Intervall [0; 7]. Algorithmus 9 ist mit 6,98 deutlich der Leistungsfähigste und erreicht in fünf der sieben Eigenschaften (mit) den besten Wert (siehe Abbildung 7-4). Nur bei der Präzision ist er <2 mm schlechter und bei der Laufzeit 30 μ s langsamer als das bezüglich dieser beiden Kriterien jeweils beste Verfahren.

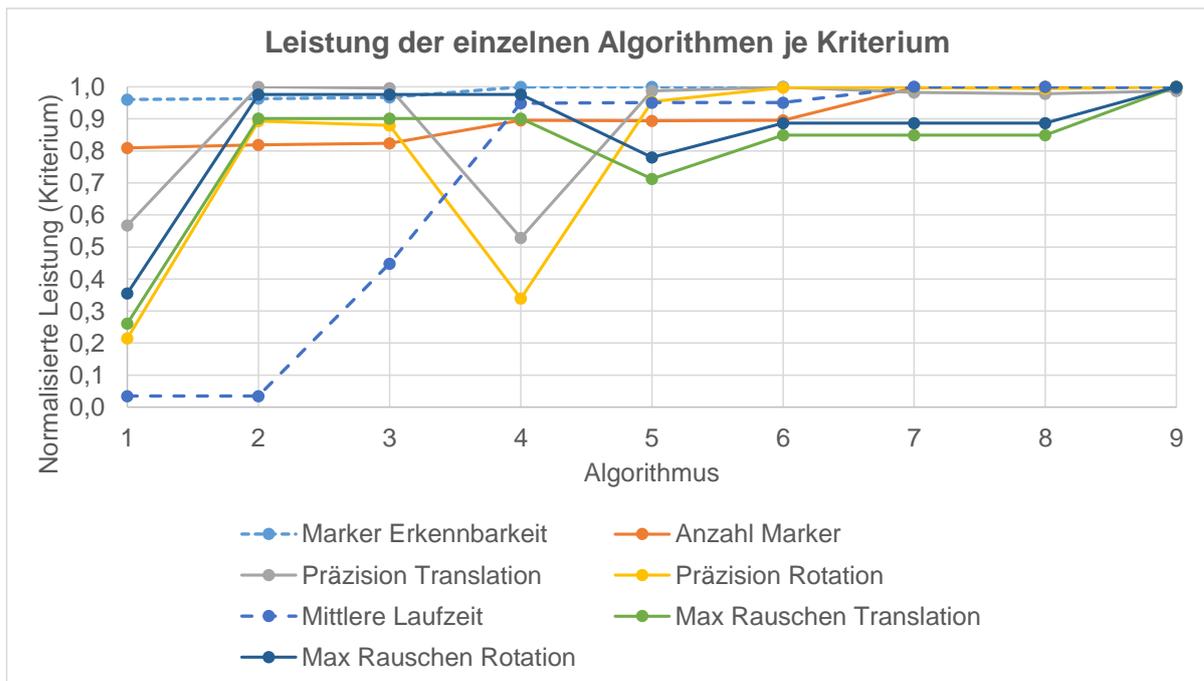


Abbildung 7-3: Normierte, individuelle Leistung der Algorithmen

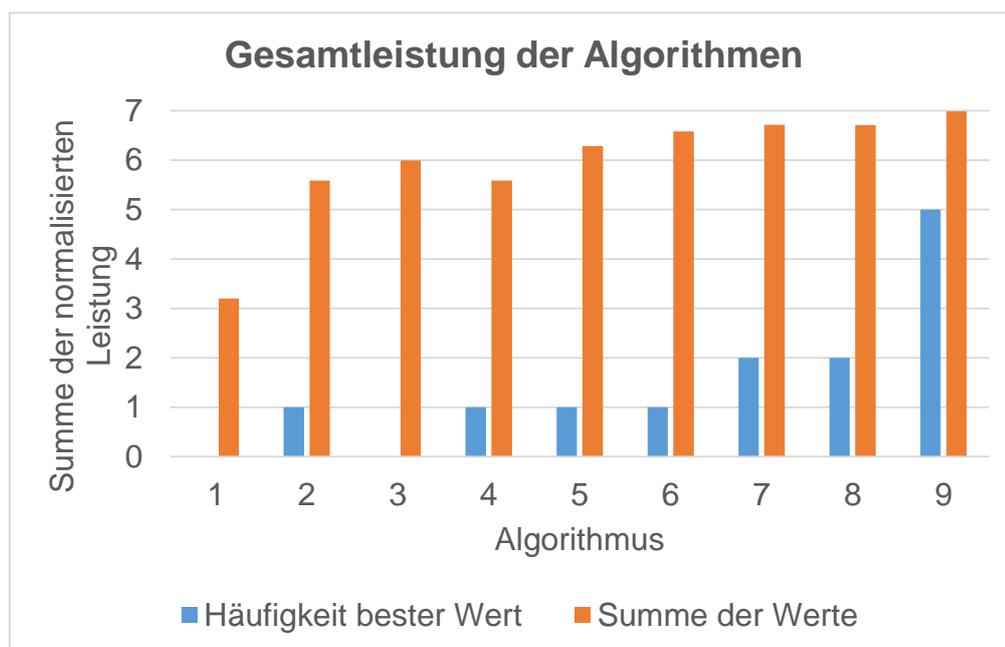


Abbildung 7-4: Normierte Gesamtleistung der Algorithmen

Nachdem die Wahl des finalen Algorithmus motiviert ist, werden die Eigenschaften und Potentiale dieses Verfahrens näher beleuchtet:

- Die *Marker Erkennbarkeit* beträgt 100 % und ist damit optimal. Für Multi-Marker Strategien [HOH-2014, S. 217] ist zusätzlich relevant, wie viele Marker je Bild oder insgesamt erkannt werden können. Es werden 39170 Marker erkannt, davon laut *Markervorhersage* 35365 vollständig. Bei 2932 Markern liegen drei Punkte und bei 873 Markern nur zwei Punkte direkt im Bild. Marker, bei denen (voraussichtlich) nur ein Punkt im Bild liegt, werden verworfen, da in diesem Fall keine zuverlässige Messung möglich ist. Liegt ein Marker nicht vollständig im Bild, ist seine Extraktion schwierig und es besteht zusätzlich die Gefahr falsch-positiver Messungen. Oft werden Kandidaten verworfen, da die Bestimmung der Marker ID über den Bildrand hinaus nicht möglich ist. Die dennoch gefundenen Marker sind zu einem Großteil im Bild zu sehen und ragen nur in geringem Umfang über den Bildrand hinaus.
- Gründe für nicht erkannte Marker werden im Folgenden nur anhand von Markern betrachtet, die vollständig innerhalb des Bildbereiches liegen. Nach Auswertung der *Markervorhersage* befinden sich 564 zusätzliche Marker im Bild, es besteht unter den vollständig im Bild befindlichen Markern ein Verbesserungspotential von höchstens 1,4 %. Diese Marker werden aus unterschiedlichen Gründen nicht gefunden oder ihre Kandidaten verworfen.
 - 438 Marker sind teilweise oder komplett durch Deckenelemente verdeckt. Davon sind 184 vollständig verdeckt und damit grundsätzlich nicht erkennbar. Bei 111 Markern ist nur eine Ecke zu sehen und eine Messung, falls der Marker erkannt wird, stark fehlerbehaftet. Von 74 Markern sind zwei Ecken im Bild erkennbar. Oft ist der Marker zu 2/3 oder mehr verdeckt und es ragen nur seine Ecken heraus. Drei Ecken sind bei 69 Markern sichtbar. Meist ragen zwei Ecken davon minimal hinter dem verdeckenden Objekt hervor. Legt man statt der Eckpunkte die Zahl der vollständig sichtbaren Kanten zugrunde, so sind bei 295 Markern alle vier Kanten (teilweise) verdeckt, für 67 Marker ist nur eine Kante vollständig zu sehen und bei den übrigen 76 Markern sind zwei Kanten komplett sichtbar.
 - 113 Marker sind im Bild überbelichtet und zehn unterbelichtet. Bei zwei Markern ist beides der Fall – der Dynamikumfang der Kamera reicht nicht aus, um den Marker hinreichend abzubilden.
 - Bei einem Marker konnte die Ursache nicht geklärt werden.
 - Exemplarische Abbildungen nicht erkannter Marker werden in Anhang A dargestellt.

Folglich ist eine Steigerung der Anzahl erkannter Marker schwierig zu realisieren. Falls für eine hinreichend präzise *Posenschätzung* mindestens zwei Eckpunkte gemessen werden müssen, können maximal zusätzlich 269 Marker ausgewertet werden. Das Potential schrumpft damit auf 0,7 % zusammen. Etwa 45 % dieser Marker können durch einen besseren Algorithmus zur Anpassung der Belichtungszeit gefunden werden. Die Übrigen können ggf. durch ein Verfahren erkannt werden, welches mit teilweisen Verdeckungen besonders gut zurechtkommt. In diesen Fällen ist eine Messung der verdeckten Eckpunkte nicht exakt möglich, die Präzision kann sich durch diese Maßnahme verschlechtern.

- Die konkrete Präzision der Einzelmessung beträgt somit $67,9 \text{ mm}/\sqrt{2} = 48,1 \text{ mm}$ bzw. $0,3^\circ/\sqrt{2} = 0,24^\circ$ (siehe Abschnitt 4.3.5). Sofern die Werte normalverteilt sind, beträgt $\sigma = 16 \text{ mm}$ bzw. $0,08^\circ$. Für die Betrachtung der Einzelmessung wird stets von einer Normalverteilung der Messwerte ausgegangen.

Das finale, in dieser Arbeit entwickelte Lokalisierungsverfahren erfüllt alle in Kapitel 3 gestellten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines Lokalisierungssystems für Flurförderzeuge. Die Anforderungen werden deutlich übertroffen (siehe Tabelle 7-5). Auch unter erheblich schwierigeren Bedingungen erscheint eine Einhaltung der Anforderungen daher plausibel. Die vergleichsweise hohe Latenz von etwa 117 ms stellt den schlimmsten Fall dar und entsteht durch eine Verzögerung beim Abruf der Bilder. Die maximale Zeit, die zur Bildauswertung benötigt wird, beträgt 7 ms. Im Mittel sind es weniger als 0,4 ms.

Tabelle 7-5: Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (Labormuster)

Anforderung	Gefordert	Erreicht
Marker Erkennbarkeit	99,73 %	100 %
Präzision	$<\pm 300 \text{ mm}$ (3σ)	48,1 mm/0,24°
Auflösung	$<100 \text{ mm}$	$0,1 \text{ mm} < x < 3 \text{ mm}$ bzw. $<0,01^\circ$
Latenz	$<0,5 \text{ s}$	$<0,117 \text{ s}$ (maximale Auswertungsdauer $<0,007 \text{ s}$)

Um die erzielte Leistungsfähigkeit in den Kontext anderer Algorithmen einzuordnen, folgt ein Vergleich mit Algorithmen aus dem Stand der Technik (siehe Tabelle 7-6). Dies dient dazu festzustellen, in wie weit die bisher verfügbaren Algorithmen die gestellten Anforderungen erfüllen können. Von Interesse sind hier besonders die Präzision sowie die Eignung für die *Markervorhersage* und der Einfluss auf die *Marker Erkennbarkeit*. Ohne *Markervorhersage* ist hingegen die *Marker Erkennbarkeit* identisch zu den bereits untersuchten Zwischenstufen 1 und 2 in Tabelle 7-4, da dort

Markerextraktion und *Posenschätzung* voneinander entkoppelt sind. Folgende Eigenschaften lassen sich aus den Versuchen ableiten.

- Wird die z-Koordinate statisch gewählt, fallen die Folgefehler durch die fehlerhafte Bestimmung der z-Koordinate sehr gering aus und alle getesteten Posenschätzverfahren liefern eine akzeptable Präzision (<70 mm in der Einzelmessung). Die *Marker Erkennbarkeit* ist in allen Fällen zu gering.
- Wird hingegen die *Markervorhersage* hinzugenommen, so versagen die 6DoF-Posenschätzverfahren deutlich. Die Präzision der Einzelmessung liegt bei >1,2 m, je nach Verfahren, teils deutlich darüber. In der Folge erreicht auch die *Marker Erkennbarkeit* aufgrund der schlechten Vorhersagequalität nicht die gewünschte Güte, da sich die Marker nicht in der (fehlerhaft) vorhergesagten ROI befinden. Der große Fehler ist in diesem Fall auf die geringe Robustheit der 6DoF-*Posenschätzung* gegenüber unpräziser Extraktion zurückzuführen. Insbesondere der Fehler im Gierwinkel von teils mehr als 20° verursacht starke Verschiebungen in der x,y-Ebene bei der Invertierung der Pose [BAU-2007, S. 83] (vgl. Abschnitt 6.2.1). Dies ist jedoch bei 6 Freiheitsgraden kein Bug, sondern ein Feature, da es sich bei „verrauschten“ Daten auch um korrekte, teils deutlich verschiedene Messungen handeln kann [SCH-2006]. Ein möglicher Ansatz diesem Problem zu begegnen, ist der Einsatz von Bundle-Adjustment-Verfahren [TRI-2000, S. 298ff.], die allerdings mit hohem Berechnungsaufwand einhergehen [TRI-2000, S. 331]. Die Begrenzung der Freiheitsgrade erscheint bei geringen Ressourcen deutlich attraktiver.
- Wird auf die *Markervorhersage* verzichtet und die Höhe dynamisch bestimmt, scheitern die klassischen Posenschätzverfahren an der Anforderung zur Genauigkeit der Position in der x,y-Ebene sehr deutlich. Es wird bezogen auf die Einzelmessung eine Präzision von >1,2 m erreicht, die damit mehr als dreimal so hoch ist wie angestrebt wird. Nur ca. 45 % der Messwerte für das Standardverfahren in OpenCV [ITS-2014] liegen dann unterhalb der Anforderung von 400 mm für eine Einzelmessung. Mit der eckenbasierten, subpixelgenauen Extraktion statt der Kantenverfeinerung fällt der Fehler noch höher aus. Verursacht werden die Abweichungen durch falsch bestimmte Distanzwerte, die bis zu 3 m vom richtigen Wert abweichen und teils eine Position des Gabelstaplers unterhalb des Hallenbodens suggerieren. Hier wird der überlineare Distanzfehler [BAU-2007, S. 84] deutlich sichtbar. Die im Vergleich zu üblichen AR-Szenarien [BAU-2007, S. 84] hohe Distanz zu den Markern und daraus resultierende kleine Abbildung im Bild erschwert die Distanzbestimmung im 6DoF-Fall erheblich. Wenngleich negative Werte nicht plausibel sind und daher verworfen werden können, ist dies eine ähnliche Maßnahme wie die statische Bestimmung der Anbringungshöhe [JUN-2015], die aber den Fehler

nur nach unten auf die Anbringungshöhe des Sensors begrenzt. Eine statische Bestimmung der z-Koordinate ist aufgrund der erheblich besseren Präzision vorzuziehen und im Anwendungsfall von großer Bedeutung.

- Das PPP-Verfahren zur *Posenschätzung* [HOH-2014, S. 124f.] ist ein Vorläufer der in dieser Arbeit weiterentwickelten Verfahren. Bisher wurde die Präzision dieses Verfahrens nicht zuverlässig bestimmt [HOH-2014, S. 168f.]. Anhand der hier entwickelten Evaluierungsmethode ist dies jedoch ebenso möglich, wie für die neu vorgestellten Verfahren. Die Präzision beträgt ca. 145 mm (x,y) und $0,56^\circ$ (Gierwinkel) für die Doppelmessung bzw. ca. 100 mm (x,y) und $0,4^\circ$ (Gierwinkel) für die Einzelmessung. Zusammen mit dem ebenfalls vorhandenen systematischen Fehler erfüllt dieses Verfahren die Anforderung an die Genauigkeit. Die in der Praxis benötigte sehr hohe *Marker Erkennbarkeit* wird von keinem der getesteten Verfahren ohne *Markervorhersage* erreicht. Wesentliche Schwäche dieses Ansatzes ist die ungenaue Bestimmung der z-Koordinate. Diese schwankt in den Messungen um bis zu 1000 mm. Große Abweichungen sind jedoch sehr selten - nur 22 Messwerte weichen um mehr als 200 mm vom korrekten Wert ab. Der daraus resultierende Folgefehler bei der *Posenschätzung* ist maßgeblich für die geringere Präzision verantwortlich (vgl. Abschnitt 6.1.2), fällt aber deutlich geringer als bei den 6DoF-Posenschätzverfahren aus. Die Messung der z-Koordinate im Bild birgt jedoch nicht nur Nachteile, sondern kann zusätzlich genutzt werden, um die Hubhöhe zu schätzen, z. B. wenn die Kamera am Gabelträger angebracht wird. Dies ermöglicht die von Hohenstein geforderte Funktionsintegration aus Hubhöhenbestimmung und Flurförderzeuglokalisierung [HOH-2014, S. 84], erfordert aber eine robuste Hardware und Anbringung am Fahrzeugendeffektor. Diese Anbringung auf Basis kostengünstiger Module umzusetzen, erscheint aufgrund der Gefahr direkter Stoßeinwirkungen im Bereich des Gabelträgers am Gabelstapler praxisfern und wird nicht weiter betrachtet. Möglicherweise eignet sich dieser Ansatz zur Positions- und Hubhöhenbestimmung an einem Elektrohandhubwagen („Ameise“).
- Die Ursache für die hohe Laufzeit des RPP-Algorithmus wird nicht ermittelt, da eine Eignung des Algorithmus aus Gründen der *Marker Erkennbarkeit* bzw. Präzision (s. u.) nicht gegeben ist. Vermutlich ist die verwendete Implementierung [NGH-2012] in diesem Anwendungsfall ineffizient bzw. führt sehr viele Iterationen bis zur Konvergenz der Pose aus [SCH-2006].

Somit sind aus dem Stand der Technik mit Ausnahme von PPP [HOH-2014, S. 124f.] keine der getesteten Posenschätzverfahren unter realistischen Bedingungen in der Lage, die Genauigkeit und *Marker Erkennbarkeit*, welche für eine genaue und lückenlose Nachverfolgung der Ladeeinheiten im Lager unbedingt notwendig sind,

gleichzeitig zu erfüllen. Das System von Hohenstein [HOH-2014, S. 147ff.] ermöglicht zwar eine hinreichende Genauigkeit, scheitert allerdings an einer für die Praxis zu geringen *Marker Erkennbarkeit*.

Das mit diesem Lokalisierungsansatz verwandte System der Firma TotalTrax [TOT-2014] löst das Problem geringer *Marker Erkennbarkeit* hingegen durch Einsatz einer zusätzlichen Beleuchtung und einer speziellen Reflektionsschicht auf der Markeroberfläche. Dies steigert den Kontrast der Markerbestandteile im Bild erheblich und erleichtert die Markerextraktion im gesamten Bild. Aufgrund der besseren Bilddaten wirkt sich die Beleuchtung vermutlich auch positiv auf die Genauigkeit der *Posenschätzung* aus. Wesentliche Nachteile dieser Maßnahmen sind die zusätzlichen Kosten für die Beleuchtung und die Markerbeschichtung. Positiver Nebeneffekt einer Beleuchtung am kamerabasierten Lokalisierungssystem ist eine (gewisse) Unabhängigkeit vom Umgebungslicht, etwa für den Einsatz an fahrerlosen Transportsystemen in unbeleuchteten Lagerhallen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren erfüllt die Anforderungen hingegen auch ohne zusätzliche Beleuchtung sehr gut. Die detaillierte Analyse zeigt, dass die vorgeschlagenen Verbesserungsansätze alle ihre Berechtigung haben und in Kombination miteinander besonders wirksam sind.

Tabelle 7-6: Lokalisierungsleistung des Stands der Technik

Nr.	Marker Erkennbarkeit [%]	Anzahl Marker	Präzision (3σ) [mm]/[°]	Mittlere Laufzeit [ms]
10	96,7	32229	86,8/2,88	6,5
11	96,7	32229	89,6/3,02	25,8
12	98,7	36847	1905/21,5	1,0
13	98,7	37152	1762/21,4	22,9
14	95,5	29886	1730/4,86	6,5
15	95,5	29886	1730/4,11	25,8
16	95,5	29886	145,6/0,56	5,8

7.2 Leistungsfähigkeit der Lokalisierung

Folgend werden mit dem Funktionsmuster separate Versuche mit dem vollständigen Lokalisierungssystem durchgeführt und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems demonstriert. In dieser Phase der Evaluierung werden die Bilddaten in Echtzeit ausgewertet und die Messergebnisse abgespeichert. Auch hier kommt ein Gabelstapler als Repräsentant der Flurförderzeuge zum Einsatz. Die Ergebnisse lassen sich auf beliebige Fahrzeuge übertragen, sofern der Messaufbau (siehe Abschnitt 4.3.2) gleich bleibt.

In allen Untersuchungen werden im Dunkeln, nur mit diffuser Beleuchtung (ca. 5-15 Lux) durchgeführte Versuche „außer Konkurrenz“ betrachtet, da es sich um in der Praxis aus Sicherheitsgründen unrealistische Szenarien handelt. Diese Experimente dienen dazu, etwaige Grenzen des Lokalisierungssystems aufzuzeigen. Für Warenlager ist nach DIN EN 12464-1 eine Mindestlichtstärke von 100 Lux vorgeschrieben [DIN EN 12464-1, S. 22]. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die ermittelten Kennwerte folglich nur auf die übrigen Versuche.

7.2.1 Vermeidung von Bewegungsunschärfe

Bei ersten Tests stellte die Bewegungsunschärfe in den Bildaufnahmen ein großes Problem dar (vgl. Abschnitt 5.1.3). Bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bewegen sich die auszuwertenden Marker während der Belichtung im Bild und ihre Abbildung wirkt in der Aufnahme in die Länge gezogen und verschwommen. Eine Extraktion mit den betrachteten Algorithmen ist unter diesen Umständen schwierig, da der sonst vergleichsweise große, auf wenige Pixel verteilte Kantengradient über viele Pixel gestreckt wird (siehe Abbildung 7-5b). In typischen Beispielfahrten konnte trotz des Einsatzes der *Markervorhersage* auf dem Raspberry Pi nur eine *Marker Erkennbarkeit* von <80 % erreicht werden. Mit aktivierter Belichtungszeitbegrenzung wird hingegen nahezu immer eine *Marker Erkennbarkeit* von 100 % erzielt (siehe unten). Dies liefert einen zusätzlichen Grund, warum eine sinnvolle Auswertung anhand von Bildaufnahmen auf dem Funktionsmuster nicht möglich ist – für bereits aufgezeichnete Bilder kann die Belichtungszeit nachträglich nicht mehr angepasst werden, obwohl dies für eine robuste Auswertung essentiell ist.

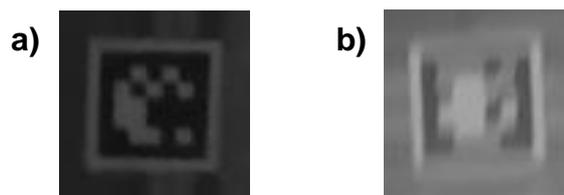


Abbildung 7-5: a) Scharf abgebildeter Marker und b) Marker mit starker Bewegungsunschärfe

7.2.2 Marker Erkennbarkeit

In allen statischen Szenen und bei den Doppelspielen wird eine *Marker Erkennbarkeit* von 100 % erreicht. Schwächen sind vorwiegend bei hohen Fahrgeschwindigkeiten in Kombination mit einem Wechsel von einer dunklen zu einer hellen Szene auszumachen, etwa bei der Durchfahrt unter einem großen Dachfenster bei Sonnenschein. Für einen kurzen Zeitraum während dieses Helligkeitswechsels ist der einzige im Bild sichtbare Marker stark überbelichtet und kann in einem Bild und ggf. in wenigen folgenden Bildern nicht extrahiert werden. Aufgrund des im Vergleich zum Labormuster geringeren Öffnungswinkels der Kamera ist in diesen Fällen auch kein

bereits im vergangenen Bild erkannter Marker mehr sichtbar. Da dieser Effekt selten, nur für wenige Bilder und nur bei hohen Fahrgeschwindigkeiten bzw. mittleren Kurvengeschwindigkeiten auftritt, ist dies für praktische Anwendungen in der Regel kein Problem, da die Aufnahme bzw. Abgabe einer Ladeinheit bei niedrigen Geschwindigkeiten erfolgt. In diesen Fällen ist stets eine Extraktion der Marker gewährleistet. Die *Marker Erkennbarkeit* liegt über alle Versuche betrachtet bei 99,95 % und erfüllt damit die gestellte Anforderung. Die Markerextraktion durch Kantenverfeinerung [STR-1999] gelingt bereits in über 98 % der Fälle, die Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld ist in 1,3 % der Fälle erfolgreich und die „klassische“ Suche in der ROI trägt nur noch 0,52 % der gefundenen Marker bei. Eine Suche im gesamten Bild ist in weniger als 0,01 % der Bilder nötig. Bei ca. 5-15 Lux ist bereits bei mittleren Geschwindigkeiten die Extraktion der Marker nicht mehr in ausreichendem Umfang gewährleistet. Das Bild ist hier so stark verrauscht, dass Marker oft nicht (wieder) gefunden werden. Scheitert die Markerextraktion anhand der *Markervorhersage* unter diesen Umständen ein einziges Mal, wird erst wieder bei niedrigen Geschwindigkeiten erneut ein Marker gefunden, wenn die Belichtungszeitanpassung nicht mehr (so stark) begrenzt wird und das Bildrauschen sowie die Bewegungsunschärfe abgenommen haben (vgl. Abbildung 7-6).

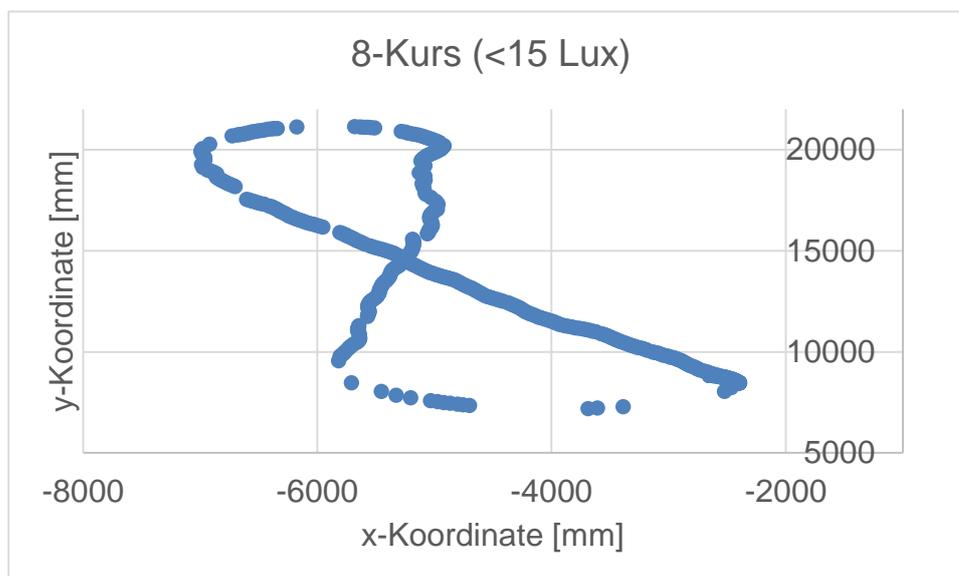


Abbildung 7-6: Plot des in mittlerer Geschwindigkeit gefahrenen 8-Kurses bei <15 Lux

Dies verdeutlicht wie wichtig die durch die *Markervorhersage* ermöglichte erste Phase der Markerextraktion für die *Marker Erkennbarkeit* ist. Bei hoher Geschwindigkeit und sehr geringem Umgebungslicht verhindert entweder das durch die Begrenzung der Belichtungszeit stärkere Bildrauschen oder die mangels Begrenzung eintretende Bewegungsunschärfe die Markerextraktion durch das Funktionsmuster. Eine Kamera mit größerer Sensorfläche kann hier möglicherweise helfen, ist aber in der Regel

deutlich größer und teurer [CRI-2013]. Alternativ kann eine nach oben gerichtete Beleuchtung Abhilfe schaffen. Manuell bediente Flurförderzeuge werden in der Praxis in Warenlagern aber ohnehin nicht im Dunkeln betrieben [DIN EN 12464-1, S. 22].

7.2.3 Auswertungsgeschwindigkeit/Latenz

Die mittlere Auswertungsgeschwindigkeit beträgt 5,8 ms. Für die reine Bildaufnahme kommen durchschnittlich 18 ms hinzu. Es ergibt sich folglich eine mittlere Laufzeit von 23,8 ms je Bild. Die besten 99,73 % der Bilder werden in jeweils weniger als 40 ms aufgenommen und die Position daraus in unter 19 ms berechnet. Die Latenz liegt somit bei <60 ms und damit unter den geforderten 500 ms [HOH-2014, S. 73]. Der Wert ist geringer als beim Labormuster, was vermutlich auf den Kameratreiber und den eingesetzten Bus zur Anbindung der Kamera zurückzuführen ist.

7.2.4 Auflösung

Die Auflösung des Funktionsmusters liegt zwischen 1 mm und 0,1 mm. Da im Labormuster eine höhere Bildauflösung zum Einsatz kommt, wird die Obergrenze der Positionsauflösung dort mit 3 mm möglicherweise zu hoch geschätzt. Aus demselben Grund ist für das Labormuster eine höhere Auflösung als für das Funktionsmuster zu erwarten. Eine detailliertere Betrachtung erfolgt nicht, da die Anforderung von <100 mm [HOH-2014, S. 85] bereits um mindestens zwei Größenordnungen übertroffen wird.

7.2.5 Präzision

Tabelle 7-7: Marker Erkennbarkeit und Präzision des Funktionsmusters (Einzelmessung)

Versuche	Anzahl Bilder	Marker Erkennbarkeit [%]	Präzision (3σ) [mm]/[°]	Präzision Mittelwert [mm]/[°]
Statische	52083	100	56/0,26	19,5/0,06
Dynamische	109982	99,92	71/0,65	19,1/0,09
Gesamt	162065	99,95	-	-

Allgemeine Betrachtung

Für alle statischen Versuche beträgt die Präzision der Einzelmessung für das 99,73-Perzentil (3σ) 56 mm für die Translation bzw. 0,26° für den Gierwinkel (siehe Tabelle 7-7). In den dynamischen Versuchen liegen diese Werte mit 71 mm und 0,65° etwa 25 % bzw. 150 % höher. Betrachtet man die Mittelwerte, ergibt sich mit 19 mm nahezu derselbe Wert. Offenbar treten bei den dynamischen Versuchen die schlechteren Messwerte etwas häufiger auf als bei den statischen Versuchen. Eine wesentliche

Rolle für diesen Umstand liegt vermutlich in der Belichtungszeitanpassung. Die Eignung der adaptiv bestimmten Belichtungszeit für das jeweils folgende Bild ist in dynamischen Szenen schlechter, wenn sich eine zukünftige Szene bezüglich der Helligkeit deutlich von der aktuellen Szene unterscheidet. Bei statischen Versuchen wird stets eine gut geeignete Belichtungszeit für die aufgenommene Szene zu Beginn des Versuchs gefunden und nur bei Änderungen des Umgebungslichtes geringfügig nachgeregelt. Ändert sich an der Szene nichts, ist die Belichtungszeit auch für die Zukunft gut geeignet. Die Extraktion der Marker kann in diesem Fall unter günstigen Bedingungen erfolgen. In dynamischen Versuchen kann sich das Umgebungslicht der aktuell betrachteten Szene sehr stark verändern, etwa wenn von einem Bereich ohne direkte Sonneneinstrahlung (z. B. Wellblechdach) in einen Bereich mit direkter Sonneneinstrahlung (z. B. Dachfenster) gefahren wird oder umgekehrt. In diesen Fällen wird die Belichtungszeit nur mit gewisser Verzögerung an die neue Szene angepasst. In der Übergangszeit werden Bilder mit der bisherigen Belichtungszeit aufgezeichnet und Bereiche einzelner Marker möglicherweise über- oder unterbelichtet. Gelingt es diese Marker trotzdem auszuwerten, so ist die Messung in der Regel von geringerer Qualität. Auch in den dynamischen Versuchen wird die Anforderung an die Präzision jedoch sehr gut erfüllt. Im Vergleich mit dem Labormuster liegt der Wert für die Abweichung der Translation etwa 50 % höher, obwohl das ausgewertete Bild nur etwa 1/5 so groß ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Marker im Bild aufgrund des kleineren Öffnungswinkels der Kamera des Funktionsmusters trotzdem etwa halb so groß erscheinen wie in den Bildern des Funktionsmusters. Die Steigerung der Messungengenauigkeit gegenüber dem Labormuster kann folglich größtenteils durch die ungenauere Abbildung der Marker infolge der geringeren Auflösung erklärt werden.

Einfluss von Umgebungslicht und Fahrgeschwindigkeit

Von Interesse ist auch die Abhängigkeit der Präzision von den variierten Parametern Beleuchtung und Fahrgeschwindigkeit. Um einen Einfluss dieser Parameter festzustellen, werden die Mittelwerte der Messabweichungen über alle Versuche einer Kategorie bestimmt. Eine Betrachtung des 99,73-Perzentils wird an dieser Stelle nicht durchgeführt, da grundsätzliche Effekte untersucht werden und einzelne Ausreißer aufgrund der großen Zahl der Messwerte im Mittelwert einen geringen Einfluss haben. Ansonsten können wenige, von der untersuchten Größe unabhängige Werte die Analyse erheblich verfälschen.

Tabelle 7-8: Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision (Translation) vom Umgebungslicht

Versuche	Tag+Licht	Tag	Nacht
8-Kurs	27,9	28,6	28,3
Vorwärtsfahrt	26,0	26,0	27,0

Tabelle 7-9: Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision (Translation) von der Fahrgeschwindigkeit

Versuche	Langsam	Mittel	Maximal
8-Kurs	26,0	28,3	30,6
Vorwärtsfahrt	24,9	27,2	26,8

Wie Tabelle 7-8 zu entnehmen ist, liegt der Einfluss des Umgebungslichtes auf die Präzision mit <1 mm im Bereich der geschätzten Auflösung des Systems und ist damit nicht signifikant. Folglich sind die Algorithmen zur Extraktion und *Posenschätzung* weitgehend unabhängig vom Umgebungslicht. Zwar nimmt das Rauschen eines Sensors mit sinkender Helligkeit zu [PHO-2010], allerdings hat das Rauschen generell einen sehr geringen Einfluss auf die Präzision und somit spielen dessen Einflüsse im Lokalisierungssystem nur eine untergeordnete Rolle. Ähnliches gilt für den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit (vgl. Tabelle 7-9). Die Datenlage ist in diesem Fall nicht so eindeutig wie bei der Abhängigkeit der Präzision von der Helligkeit (siehe Tabelle 7-8). Mit zunehmender Geschwindigkeit ist eine geringfügige Verschlechterung der Präzision erkennbar – um ca. 2 mm bei der Vorwärtsfahrt und 4,6 mm beim 8-Kurs. Die höhere Abweichung beim 8-Kurs liegt offensichtlich in den Kurvenfahrten begründet. Bei diesen Fahrversuchen werden sehr hohe Fahrgeschwindigkeiten beim Eintritt in die Kurven in sehr hohe Kurvengeschwindigkeiten umgesetzt. Dadurch bewegen sich die Marker im äußeren Bildbereich sehr viel schneller als dies bei einer Vorwärtsfahrt der Fall ist.

Einfluss des Fahrzeugs

Ein erheblich größerer Einfluss ergibt sich überraschenderweise beim Vergleich der Versuchsstapler untereinander. Wie Tabelle 7-10 zeigt, ist die Präzision der Translation bei den Testfahrten mit dem EFG 110k um ca. 14 mm oder etwa 60 % niedriger als bei Testfahrten mit dem Modell EFG 220. Die Gründe für diesen Unterschied können im Nachhinein aus den Versuchsdaten nicht ermittelt werden. Mehrere Fehlerquellen kommen in Frage.

- Die ggf. unbeabsichtigt präzisere Montage des Sensors am EFG 220 kann eine Rolle spielen. Besonders relevant ist die parallele Anbringung zum Hallenboden. Eine höhere Neigung des Bildsensors gegenüber der Bodenebene

führt zu einer zusätzlichen, systematischen Fehlerquelle, in deren Konsequenz die Vorhersagegenauigkeit und die Präzision sinken. Dies kann durch eine präzise Vermessung der Anbringung an beiden Fahrzeugen geklärt werden. Diese Vermessung gestaltet sich bei den verwendeten Kameras schwierig, da sich die Ebene des Sensors nicht zerstörungsfrei bestimmen lässt und nur die Ebene der Platine, auf welcher der Sensor befestigt ist, zur Einmessung verwendet werden konnte. Eine Neigung der Sensorebene gegenüber der Platine kann folglich nicht mit angemessenem Aufwand ermittelt werden.

- Auch der Stapler kann einen Einfluss haben, etwa wenn die Schwingungen der Fahrerkabine bei Fahrten über Bodenunebenheiten mit dem EFG 220 geringer ausfallen als beim EFG 110k. In diesem Fall steigt ebenfalls die Vorhersagegenauigkeit, da der systematische Messfehler während der Fahrt geringer ausfällt. Messungen mit einer Inertialsensorik können das unterschiedliche Verhalten der Fahrzeuge ggf. untermauern, etwa wenn unterschiedlich starke Winkelbeschleunigungen bei verschiedenen Fahrzeugen und gleicher Fahrgeschwindigkeit auf derselben Fahrstrecke auftreten.
- Eine genauere Kalibrierung einer der Kameras kann ebenfalls einen Einfluss haben. Die verwendete Kalibrierungsroutine [DAT-2009] deutet eine ca. 10 % höhere Kalibriergüte (Average Reprojection Error) für die am EFG 220 eingesetzte Kamera an. Der Einfluss der Kalibrierung auf die Güte der *Posenschätzung* ließe sich in erneuten Messungen anhand der Verteilung der im Bild gemessenen, kalibrierten Markereckpunkte im Bild charakterisieren. Bei einer geringeren Kalibrierengenauigkeit ist z. B. eine größere Varianz der Innenwinkel des Markervierecks zu erwarten.
- Es handelt sich bei den eingesetzten Raspberry Pi Kameras um unterschiedliche Varianten des gleichen Typs. Die Kamera am EFG 220 wird ohne NIR-Filter geliefert, die am EFG 110k eingesetzte Kamera besitzt einen NIR-Filter. Bei der Kamera ohne NIR-Filter ist das Signal-Rausch-Verhältnis vermutlich etwas besser, da mehr Licht auf den Sensor fällt. Ein großer Einfluss auf die *Posenschätzung* ist aufgrund der weitgehenden Unabhängigkeit der Präzision in unterschiedlichen Beleuchtungssituationen nicht zu erwarten.
- Möglicherweise ist eine Kombination der genannten Ursachen für den Unterschied in der Präzision verantwortlich. In diesem Fall ist eine Bestimmung des Einflusses einzelner Ursachen besonders schwierig und erfordert sehr präzise Messinstrumente und einen hohen Messaufwand. Ob die unterschiedlichen Kameras gleichen Typs prinzipiell einen Einfluss auf die Präzision haben, ließe sich durch zusätzliche Versuche mit vertauschten Kameras feststellen. Auf entsprechende Versuche wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da die Präzision in beiden Fällen trotz des Einsatzes kostengünstiger Module bereits der Anforderung genügt. Zukünftige Arbeiten können sich z. B. mit dem Einfluss

der Schwankungen in der Produktqualität kostengünstiger Hardware auf den Einsatz kostengünstiger Module zur *Posenschätzung* befassen.

Tabelle 7-10: *Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision [mm] vom Versuchsstapler*

Versuche	EFG 110k	EFG 220
8-Kurs	35,2	21,4
Vorwärtsfahrt	33,4	19,2

Logische Trennung zweier benachbarter Paletten

Durch Einfahrt in zwei benachbarte Europaletten wird der Abstand zwischen den beiden Paletten gemessen, um zu ermitteln, ob diese anhand der Position unterschieden werden können. Aufgrund der Abmessungen einer Europalette [DIN EN 13698-1] sollte der bestimmte Abstand, je nach Abstand der Gabelzinken zueinander und der Einfahrposition des Gabelstaplers, zwischen 627,5 mm und 927,5 mm liegen. Das Intervall der möglichen Werte ergibt sich dabei aus der Breite der Palette, der Größe des Lochs für die Aufnahme durch die Gabelzinken und der Breite der Gabelzinken selbst. Die ermittelten Werte für den Abstand der Paletten in diesem Versuch sind in Tabelle 7-11 zusammengefasst.

Tabelle 7-11: *Gemessene Abstände bei Einfahrt in zwei benachbarten Paletten*

Kennzahl	Abstand [mm]
Min	865
Mittelwert	886
Max	907
Max-Min	42
Standardabweichung	15

Der gemessene Abstand liegt immer im Bereich des zulässigen Intervalls. Eine Trennung der beiden Paletten anhand der Positionsdaten ist in den Versuchen stets möglich. Die konkreten Abstände verteilen sich auf einen ca. 40 mm breiten Korridor. Die Schwankung kann zumindest teilweise durch tatsächliche Abweichungen infolge unterschiedlicher Einfahrten in die Paletten begründet sein.

Einfluss des Bildrauschens

Für das Labormuster wird ebenfalls untersucht wie stark die Pose im statischen Fall schwankt, also welchen Einfluss das Rauschen des Bildsensors auf das Messrauschen des Lokalisierungssystems hat. In Tabelle 7-12 werden die Werte der finalen

Version des Labormusters (vgl. Tabelle 7-5) mit den Werten des Funktionsmusters bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen verglichen:

- Das Rauschen in den Messdaten des Funktionsmusters ist bezüglich der x,y-Koordinaten mehr als doppelt so hoch wie beim Labormuster. Dies ist auf das deutlich höhere Bildrauschen im Sensor des Funktionsmusters zurückzuführen.
- Bei ausreichendem Tageslicht spielt die Hallenbeleuchtung in der Versuchshalle des Lehrstuhls offenbar nur eine untergeordnete Rolle für das Messsystem. Auch mit der Hallenbeleuchtung als einzige Lichtquelle verschlechtert sich die Messung gegenüber der Vergleichsmessung bei Tageslicht nur geringfügig, obwohl die mit dem Luxmeter gemessene einfallende Lichtmenge nur etwa 1/3 so hoch ist. Eine mögliche Erklärung dafür liegt in der Wahl der Belichtungszeit. Bei zu hoher Helligkeit wird die Belichtungszeit reduziert, um die Marker an der Hallendecke im Bild erkennen zu können. Bei niedriger Lichtmenge ist dies nicht notwendig. Das in diesem Zusammenhang relevante Signal-Rausch-Verhältnis ist in beiden Messreihen daher wahrscheinlich sehr ähnlich.
- In nahezu dunklen Szenen steigt das Rauschen jedoch deutlich an, die Anforderungen an die Genauigkeit werden dennoch erfüllt. Die absoluten Werte sind deutlich niedriger als am Tag gemessene Werte von Jung et al. [JUN-2015].

Tabelle 7-12: Einfluss des Bildrauschens bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen

Gerät	Beleuchtung	Lichtstärke [Lux]	Max Rauschen [mm]/[°]
Labormuster	Tag+Licht	nicht bestimmt	4,8/0,15
Funktionsmuster	Tag+Licht	270-510	13,9/0,26
Funktionsmuster	Tag	260-460	11,9/0,36
Funktionsmuster	Nacht	90-130	16,4/0,37
Funktionsmuster	Dunkel	2-10	25,4/1,03

Einfluss des Ladungsgewichtes

Durch Aufnahme unterschiedlicher Gewichte verändert sich die Neigung des Fahrzeugs. Daraus resultiert ein zusätzlicher systematischer Fehler, der analog zum Fehler durch Bodenunebenheiten wirkt, aber von der Intensität der Neigung und damit indirekt vom Gewicht abhängt. Tabelle 7-13 zeigt wie stark sich die Positionsbestimmung bei stillstehendem Fahrzeug verändert, wenn unterschiedlich schwere Gewichte aufgenommen und auf Verfahrhöhe (30-50 cm) oder die maximal zulässige Hubhöhe angehoben werden.

Tabelle 7-13: Mittlere Verschiebung der Pose abhängig vom Ladungsgewicht

Stapler	Gewicht [kg]	Auf max. zul. Höhe [mm]	Bei Verfahrenhöhe [mm]
EFG 110k	0	11	3
	100	47	18
	500	77	49
	1000	206	96
EFG 220	0	5	0
	100	8	8
	500	33	12
	1000	52	40
	1500	68	50
	2000	107	68

Für große Gewichte ist die gemessene Verschiebung deutlich erkennbar und beträgt beim EFG 110k bis zu 200 mm. Nach Formel (6-1) entspricht dies etwa einer zusätzlichen Neigung von $1,3^\circ$. Bei Verfahrenhöhe sind es noch fast 100 mm bzw. $0,65^\circ$. Die Unterschiede bei verschiedenen Hubhöhen lassen vermuten, dass der Hubmast nicht exakt senkrecht gestellt war, da sonst der Hebelarm im Kräftegleichgewicht gleich bleiben sollte. Ein ähnliches Verhalten ist beim EFG 220 zu erkennen. Dort sind die Positionsfehler jedoch deutlich geringer. Trotz doppelter Last beträgt die Neigung des Fahrzeugs etwa die Hälfte des für den EFG 110k gemessenen Wertes. Die Verschiebung der Position bleibt somit unter 100 mm, aber sehr deutlich über dem typischen Messrauschen. In beiden Fällen ist eine proportionale Beziehung zwischen Gewicht der Ladung und Verschiebung der Position des Staplers erkennbar (siehe Abbildung 7-7). Bei Fahrzeugstillstand sollte es somit zumindest grob möglich sein von der Änderung der Pose des Fahrzeugs bei Ladungsaufnahme auf das Ladungsgewicht zu schließen und dadurch zusätzliche Funktionen zu realisieren. Wird stets sehr schwere Ladung, z. B. Papierrollen, transportiert, kann eine Erkennung der Ladungsaufnahme über die Positionsänderung im Stillstand durchgeführt werden. Die von Hohenstein geforderte Funktionsintegration mehrerer Sensorfunktionen in einem einzigen Sensor [HOH-2014, S. 84] kann dadurch auch indirekt erreicht werden, obwohl relevante Objekte, z. B. die Gabelzinken, nicht im Bild erkennbar sind.

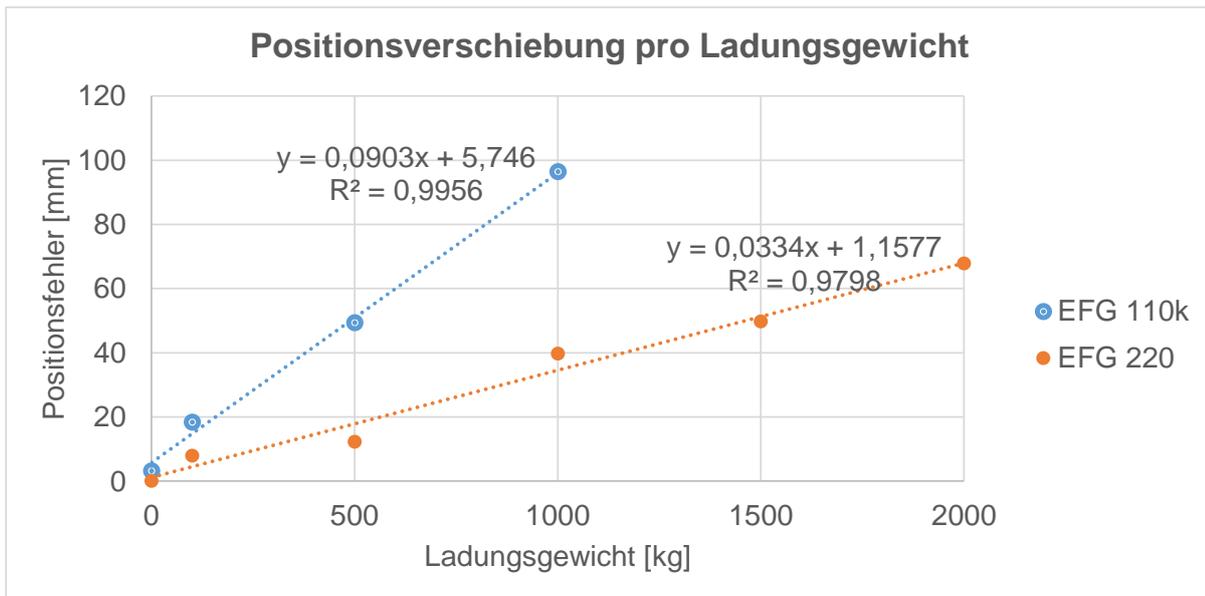


Abbildung 7-7: Abhängigkeit des Positionsfehlers vom Ladungsgewicht

Ob der Messfehler tatsächlich normalverteilt ist, kann überprüft werden, indem ein Histogramm der Fehlerwerte erstellt wird. Bildet dieses Histogramm die Normalverteilung hinreichend ab, so kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden. Ein solches Histogramm ist nicht eindeutig, da die Zahl der Klassen, in die es unterteilt wird, ein Parameter des Histogramms ist [BRA-2008, S. 196]. Die Hypothese wird daher für verschiedene Anzahl Klassen (engl. bins) auf Plausibilität überprüft und mit einem mittels der Software Imfit [WUT-2015] berechneten Fit auf eine Gauß-Kurve verglichen. Die direkt gemessenen Abweichungen in x- und y-Ebene werden mittels der euklidischen Distanz zu einem eindimensionalen Wert zusammengefasst und normalisiert. Da die Distanz stets ein positiver Wert ist, die Abweichungen in x- und y-Richtung jeweils sowohl positiv als auch negativ sein können, wird das Vorzeichen der Distanz aus dem Produkt der Vorzeichen seiner Komponenten bestimmt. Die Distanz weist dadurch positive und negative Werte auf. Das Vorgehen soll verhindern, dass durch die Verwendung des Betrags ein $\mu \neq 0$ der Normalverteilung die Form der Verteilung verändert, da sonst positiver und negativer Bereich der Verteilung an der y-Achse gespiegelt übereinandergelegt werden (vgl. Abbildung 7-8). Die ermittelten Kurven sehen einer Normalverteilung für eine geringe Anzahl Klassen (z. B. 3, 5 und 7) sehr ähnlich. Analog gilt dies auch für den Gierwinkel. Die Normalverteilung modelliert somit die Verteilung der Messwerte hinreichend gut.

In Tabelle 7-14 sind die Ergebnisse zur Leistungsfähigkeit der Lokalisierung zusammengefasst. Alle Anforderungen sind erfüllt, die Leistung übertrifft die Anforderungen teils sehr deutlich. Die Präzision ist mehr als viermal so hoch wie nötig, die Auflösung 100 Mal höher als gefordert und die Latenz im schlimmsten Fall nur 1/8 so hoch wie für die Praxis relevant. Die *Marker Erkennbarkeit* ist ebenfalls geringfügig höher als

gefordert, kann aber Prinzip bedingt nur noch um 0,05 Prozent gesteigert werden. Es besteht diesbezüglich kaum Verbesserungspotential. Die Werte gelten jedoch nur für ein unbeladenes Fahrzeug. Im beladenen Zustand kann durch eine fahrzeugspezifische, gewichtsabhängige Neigung ein zusätzlicher systematischer Fehler auftreten.

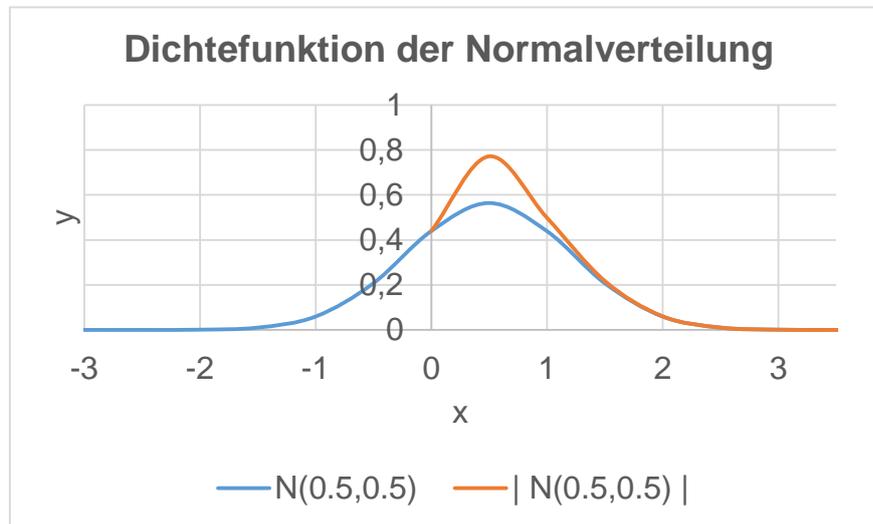


Abbildung 7-8: Dichtefunktion der Normalverteilung und Summe der Beträge ihres positiven und negativen Teils

Tabelle 7-14: Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (Funktionsmuster)

Anforderung	Gefordert [HOH-2014, S. 85]	Erreicht
Marker Erkennbarkeit	99,73 %	99,95 %
Präzision	± 300 mm (3σ)	71 mm/ $0,65^\circ$
Auflösung	<100 mm	0,1 mm < x < 1 mm bzw. < $0,01^\circ$
Latenz	<0,5 s	<0,06 s (maximale Auswertungsdauer) <0,02 s

7.3 Erklärungsansätze mittels synthetischer Versuche

In diesem Unterkapitel werden mögliche Quellen für Messfehler und deren Einfluss auf die Präzision anhand von Simulationen näher untersucht. Neben der reinen Quantifizierung der Einflüsse dient dies auch der Entdeckung verbliebener Optimierungspotentiale. Nachfolgend werden zwei wesentliche Einflüsse quantifiziert:

1. Der vernachlässigte, aber bisher nicht näher untersuchte Einfluss der Neigungen der Marker gegenüber der Bodenebene ε_β und ε_γ auf den Gierwinkel und
2. der Fehler in den x,y-Koordinaten infolge eines ungenau gemessenen Gierwinkels. (vgl. Abschnitt 6.2.1)

7.3.1 Einfluss der Markerneigung auf den Gierwinkel

Die Präzision der Anbringung aller in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml angebrachten Marker (siehe Abbildung 7-9) ergibt sich aus der klassischen Vermessung der Markereckpunkte [LEH-2015].

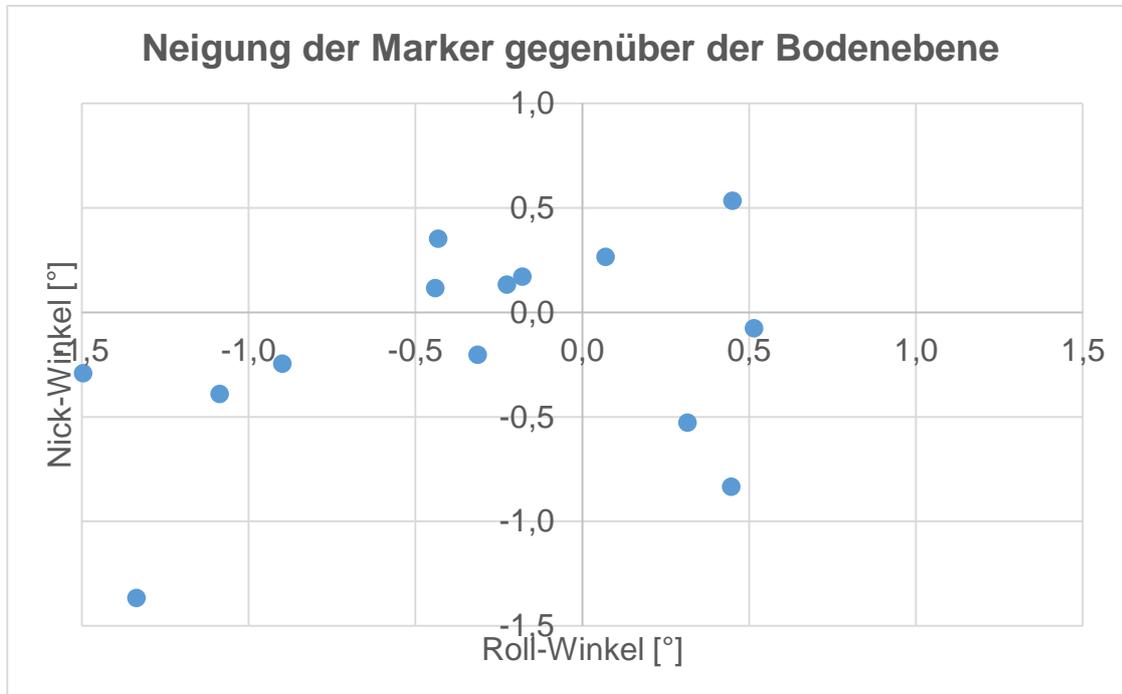


Abbildung 7-9: Präzision der Anbringung der Hallendeckenmarker in der fml Versuchshalle

Die Abweichung ist stets $<1,5^\circ$ um jede Achse, der Mittelwert liegt unterhalb von $0,5^\circ$. Für den ersten Versuch wird daher ein Marker um $0-5^\circ$ in 1° Schritten um beide relevanten Achsen geneigt und senkrecht in die darunter liegende Bildebene projiziert. In der Projektion wird der Gierwinkel gemessen und die Abweichung zum Soll-Wert bestimmt (siehe Tabelle 7-15). Eine Montage mit einer maximalen Abweichung von $<5^\circ$, ist für Laien problemlos erreichbar.

Folgende Parameter werden nicht verändert:

- Der Abstand zwischen Marker und Bildebene spielt für die Bestimmung des Gierwinkels keine Rolle, da der Marker durch die Projektion mit zunehmendem Abstand nur skaliert (kleiner) im Bild erscheint.
- Ebenso ist der reale Gierwinkel in diesem Versuch nicht von Bedeutung, da eine Rotation um diesen Winkel sowohl den Marker als auch dessen Projektion identisch beeinflusst.
- Die Position im Bild ist nach der Formel für die Projektion in die Bildebene (5-4) ebenfalls ohne Bedeutung.

Tabelle 7-15: Einfluss der Markerneigung auf den Gierwinkel [°]

$\varepsilon_\beta / \varepsilon_\gamma$	0°	1°	2°	3°	4°	5°
0°	0	0	0	0	0	0
1°	0	-0,009	-0,017	-0,026	-0,035	-0,044
2°	0	-0,017	-0,035	-0,052	-0,070	-0,087
3°	0	-0,026	-0,052	-0,079	-0,105	-0,131
4°	0	-0,035	-0,070	-0,105	-0,140	-0,175
5°	0	-0,044	-0,088	-0,131	-0,175	-0,219

Aus der obigen Tabelle lassen sich fünf wesentliche Schlussfolgerungen ziehen.

1. Damit die Neigung des Markers zu einer Abweichung bei der Messung führt, muss eine Neigung um beide Winkel vorhanden sein. Der Grund ist vermutlich analog zur Unabhängigkeit des Mittelpunktes von der Neigung. Aufgrund der komplexen Formeln zur Bestimmung des Winkels ist dieser Zusammenhang formal schwierig herzustellen. (vgl. Abschnitt 6.2.3)
2. Ist eine Abweichung vorhanden, tritt diese stets mit negativem Vorzeichen auf, der Winkel wird folglich zu klein geschätzt.
3. Mit steigenden Neigungswinkeln nimmt der Fehler im betrachteten Intervall linear zu. Mittels linearer Regressionsanalyse lässt sich die Ebene bestimmen, deren Gleichung diese Abweichung beschreibt (siehe Formel (7-1)). Die maximale Abweichung zwischen simulierten und nach der Formel berechneten Werten beträgt $0,0002^\circ$. Das Modell bildet die Realität sehr gut ab, da die Messgenauigkeit des Gierwinkels in diesem Fall um drei Größenordnungen höher liegt.
4. Für die in der Versuchshalle durchgeführten Messungen ist der systematische Gierwinkelfehler durch die Markerneigung nicht relevant. Für einen Marker ist der Einfluss kleiner als $1/60^\circ$, für alle anderen Marker liegt er unter $1/200^\circ$.
5. Für große Neigungen ist der betrachtete Fehler jedoch hoch genug, um in der Praxis einen Einfluss auf die Präzision des Lokalisierungssystems zu haben. Um diesen Einfluss zu minimieren, sollten die entsprechenden Neigungen $<2^\circ$ betragen und minimiert werden. Im Zweifel kann die Neigung um eine Achse hoch ausfallen solange die Neigung um die andere Achse sehr gering ist.

$$f(\beta, \gamma) = -0,00874075 \cdot \varepsilon_\beta \cdot \varepsilon_\gamma \quad (7-1)$$

7.3.2 Einfluss des Gierwinkels auf die x,y-Position

Nach Formel (6-7) lässt sich der Fehler bestimmen, der entsteht, wenn ein Marker an einer bestimmten Position mit einem konkreten Winkelfehler extrahiert wird (siehe Abschnitt 6.2.1). Analog kann der mittlere Fehler über die mittlere z-Distanz und die daraus folgende mittlere Distanz zwischen Marker und Kamera in der x,y-Ebene berechnet werden. Für die Berechnung des 99,73-Perzentils ist dieser Ansatz jedoch problematisch, da zwei unabhängige und unterschiedliche Verteilungen gemeinsam berücksichtigt werden müssen – auf der einen Seite die Normalverteilung des Messfehlers, auf der anderen Seite die (unbekannte) Verteilung der Abstände der im Bild gleichzeitig sichtbaren Marker.

Um jedoch einen ungefähren Eindruck des Einflusses des Gierwinkelfehlers auf den Fehler der x,y-Koordinaten zu bekommen, werden jeweils Paare von Markern in der x,y-Ebene gleichverteilt im Abstand von 0-5 m zum Sensor und in einer Höhe zwischen 8 und 10 m über dem virtuellen Bildsensor platziert. Dabei wird ein Mindestabstand von 3 m zwischen den einzelnen Markerpaaren gewährleistet. Dies entspricht etwa den in den Versuchen mit dem Funktionsmuster auftretenden Intervallen. Auf jeden dieser Marker wird ein normalverteilter Winkelfehler addiert und anschließend der Messfehler für jedes der 1000000 simulierten Markerpaare bestimmt. Die Normalverteilung wird dabei so gewählt, dass sie die Messfehler aus den dynamischen Versuchen möglichst gut abbildet. Die hohe Anzahl an Markerpaaren dient der statistischen Absicherung. Die Berechnung dauert auf einem ca. 5 Jahre alten Laptop wenige Sekunden.

Für das 99,73-Perzentil ergibt sich ein Messfehler von 39 mm, was etwa 50 % der Präzision entspricht. In der Realität ist die Distanz zwischen den Markern jedoch nicht gleichverteilt, sondern relativ groß. Bei einer größeren Distanz verschlechtert sich der Messfehler weiter (vgl. Formel (6-7)). Die Simulation liefert daher eine Untergrenze für den betrachteten Fehleranteil.

Der verbliebene Messfehler ist auf andere Fehlerursachen zurückzuführen:

- Systematische Fehler in der Bewegungsvorhersage pflanzen sich in der *Posenschätzung* fort. Der Einfluss dieses Fehlers ist unbekannt, da unklar ist welche Fehler er bei einer realen Messung verursacht bzw. in wie weit diese durch die positive Rückkopplung in der *Posenschätzung* reduziert werden.
- Der Markermittelpunkt unterliegt einem unbekanntem Messfehler.
- Eine ungenaue Kalibrierung hat ebenfalls einen Einfluss auf die *Posenschätzung*. Weder der tatsächliche Kalibrierfehler noch dessen Verteilung sind für

die eingesetzten Kameras bekannt. Daher ist der resultierende Messfehler nicht quantifizierbar.

Das Bildrauschen hat hingegen keinen zusätzlichen Einfluss mehr, da der Gierwinkelfehler, welcher teilweise auch durch Bildrauschen entsteht, bereits in die Simulation berücksichtigt wird oder im oben als unbekannt deklarierten Messfehler des Markermittelpunktes abgebildet ist. Insgesamt können ca. 50 % der Messfehler erklärt werden, für die übrigen 50 % sind mögliche Ursachen bekannt. Letztere 50 % können aufgrund komplexer Wechselbeziehungen oder fehlender Information nicht quantifiziert werden. Der Fehler bei der Bestimmung des Gierwinkels ist von großer Bedeutung für die Präzision des gesamten Lokalisierungssystems und sollte daher minimiert werden.

7.4 Kritische Betrachtung

Das Zusammenfügen zweier Einzelmessungen zu einer Doppelmessung zwecks Bestimmung der Präzision ist problematisch. Oft werden dabei schlechte und gute Messungen zu einer schlechten Doppelmessung zusammengefasst. Die schlechte Messung befindet sich dabei oft am Bildrand und ist nicht gut zur *Posenschätzung* geeignet, während die gute Messung bereits allein ausreicht, um die Pose zu bestimmen. Zudem ist durch den Aufbau bedingt die Distanz zwischen den Markern im Bild relativ groß und die Marker in den Randbereichen sind überrepräsentiert. Folglich ist die erwartete Gleichverteilung des Abstands eines Markers von der Bildmitte in den Versuchen nicht gegeben. Dies erklärt in Teilen die besonders schlechten Messwerte der 6DoF-Posenschätzverfahren. Dieser Umstand gilt für alle Verfahren und stellt den Vergleich der Verfahren untereinander nicht in Frage, sondern verdeutlicht die Leistungsfähigkeit der entwickelten Algorithmen unter besonders schwierigen Umständen. Der tatsächliche Wert der Präzision kann unter diesen Umständen jedoch für alle Verfahren geringer sein als in dieser Arbeit bestimmt. Die Evaluierungsmethode ist generell blind für Szenen, in denen nur ein einzelner Marker im Bild gefunden werden kann. In diesen Fällen kann keine Relation zwischen zwei Markern bestimmt werden und die Szene wird daher für die Bestimmung der Präzision nicht berücksichtigt. Befindet sich tatsächlich nur ein Marker im Bild, so wird diese Szene für alle Posenschätzverfahren nicht verwendet. Für das finale Verfahren werden in 13001 von 14215 Bildern mehrere Marker gefunden. Folglich deckt die Evaluierung >90 % der Bilder ab. Ohne *Markervorhersage* liegt die Abdeckung hingegen nur bei etwa 80 %, da weniger Markerpaaire in den betroffenen Bildern gefunden werden.

Verbesserungen durch Multi-Marker Strategien [HOH-2014, S. 217] können mit dem Auswerteverfahren nicht direkt abgebildet werden, da eine Gewichtung der Werte durch diese Strategien nicht sinnvoll in den Markerrelationen umgesetzt werden kann. Hohenstein zeigt jedoch bereits, dass sich die Genauigkeit der Posen durch Multi-Marker Strategien kaum verbessert [HOH-2014, S. 132].

Grenzen der Genauigkeit sind auch im systematischen Fehler der Messung zu finden. Da zwei aufeinander folgende Messungen, z. B. aufgrund von Bodenunebenheiten, unterschiedlichen systematischen Fehlern unterliegen können, ist die daraus abgeleitete Vorhersage ebenfalls mit einem systematischen Fehler behaftet. Somit werden möglicherweise falsche *Posenschätzungen* stärker gewichtet als richtige Messungen und die gesamte Messung dadurch verfälscht. Systematische Fehler haben bei den Verfahren, die eine positive Rückkopplung beinhalten, auch einen Einfluss auf den statistischen Messfehler. Diese zusätzliche Fehlerquelle hat jedoch scheinbar einen deutlich geringeren Einfluss als die sonst stattdessen auftretenden statistischen Messfehler. Die positive Rückkopplung verbessert die Präzision und setzt gleichzeitig einer weiteren Verbesserung der Präzision Grenzen. Deutliche Verbesserungen der Genauigkeit sollten folglich die Richtigkeit stärker in den Fokus rücken, da eine Verbesserung der Richtigkeit der Messwerte, indirekt auch die Präzision erhöht.

Eine Begrenzung der Freiheitsgrade ist im betrachteten Anwendungsfall selbstverständlich nur deshalb möglich, da Flurförderzeuge die vernachlässigten Freiheitsgrade nicht aufweisen [JUN-2015]. Die Methode lässt sich daher nicht verallgemeinern und 6DoF-Posenschätzverfahren besitzen selbstverständlich in der Praxis ihre Berechtigung, etwa wenn die Genauigkeitsanforderung bereits durch die systematische Abweichung unerfüllbar wird und nicht anderweitig eliminiert werden kann.

7.5 Markervermessung

Die Marker werden mit dem Funktionsmuster relativ zueinander vermessen und der Posengraph, welcher die absolute Position jedes Markers in Hallenkoordinaten enthält, aus diesen Informationen bestimmt (siehe Abschnitt 5.1.5). Mittels verschiedener Verfahren [GRI-2007; GRI-2010; KUM-2011] wird der Graph anschließend optimiert. Ziel ist es bei der Vermessung der einzelnen Relationen auftretende Messfehler zu minimieren. Die Vermessung mittels Teach-in wird zehn Mal durchgeführt, um typische Effekte, die bei der Vermessung auftreten können, zu identifizieren. Es werden nur Markerrelationen berücksichtigt, die mindestens auf zehn Messungen der betroffenen Relation beruhen, damit einzelne schlechte Messungen den Posengraph

nicht negativ beeinflussen. Als Referenzwerte dienen die mit einem Theodolit eingemessenen Positionswerte für die Eckpunkte der Marker, welche mit aktueller Messtechnik und Messverfahren durch den Lehrstuhl für Geodäsie der TUM [LEH-2015] ermittelt wurden.

Die Vermessung per Teach-in stellt gegenüber am Markt verfügbarer kamerabasierter Lokalisierungssysteme für Gabelstapler ein Alleinstellungsmerkmal dar. Im Folgenden wird die Eignung dieses Ansatzes in der Praxis analysiert, indem die Abweichungen des initialen und des durch verschiedene Algorithmen [GRI-2007; GRI-2010; KUM-2011] optimierten Posengraphen mit den Referenzwerten verglichen werden. Da g2o [KUM-2011] viele verschiedene Optimierungsalgorithmen implementiert, werden alle verfügbaren Verfahren ausgewertet, aber nur der am besten funktionierende Algorithmus aus dem g2o-Software-Paket für den Vergleich mit den anderen Software-Paketen [GRI-2007; GRI-2010] herangezogen.

Als Maß für den Vergleich werden vier verschiedene Kennzahlen verwendet, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Güte des Posengraphen widerspiegeln.

1. Der Durchschnittswert der mittleren Abweichung jedes Markers von den Referenzwerten über alle 10 Versuche gibt einen groben Überblick über die Güte aller Marker im Posengraph. Diese Kennzahl repräsentiert die mittlere Güte der Markerposen und ermöglicht einen groben Vergleich der Optimierungsalgorithmen.
2. Die geringste erzielte Abweichung stellt die Untergrenze der erreichten Genauigkeit bei der Markervermessung dar. Schlechte Werte bezüglich dieser Kennzahl haben für die Praxis nur geringe Aussagekraft. Der Startmarker wird in dieser Rechnung nicht berücksichtigt, da er sich per Konstruktion stets im Koordinatenursprung des Hallenkoordinatensystems befindet und seine Abweichung daher immer gleich Null ist.
3. Wichtig für die Praxis ist der schlimmste Fall. Dieser wird als die größte Abweichung einer Markerposition von den Referenzwerten in allen Messungen ermittelt.
4. Schließlich wird der Mittelwert der in jedem Versuch bestimmten, größten Abweichung eines Markers von den Referenzwerten betrachtet. Dieser Wert soll zum einen die im Mittel zu erwartende, schlimmste Abweichung zeigen und zum anderen einen Ausblick auf Teach-in Fahrten mit höherer Anzahl an Messwerten liefern.

Es werden nur die Abweichungen der x,y-Koordinaten betrachtet, da Abweichungen der Winkel sehr viel geringer ausfallen und für die Praxis somit nicht relevant sind.

Der Fehler des Gierwinkels wirkt sich aber indirekt auf die translatorischen Koordinaten aus (vgl. Abschnitt 7.1.4). Tabelle 7-16 zeigt die Werte zu den Kennzahlen für die verschiedenen Optimierungsverfahren. Folgende Aussagen lassen sich anhand der Kennzahlen treffen.

1. Die Abweichungen von den Referenzwerten sind im schlimmsten Fall mit 600-700 mm sehr groß.
2. Die optimierten Posengraphen sind zwar im Mittel etwas besser als der initiale Posengraph, die größten Abweichungen bleiben aber trotz der Optimierung erhalten.
3. Die Güte der durch die unterschiedlichen Optimierungsalgorithmen ermittelten Posengraphen unterscheidet sich in der Praxis kaum. Lediglich bei den größten Abweichungen gibt es geringfügige Unterschiede. g2o erzielt die im Vergleich besten Werte, Toro verschlechtert manchmal sogar die größte Abweichung des initialen Posengraphen.

Tabelle 7-16: Kennzahlen für den Vergleich der Markervermessung (alle Angaben in mm, niedrigere Werte sind besser)

Algorithmus	Mittel	Min	Max	Mittel(Max)
Referenzwerte	0	0	0	0
Initialer Posengraph	191	6	673	428
G2o ¹³	148	6	632	313
Toro ¹⁴	149	6	719	320
Hogman ¹⁵	153	5	691	299

Auf den ersten Blick eignet sich die Vermessung per Teach-in für eine palettengenaue Lokalisierung eines Gabelstaplers aufgrund der hohen Abweichungen der gemessenen Posen von den realen Posen nicht. Bei manchen Markern ist die Verschiebung durch den Fehler in den Vermessungsdaten bereits größer als die geforderte Genauigkeit zulässt.

¹³ Kommandozeilenparameter: `-solver 2dlinear -robustKernel Cauchy`

¹⁴ In einem Versuch konnte kein gültiges Ergebnis bestimmt werden, da aus der Eingabe kein Posengraph generiert werden konnte (Ursache unklar). Die Zahlen beziehen sich daher nur auf die übrigen neun Versuche.

¹⁵ Analog zu ¹⁴ konnte in zwei Versuchen kein gültiges Ergebnis bestimmt werden.

Um die Ursache für dieses Problem zu finden, werden die konkreten Ergebnisse eines Versuchs, in dem der schlechteste Wert auftritt, näher analysiert. Diese Betrachtung erfolgt exemplarisch für das entsprechende Ergebnis von g2o. Der optische Vergleich der Posen aus der Markervermessung mit den Referenzdaten zeigt das grundsätzliche Problem: je weiter der vermessene Marker vom Ursprung des Hallenkoordinatensystems entfernt ist, desto größer wird der Messfehler im Posengraph (siehe Abbildung 7-10).

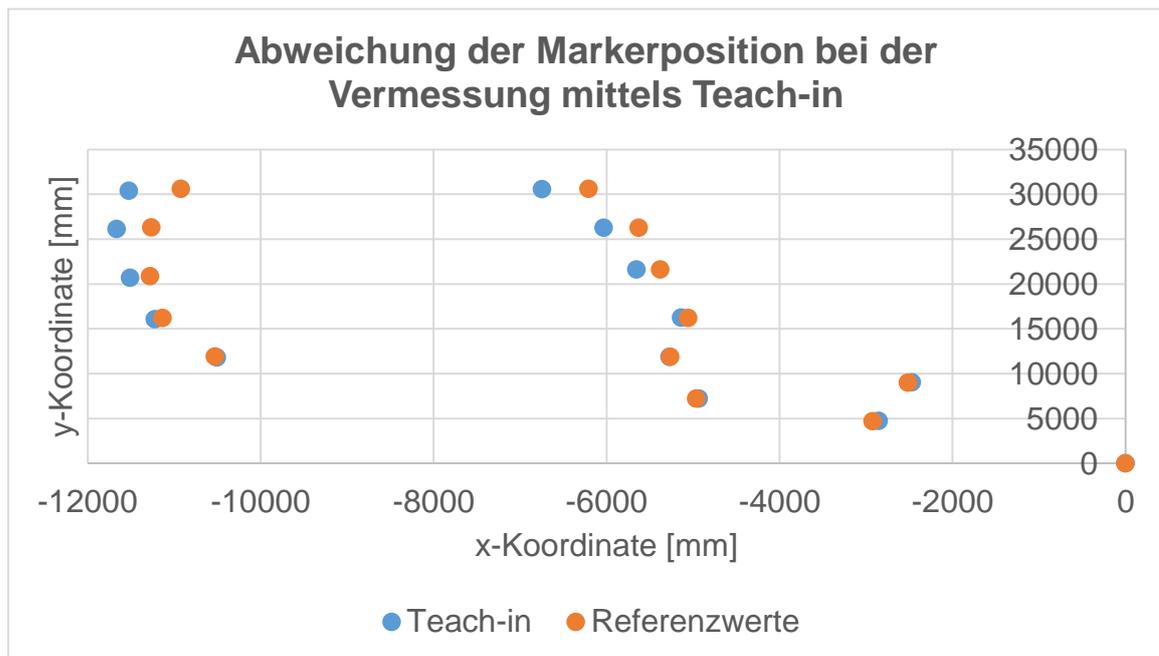


Abbildung 7-10: Position der Marker Referenzwerte und per Teach-in vermessenen Werte

Trägt man diese Abweichung gegenüber der Distanz des entsprechenden Markers vom Ursprung auf, so ist dieser Zusammenhang deutlicher sichtbar. Für den Gierwinkelfehler lassen die Daten einen linearen Zusammenhang zwischen Messfehler und Distanz vermuten (vgl. Abbildung 7-11). Für die Distanz in der Ebene tritt dieser Zusammenhang verzögert auf. Die Abweichung der Position ist für Marker in der Nähe des Startmarkers gering. Aufgrund der höheren Markerdichte können dort mehrfache Markerrelationen zwischen unterschiedlichen Markern gleichzeitig bestimmt werden, so dass es den Optimierungsverfahren gelingt Widersprüche in den Messdaten aufzulösen bzw. zu reduzieren. Weiter entfernt vom Ursprung gelingt dies seltener, der Fehler steigt nahezu linear an. Der Fehler des Gierwinkels wächst bereits von Beginn an linear, möglicherweise handelt es sich dort zumindest teilweise um einen systematischen Fehler. Ansonsten sollten die Optimierungsalgorithmen diesen Fehler ebenfalls im Bereich um den Startmarker ausgleichen, wie es bei den x,y-Koordinaten der Fall ist. Ein Fehler bei der Bestimmung des Gierwinkels eines Markers beeinflusst den Messfehler für alle darauf folgende Marker. Bereits geringfügige

Fehler haben unabhängig von der Fehlerquelle aufgrund des langen Hebelarms, über den sie wirken, sehr viel größere Konsequenzen als dies bei der *Posenschätzung* des Flurförderzeugs der Fall ist. In der Praxis ist daher in großen Lagerhallen mit deutlich größeren Abweichungen als in den durchgeführten Versuchen zu rechnen. Diese Fehlerfortpflanzung führt zu absolut gesehen großen Abweichungen, die sich aus inkrementell sehr viel kleineren Fehlern zusammensetzen. Lokal betrachtet sind die Unterschiede somit gering. Folglich tritt der konkrete absolute Fehler reproduzierbar auf und hat auf die Wiederholgenauigkeit keinen relevanten Einfluss. Die Identifizierung einer Palette bzw. der zugehörigen Ladeeinheit ist folglich trotz hoher absoluter Abweichungen möglich, solange die Positionsdaten zur Palette stets mit dem Lokalisierungssystem bestimmt werden. Stammen die initialen Daten jedoch aus anderen Quellen, bleibt das Problem bestehen. In der Praxis kann dieses Problem gelöst werden, indem beim ersten Transportauftrag die initial bekannte Position einer Ladeeinheit mit der Messung verglichen wird. Über alle solchen Wertepaare aus Soll-Wert und Messwert können, z. B. mittels der Methode kleinster Quadrate, die Vermessungsfehler minimiert werden. Fehler im Transportprozess können in dieser Phase noch nicht entdeckt werden, was dem Status quo vor der Einführung positionsbasierter Lagerverwaltung [GÜN-2007] entspricht.

Durch den Abstand der Marker zueinander sind Messungen der Markerrelation zweier benachbarter Marker manchmal nur an bestimmten Stellen in der Halle möglich. Ein Marker ist z. B. gerade noch im Bild erkennbar und der andere soeben schon sichtbar. Dies führt zu statistischen Messfehlern durch den in beiden Fällen relativ hohen Abstand als Hebelarm des Gierwinkelfehlers (vgl. Abschnitt 6.2.1). Hinzu kommt ggf. ein weiterer Fehler, etwa wenn nur genau an einer Stelle im Bild beide Marker sichtbar sind oder nur an dieser Stelle aufgenommen werden. In solchen Fällen kann durch Fehler in der Kalibrierung eine systematische Abweichung auftreten, da alle Aufnahmen an derselben Stelle im Bild erfolgen und der Kalibrierfehler dort immer derselbe ist. Die Algorithmen zur Optimierung stufen diese systematisch fehlerhafte Messung als besonders zuverlässig ein, wenn die Schwankungen gering sind. Häufigere Messungen an derselben Stelle schaffen daher in diesem Fall keine Abhilfe.

Die durch statistische Messfehler verursachten Fehler bei der Vermessung können durch eine größere Zahl an Messungen während des Teach-in verringert werden. Dies kann entweder a priori geschehen oder während des laufenden Betriebs immer weiter verfeinert werden, indem laufend Daten zu den Markerrelationen auf allen Lokalisierungssystemen gesammelt werden und mittels der so erstellten, immer größeren Datenbasis eine genauere Markervermessung erfolgt. Wie wirksam diese Verbesserung in der Praxis ist und wie viele Daten für welche Messqualität benötigt

werden, kann im Rahmen der Evaluierung nicht ermittelt werden. Beim Teach-in Verfahren ist trotz großer Messdatenmengen mit signifikanten absoluten Abweichungen zu rechnen. Dieser Umstand sollte bei der Wahl geeigneter Ansätze zur Vermessung für den konkreten Anwendungsfall berücksichtigt werden.

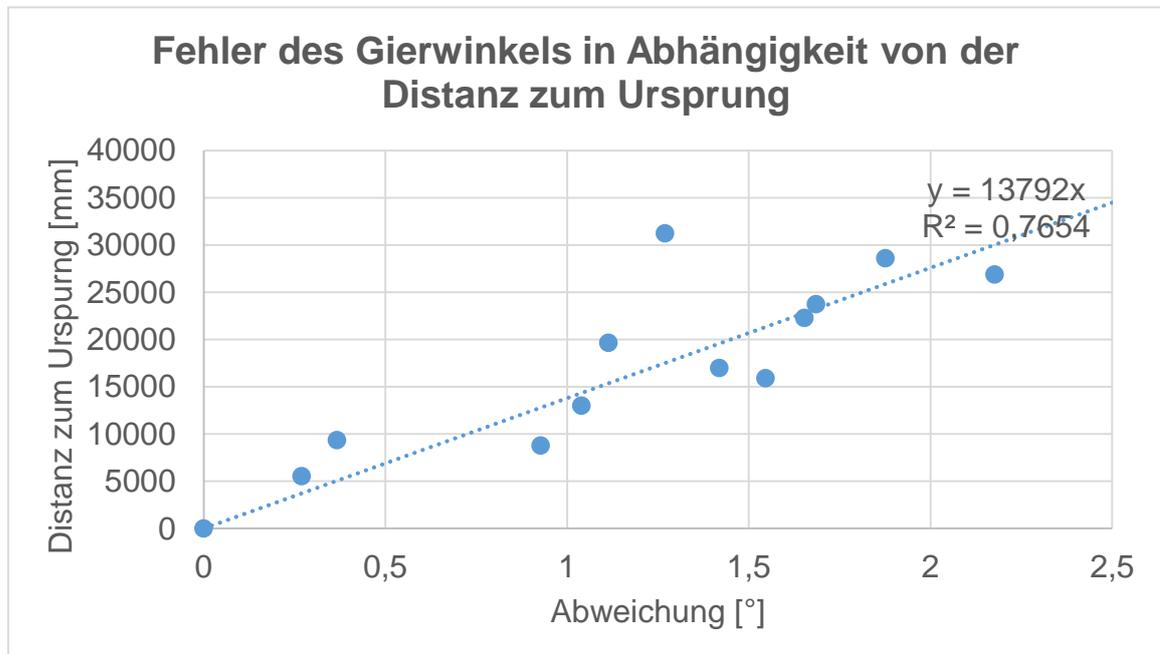


Abbildung 7-11: Kumulativer Gierwinkelfehler bei der Vermessung per Teach-in

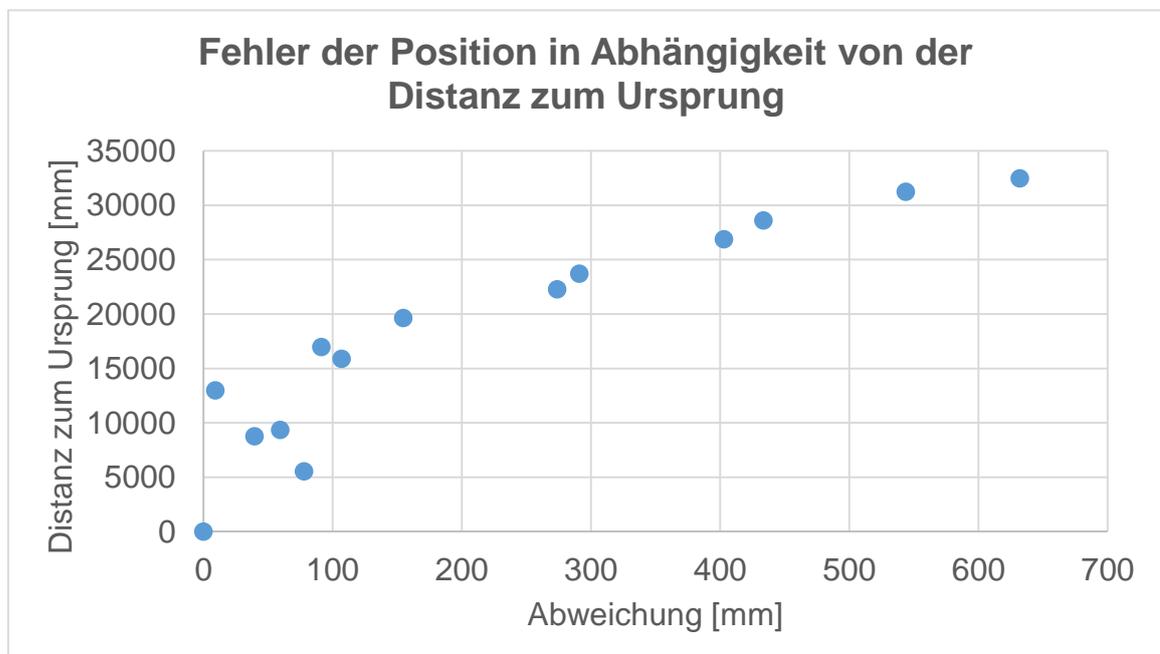


Abbildung 7-12: Kumulativer Positionsfehler bei der Vermessung per Teach-in

7.6 Weitere Eigenschaften

Der Lokalisierungs-Demonstrator soll neben einer ausreichenden Leistungsfähigkeit weiteren Anforderungen genügen (vgl. Kapitel 3). Die Erfüllung dieser Anforderungen wird auf den folgenden Seiten überprüft.

7.6.1 Einsatz kostengünstiger Module

Die Forderung nach dem Einsatz kostengünstiger Module lässt sich anhand der Kosten für die jeweiligen Module überprüfen. Die genannten Modelle der Module stellen ausdrücklich keine Empfehlung dar, sondern dienen dazu, die Kalkulation nachvollziehbar darzulegen. Da konkrete Preise nur eine Momentaufnahme darstellen, werden die Beträge in Tabelle 7-17 auf 5 € genau gerundet aufgelistet. Die Zusammensetzung der Kosten für einen Marker wird bereits in Tabelle 5-8 beschrieben. Die Kosten zur Ausrüstung der Versuchsgabelstapler mit je einem Funktionsmuster und die 14 Marker an der Hallendecke betragen insgesamt weniger als 400 €, was im Vergleich mit kommerziellen Lokalisierungssystemen als kostengünstig bezeichnet werden kann. Es handelt sich bei den ermittelten Kosten nur um die Preise für die einzelnen Komponenten, aus denen das Lokalisierungssystem gefertigt werden kann. Kosten für Arbeitslohn zur Montage der Komponenten und Integration des Systems beim Anwender sind ausdrücklich nicht berücksichtigt. Die Integrationskosten und teilweise auch die Montage einzelner Komponenten, z. B. Kamera und Objektiv, sind bei industrietauglicher Hardware mindestens in ähnlicher Höhe fällig wie beim Funktionsmuster und können im Rahmen dieser Arbeit nicht seriös geschätzt werden. Das Funktionsmuster wird zur Erstellung des Demonstrators von Laien montiert und in den Stapler integriert. Die Integration ist innerhalb kürzester Zeit möglich, da es sich bei den Komponenten um handelsübliche Endkundenprodukte handelt und kein Eingriff in die Fahrzeugelektrik erfolgt. Die Lokalisierung besteht somit aus kostengünstigen Modulen und lässt sich aufwandsarm und kostengünstig in Gabelstapler integrieren.

Ein Vergleich mit bestehenden Lösungen gestaltet sich schwierig, auch weil die Anbieter in der Regel das Lokalisierungssystem nicht einzeln, sondern im Paket mit Lagerverwaltung und Staplerleitsystem anbieten und keine direkten Preisinformationen veröffentlichen. Zenotrack und IdentPro stellen für ihre Lösungen aus Lokalisierungssystem, Lagerverwaltung und Staplerleitsystem Ersparnisse in Höhe von bis zu 30 Prozent und einen Return on Invest von 1-2 Jahren in Aussicht [ALE-2013; IDE-2016]. Bei Staplerkosten von ca. 47000 €/Jahr [MAR-2014, S. 253] ergäben sich somit Kosten für die Gesamtlösung von >14000 € je Stapler. Die Kosten für die reine Lokalisierungslösung bleiben jedoch unklar. Für ein Warehouse-Management Sys-

tem sind mindestens 10000 € einzukalkulieren [LOG-2005], allerdings beinhaltet ein solches System neben dem LVS noch weitere Komponenten [GÜN-2016, S. 156]. Allein die Hardwarekosten für Sensor und Auswerteeinheit betragen je Fahrzeug bereits deutlich mehr als 1000 €.

Tabelle 7-17: Grobe Schätzung der Kosten der einzelnen Module des Funktionsmusters

Modul	Modell	Kosten [€]
Recheneinheit	Raspberry Pi Model B	35
Kamera	Raspberry Pi Camera Rev. 1.3	30
SD Karte	Class 10	10
Spannungsversorgung	Powerbank 20000 mAh	30
Gehäuse	Einfaches Gehäuse	10
Halterung	Gewebeklebeband/Aluminiumplatte	0
Infrastruktur	ArUco Marker [GAR-2014]	$10n$
Summe		$115 + 10n$

7.6.2 Autarke Energieversorgung

Durch Einsatz einer Powerbank ist die Anforderung zur autarken Energieversorgung erfüllt. Die Betriebsdauer muss mindestens acht Stunden betragen, damit die Energieversorgung für eine Schicht aufrechterhalten werden kann. Um zu prüfen ob dies mit dem entwickelten Lokalisierungssystem möglich ist, wird das Funktionsmuster mit einer vollständig geladenen Powerbank verbunden und solange zur Lokalisierung eines Gabelstaplers benutzt bis die Spannungsversorgung der Powerbank zusammenbricht. Die Zeit zwischen Start und Beenden des Betriebssystems ergibt etwa die Dauer, die das Funktionsmuster in Betrieb war. Das Fahrzeug wird aufgrund der hohen, kontinuierlichen Versuchsdauer während dieses Versuchs nicht bewegt. Angesichts der vergleichbaren Verarbeitungsdauer der Bilder in statischen und dynamischen Versuchen ist nicht von einem stärkeren Energieverbrauch in dynamischen Versuchen auszugehen. Wie Tabelle 7-18 entnommen werden kann, reicht die Laufzeit der kleineren Powerbanks für den angestrebten Zweck nicht aus. Mit fast sieben Stunden ist die selbstgebaute Powerbank jedoch dem Ziel schon recht nahe. Die 20000 mAh Powerbank ermöglicht eine mehr als ausreichende Betriebsdauer von über 25 Stunden. Es ist somit möglich das Funktionsmuster einen Tag autark zu betreiben. Der große Unterschied in der Betriebsdauer zwischen der Powerbank aus 4 AA Akkus und der kleinsten Powerbank fällt jedoch auf. Letztere hält trotz einer 16 % geringeren Nennkapazität nur etwa halb so lange die Spannung aufrecht wie Erstere. Die Hersteller geben aus unterschiedlichen Gründen eine in der Praxis nicht abrufbare Kapazität für ihre Produkte an [WAL-2015]. Die Abweichung vom theoretischen Wert ist in den durchgeführten Versuchen für jedes der Modelle unterschiedlich, für

das Versuchsergebnis jedoch nicht relevant. Falls ein Staplerterminal am Gabelstapler angebracht ist, besteht auch die Möglichkeit das Funktionsmuster über die USB-Schnittstelle des Terminals mit Spannung zu versorgen. In diesem Fall ist ein regelmäßiges Wechseln der Akkus nicht notwendig und die Betriebsdauer des Funktionsmusters nur durch die Kapazität der Staplerbatterie begrenzt.

Tabelle 7-18: Betriebsdauer des Funktionsmusters mit drei verschiedenen Powerbanks

Powerbank	Betriebsdauer mit einer Ladung [h]	Geschätzter Stromverbrauch [mA]
4000 mAh (4x AA Akkus)	6:52	583
20000 mAh	25:11	794
3350 mAh	3:29	962

7.6.3 Portierbarkeit

Die Portierbarkeit auf unterschiedliche Plattformen ist ebenfalls gegeben. Es sind mit Ausnahme der Integration des Kameratreibers keine Anpassungen am Quellcode notwendig, um die Software des Labormusters im Funktionsmuster zu nutzen.

7.6.4 Startdauer

Ob die Startdauer maximal 13 s (vgl. Abschnitt 3.2.2) beträgt, wird durch eine Messung ermittelt. Die Zeitdifferenz zwischen Beginn der Spannungsversorgung und Bestimmung der ersten Pose durch das Funktionsmuster wird vier Mal mittels einer Stoppuhr bestimmt. Eine interne und potentiell genauere Messung kann nicht erfolgen, da eine unbekannte Zeitspanne vergeht bis das Betriebssystem gestartet wird und somit erst ab diesem Zeitpunkt die interne Uhr zu zählen beginnt. Der Zeitpunkt zwischen Start der Lokalisierungssoftware und Bestimmung der ersten Pose wird mittels der internen Uhr berechnet. Die Startdauer des Betriebssystems ergibt sich aus der Differenz der beiden oben genannten Werte.

Tabelle 7-19: Startdauer des Funktionsmusters

Durchführung	Startdauer [s]
1	21,29
2	21,26
3	21,37
4	21,66
Mittelwert	21,40

Die Startdauer beträgt ca. 21 Sekunden und setzt sich aus etwa 19 Sekunden für den Start des Betriebssystems und 2 Sekunden für den Start der Lokalisierungssoft-

ware zusammen. Die Anforderung von 13 Sekunden wird somit nicht erfüllt. Dies ist zu großen Teilen nicht auf die Lokalisierungssoftware zurückzuführen, sondern auf den vergleichsweise langsamen Startvorgang des Betriebssystems. Um die Anforderung zu erfüllen, muss dessen Startvorgang erheblich beschleunigt werden. Dies kann durch schnellere Hardware, z. B. den mittlerweile verfügbaren deutlich schnelleren Raspberry Pi 3 [THE-2016; KLO-2016], aufwandsarm realisiert oder mittels eines speziell auf den Anwendungsfall angepassten Betriebssystems [YOC-2017] umgesetzt werden. Da das Funktionsmuster eine eigene Spannungsversorgung besitzt, stellt auch der kontinuierliche Betrieb eine unmittelbar verfügbare und rechtzeitige *Posenschätzung* sicher. Typische Staplerterminals und Industrie-PCs erfüllen die gestellte Anforderung ebenfalls nicht:

- Ein ca. 10 Jahre altes, am Versuchsstapler des Lehrstuhls verbautes Staplerterminal von Jungheinrich benötigt zum Starten des Betriebssystems etwa 50 Sekunden bis der Login-Bildschirm erscheint.
- Auch das mit einer Intel Atom E3827 CPU und 4 GB RAM ausgestattete, modernere Staplerterminal WMT 110 von Jungheinrich benötigt vom Einschalten über das Hochfahren des Betriebssystems Windows 7 embedded bis zum Autostart einer Anwendung ca. 38 Sekunden [MIR-2016].

4logistic nutzt eine moderne SSD als Massenspeicher und nennt für ein Staplerterminal eine Startzeit von „[...] rund 15 Sekunden (abhängig von der Konfiguration)“ [4LO-2017]. Ob ältere Modelle beliebiger Hersteller diese Zeit erreichen können ist zumindest fraglich. Obwohl die gestellte Anforderung an die Startdauer durch das Funktionsmuster nicht erfüllt wird, ist die vorgeschlagene Lösung in der Praxis gegenüber bestehenden Lösungen konkurrenzfähig, da die Anbindung an das LVS über das Staplerterminal den Flaschenhals darstellt. Unter praktischen Gesichtspunkten sollte die Anforderung an die Startdauer des Lokalisierungssystems statt von der Startdauer des Staplers von der Verfügbarkeit der Anbindung zum LVS abgeleitet werden und mindestens genauso schnell wie diese verfügbar sein. Eine Startdauer von 20-40 Sekunden ist aus dieser Perspektive ausreichend.

7.6.5 Vermessung per Teach-in

Die Vermessung der Marker mittels Teach-in ist möglich und senkt die Kosten für die Infrastruktur erheblich, wenn die ermittelten Abweichungen der absoluten Koordinaten für den Anwendungsfall akzeptabel sind (vgl. Unterkapitel 7.5).

7.7 Fazit

Mittels optischer Verfahren lässt sich eine Lokalisierung auf Basis kostengünstiger Komponenten umsetzen, welche die Anforderungen der Logistik an eine palettengenaue Lokalisierung für Flurförderzeuge hinreichend erfüllt.

7.7.1 Lokalisierungssystem für Flurförderzeuge

Es gelingt den scheinbaren Zielkonflikt zwischen *Marker Erkennbarkeit*, Genauigkeit und Ressourceneinsatz in der Praxis aufzulösen und mit wenig Berechnungsaufwand auch bei schlechter Eingabe ausreichend genaue Posen des Flurförderzeugs zu bestimmen. Bei fahrerlosen Transportsystemen reicht die Genauigkeit jedoch nicht aus, um eine Palette allein anhand der Position anzufahren, für die Navigation eines solchen Fahrzeugs im Lager genügt die Genauigkeit jedoch. Die Wiederholrate ist mit mehr als 25 Hz hinreichend groß und die Latenz mit <60 ms sehr gering. Der Gierwinkel wird konkurrenzfähig genau [BLU-2016] bestimmt. Geringere Anbringungshöhen der eingesetzten Marker können den Messfehler weiter reduzieren, da der Hebelarm, über den sich systematische und statistische Fehler auswirken, dadurch kürzer wird. Schwächen bestehen in der Vermessung der Marker per Teach-in. Dort wirken die sonst geringen Messfehler des Gierwinkels kumulativ und führen zu hohen Abweichungen zwischen der erstellten Karte und der Realität. Diese Abweichungen sind jedoch lokal reproduzierbar und spielen in der Praxis in vielen Fällen keine Rolle. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften des Funktionsmusters zeigt Tabelle 8-1.

7.7.2 Kritische Bewertung

Der exakte Einfluss einzelner Maßnahmen kann nicht immer genau beziffert werden, da es (gewollte) Rückkopplungseffekte gibt. Der Anteil jeder einzelnen Maßnahme ist zudem von lokalen Gegebenheiten im Aufbau abhängig.

Das Lokalisierungssystem ist in der Lage nur teilweise im Bild sichtbare Marker zu erkennen. Diese Fähigkeit ist für eine Lokalisierung nur relevant, wenn sonst kein vollständig sichtbarer Marker erkannt werden kann, da ein einzelner Marker zur Positionsbestimmung ausreicht. Je kleiner die Distanz zwischen Flurförderzeug und Marker in der x,y-Ebene ist, desto geringer wirkt sich der Messfehler des Gierwinkels auf die x,y-Koordinaten aus. Marker, die in den Randbereichen des Kamerabildes erscheinen, verschlechtern tendenziell die *Posenschätzung* und es kann daher sinnvoll sein diese nicht zu berücksichtigen, obwohl ihre Extraktion möglich ist.

Aufgrund des Messaufbaus sind Messungen in den Randbereichen des Bildes für die Ermittlung der Präzision deutlich überrepräsentiert. Die ermittelte Präzision ist daher als Obergrenze zu sehen und kann in der Praxis geringer ausfallen.

Eine umfangreiche Evaluierung im Praxiseinsatz kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen und bleibt einem Pilotbetrieb vorbehalten. Zwar wird das Funktionsmuster auch in Versuchen unter widrigen Umgebungsbedingungen erfolgreich getestet, die Versuche beschränken sich aber auf die Versuchshalle des Lehrstuhls fml. In anderen Umgebungen können zusätzliche Schwächen auftreten, die bisher nicht aufgefallen sind. Weitere Untersuchungen in unterschiedlichen Umgebungen sollten daher durchgeführt werden, um die Fähigkeiten des entwickelten Systems fundierter abzusichern.

In Anbetracht der geringen Ressourcen, die von allen Maßnahmen zur Markerextraktion gemeinsam benötigt werden, stellt sich die Frage in wie weit eine weitere Optimierung sinnvoll ist. Eine wesentliche Problematik ist dabei der deutliche Unterschied zwischen Auswertung einer vorhergesagten Region und der Auswertung des Gesamtbildes [STR-1999]. Die Auswertung des Gesamtbildes ist sehr selten während der Fahrt notwendig und benötigt erheblich mehr Rechenoperationen als die (erfolgreiche) Auswertung der vorhergesagten Regionen. Vor diesem Hintergrund erscheint fraglich, ob ein weiterer Speedup in den vorhergesagten Regionen sinnvoll ist, solange die Auswertung im Gesamtbild der Flaschenhals bleibt. Eine höhere *Marker Erkennbarkeit* ist grundsätzlich von Vorteil und es sollten so viele Maßnahmen zur Steigerung der *Marker Erkennbarkeit* ergriffen werden, wie unter den Randbedingungen realisierbar sind. Schließlich stellt die Verfügbarkeit des Systems in der Praxis eine der wichtigsten Anforderungen dar und das entwickelte Lokalisierungssystem ist genau dann verfügbar, wenn ein Marker erkannt wird.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel vermittelt eine Übersicht über die gesamte Arbeit (Unterkapitel 8.1) und liefert zusätzlich Anregungen für künftige, auf den erzielten Ergebnissen aufbauende Forschungs- und Entwicklungsziele (Unterkapitel 8.2) sowie mögliche Lösungsansätze zur Beantwortung verbliebener Fragen im Kontext der Aufgabenstellung.

8.1 Zusammenfassung

8.1.1 Motivation

In der Intralogistik ermöglichen Positionsinformationen zu Waren, Ladeeinheiten und Maschinen die Umsetzung einer Vielzahl an Sensorfunktionen [GÜN-2014a, S. 32ff.; KLE-2013; TEL-2011].

Aufbauend auf diesen Sensorfunktionen können Prozesse im Warenlager analog zum Einsatz von RFID effizient und von hoher Qualität realisiert werden. Waren können anhand ihrer Bewegung im Lager verfolgbar gemacht und dadurch Transparenz über den Aufenthalt der Waren im Lager geschaffen werden. Fehler bei manuellen Transportfahrten können erkannt und leicht korrigiert werden, was letztlich die Prozessqualität steigert. [GÜN-2016, S. 192]

Grundsätzlich sind derartige Lokalisierungssysteme für fahrerlose Transportsysteme und manuell bediente Flurförderzeuge bereits seit Jahren am Markt verfügbar [ULL-2014, S. 118ff.; IND-2017a; TOT-2014; ALE-2013]. Die dafür aufgerufenen Preise rechtfertigen deren Einsatz aus wirtschaftlichen Gründen nur in Ausnahmefällen, so dass nur ein geringer Prozentsatz der Flurförderzeuge mit solchen Systemen ausgerüstet ist. Allein die Kosten für die zur Positionsbestimmung genutzten, industrietauglichen Hardwarekomponenten überschreiten bereits die Investitionsbereitschaft vieler potentieller Anwender. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer präzisen und aus kostengünstigen Komponenten aufgebauten Lösung zur Positionsbestimmung von Flurförderzeugen, welche die Anforderungen an ein Lokalisierungssystem im industriellen Einsatz erfüllt.

8.1.2 Entwicklung eines kostengünstigen Lokalisierungssystems für Flurförderzeuge in Warenlagern

In einem ersten Schritt werden die Anforderungen an ein Lokalisierungssystem aus kostengünstigen Komponenten im industriellen Einsatz analysiert (vgl. Kapitel 3). Zusätzlich zu den Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines Lokalisierungssystems für Flurförderzeuge (siehe Unterkapitel 2.5) sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Alle Bestandteile eines kostengünstigen Lokalisierungssystems müssen selbst möglichst kostengünstig sein.
- Eine Integration der Komponenten am Flurförderzeug und im Warenlager muss aufwandsarm und schnell möglich sein.
- Das Lokalisierungssystem soll in 99,73 % der relevanten Fälle eine hinreichend genaue Pose bestimmen und spätestens nach 13 Sekunden zur Verfügung stehen.
- Software und Bildverarbeitungsalgorithmen müssen ihre Aufgabe unter diesen Rahmenbedingungen erfüllen. Die zusätzlichen Schwächen kostengünstiger Sensorik, etwa systematische Bildverzerrungen, Bewegungsunschärfe und der Rolling-Shutter-Effekt sind zu minimieren, um eine Bildauswertung zwecks Lokalisierung zu ermöglichen. Dafür stehen nur geringe Ressourcen in Form einer kostengünstigen Recheneinheit zur Verfügung.

In Unterkapitel 4.2 folgt eine systematische Analyse der Schwachstellen bestehender Systeme mit dem Ziel Optimierungspotentiale aufzudecken, die das Design einer vergleichbaren, aber kostengünstigen Lösung ermöglichen (vgl. Unterkapitel 4.3). Die wesentlichen Schwachstellen des untersuchten Lokalisierungssystems sind die Kosten für Sensorik, Recheneinheit, Integration am Flurförderzeug und Aufbau der Infrastruktur. Zudem benötigt die Markerextraktion die meiste Rechenleistung und ist für den Praxiseinsatz nicht zuverlässig genug.

Die Hebung dieser Optimierungspotentiale gelingt im Wesentlichen durch die systematische Eliminierung der identifizierten Schwachstellen.

- Auf Seiten der Hardware kommen statt Industrie-PC und Industriekamera der Raspberry Pi [RS-2013] und eine dazu kompatible Kamera [RAS-2017] zum Einsatz.
- Die Kosten für die Integration am Flurförderzeug werden durch Batteriebetrieb dieser Komponenten zusätzlich gesenkt.
- Die Referenzpunkte in der Infrastruktur sind aus preiswerten, handelsüblichen Bestandteilen aufgebaut, in wenigen Arbeitsschritten zu fertigen und können

problemlos von Laien an der Hallendecke montiert sowie mit dem Demonstrator bei einer Teach-in Fahrt vermessen werden.

- Mittels Adaption bestehender Algorithmen und der Entwicklung neuer, auf den Anwendungsfall der Lokalisierung von Flurförderzeugen in Warenlagern spezialisierten Verfahren wird die Leistungsfähigkeit des Lokalisierungssystems gesteigert. Es werden z. B. die Freiheitsgrade der Pose auf ein Minimum reduziert [JUN-2015] und die Extraktion der zur *Posenschätzung* genutzten Marker mit der Vorhersage der zukünftigen Position verknüpft. Es entsteht dadurch ein positiver Rückkopplungseffekt, in dessen Folge sich Erkennungsleistung und Genauigkeit der Pose gegenseitig immer weiter verstärken (siehe Abschnitt 4.3.3).

8.1.3 Evaluierung des Demonstrators

Um die Fähigkeiten des entwickelten Systems einschätzen zu können, wird eine umfangreiche Evaluierung des Demonstrators vorgenommen. Diese besteht aus zwei wesentlichen Bestandteilen: einem theoretischen Teil (siehe Kapitel 6), in dem einzelne Eigenschaften analytisch ermittelt werden und einem experimentellen Teil, in dem sich der Demonstrator bezüglich der übrigen Anforderungen in praxisnahen Versuchen bewähren muss (vgl. Kapitel 7).

Im Rahmen der theoretischen Analyse wird der Einfluss diverser Faktoren untersucht, u. a. der Positionsfehler durch:

- vernachlässigte Messgrößen (Neigungswinkel, Bodenunebenheiten, Neigung der Marker),
- den Messfehler des Gierwinkels,
- eine ungenaue Extraktion eines Markers im Bild und
- das Ladungsgewicht.

Für die experimentelle Evaluierung wird zunächst eine Evaluierungsmethodik entwickelt, die es erlaubt, die Leistungsfähigkeit präzise ohne ein Referenzsystem zu bewerten. Dies gelingt in statischen und dynamischen Versuchen durch den Vergleich gemessener geometrischer Transformationen zwischen statischen Referenzpunkten an der Hallendecke mit den entsprechenden Soll-Werten für diese Transformationen (siehe Abschnitt 4.3.5).

8.1.4 Erzielte Ergebnisse

Es wird ein kamerabasiertes, flexibles Lokalisierungssystem vorgestellt, das aus kostengünstigen, handelsüblichen Komponenten besteht. Das System erfüllt die gestell-

ten Anforderungen (siehe Kapitel 3) voll und ist vielfach deutlich leistungsfähiger als vergleichbare, am Markt verfügbare Systeme. Nach aktuellem Stand lässt sich mit einfachen Methoden eine Lagerhalle samt der enthaltenen Flurförderzeuge für wenige hundert Euro mit dem Lokalisierungssystem ausstatten. Zugleich werden Maßnahmen erarbeitet, welche die inhärenten Schwächen kostengünstiger Endkundenprodukte teilweise ausgleichen und dadurch einen industriellen Einsatz kostengünstiger Module rechtfertigen können (siehe Unterkapitel 3.3 und 3.4). Die Analyse der Eigenschaften und des typischen Verhaltens ermöglicht ein umfangreiches Verständnis der Funktionsweise der genutzten Algorithmen. Tabelle 8-1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften des entwickelten Lokalisierungssystems.

Tabelle 8-1: Wesentliche Eigenschaften des Demonstrators

Anforderung	Fähigkeit	Abschnitt
Robustheit (Marker Erkennbarkeit)	99,95 %	7.2.2
Richtigkeit	<±40 mm (3 σ)	6.1
Präzision	<±70 mm (3 σ)	7.2.5
Auflösung	<1 mm / 0,01°	7.2.4
Latenz	<60 ms	7.2.3
Frequenz	30 Hz	7.2.3
Batterielaufzeit	>24 h	7.6.2
Startdauer	<22 s	7.6.4
Vermessung der Referenzpunkte	Teach-in	7.5
Max. Fahrgeschwindigkeit	<12 km/h	7.1.2
Kosten	Sehr gering	7.6.1

8.2 Ausblick

Auf dem aktuellen Stand bieten die entwickelten Verfahren die Grundlage für eine Umsetzung praxistauglicher Systeme zur Lokalisierung von Flurförderzeugen aus kostengünstigen Komponenten. Ein solches, insgesamt kostengünstiges System erscheint in der Praxis möglich. Forschung und Industrie können auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen und die vorgeschlagenen Methoden anwenden und weiterentwickeln. Um die Entwicklung und Evaluierung ähnlicher Lokalisierungssysteme zu erleichtern, wird der Quellcode des in dieser Arbeit entwickelten Lokalisierungssystems nach Veröffentlichung dieser Arbeit interessierten Entwicklern unter einer Open Source Lizenz zur Verfügung gestellt.

Es kristallisieren sich drei wesentliche Kategorien aus den Bereichen Weiterentwicklung und Anwendung der beschriebenen Ansätze heraus. Im Bereich der Logistik kommen die Weiterentwicklung des Ansatzes zur Lokalisierung von Flurförderzeugen bzw. die Nutzung des Systems in zusätzlichen Anwendungsfällen in Betracht. Außerhalb von Produktion und Logistik kann das Lokalisierungssystem ggf. Anwendung finden, wenn die Einschränkungen und Rahmenbedingungen den Einsatz sinnvoll erscheinen lassen.

8.2.1 Technische Weiterentwicklung der Lokalisierung

Eine Weiterentwicklung des Messprinzips kann bezüglich aller Eigenschaften erfolgen. Insbesondere die Vermessung per Teach-in weist Optimierungspotentiale auf. Eine deutliche Reduktion der systematischen Fehler in diesem Bereich ist Voraussetzung für die Bestimmung einer zu klassischen Messverfahren konkurrenzfähigen Karte. Die sehr genaue Messung des Gierwinkels stellt hierbei die größte Herausforderung dar, eine Lösung erhöht aber zugleich die Präzision im Betrieb weiter (vgl. Abschnitt 7.3.2).

Eine genauere Kalibrierung kann ebenfalls die Präzision steigern. Hier gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze:

1. Der Einsatz einer teuren, hochgenau gefertigten Kalibriernormale in Kombination mit einem leistungsfähigen, kompatiblen Kalibrierprozess [DEM-2011, S. 223f.] führt voraussichtlich zu einer besseren *Posenschätzung* (siehe Unterkapitel 7.3). Zunächst stehen die zusätzlichen Kosten dem Bedarf einer kostengünstigen Kalibrierung entgegen. Für kommerzielle Anbieter kann sich diese Maßnahme jedoch amortisieren und durch ein einheitliches Vorgehen eine konstante Qualität der Kalibrierung sichergestellt werden.
2. Die Verwendung eines komplexeren Kameramodells zur Kalibrierung verspricht besonders dann eine höhere Präzision, wenn das Lochkameramodell die Fehler kostengünstiger Kameras nicht gut genug beschreiben kann. Die größere Zahl der Parameter eines komplexeren Kameramodells bedingt jedoch auch einen höheren Aufwand bei der Kalibrierung. Albarelli et al. zeigen, dass dieser Aufwand in vielen Fällen nicht notwendig ist [ALB-2010].

Auch leicht umzusetzende Maßnahmen, etwa die Vermeidung der Nutzung von Markern in den Randbereichen, können bereits die Präzision steigern und die Latenz senken. Eine fundierte Evaluierung dieses Ansatzes kann möglicherweise nur über die Anbringung vieler Marker oder den Einsatz eines kostenträchtigen Referenzsystems erfolgen.

Die Fusion des *Location Sensors* mit weiterer Sensorik, z. B. der Odometrie oder einer externen IMU, kann mehrere positive Auswirkungen vereinen.

1. Die Fusion mit anderen Sensoren und weiteren Funktionsmustern kann die Präzision steigern. Dazu sind nicht zwingend zwei Recheneinheiten notwendig, da der Raspberry Pi [RS-2013] mit zwei Kameras bestückt werden kann.
2. Eine Nutzung weiterer Sensoren kann auch die Verfügbarkeit der Messungen steigern, etwa in Form einer relativen Positionsbestimmung [MAU-2012, S. 92ff.], wenn kein Marker gefunden wird. Die Anzahl der Marker kann wie bei ZENOWAY [ALE-2013] deutlich reduziert werden, da auf die Markerextraktion solange verzichtet werden kann, wie die Positionsbestimmung mittels der übrigen Sensoren ausreicht. Die Markerextraktion kann ggf. solange gestoppt werden bis die Position des Fahrzeugs auf einen im Bild sichtbaren Marker hindeutet.
3. Die systematischen Fehler durch die vernachlässigten Neigungen lassen sich prinzipiell messen und entsprechend auch korrigieren. Für eine Verbesserung der Genauigkeit muss diese Messung sehr genau, also sowohl richtig als auch präzise sein. In explorativen Versuchsmessungen mit einer kostengünstigen IMU wurde nur eine Präzision von etwa 1° erreicht. Erforderlich ist eine Genauigkeit $<0,2^\circ$.
4. Die Belichtungszeitbeschränkung kann aus der gemessenen Geschwindigkeit abgeleitet werden und muss nicht aus der Schätzung der Geschwindigkeit ermittelt werden. Schwankungen in der Geschwindigkeit ließen sich so vermeiden und die Einschränkungen durch die Begrenzung der Belichtungszeit reduzieren.

Eine Funktionsintegration durch Ableitung zusätzlicher Informationen aus den Positionsdaten erscheint ebenfalls möglich. In Abschnitt 7.2.5 wird vorgeschlagen anhand der Messdaten die Neigung des Fahrzeugs zu schätzen und dadurch zusätzliche Sensorfunktionen zu realisieren. Denkbar sind z. B. die Erkennung der Aufnahme / Abgabe von Ladung bzw. des groben Gewichts der Ladung aus der Positionsänderung am Aufnahme / Abgabeort. Alternativ kann bei bekanntem Ladungsgewicht eine Schätzung der Hubhöhe im Hochregallager erfolgen. Die Integration weiterer Funktionen eines klassischen Staplerterminals in die Recheneinheit birgt zusätzliche Synergien. Über eine akustische oder optische Schnittstelle können kostengünstig Signale oder Anweisungen, z. B. auszuführende Aufträge, an den Fahrer weitergeben werden und über Eingabeschnittstellen eine Bestätigung durch den Fahrer erfolgen. Eine einfache Eingabe kann dabei über einen Schalter erfolgen, komplexe Interaktionen sind über eine Spracheingabe möglich, wie diese in diversen Smartphone und Smart-Home Produkten bereits integriert ist. Im Bereich der Kommissionierung gibt

es mit Pick-by-voice bereits Konzepte, die vergleichbare Funktionen in der Intralogistik umsetzen [MAR-2014, S. 401].

8.2.2 Anwendungsmöglichkeiten in Produktion und Logistik

Für das entwickelte Messverfahren gibt es weitere unmittelbare Anwendungen in Produktion und Logistik, die keine signifikante Weiterentwicklung der Algorithmen erfordern. Eine tatsächliche Eignung für den konkreten Anwendungsfall ist vorab zu prüfen.

Die automatische Beladung eines LKW mit Paletten und die Navigation in dessen Auflieger stellt aktuelle, automatisierte Systeme noch immer vor Herausforderungen [GÜN-2011]. Hier ist es denkbar, unter dem Dach des LKW die Marker an jeden „Lagerplatz“ anzubringen und mit dem Lokalisierungssystem ausgestattete Fahrzeuge beim Beladungsvorgang zu unterstützen. Das für das Lager zuständige IT-System kann dazu die Informationen über die für jeden LKW individuellen Marker und ggf. zusätzliche Metainformationen zum LKW, z. B. ein 3D Modell des Innenraums, mit dem Transportauftrag an ein geeignetes fahrerloses Transportsystem übermitteln und das betroffene FTF so bei der Ausführung des Auftrags unterstützen.

Falls nur an diskreten Punkten die Position des Flurförderzeugs von Bedeutung ist, genügt es an bestimmten Identifikationspunkten Marker anzubringen und auf die Echtzeitverfolgung des Flurförderzeugs in den übrigen Teilen des Lagers oder der Produktionsstätte zu verzichten. Auf diese Weise lässt sich beispielsweise kostengünstig feststellen welchen Bahnhof oder Bereitstellort ein Routenzug erreicht hat. Auch in der Kommissionierung kann die Positionsbestimmung Zusatznutzen erzielen. Die hinreichend genaue Lokalisierung eines Kommissionierwagens kann die Infrastruktur eines Pick-by-light Systems [MAR-2014, S. 401] auf dem Wagen statt in der Umgebung ermöglichen. Der Kommissionierer bekäme anhand von LEDs oder komplexeren Anzeigemodulen auf dem Wagen Hinweise zur Navigation im Lager, zu Haltepunkten, Lagerfächern, Ware usw. angezeigt. Aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeit und dem geringen Einfluss des Transportgewichtes auf die Neigung des Wagens ist hier mit einer deutlich höheren Genauigkeit zu rechnen, so dass eine zuverlässige Bestimmung eines Lagerfachs möglich erscheint. Dieser Ansatz ist vergleichbar mit der Lokalisierung eines Einkaufswagens, die Zimmermann [ZIM-2006] bereits mittels einer ähnlichen Lokalisierungsmethode gezeigt hat.

Eine Nutzung des Ansatzes ist auch jenseits von Warenlagern möglich. Die Positionsbestimmung von Maschinen in der Produktion kann prinzipiell genauso erfolgen

wie bei Flurförderzeugen und in einem wandelbaren Produktionsumfeld stets die aktuelle Pose der Maschinen ermitteln.

8.2.3 Sonstige Anwendungsmöglichkeiten

Jenseits der Logistik bieten sich ebenfalls Einsatzmöglichkeiten. Aufgrund des initialen Aufwandes für die Infrastruktur ist eine praktische Nutzung in anderen Bereichen davon abhängig, ob die Umgebung die Infrastruktur zulässt und die Anwendung den zugehörigen Aufwand rechtfertigt. Als KO-Kriterien können nicht nur technische Gegebenheiten, sondern auch die Akzeptanz der Nutzer eine Rolle spielen.

In der Forschung kann die Positionsbestimmung als Hilfsmittel für ein breites Spektrum an Anwendungen dienen.

1. Autonome Fahrzeuge/Roboter benötigen kontinuierlich Positionsinformationen für die Navigation. Forschungsprojekte, die sich mit anderen Teilbereichen der Robotik beschäftigen, müssen dennoch als Grundvoraussetzung eine Positionsschätzung implementieren oder eine entsprechende Lösung zukaufen, obwohl diese nicht unmittelbar Teil der Forschungsaufgabe ist. Die Umsetzung und Integration einer entsprechenden Lösung bindet unnötig Ressourcen, die an anderer Stelle sinnvoller verwendet werden können, wenn ein kostengünstiges Lokalisierungssystem zur Verfügung steht. Somit wird auch die Einstiegshürde in den Bereich der Entwicklung mobiler Roboter gesenkt.
2. Dynamische Bewegungen eines Messwagens können mit dem vorgeschlagenen System in Versuchen verfolgt werden.
3. Die im Rahmen der Evaluierung bestimmte Güte der Positionsbestimmung erlaubt den aufwandsarmen und kostengünstigen Vergleich mit anderen Lokalisierungslösungen und kann als Referenzsystem für die Entwicklung und Evaluierung ungenauerer Lokalisierungssysteme genutzt werden. Mittelfristig fördert dies auch die Entwicklung und Evaluierung robuster, merkmalsbasierter Lokalisierungssysteme, die keinen oder deutlich weniger Infrastrukturaufwand voraussetzen.

Literaturverzeichnis

- [4LO-2017] 4logistic Limited: Produktseite Staplerterminal.
<https://www.4logistic.de/media/pdf/7f/b4/33/2017-DE-MS8-Standard-Series-MK2.pdf>, Aufruf am 31.07.2017.
- [ABA-2004] Ababsa, F.; Mallem, M.; Roussel, D.: Comparison between particle filter approach and Kalman filter-based technique for head tracking in augmented reality systems. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, S. 1021–1026.
- [AIA-2014] AIA: Vision Standards – Your hub for industry standards.
<http://www.visiononline.org/vision-standards.cfm>, Aufruf am 11.04.2014.
- [AIS-2017] AISCI IDENT GmbH: Industrie PCs/Staplerterminals – Fahrzeugterminals. <http://www.aisci-shop.de/Industrie-PCs-Staplerterminals/Fahrzeugterminals/>, Aufruf am 31.07.2017.
- [ALB-2010] Albarelli, A.; Rodolà, E.; Torsello, A.: Robust Camera Calibration using Inaccurate Targets. In: Labrosse, F., et al. (Hrsg.): *British Machine Vision Conference*, 2010, S. 16.1-16.10.
- [ALB-2016] Albrecht, T.; Hüttenbrink, A.: Funk-Lokalisierung für die Steuerung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen und Kommissionierprozessen – Innovative Technik ermöglicht neue Einsatzbereiche. In: *FTS-/AGV-FACTS*, Jg. 1 (2016) Nr. 1, S. 12–13.
- [ALE-2013] Alec Essati: Staplerortung und -navigation. In: *IT Logistics* (2013) Nr. 1, S. 38–39.
- [AND-2013] Andersson, U.: *Laser Navigation System for Automatic Guided Vehicles – From Research Prototype to Commercial Product*. Research report, Luleå University of Technology, 2013.
- [ARM-1996] Armstrong, M. N.: *Self-calibration from image sequences*. Dissertation. Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford, 1996.
- [ARN-2015] Arnon, S.: *Visible light communication*. Cambridge University Press, Cambridge, op. 2015.
- [ART-2017] ARtoolKit: How does ARToolKit work?
<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/documentation/userarwork.htm>, Aufruf am 02.08.2017.

- [ATC-2010] Atcheson, B.; Heide, F.; Heidrich, W.: CALTag: High Precision Fiducial Markers for Camera Calibration. In: Koch, R. (Hrsg.): Vision modeling and visualization, Goslar, 2010, S. 41–48.
- [AXE-2015] Axelson, J.: USB complete – The developer's guide. Lakeview Research LLC, Madison, WI, 2015.
- [AXP-2017] Axper: Vision II Technology. http://axper.com/wp-content/themes/axper/pdf/Vision_II_EN.pdf, Aufruf am
- [AZU-1997] Azuma, R. T.: A Survey of Augmented Reality. In: Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Jg. 6 (1997) Nr. 4, S. 355–385.
- [BAK-2010] Baker, S.; Bennett, E.; Kang, S. B.; Szeliski, R.: Removing rolling shutter wobble 2010 IEEE conference on computer vision and pattern recognition, New York, 2010, S. 2392–2399.
- [BAU-2007] Bauer, M. A.: Tracking Errors in Augmented Reality. Dissertation. Chair for Computer-Aided Medical Procedures & Augmented Reality, Technische Universität München, München, 2007.
- [BEC-2011] Beckhaus, K. T.: Integration von Flurförderzeugen in die IT-Prozesssteuerung der Intralogistik. FML, Garching b. München, 2011.
- [BER-2013] Berczik, P.; Spurzem, R.; Zhong, S.; Wang, L.; Nitadori, K.; Hamada, T.; Veles, A.: Up to 700k GPU Cores, Kepler, and the Exascale Future for Simulations of Star Clusters Around Black Holes. In: Kunkel, J. (Hrsg.): Supercomputing. Springer, Berlin [u.a.], 2013, S. 13–25.
- [BIL-2014] Bildstein, A.; Seidelmann, J.: Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 581–597.
- [BLE-2009] Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM, a Design Research Methodology. Springer London, Guildford, Surrey, 2009.
- [BLU-2016] BlueBotics SA: Your vehicle, our navigation. http://www.bluebotics.com/wp-content/uploads/2016/03/BlueBotics_ANT_2016.pdf, Aufruf am 30.07.2017.
- [BOR-1996] Borenstein, J.; Liqiang Feng: Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, Jg. 12 (1996) Nr. 6, S. 869–880.
- [BOU-2013] Bourscheid, O.: Kamerabasierte Objekterkennung für Standardkomponenten in der Intralogistik. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2013.

- [BRA-2008] Bradski, G.; Kaehler, A.: Learning OpenCV – Learning OpenCV. O'Reilly & Associates, Sebastopol, CA, 2008.
- [BRI-1971] Britting, K. R.: Inertial navigation systems analysis., Cambridge, Mass., United States, 1971.
- [BUB-2014] Bubeck, A.; Gruhler, M.; Reiser, U.; Weißhardt, F.: Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 221–233.
- [BUL-2010] Bulut, Y.; Vines-Cavanaugh, D.; Bernal, D.: Process and Measurement Noise Estimation for Kalman Filtering. In: Proulx, T. (Hrsg.): Proceedings of the 28th IMAC, a conference on structural dynamics, 2010. Springer, New York, 2010, S. 375–386.
- [BUS-1996] Buschmann, F.: A system of patterns. Wiley, Chichester [u.a.], 1996.
- [B-W-2009] b-wise GmbH: Six Sigma – Entstehung und Hintergründe. <https://www.business-wissen.de/hb/entstehung-und-hintergruende/>, Aufruf am 27.07.2017.
- [CAZ-2009] Cazabon, C.: memtester, 2009.
- [CHI-2011] Chih-Hsiung Yang: Unmanned trackless order picking forklift system. Patentschrift US8670892 B2, 2011.
- [CHO-1973] Chow, D. K.: Reliability of Some Redundant Systems with Repair. In: IEEE Transactions on Reliability, Jg. R-22 (1973) Nr. 4, S. 223–228.
- [CHO-1984] Chow, E.; Willsky, A.: Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. In: IEEE Transactions on Automatic Control, Jg. 29 (1984) Nr. 7, S. 603–614.
- [CIZ-2016] Cizek, P.; Faigl, J.; Masri, D.: Low-latency image processing for vision-based navigation systems. In: Okamura, A.; Menciassi, A. (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2016, S. 781–786.
- [CME-2017] CME Services: Secret Video Recorder. CME Services, 2017.
- [COL-2000] Collins, R. T.; Lipton, A. J.; Kanade, T.: Introduction to the special section on video surveillance. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jg. 22 (2000) Nr. 8, S. 745–746.
- [COL-2006] Cole, D. M.; Newman, P. M.: Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2006, S. 1556–1563.

- [COX-2002] Cox, A.; Meskes, M.; Ingram, J.; Cinege, D.: watchdog – a software watchdog daemon, 2002.
- [CRI-2013] Crisp, S.: Camera sensor size: Why does it matter and exactly how big are they? <http://newatlas.com/camera-sensor-size-guide/26684/>, Aufruf am 30.07.2017.
- [CUM-2008] Cummins, M.; Newman, P.: Accelerated appearance-only SLAM- IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Piscataway, N.J., 2008, S. 1828–1833.
- [DAS-2002] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: VERORDNUNG (EG) Nr. 178/2002 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES – EG 178/2002, 2002.
- [DAS-2006] DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG – 2006/42/EG Amtsblatt der Europäischen Union
- [DAT-2009] Datta, A.; Kim, J.-S.; Kanade, T.: Accurate camera calibration using iterative refinement of control points IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops, 2009, S. 1201–1208.
- [DEL-2017] Delvare, J.: Im-sensors, 2017.
- [DEM-1995] Dementhon, D. F.; Davis, L. S.: Model-based object pose in 25 lines of code. In: International Journal of Computer Vision, Jg. 15 (1995) Nr. 1-2, S. 123–141.
- [DEM-2011] Demant, C.; Springhoff, A.; Streicher-Abel, B.: Industrielle Bildverarbeitung – Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. Springer, Heidelberg [u.a.], 2011.
- [DEN-2010] den Otter; Nijhoff: Marker Detection for AR Applications. Infi, 2010.
- [DEU-2008] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.: Leitfaden zur Arbeitsgestaltung. MTM-Institut, Zeuthen, 2008.
- [DEU-2010] Deutsche MTM-Vereinigung e.V.: Handbuch MTM-Logistik, Hamburg, 2010.
- [DEV-2017] developer.android.com: Camera.Parameters. <https://developer.android.com/reference/android/hardware/Camera.Parameters.html>, Aufruf am
- [DIL-1992] Dillencourt, M. B.; Samet, H.; Tamminen, M.: A general approach to connected-component labeling for arbitrary image representations. In: Journal of the ACM, Jg. 39 (1992) Nr. 2, S. 253–280.

- [DIN 1319-1] Deutsches Institut für Normung: DIN 1319-1. DIN Nr. 1319-1, 1995.
- [DIN 18202] Deutsches Institut für Normung: Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. DIN Nr. 18202, 2013.
- [DIN 5725-1] Deutsches Institut für Normung: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Meßverfahren und Meßergebnissen Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe. DIN Nr. 5725-1, 1997.
- [DIN EN 12464-1] Deutsches Institut für Normung: Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. DIN EN Nr. 12464-1, 2011.
- [DIN EN 13698-1] Deutsches Institut für Normung: DIN EN 13698-1. DIN EN Nr. 13698-1, 2004.
- [DIN EN 15620] Deutsches Institut für Normung: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl - Verstellbare Palettenregale - Grenzabweichungen, Verformungen und Freiräume. DIN EN Nr. 15620, 2010.
- [DIN EN 60529] Deutsches Institut für Normung: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code). DIN EN Nr. 60529, 2017.
- [DIN ISO 5725-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 5725-3. DIN ISO Nr. 5725-3, 2003.
- [DOD-2010] Dodel, H.; Häupler, D.: Satellitennavigation. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [DOE-1978] Doerr, J.: Low-cost microcomputing – The personal computer and single-board computer revolutions. In: Proceedings of the IEEE, Jg. 66 (1978) Nr. 2, S. 117–130.
- [DOR-2007] Dorfmueller-Ulhaas, K.: Robust Optical User Motion Tracking Using a Kalman Filter. Bericht, Universität Augsburg, Augsburg, 2007.
- [DRE-2017] Drees, C.: Facebook bastelt jetzt auch am modularen Smartphone. <https://www.mobilegeeks.de/news/facebook-bastelt-jetzt-auch-am-modularen-smartphone/>, Aufruf am 31.07.2017.
- [DUR-1996] Durrant-Whyte, H.; Rye, D.; Nebot, E.: Localization of Autonomous Guided Vehicles. In: Giralt, G.; Hirzinger, G. (Hrsg.): Robotics Research. Springer London, London, 1996, S. 613–625.
- [DUR-2006] Durrant-Whyte, H.; Bailey, T.: Simultaneous localization and mapping – Part I. In: IEEE Robotics & Automation Magazine, Jg. 13 (2006) Nr. 2, S. 99–110.
- [DÜR-2009] Dürr, T.; Beichl, W.: Basis für die Automatisierung – Autonome Navigation für FTS. In: Hebezeuge Fördermittel (2009) Nr. 1-2, S. 24–26.

- [DYN-2007] Dynia, M.; Łopuszański, J.; Schindelhauer, C.: Why Robots Need Maps. In: Prencipe, G. (Hrsg.): Structural information and communication complexity. Springer, Berlin [u.a.], 2007, S. 41–50.
- [ECK-2013] Eckhardt, W.; Heinecke, A.; Bader, R.; Brehm, M.; Hammer, N.; Huber, H.; Kleinhenz, H.-G.; Vrabec, J.; Hasse, H.; Horsch, M.; Bernreuther, M.; Glass, C. W.; Niethammer, C.; Bode, A.; Bungartz, H.-J.: 591 TFLOPS Multi-trillion Particles Simulation on SuperMUC. In: Kunkel, J. (Hrsg.): Supercomputing. Springer, Berlin [u.a.], 2013, S. 1–12.
- [ELL-2010] Elliott, J.: IBM Mainframes – 45+ Years of Evolution. Vortrag, 2010.
- [ELM-2002] Elmenreich, W.: Sensor fusion in time-triggered systems. Technische Universität Wien, Wien, 2002.
- [EMA-2012] Emami, S.; Levgen, K.: Mastering OpenCV with Practical Computer Vision Projects. Packt Publishing, Birmingham, 2012.
- [EMB-2017] embeDD GmbH: DD-WRT, 2017.
- [EMM-2012] Emmerich, J. S.; Roidl, M.; Bich, T.; Hompel, M. ten: Entwicklung von energieautarken, intelligenten Ladehilfsmitteln am Beispiel des inBin. In: Logistics Journal Proceedings (2012)
- [ENG-2012] Engel, J.; Sturm, J.; Cremers, D.: Camera-Based Navigation of a Low-Cost Quadcopter 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), 2012, S. 2815–2821.
- [ENG-2014] Engel, J.; Schöps, T.; Cremers, D.: LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. In: Fleet, D., et al. (Hrsg.): 13th European Conference on Computer Vision (ECCV), Cham, 2014, S. 834–849.
- [ESS-2011] Essati, A.; Wildenauer, H.: Method and system for sensing the position of a vehicle. Patentschrift US9417071 B2, 2011.
- [ESS-2014a] ESSENSIUM: EPS Evaluation Kit.
http://www.essensium.com/images/pdf/EPS_Eval_Kit_Flyer.pdf, Aufruf am 06.08.2017.
- [ESS-2014b] ESSENSIUM NV: EPS Forklift Collision Warning System – How to Increase Warehouse Safety using EPS RTLS.
http://www.essensium.com/images/pdf/EPS_Safety_01AN.pdf, Aufruf am 30.07.2017.
- [ESS-2016] ESSENSIUM: WareTrack: Forklift Tracking for Warehouse Management Systems. <http://www.essensium.com/markets/forklift-tracking.html>, Aufruf am 06.08.2017.
- [EUR-1998] EUROCONTROL European Organization for the Safety of Air Navigation: WGS 84 Implementation manual, Brüssel, 1998.

- [FAB-2012] Fabijańska, A.: A survey of subpixel edge detection methods for images of heat-emitting metal specimens. In: International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Jg. 22 (2012) Nr. 3, S. 250.
- [FAB-2015] Fabijanska, A.: SUBPIXEL EDGE DETECTION IN BLURRY AND NOISY IMAGES. In: International Journal of Computer Science and Applications (2015) Nr. 12-2, S. 1–19.
- [FIA-2005] Fiala, M.: ARTag, a Fiducial Marker System Using Digital Techniques. In: Schmid, C.; Soatto, S.; Tomasi, C. (Hrsg.): IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Los Alamitos, Calif., 2005, S. 590–596.
- [FIA-2010] Fiala, M.: Designing highly reliable fiducial markers. In: IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, Jg. 32 (2010) Nr. 7, S. 1317–1324.
- [FIS-1981] Fischler, M. A.; Bolles, R. C.: Random sample consensus – A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: Communications of the ACM, Jg. 24 (1981) Nr. 6, S. 381–395.
- [FIS-2015] Fischer, G. H. O.: Einflussfaktoren auf die Exposition von Flurförderzeugfahren gegenüber Ganzkörper-Vibrationen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.
- [FM-2017] fm: Lokalisierung per Bluetooth – Jungheinrich entwickelt System zur Indoor-Ortung von Flurförderzeugen. In: FM Das Logistik-Magazin (2017) Nr. 6, S. 56.
- [FOR-2006] Forlizzi, J.; DiSalvo, C.: Service robots in the domestic environment. In: Goodrich, M. A.; Schultz, A. C.; Bruemmer, D. J. (Hrsg.): Human-robot interaction workshop 2006, New York, New York, USA, 2006, S. 258.
- [FOU-2002] Fouskas, K.; Giaglis, G.; Kourouthanassis, P.; Pateli, A.; Tsamakos, A.: On the Potential Use of Mobile Positioning Technologies in Indoor Environments BLED 2002 Proceedings, 2002, S. 33.
- [FRA-2011] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS: awiloc – Lokalisierung in Kommunikationsnetzen. https://www.zio.fraunhofer.de/content/dam/zio/de/documents/PDFs/Flyer/ZIO_Flyer_Awiloc.pdf, Aufruf am 01.08.2017.
- [FRA-2017] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS: Test- und Anwendungszentrum L.I.N.K. <http://www.iis.fraunhofer.de/LINK>, Aufruf am 29.07.2017.

- [GAO-2003] Gao, X.-S.; Hou, X.-R.; Tang, J.; Cheng, H.-F.: Complete solution classification for the perspective-three-point problem. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jg. 25 (2003) Nr. 8, S. 930–943.
- [GAR-2014] Garrido-Jurado, S.; Muñoz-Salinas, R.; Madrid-Cuevas, F. J.; Marín-Jiménez, M. J.: Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. In: Pattern Recognition, Jg. 47 (2014) Nr. 6, S. 2280–2292.
- [GAR-2016] Gartner: Gartner Says Worldwide Smartphone Sales Grew 9.7 Percent in Fourth Quarter of 2015. <http://www.gartner.com/newsroom/id/3215217>, Aufruf am 29.07.2017.
- [GEI-2016] Geiger, J.: Optimierte Platzierung optischer Marker zur Lokalisierung in Warenlagern. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [GEN-1967] Gene Amdahl: Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities AFIPS spring joint computer conference, 1967, 1967, S. 483–485.
- [GIL-2015] Gillert, A.: Acceleration of Marker Detection on the Raspberry Pi with FPGAs for Use on Forklift Trucks. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.
- [GLA-2013] Glauser, W.: Doctors among early adopters of Google Glass. In: CMAJ : Canadian Medical Association journal = journal de l'Association medicale canadienne, Jg. 185 (2013) Nr. 16, S. 1385.
- [GOL-2016a] golem.de: Intels Project-Tango-Smartphone kostet 400 US-Dollar. <http://www.golem.de/news/realsense-intels-project-tango-smartphone-kostet-400-us-dollar-1601-118422.html>, Aufruf am 05.08.2017.
- [GOL-2016b] golem.de: Lenovos Project-Tango-Smartphone kostet 500 Euro. <http://www.golem.de/news/phab-2-pro-lenovos-project-tango-smartphone-kostet-500-us-dollar-1606-121421.html>, Aufruf am 05.08.2017.
- [GOO-2016] Google Inc.: Tango – Google Developers. <https://developers.google.com/tango/>, Aufruf am 05.08.2017.
- [GOO-2017a] Google Inc.: Android, 2017.
- [GOO-2017b] Google Inc.: GLASS. <https://x.company/glass/>, Aufruf am 01.08.2017.

- [GOO-2017c] Google Inc.: Google Maps. www.google.de/maps, Aufruf am 02.08.2017.
- [GRI-2007] Grisetti; Stachniss; Grzonka; Burgard (Hrsg.): A Tree Parameterization for Efficiently Computing Maximum Likelihood Maps using Gradient Descent, 2007.
- [GRI-2010] Grisetti, G.; Kummerle, R.; Stachniss, C.; Frese, U.; Hertzberg, C.: Hierarchical optimization on manifolds for online 2D and 3D mapping IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2010, S. 273–278.
- [GU-2009] Gu, Y.; Lo, A.; Niemegeers, I.: A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Jg. 11 (2009) Nr. 1, S. 13–32.
- [GUI-2008] Guizzo, E.: Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse. In: IEEE Spectrum, Jg. 45 (2008) Nr. 7, S. 26–34.
- [GÜN-2007] Günthner, W. A.: Logistikleistung verbessern durch Einsatz von RFID an Gabelstaplern. Vortrag. Logimat, Stuttgart, 14.02.2007.
- [GUN-2008] Gunther Reinhart: Montage, Handhabung und Industrieroboter. Vorlesungsskript. iw, Technische Universität München, München, 2008.
- [GÜN-2011] Günter Ullrich: Quo vadis FTS? – Fahrerlose Transportsysteme in Vision und Wirklichkeit. In: Hebezeuge Fördermittel (2011) Nr. 10, S. 562–565.
- [GÜN-2012] Günthner, W. A., ten Hompel, M., Tenerowicz-Wirth, P., Büchter, H., Schippl, M.: Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellen- und Zellulare Fördertechnik, 2012.
- [GÜN-2014a] Günthner W.A.; Hohenstein F.; Jung, M.: Das Staplerauge, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, München, 2014.
- [GÜN-2014b] Günthner, W. A.: Forschungsbericht Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom). Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Techn. Univ. München, Garching, 2014.
- [GÜN-2016] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik. Skript zur Vorlesung. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [GUR-1999] Guralnik, V.; Srivastava, J.: Event detection from time series data. In: Chaudhuri, S. (Hrsg.): Proceedings International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD), New York, NY, 1999, S. 33–42.

- [HAG-2011] Hagara, K.: Edge Detection with Sub-pixel Accuracy Based on Approximation of Edge with Erf Function. In: Radioengineering, Jg. 20 (2011) Nr. 2, S. 516–524.
- [HAM-1950] Hamming, R. W.: Error Detecting and Error Correcting Codes. In: Bell System Technical Journal, Jg. 29 (1950) Nr. 2, S. 147–160.
- [HAM-2005] Hampapur, A.; Brown, L.; Connell, J.; Ekin, A.; Haas, N.; Lu, M.; Merkl, H.; Pankanti, S.: Smart video surveillance – Exploring the concept of multiscale spatiotemporal tracking. In: IEEE Signal Processing Magazine, Jg. 22 (2005) Nr. 2, S. 38–51.
- [HAN-2010] Hans-Martin Piazza: Mobile Computing in der Logistik – FM-Interview mit Olaf May, MSSl Vice President Central Europe, Motorola Enterprise Mobility Solutions. In: FM Das Logistik-Magazin (2010) Nr. 7-8, S. 52–54.
- [HAN-2013] handwerk magazin: Acht Smartphones im BAUSTELLENTTEST. <https://www.handwerk-magazin.de/outdoor-smartphones-handys-im-baustellentest/150/381/208019>, Aufruf am 01.08.2017.
- [HAN-2017] handwerk.com: Auf Leitungssuche mit dem Smartphone – 10 clevere Apps für Handwerker. <https://www.handwerk.com/archiv/werkzeug-telefon-150-1141-33353.html>, Aufruf am 01.08.2017.
- [HAR-1989] Haralick, R. M.; Joo, H.; Lee, C.; Zhuang, X.; Vaidya, V. G.; Kim, M. B.: Pose estimation from corresponding point data. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Jg. 19 (1989) Nr. 6, S. 1426–1446.
- [HAR-1992] Harris, C.: Geometry from Visual Motion. In: Blake, A.; Yuille, A. (Hrsg.): Active vision. MIT Press, Cambridge, Mass, 1992, S. 263–284.
- [HAR-2004] Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2004.
- [HAS-2017] Hasselmann, J.: 15.000 Polizisten werden mit Handys ausgestattet – Weil der Digitalfunk immer noch nicht funktioniert, sollen die Polizisten nun Diensthandys bekommen. In: Der Tagesspiegel (2017)
- [HED-2008] Hedley, M.; Humphrey, D.; Ho, P.: System and algorithms for accurate indoor tracking using low-cost hardware2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, 2008, S. 633–640.
- [HEI-1997] Heikkila, J.; Silven, O.: A four-step camera calibration procedure with implicit image correctionIEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997, S. 1106–1112.

- [HEI-2012] Heinly, J.; Dunn, E.; Frahm, J.-M.: Comparative Evaluation of Binary Features. In: Fitzgibbon, A. W. (Hrsg.): 12th European Conference on Computer Vision (ECCV), Berlin, New York, 2012, S. 759–773.
- [HEI-2013] Heißmeyer, S.; Overmeyer, L.; Müller, A.: Optical Indoor Positioning of Vehicles. In: Logistics Journal (2013)
- [HEN-2012] Hennessy, J. L.; Patterson, D. A.; Arpacı-Dusseau, A. C.: Computer Architecture: A Quantitative Approach. Morgan Kaufmann Publishers/Elsevier, San Francisco, CA 94111, 2012.
- [HEN-2014] Henry, P.; Krainin, M.; Herbst, E.; Ren, X.; Fox, D.: RGB-D Mapping: Using Depth Cameras for Dense 3D Modeling of Indoor Environments. In: Khatib, O. (Hrsg.): Experimental robotics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014, S. 477–491.
- [HER-2014] Hergenbahn, B. R.; Henley, T. B.: An introduction to the history of psychology. Wadsworth, Belmont, CA, 2014.
- [HER-2016] Hermann, M.; Pentek, T.; Otto, B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. In: Bui, T. X.; Sprague, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2016, S. 3928–3937.
- [HES-2014] Hesch, J. A.; Kottas, D. G.; Bowman, S. L.; Roumeliotis, S. I.: Camera-IMU-based localization – Observability analysis and consistency improvement. In: The International Journal of Robotics Research, Jg. 33 (2014) Nr. 1, S. 182–201.
- [HEU-2015] Heuberger, A.: TEST- UND ANWENDUNGSZENTRUM L.I.N.K. https://www.iis.fraunhofer.de/content/dam/iis/de/doc/lv/201503_LINK_DINlang_4S_de_web-2.pdf, Aufruf am 29.07.2017.
- [HIE-2016] Hietanen, A.; Lankinen, J.; Kämäräinen, J.-K.; Buch, A. G.; Krüger, N.: A comparison of feature detectors and descriptors for object class matching. In: Neurocomputing, Jg. 184 (2016), S. 3–12.
- [HIR-2008] Hirzer, M.: Marker Detection for Augmented Reality Applications. Graz University of Technology, Austria, 2008.
- [HOF-2013] Hoffmann, O.: Flexibilität ohne Kapitalbindung – Mietstapler – eine effiziente Variante für Kurzzeit-Einsätze. In: Hebezeuge Fördermittel Sonderheft Flurförderzeuge (2013), S. 42–44.
- [HOF-2015] Hofbauer, A.; Glawe, R.: Using UAVs towards mapping of and localization in warehouses. Studienarbeit, Technische Universität München, München, 2015.
- [HOH-2012] Hohenstein, F.; Günthner, W. A.: Anforderungen und Fähigkeiten gegenwärtiger Stapler. In: Bruns, R. (Hrsg.): Tagungsband - 9. Ham-

burger Staplertagung. Helmut Schmidt Universität, Hamburg, 2012, S. 5–21.

- [HOH-2014] Hohenstein, F. C.: Systementwurf und Umsetzung einer funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung für eine wandlungsfähige und effiziente Transportausführung. Dissertation. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2014.
- [HOR-1981] Horn, B. K.; Schunck, B. G.: Determining optical flow. In: Artificial Intelligence, Jg. 17 (1981) Nr. 1-3, S. 185–203.
- [IDE-2016] IdentPro GmbH: Staplerortung mit Laser – Robustes optisches System. <http://identplus.net/staplerortung/>, Aufruf am 29.07.2017.
- [IEEE STD 802.11-2016] IEEE Standards Association: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std Nr. 802.11-2016, 2016.
- [ILA-2017] Ila, V.; Polok, L.; Solony, M.; Svoboda, P.: SLAM++ -A highly efficient and temporally scalable incremental SLAM framework. In: The International Journal of Robotics Research, Jg. 36 (2017) Nr. 2, S. 210–230.
- [IND-2017a] INDYON GmbH: Track+Race LocatingSystem – Optimierung staplerbedienter Lagerprozesse. http://www.indyon.de/images/pdf/de/Flyer_TR_DE.pdf, Aufruf am 27.07.2017.
- [IND-2017b] industrialradio.de: Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie (ZDKI). <http://www.industrialradio.de/>, Aufruf am 06.08.2017.
- [INT-2014] Intermec by Honeywell: Vehicle Mount RFID Reader. <https://www.honeywellaidc.com/en/-/media/en/files-public/data-sheets/iv7-rfid-vehicle-reader-data-sheet-en.pdf>, Aufruf am 31.07.2017.
- [ISO/IEC 15961-1:2013] International Standards Organization: ISO/IEC 15961. ISO/IEC Nr. 15961-1:2013, 2013.
- [ISO/IEC 15962:2013] International Standards Organization: ISO/IEC 15961. ISO/IEC Nr. 15962:2013, 2013.
- [ISO/IEC 7498-1] International Standards Organization: Open Systems Interconnection - Basic Reference Model: The Basic Model. ISO/IEC Nr. 7498-1, 1994.
- [ITS-2014] Itseez: OpenCV – Camera Calibration and 3D Reconstruction. http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html, Aufruf am 20.11.2014.

- [ITS-2017] Itseez: OpenCV Projektseite. <http://opencv.org/>, Aufruf am 28.07.2017.
- [JÄH-2005] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. Springer, Berlin, 2005.
- [JÄH-2012] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung – Und Bildgewinnung. Springer Vieweg, Berlin u.a., 2012.
- [JI-2008] Ji, H.; Liu, C.: Motion blur identification from image gradientsIEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2008, S. 1–8.
- [JON-2017] Jones, D.: Picamera, 2017.
- [JUN-2014a] Jungheinrich AG: EFG 110/110k/113/115 – Electric three-wheel truck (1,000/1,250/1,500 kg). http://www.jungheinrich.com/uploads/jh_importer/assets_product_5365_en-ZKW____pdf___link/EFG_110____113____115_data_sheet.pdf, Aufruf am 30.07.2017.
- [JUN-2014b] Jung, Le, Atz, Günthner: Entwicklung, Umsetzung und Evaluierung eines dezentralen LagerverwaltungssystemsLogistics Journal, 2014.
- [JUN-2014c] Jung, M.; Hohenstein, F.; Günthner, W. A.: Staplerauge: A Framework for Camera-Based Sensor Functions on Forklift Trucks. In: Clausen, U.; Hompel, M. ten; Meier, J. F. (Hrsg.): Efficiency and Innovation in Logistics, Cham, 2014, S. 77–88.
- [JUN-2015] Jung, M.; Günthner, W. A.: An accurate and efficient camera-based indoor positioning approach for intralogistic environmentsXXI International Conference On Material Handling, Constructions and Logistics, 2015, S. 133–138.
- [JUN-2016] Jungheinrich Vertrieb Deutschland AG & Co KG: ETV/ETM 214/216 – Elektro-Schubmaststapler (1.400/1.600 kg). http://www.jungheinrich.de/fileadmin/minion/de/tx_jhproducts_ffz/5630_de-de/assets/typenblatt_etm_etv_214__216.pdf, Aufruf am 05.08.2017.
- [JUN-2017a] Jungheinrich AG: EFG 213/215/216k/216/218k/218/220 – Elektro-Dreiradstapler (1.300/1.500/1.600/1.800/2.000 kg). http://www.jungheinrich.de/fileadmin/minion/de/tx_jhproducts_ffz/7164_de-de/assets/typenblatt_efg_213_215_216k_216_218k_218_220.pdf, Aufruf am 30.07.2017.
- [JUN-2017b] Jungheinrich AG: Prozessoptimierung. <http://www.jungheinrich.de/prozessoptimierung/>, Aufruf am 31.07.2017.

- [JUR-2000] Juran, J. M.: Jurans quality handbook. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [KAL-1960] Kalman, R. E.: A new approach to linear filtering and prediction problems. In: Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering (1960), S. 35–45.
- [KAM-2011] Kamagaew, A.; Stenzel, J.; Nettstrater, A.; Hompel, M. ten: Concept of Cellular Transport Systems in facility logistics. In: Sen Gupta, G. (Hrsg.): 5th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2011, S. 40–45.
- [KAN-2017] Kannenberg, A.: Für gezielte Werbung: Deutsche Post testet Displays mit Gesichtserkennung. <https://heise.de/-3682944>, Aufruf am 05.08.2017.
- [KAR-2005] Karlsson, N.; Di Bernardo, E.; Ostrowski, J.; Goncalves, L.; Pirjanian, P.; Munich, M. E.: The vSLAM Algorithm for Robust Localization and Mapping IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, S. 24–29.
- [KAR-2008] Karcher, H. B.; Kaufmann, J.: UMTS zum Selbermachen: Alles über Femtozellen. <http://www.zdnet.de/39188582/>, Aufruf am 06.08.2017.
- [KAR-2011] Karwowski, W.; Soares, M. M.; Stanton, N.: Human factors and ergonomics in consumer product design – Methods and techniques. Taylor & Francis, Boca Raton, 2011.
- [KAS-2017] Kasper, C.: Work-by-Inclusion in der Logistik – Integration von Menschen mit Hörbehinderung in alltägliche Lagerprozesse. In: Hebezeuge Fördermittel (2017) Nr. 3, S. 84.
- [KAT-1999] Kato, H.; Billinghurst, M.: Marker tracking and HMD calibration for a video-based augmented reality conferencing system Second International Workshop on Augmented Reality, 1999, S. 85–94.
- [KAW-1997] Kawazoe Aguilera, M.; Chen, W.; Toueg, S.: Heartbeat: A timeout-free failure detector for quiescent reliable communication. In: Mavronicolas, M. (Hrsg.): 11th international workshop on Distributed algorithms (WDAG), Berlin [u.a.], 1997, S. 126–140.
- [KHA-2015] Khalid, H.; Shihab, E.; Nagappan, M.; Hassan, A. E.: What Do Mobile App Users Complain About? In: IEEE Software, Jg. 32 (2015) Nr. 3, S. 70–77.
- [KLE-2007] Klein, G.; Murray, D.: Parallel Tracking and Mapping for Small AR Workspaces 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007, S. 1–10.
- [KLE-2013] Kleinert, S.; Overmeyer, L.: Integration von 3D-Kamerasystemen am Gabelstapler. In: Logistics Journal (2013)

- [KLO-2016] Klosowski, T.: How the Raspberry Pi 3 Benchmarks Against Older Models. <http://liferhacker.com/how-the-raspberry-pi-3-benchmarks-against-older-models-1762417275>, Aufruf am 30.07.2017.
- [KOC-2017] Kockskämper, O.: Die 40 schönsten Wochenend-Radtouren in Deutschland. Bielefelder Verlag, Bielefeld, 2017.
- [KOL-1997] Koller, D.; Klinker, G.; Rose, E.; Breen, D.; Whitaker, R.; Tuceryan, M.: Real-time vision-based camera tracking for augmented reality applications. In: Thalmann, D.; Feiner, S.; Singh, G. (Hrsg.): ACM symposium on virtual reality software and technology, New York, New York, USA, 1997, S. 87–94.
- [KÖP-2014] Köppe, E.: Lokalisierung sich bewegender Objekte innerhalb und außerhalb von Gebäuden, 2014.
- [KRA-2014] Krauß, M.; Konrad, R.: Drahtlose ZigBee-Netzwerke – Ein Kompendium. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2014.
- [KRU-2006] Kruegle, H.: CCTV Surveillance: Analog and Digital Video Practices and Technology. Butterworth-Heinemann, 2006.
- [KUM-2011] Kummerle, R.; Grisetti, G.; Strasdat, H.; Konolige, K.; Burgard, W.: G²o: A general framework for graph optimization 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New York, 2011, S. 3607–3613.
- [KUN-2016] Kunow, A.: Raspberry Pi Verkaufszahlen: Mini-PC mit 10 Millionen Nutzern. <http://www.pc-magazin.de/news/raspberry-pi-verkaufszahlen-starter-kit-release-preis-3196825.html>, Aufruf am 30.07.2017.
- [KÜP-2005] Küpper, A.: Location-based services – Fundamentals and applications. Wiley, Chichester, 2005.
- [LAM-2014] LaMonica, M.: Philips Creates Shopping Assistant with LEDs and Smart Phone. <http://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/networks/philips-creates-store-shopping-assistant-with-leds-and-smart-phone>, Aufruf am 05.08.2017.
- [LEH-2015] Lehrstuhl für Geodäsie, TUM: Einmessung optischer Zielmarken für den Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik Garching. Lehrstuhl für Geodäsie, TUM, 2015.
- [LEP-2009] Lepetit, V.; Moreno-Noguer, F.; Fua, P.: EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. In: International Journal of Computer Vision, Jg. 81 (2009) Nr. 2, S. 155–166.
- [LEV-2010] Levinson, J.; Thrun, S.: Robust vehicle localization in urban environments using probabilistic maps IEEE International Conference on Ro-

botics and Automation (ICRA), Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2010, S. 4372–4378.

- [LI-2014] Li, L.: Time-of-Flight Camera - An Introduction. <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>, Aufruf am 29.07.2017.
- [LIF-2013] LIFT and ACCESS: Keytroller Digital Wireless Camera System Designed for Forklifts. <http://www.liftandaccess.com/article/keytroller-digital-wireless-camera-system-designed-forforklifts>, Aufruf am 06.08.2017.
- [LIN-2014] Linde Material Handling GmbH: Linde Safety Pilot: Technischer Durchbruch in Sachen Sicherheit. http://www.linde-mh.ch/de/country_site_ch/newsinfoservice/news_pressespiegel/news_pressespiegel_2_4416.html, Aufruf am 31.07.2017.
- [LIT-2001] Litwiller, D.: CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. https://teledynedalsa.com/public/corp/Photonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf, Aufruf am
- [LIU-2015] Liu, S.: Evaluierung eines funkbasierten RTLS bezüglich des Einsatzes in Warenlagern. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.
- [LOG-2005] Logistik Heute: Flexibel in die Zukunft – Marktübersicht Warehouse Management. In: Logistik Heute (2005) Nr. 6, S. 36–37.
- [LOW-2004] Lowe, D. G.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision, Jg. 60 (2004) Nr. 2, S. 91–110.
- [LUC-1993] Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, Berlin, Heidelberg, 1993.
- [LYM-2003] Lymberis, A.: Smart wearables for remote health monitoring, from prevention to rehabilitation: current R&D, future challenges. In: Carson, E. R.; Summers, R. (Hrsg.): 4th International IEEE EMBS Special Topic Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, 2003, S. 272–275.
- [MAC-2010] Machado, M.: F3, 2010.
- [MAL-2009] Malik, A.: RTLS for Dummies. Wiley, Hoboken, NJ, 2009.
- [MAL-2015] Malinski, V.: Bildverarbeitung auf verteilten Systemen zur Realisierung einer Sensorfunktion am Gabelstapler mittels Sensordaten eines Smartphones. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.

- [MAN-2015] manager magazin: So sieht das neue Google-Glass aus – Erste Fotos vom neuen Gadget. <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/it/google-glass-neue-datenbrille-fuer-volkswagen-dhl-co-a-1069873.html>, Aufruf am 01.08.2017.
- [MAN-2016] Mantiuk, R.; Krawczyk, G.; Zdrojewska, D.: High Dynamic Range Imaging. Wiley, 2016.
- [MAR-2003] Marwedel, P.: Embedded system design. Kluwer, Boston Mass. u.a., 2003.
- [MAR-2014] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [MAR-2015] Marchewka, J. T.: Information technology project management. John Wiley & Sons, Hoboken, 2015.
- [MAU-2009] Mautz, R.: Overview of current indoor positioning systems. In: Geodesy and Cartography, Jg. 35 (2009) Nr. 1, S. 18–22.
- [MAU-2012] Mautz, R.: Indoor positioning technologies, Zürich, 2012.
- [MAY-2014] Mayer, F.; Pantförder, D.: Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production-Systems. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 481–491.
- [MAY-2016] Mayyas, A.; Wei, M.; Chan, S. H.; Lipman, T.: Fuel Cell Forklift Deployment in the USA. In: Stolten, D.; Samsun, R. C.; Garland, N. (Hrsg.): Fuel cells. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016, S. 334–342.
- [MCT-2017] mctx: Zertifiziert für ZENO TRACK – Logistikterminals für videobasierte Staplerortung. <https://systems.mctx.de/de/industrie-terminals-mango/zeno-track-videobasierte-staplerortung>, Aufruf am 05.08.2017.
- [MET-2005] Methley, G.; Crisp, M.; Newman, J.; Ramsdale, P. A.; Rio, M.; Bhatti, S.; Atefi, A.: Efficient mobile mesh networking: attractions, myths and techno-economic roadmap to successful commercial innovation First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2005, S. 361–370.
- [MIC-2015] Micusik, B.; Wildenauer, H.: Descriptor free visual indoor localization with line segments IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015, S. 3165–3173.
- [MIC-2017a] Microsoft Robotics: Kinect Sensor. <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh438998.aspx>, Aufruf am 29.07.2017.

- [MIC-2017b] Microsoft: Kinect-Hardware. <https://developer.microsoft.com/de-de/windows/kinect/hardware>, Aufruf am 29.07.2017.
- [MIC-2017c] Microsoft: Watchdog Timer Driver. <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms856963.aspx>, Aufruf am 29.07.2017.
- [MIR-2012] Mirai Higuchi, Ankur Datta, Takeo Kanade: Software Package for Precise Camera Calibration. http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=617&menu_id=261, Aufruf am 17.06.2015.
- [MIR-2013] Mirlach, M.; Günthner, W. A.; Ulbrich, A.; Beckhaus, K.: Auftragszu- teilungsverfahren für Staplerleitsysteme17. Flurförderzeugtagung 2013. VDI-Verl., Düsseldorf, 2013, S. 67–78.
- [MIR-2016] Mirlach, Michael: München. Expertengespräch am 16.11.2016.
- [MIT-2003] Mittal, A.; Davis, L. S.: M2Tracker: A Multi-View Approach to Seg- menting and Tracking People in a Cluttered Scene. In: International Journal of Computer Vision, Jg. 51 (2003) Nr. 3, S. 189–203.
- [MOB-2002] Mobley, R. K.: An introduction to predictive maintenance. Butter- worth-Heinemann, Amsterdam, 2002.
- [MOH-2015] Mohamed Ezzeldin, M.: Pallet Content Classification for Real-time Applications Mounted on Forklifts using Color and Depth Information. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2015.
- [MUE-2014] Muensterer, O. J.; Lacher, M.; Zoeller, C.; Bronstein, M.; Kübler, J.: Google Glass in pediatric surgery: an exploratory study. In: International journal of surgery (London, England), Jg. 12 (2014) Nr. 4, S. 281–289.
- [MUJ-2012] Muja, M.; Lowe, D. G.: Fast Matching of Binary FeaturesNinth Con- ference on Computer and Robot Vision (CRV), 2012. Conference on Computer and Robot Vision; Conférence en Vision Artificielle et Ro- botique; CRV, Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2012, S. 404–410.
- [MÜL-2004] Müller, B.; Anido, R. d. O.: Distributed real-time soccer tracking. In: Chang, E.; Wang, Y.-F.; Zhao, F. (Hrsg.): Proceedings of the ACM Second International Workshop on Video Surveillance & Sensor Networks, New York, NY, 2004, S. 97–103.
- [MUL-2015] MULTILOK Ltd: LOCAL INDOOR POSITIONING SYSTEM – LIPS Hardware Users' Manual. <https://www.multilux.eu/docs/MRFUM01.pdf>, Aufruf am 06.08.2017.
- [MUN-2014] Munoz-Salinas, R.: ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCV.

- <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>, Aufruf am 28.07.2017.
- [MUN-2016] Munoz-Salinas, R.; Marín-Jimenez, M. J.; Yeguas-Bolivar, E.; Medina-Carnicer, R.: Mapping and Localization from Planar Markers, 2016.
- [MUR-1998] Murphy, K.: Kalman filter toolbox for Matlab – Example of Kalman filtering.
<http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/Kalman/kalman.html>, Aufruf am 30.07.2017.
- [MUR-2000] Murphy, N.: Watchdog Timers. In: Embedded Systems Programming (2000) Nr. 11, S. 112–124.
- [NAN-2009] Nanotron Technologies GmbH: nanoLOC TRX Transceiver Product Brief - Version 2.0.
http://nanotron.com/assets/pdf/products/Factsheet_nanoLOC-NA5TR1.pdf, Aufruf am 06.08.2017.
- [NAR-2005] Nardi, D.; Riedmiller, M.; Sammut, C.; Santos-Victor, J.: RoboCup 2004: Robot Soccer World Cup VIII – Robot Soccer World Cup VIII. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [NAU-2014] Naumann, H.; Löffler-Mang, M.; Schröder, G.: Handbuch Bauelemente der Optik – Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik. Hanser, Carl, München, 2014.
- [NAV-2017] NavVis GmbH: NavVis – Digitizing Indoors. <http://www.navvis.com/>, Aufruf am 03.08.2017.
- [NEU-1999] Neumann, U.; You, S.: Natural feature tracking for augmented reality. In: IEEE Transactions on Multimedia, Jg. 1 (1999) Nr. 1, S. 53–64.
- [NGH-2012] Nghia Ho: POSE ESTIMATION FOR PLANAR TARGET, 2012.
- [NIK-2014] Nikolic, J.; Rehder, J.; Burri, M.; Gohl, P.; Leutenegger, S.; Furgale, P. T.; Siegwart, R.: A synchronized visual-inertial sensor system with FPGA pre-processing for accurate real-time SLAM. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014, S. 431–437.
- [NÜT-2011] Nützi, G.; Weiss, S.; Scaramuzza, D.; Siegwart, R.: Fusion of IMU and Vision for Absolute Scale Estimation in Monocular SLAM. In: Journal of Intelligent & Robotic Systems, Jg. 61 (2011) Nr. 1, S. 287–299.
- [NYQ-1928] Nyquist, H.: Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. In: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Jg. 47 (1928) Nr. 2, S. 617–644.

- [OAS-2015] OASIS: MQTT Version 3.1.1 Plus Errata 01 – OASIS Standard Incorporating Approved Errata 01. <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/mqtt-v3.1.1.html>, Aufruf am 30.07.2017.
- [OBE-1993] Oberkampff, D.; DeMenthon, D.; Davis, L. S.: Iterative pose estimation using coplanar feature points. Computer Vision Laboratory, Center for Automation Research, University of Maryland, College Park, Md., 1993.
- [OBE-1996] Oberkampff, D.; Dementhon, D. F.; Davis, L. S.: Iterative Pose Estimation Using Coplanar Feature Points. In: Computer Vision and Image Understanding, Jg. 63 (1996) Nr. 3, S. 495–511.
- [OHN-2000] Ohno, Y.; Miura, J.; Shirai, Y.: Tracking players and estimation of the 3D position of a ball in soccer games. In: Sanfeliu, A. (Hrsg.): 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Los Alamitos, California, 2000, S. 145–148.
- [OND-2012] Ondrej Miksik; Krystian Mikolajczyk: Evaluation of local detectors and descriptors for fast feature matching Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), 2012, S. 2681–2684.
- [OPE-2013] opencv dev team: OpenCV API Reference – Structural Analysis and Shape Descriptors. http://docs.opencv.org/modules/imgproc/doc/structural_analysis_and_shape_descriptors.html, Aufruf am 12.08.2017.
- [OPE-2017] OpenSLAM.org: OpenSLAM, 2017.
- [OSR-2017] OSRAM: OSRAM EINSTONE – Location Based Services beginnen mit Licht. <https://www.osram.de/einstone>, Aufruf am 05.08.2017.
- [PAP-1999] Papageorgiou, C.; Poggio, T.: Trainable pedestrian detection Proceedings. IEEE International Conference on Image Processing, Piscataway, N.J, 1999, S. 35–39.
- [PAT-2001] Patric Jensfelt: Approaches to Mobile Robot Localization in Indoor Environments. Doctoral Thesis. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2001.
- [PEN-2005] Pentenrieder, K.: Sensor Fusion using the Kalman Filter. <http://campar.in.tum.de/Chair/KalmanFilter>, Aufruf am
- [PEN-2006] Pentenrieder, Katharina, Meier, Peter, Klinker, Gudrun: Analysis of Tracking Accuracy for Single-Camera Square-Marker-Based Tracking. In: In 3rd Workshop Virtuelle und Erweiterte Realität der GI-Fachgruppe VR/AR (2006)
- [PET-1961] Peterson, W.; Brown, D.: Cyclic Codes for Error Detection. In: Proceedings of the IRE, Jg. 49 (1961) Nr. 1, S. 228–235.

- [PFA-1966] Pfaltz, J. L.: Sequential Operations in Digital Picture Processing. In: Journal of the ACM, Jg. 13 (1966) Nr. 4, S. 471–494.
- [PFL-2014] Pflaum, A.; Hohmann, C.; Groß, T.: AUTOMATISCHE ERFASSUNG VON KENNZAHLEN FÜR DAS CONTROLLING – SMART OBJECT-TECHNOLOGIEN ALS BASIS. In: Michael Schenk, et al. (Hrsg.): Tagungsband 19. Magdeburger Logistiktage. Fraunhofer-Institut IFF, 2014, S. 117–120.
- [PHO-2010] Photometrics: Keep the Noise Down! – Low Noise: An Integral Part of High-Performance CCD (HCCD) Camera Systems, 2010.
- [PIE-2017] PIEPER, M.: Mathematische Optimierung – Eine Einführung in die kontinuierliche Optimierung mit Beispielen. Springer, [S.l.], 2017.
- [PRE-1992] Press, W. H.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.; Flannery, B. P.: Numerical recipes in C – The art of scientific computing. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1992.
- [PRI-2016] Prives, S.: Systemkonzept zur Steigerung logistischer Effizienz im Lebensmitteleinzelhandel durch Einsatz intelligenter Behälter. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [QIA-2014] Qiao, Y.: Beschleunigung von Computer Vision Anwendungen auf dem Raspberry Pi mittels FPGA. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2014.
- [RAF-2015] Rafael Munoz Salinas: RaspiCam – C++ API for using Raspberry camera with/without OpenCv. Aplicaciones de la Vision Artificial, 2015.
- [RAF-2017] Rafael Munoz-Salinas: ArUco – a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCV. Aplicaciones de la Vision Artificial, Cordoba, Spanien, 2017.
- [RAJ-2014] Rajagopalan, A. N.; Chellappa, R.: Motion deblurring – Algorithms and systems. University Printing House, Cambridge United Kingdom, 2014.
- [RAM-2012] Rammelmeier, T.; Galka, S.; Günthner, W. A.: Fehlervermeidung in der Kommissionierung. In: Logistics Journal Proceedings (2012) Nr. 01
- [RAS-2017] Raspberry Pi Foundation: Raspberry Pi Documentation – Camera Module.
<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/camera/>, Aufruf am 30.07.2017.

- [RAW-2014] Rawassizadeh, R.; Price, B. A.; Petre, M.: Wearables. In: Communications of the ACM, Jg. 58 (2014) Nr. 1, S. 45–47.
- [REI-2009] Reif, R.: Entwicklung und Evaluierung eines augmented reality unterstützten Kommissioniersystems. FML, München, 2009.
- [REI-2014] Reinecke, M.; Grothaus, H.-P.; Hartanto, R.; Tschirner-Vinke, G.; Viereck, V.: Schlussbericht - Konsortialbericht – MARION - Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten, 2014.
- [RFC 1208] IETF: A Glossary of Networking Terms. RFC Nr. 1208, 1991.
- [ROH-2008] Rohrig, C.; Spieker, S.: Tracking of transport vehicles for warehouse management using a wireless sensor network. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Piscataway, NJ, 2008, S. 3260–3265.
- [RS-2013] RS Components GmbH: Raspberry Pi – Model B. [http://docs-
eu-
rope.electrocomponents.com/webdocs/127d/0900766b8127da4b.pdf](http://docs-
eu-
rope.electrocomponents.com/webdocs/127d/0900766b8127da4b.pdf), Aufruf am 30.07.2017.
- [RUB-2011] Rublee, E.; Rabaud, V.; Konolige, K.; Bradski, G.: ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Piscataway, N.J., 2011, S. 2564–2571.
- [RUP-2009] Ruppel, P.; Gschwandtner, F.: Spontaneous and Privacy-friendly Mobile Indoor Routing and Navigation. GI Jahrestagung, 2009.
- [SAN-2017] Santo Domingo, J.: SSD vs. HDD: What's the Difference? <http://uk.pcmag.com/storage-devices-reviews/8061/>, Aufruf am 06.08.2017.
- [SAX-2012] Saxowsky, H.; Heider, G.: Assistenten in Theorie und Praxis. In: SicherheitsProfi (2012) Nr. 4, S. 16–17.
- [SCH-1981] Schmidt, S. F.: The Kalman filter - Its recognition and development for aerospace applications. In: Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Jg. 4 (1981) Nr. 1, S. 4–7.
- [SCH-2006] Schweighofer, G.; Pinz, A.: Robust pose estimation from a planar target. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Jg. 28 (2006) Nr. 12, S. 2024–2030.
- [SCH-2008a] Schmalstieg, D.; Wagner, D.: Experiences with Handheld Augmented Reality. 6th IEEE & ACM international symposium on mixed and augmented reality, 2008, S. 1–13.
- [SCH-2008b] Schwerdtfeger, B.; Klinker, G.: Supporting order picking with Augmented Reality. In: Livingston, M. A. (Hrsg.): Proceedings. Interna-

- tional Symposium on Mixed and Augmented Reality, Los Alamitos, CA, 2008, S. 91–94.
- [SCH-2011] Schenk, M.: Intralogistik Heute – Ortung für die Prozess-Freigabe. <https://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/intralogistik-heute-ortung-fuer-prozessfreigabe-fraunhofer-iff.pdf>, Aufruf am 29.07.2017.
- [SCH-2016] Schmidt, C.: Klassifizierung von Leergut mittels Machinelearning auf dem Raspberry Pi. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [SCH-2017] schreinerwissen.de: Rechner für das Gewicht von Platten. <http://www.schreinerwissen.de/kg.php>, Aufruf am 30.07.2017.
- [SE-2001] Se, S.; Lowe, D.; Little, J.: Local and global localization for mobile robots using visual landmarksRSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001, S. 414–420.
- [SEA-2008] Searcy, M.; Ure, S.: Laptops in the sand: putting a rugged computer to the test. In: SAA archaeological record, Jg. 8 (2008) Nr. 4, S. 43–46.
- [SER-2010] Serra, A.; Carboni, D.; Marotto, V.: Indoor pedestrian navigation system using a modern smartphone. In: Sa, M. d. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services, New York, Sept. 2010, S. 397.
- [SHA-2012] Shaya, K.; Mavrinac, A.; Herrera, J. L. A.; Chen, X.: A Self-localization System with Global Error Reduction and Online Map-Building Capabilities. In: Hutchison, D., et al. (Hrsg.): Intelligent Robotics and Applications. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 13–22.
- [SHI-2014] Shibata, N.; Yamamoto, S.: GPGPU-Assisted Subpixel Tracking Method for Fiducial Markers. In: Journal of Information Processing, Jg. 22 (2014) Nr. 1, S. 19–28.
- [SHO-1997] Shoval, S.; Zeitoun, I.; Lenz, E.: Implementation of a Kalman filter in positioning for autonomous vehicles, and its sensitivity to the process parameters. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 13 (1997) Nr. 10, S. 738–746.
- [SIL-2012] Siltanen, S.: Theory and applications of marker-based augmented reality, 2012.
- [SMA-2015] smartek vision: Datasheet Gigasetix Camera – GC1392M GC1392C. https://www.smartek.vision/media/pdf/6f/d8/30/datasheet_smartek_gc1392_pdf.pdf, Aufruf am 30.07.2017.

- [SMI-1990] Smith, R.; Self, M.; Cheeseman, P.: Estimating Uncertain Spatial Relationships in Robotics. In: Cox, I. J.; Wilfong, G. T. (Hrsg.): Autonomous Robot Vehicles. Springer New York, New York, NY, 1990, S. 167–193.
- [SMI-2009] Smith, M.; Baldwin, I.; Churchill, W.; Paul, R.; Newman, P.: The New College Vision and Laser Data Set. In: The International Journal of Robotics Research, Jg. 28 (2009) Nr. 5, S. 595–599.
- [SPI-2017] Spiegel Online: Real lässt Gesichter von Kunden analysieren. <http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/gesichtsanalyse-haendler-testen-kunden-im-kassenbereich-a-1149763.html>, Aufruf am 05.08.2017.
- [STA-2015] Standke, W.: Arbeitsunfallgeschehen 2014, 2015.
- [STE-2000] Steger, C.: Subpixel-precise extraction of lines and edges. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Jg. XXXIII (2000) Nr. B3, S. 141–156.
- [STE-2013] Stemmer Imaging: Grundlagen Zeilenkameras. https://www.stemmer-ima-ing.de/media/uploads/websites/documents/products/cameras/de_DE-Grundlagen-Zeilenkameras-KGL1-201312.pdf, Aufruf am 29.07.2017.
- [STI-2017a] Still GmbH: Fahrerassistenzsysteme für Gabelstapler – die nächste Generation der Automatisierung und Sicherheit. <http://www.still.de/fahrerassistenzsysteme.0.0.html>, Aufruf am 31.07.2017.
- [STI-2017b] Still GmbH: FM-X SE Technische Daten – Schubmaststapler mit Superelastik-Bereifung. http://www.still.de/downloads.php?filename=FM-X_SE_DE_2017_TD_web.pdf, Aufruf am 05.08.2017.
- [STO-2016] Storm, I. T.: Raspberry Pi 3: Leistungsaufnahme und CoreMark-Vergleich. <http://heise.de/-3121139>, Aufruf am 30.07.2017.
- [STR-1999] Stricker, D.; Klinker, G.; Reiners, D.: A fast and robust line-based optical tracker for augmented reality applications. In: Behringer, R. (Hrsg.): Augmented Reality: Placing Artificial Objects in Real Scenes; Proceedings of IWAR '98, 1999, S. 129–145.
- [STR-2013] Straub, J.; Korvald, C.; Nervold, A.; Mohammad, A.; Root, N.; Long, N.; Torgerson, D.: OpenOrbiter – A Low-Cost, Educational Prototype CubeSat Mission Architecture. In: Machines, Jg. 1 (2013) Nr. 1, S. 1–32.

- [STU-2011] Sturm, J.; Magnenat, S.; Engelhard, N.; Pomerleau, F.; Colas, F.; Cremers, D.; Siegwart, R.; Burgard, W.: Towards a benchmark for RGB-D SLAM evaluation Proc. of the RGB-D Workshop on Advanced Reasoning with Depth Cameras at Robotics, 2011.
- [STU-2015] Sturm, J.: Tracking and Mapping in Project Tango. https://jsturm.de/publications/data/sturm2015_dagstuhl.pdf, Aufruf am 05.08.2017.
- [TAK-2017] Taketomi, T.; Uchiyama, H.; Ikeda, S.: Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016. In: IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Jg. 9 (2017) Nr. 1, S. 16.
- [TAM-2013] TAMRON: 219HB – High Quality Machine Vision Lens. http://www.tamron.eu/fileadmin/user_upload/CCTV/Download/Data_Sheets_Machine_Vision/219HB.pdf, Aufruf am 30.07.2017.
- [TBM-2017] tbm hightech control GmbH: Fahrerassistenzsysteme – FAS. http://www.tbm.biz/assets/content/pdf/FAS_DE_2017.pdf, Aufruf am 31.07.2017.
- [TEL-2011] Tellex, S.; Kollar, T.; Dickerson, S.; Walter, Matthew R., Banerjee, Ashis Gopal; Teller, S.; Roy, N.: Understanding Natural Language Commands for Robotic Navigation and Mobile Manipulation. In: Proceedings of the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (2011), S. 1507–1514.
- [THA-2014] Thamer, H.; Kost, H.; Weimer, D.; Thoben, K.-D.; Scholz-Reiter, B.: 3D-Objekterkennung von heterogenen Stückgütern in ungeordneten Packszenarien. In: Michael Schenk, et al. (Hrsg.): Tagungsband 19. Magdeburger Logistiktage. Fraunhofer-Institut IFF, 2014, S. 133–140.
- [THE-2016] The Mag Pi: Raspberry Pi 3 is out now! Specs, benchmarks & more. <https://www.raspberrypi.org/magpi/raspberry-pi-3-specs-benchmarks/>, Aufruf am 30.07.2017.
- [THE-2017a] The LineageOS Project: LineageOS Android Distribution, 2017.
- [THE-2017b] The OpenWrt developer team: OpenWrt, 2017.
- [THR-1999] Thrun, S.; Fox, D.; Burgard, W.: Probabilistic Robotics, 1999-2000.
- [THR-2004] Thrun, S.; Szeliski, R.; Dahlkamp, H.: CS 223-B: Introduction to Computer Vision – Lecture 2 Lenses and Camera Calibration. Vorlesungsfolien. Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA, 2004.
- [THR-2005] Thrun, S.; Montemerlo, M.: The Graph SLAM Algorithm with Applications to Large-Scale Mapping of Urban Structures. In: The Interna-

- tional Journal of Robotics Research, Jg. 25 (2005) Nr. 5-6, S. 403–429.
- [TIL-2013] Tilch, S.: CLIPS – Development of a Novel Camera and Laser-Based Indoor Positioning System. Dissertation. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich, Zurich, 2013.
- [TOT-2014] TotalTrax, I.: The Sky-Trax System™. <http://totaltraxinc.com/index.php/smart-forklift-solutions/forklift-tracking/sky-trax>, Aufruf am 22.09.2014.
- [TRE-2013] Trenkle, A.; Seibold, Z.; Stoll, T.; Furmans, K.: FiFi – Steuerung eines FTF durch Gesten- und Personenerkennung. In: Logistics Journal (2013)
- [TRI-2000] Triggs, B.; McLauchlan, P. F.; Hartley, R. I.; Fitzgibbon, A. W.: Bundle Adjustment — A Modern Synthesis. In: Goos, G., et al. (Hrsg.): International Workshop on Vision Algorithms, Berlin, 2000, S. 298–372.
- [TSO-2013] Tso, F. P.; White, D. R.; Jouet, S.; Singer, J.; Pezaros, D. P.: The Glasgow Raspberry Pi Cloud: A Scale Model for Cloud Computing Infrastructures IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2013, S. 108–112.
- [TUR-2002] Turowski, K.: Vereinheitlichte Spezifikation von Fachkomponenten – Memorandum des Arbeitskreises 5.10.3 Komponentenorientierte betriebliche Anwendungssysteme. Gesellschaft für Informatik, 2002.
- [UCH-2012] Uchiyama, H.; Marchand, E.: Object Detection and Pose Tracking for Augmented Reality: Recent Approaches, 18th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), Kawasaki, Japan, 2012.
- [ULE-2011] Ulewicz, S.: Evaluierung eines optischen RTLS im Praxis-Test-Einsatz. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2011.
- [ULL-2014] Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme – Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [VAD-2003] Vadala, D.: Managing RAID on Linux. O'Reilly, Sebastopol, CA, 2003.
- [VDE-2017] VDE: FUNKTECHNOLOGIEN FÜR INDUSTRIE 4.0 – VDE POSITIONSPAPIER, 2017.
- [VID-2017] VideoLAN team: VLC media player, 2017.

- [VOA-1998] Voas, J.: COTS software – The economical choice? In: IEEE Software, Jg. 15 (1998) Nr. 2, S. 16–19.
- [VOG-2014] Vogel-Heuser, B.: Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014, S. 37–48.
- [VOL-2009] Volker Unruh: Individuelle Finanzierungsmöglichkeiten für Gabelstapler. <http://www.mm-logistik.vogel.de/individuelle-finanzierungsmoeglichkeiten-fuer-gabelstapler-a-228018/>, Aufruf am 31.07.2017.
- [WAG-2007] Wagner, D.; Schmalstieg, D.: ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices. In: Computer Vision Winter Workshop 2007 (2007)
- [WAL-2015] Waldmann, N.: Wissen: Warum die Kapazität eurer USB-Powerbank so gering ist – Hersteller werben mit großen mAh-Angaben, aber was steckt wirklich dahinter? <http://www.allround-pc.com/artikel/wissen/2015/wissen-warum-die-kapazitaet-eurer-usb-powerbank-so-gering-ist>, Aufruf am 30.07.2017.
- [WED-2016] Wedler, G.: Efficient marker-based localization of ground conveyors with a camera-enabled Raspberry Pi. Studienarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2016.
- [WEI-2011] Weimer, D.; Kohler, S.; Hellert, C.; Doll, K.; Brunsmann, U.; Krzikalla, R.: Gpu architecture for stationary multisensor pedestrian detection at smart intersectionsIEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Piscataway, NJ, Piscataway, NJ, 2011, S. 89–94.
- [WEL-1987] Wells, D.; Beck, N.; Delikaraoglou, D.; Kleusberg, A.; Krakiwsky, E. J.; Lachapelle, G.; Langley, R. B.; Nakiboglu, M.; Schwarz, K. P.; Tranquilla J. M.; Vanicek, P.: Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, and University of New Brunswick, 1987.
- [WET-1993] Wetteborn, H.: Laserabstandsermittlungsvorrichtung. Patentschrift DE 4340756 A1, 1993.
- [WIE-2004] Wiedemann, A.: Handbuch Bauwerksvermessung. Birkhäuser Basel, Basel, 2004.
- [WIK-2017a] Wikimedia Foundation: Commercial off-the-shelf. https://de.wikipedia.org/wiki/Commercial_off-the-shelf, Aufruf am 30.07.2017.
- [WIK-2017b] Wikimedia Foundation: Comparison of single-board computers. https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_single-board_computers, Aufruf am 30.07.2017.

- [WIL-2006] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2006.
- [WÖL-2015] Wölbart, C.: Fairphone 2: Android-Smartphone in Modulbauweise. <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Fairphone-2-Android-Smartphone-in-Modulbauweise-2690732.html>, Aufruf am 30.07.2017.
- [WUT-2015] Wuttke, J.: Imfit – a C library for Levenberg-Marquardt least-squares minimization and curve fitting, 2015.
- [YAN-2012] Yang, X.; Cheng, K.-T.: LDB: An ultra-fast feature for scalable Augmented Reality on mobile devicesIEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Piscataway, NJ, 2012, S. 49–57.
- [YIT-1997] Yitzhaky, Y.; Kopeika, N. S.: Identification of Blur Parameters from Motion Blurred Images. In: Graphical Models and Image Processing, Jg. 59 (1997) Nr. 5, S. 310–320.
- [YOC-2017] Yocto Project: Yocto Project. Linux Foundation, 2017.
- [YOU-2001] You, S.; Neumann, U.: Fusion of vision and gyro tracking for robust augmented reality registration. In: Takemura, H.; Kiyokawa, K. (Hrsg.): IEEE Virtual Reality 2000. IEEE Virtual Reality International Symposium, Los Alamitos, Calif., 2001, S. 71–78.
- [ZHA-1998] Zhanping Xu; Rudolf Schwarte; Horst-Guenther Heinol; Bernd Buxbaum; Thorsten Ringbeck: Smart pixel : photonic mixer device (PMD) ; new system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip. In: Cheung, E. H. M. (Hrsg.): Fifth International Conference on Mecha-tronics and Machine Vision in Practice, 1998, S. 259–264.
- [ZHA-2002a] Zhang, L.; Ghosh, B. K.: Line segment based map building and local-ization using 2D laser rangefinderIEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway, NJ, 2000, S. 2538–2543.
- [ZHA-2002b] Zhang, X.; Fronz, S.; Navab, N.: Visual marker detection and decod-ing in AR systems: a comparative studyInternational Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Los Alamitos, CA, 2002, S. 97–106.
- [ZHO-2008] Zhou, F.; Duh, H. B.-L.; Billinghamurst, M.: Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. In: Livingston, M. A. (Hrsg.): Proceedings. International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Los Alamitos, CA, 2008, S. 193–202.
- [ZIM-2006] Zimmerman, T. G.: Tracking Shopping Carts Using Mobile Cameras Viewing Ceiling-Mounted Retro-Reflective Bar CodesFourth IEEE In-

ternational Conference on Computer Vision Systems, Piscataway,
N.J., 2006, S. 36.

Durch den Autor betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der durch diese Dissertation aufgegriffenen Forschungsthematik wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten wurde durch den Autor wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

Kurzbeleg	Titel	Autor	Art	Abgabe
[BOU-2013]	Kamerabasierte Objekterkennung für Standardkomponenten in der Intralogistik	Bourscheid, Olivier	Bachelorarbeit	2013
[QIA-2014]	Beschleunigung von Computer Vision Anwendungen auf dem Raspberry Pi mittels FPGA	Qiao, Yisong	IDP	2014
[LIU-2015]	Evaluierung eines funkbasierten RTLS bezüglich des Einsatzes in Warenlagern	Liu, Song	Masterarbeit	2015
[MAL-2015]	Bildverarbeitung auf verteilten Systemen zur Realisierung einer Sensorfunktion am Gabelstapler mittels Sensordaten eines Smartphones	Malinski, Vasyl	IDP	2015
[GIL-2015]	Acceleration of Marker Detection on the Raspberry Pi with FPGAs for Use on Forklift Trucks	Gillert, Alexander	IDP	2015
[HOF-2015]	Using UAVs towards mapping of and localization in warehouses	Hofbauer, Andreas; Glawe, Ralf	IDP	2015
[MOH-2015]	Pallet Content Classification for Real-time Applications Mounted on Forklifts using Color and Depth Information	Mohamed Ezzeldin, Mohamed	IDP	2015
[SCH-2016]	Klassifizierung von Leergut mittels Machinelearning auf dem Raspberry Pi	Schmidt, Christoph	IDP	2016
[WED-2016]	Efficient marker-based localization of ground conveyors with a camera-enabled Raspberry Pi	Wedler, Grzegorz	IDP	2016
[GEI-2016]	Optimierte Platzierung optischer Marker zur Lokalisierung in Warenlagern	Geiger, Julian	IDP	2016

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1: Teilschritte der DRM (nach [BLE-2009, S. 15])	4
Abbildung 2-1: Phasen der Extraktion eines Fiducials [HIR-2008, S. 2ff.; GAR-2014; MUN-2014]	15
Abbildung 2-2: Augmented Reality Pipeline in AR-Toolkit (nach [ART-2017])	16
Abbildung 2-3: Feature Detection, Description und Matching (nach [EMA-2012, S. 101])	17
Abbildung 2-4: Feature Matching mittels SIFT [LOW-2004]	18
Abbildung 2-5: Navigation mittels SLAM (nach [DUR-2006])	20
Abbildung 2-6: Fahrzeugnavigation mit einer Leitspur	24
Abbildung 2-7: Fahrzeugnavigation mittels Rasterverfahren [ULL-2014, S. 111ff.]	24
Abbildung 2-8: Lasernavigation am Gabelstapler (nach [IDE-2016])	25
Abbildung 4-1: Folgefehler fehlerbehafteter Winkelbestimmung: korrekte Transformation (schwarz), gemessene Transformation (grün)	57
Abbildung 4-2: Mögliche Ursachen für falsch-negative Fehler bei der Extraktion von Markerkandidaten	61
Abbildung 4-3: Fehlerquellen bei der Bestimmung der Marker ID	62
Abbildung 4-4: Klemmhalterung zur Anbringung des Sensors am Fahrerschutzdach	63
Abbildung 4-5: Markerhalterung an der Hallendecke im Projekt „Das Staplerauge“ [GÜN-2014a, S. 114]	64
Abbildung 4-6: Fehler im Abstand zum Marker für statische Distanz (Δz_{stat}) und gemessene Distanz (Δz_{mess})	68
Abbildung 4-7: Positive Rückkopplung zwischen Positionsschätzung und deren Vorhersage	70
Abbildung 4-8: Positive Rückkopplung zwischen Posenschätzung, Positionsvorhersage, Markervorhersage und Marker Erkennbarkeit	71
Abbildung 4-9: Relationen zwischen drei verschiedenen Markern als Referenzgrößen	76
Abbildung 5-1: Softwarearchitektur des Demonstrators	80
Abbildung 5-2: Verzerrte Quadrate unterschiedlicher Größen	83
Abbildung 5-3: Adaption des Verfahrens von Stricker et al. [STR-1999] an die Anforderungen im Warenlager	84

Abbildung 5-4: Lokale Suche mittels Kantenverfeinerung	86
Abbildung 5-5: Kantenverfeinerung im erweiterten Umfeld	86
Abbildung 5-6: Mindestabstand der Stützpunkte zur Verfeinerung der Markerkante	90
Abbildung 5-7: Rekonstruktion eines fehlerbehafteten Vierecks anhand a) der Innenwinkel und b) der Seitenlänge zum erwarteten Quadrat	91
Abbildung 5-8: Varianten zur Bestimmung des Mittelpunktes eines Quadrates	96
Abbildung 5-9: Varianten zur Bestimmung des Winkels eines Quadrates in der Ebene	96
Abbildung 5-10: Montage eines Markers an der Hallendecke	104
Abbildung 5-11: Aufbau eines ArUco Markers [MUN-2014]	105
Abbildung 5-12: Produktionsmängel einer Webcam (nach [THR-2004]). Teil a) zeigt den realen Zustand, b) den idealen Zustand. Der untere Teil deutet die resultierende Verzerrung des aufgenommenen Bildes an.	109
Abbildung 5-13: Auf eine Holzplatte aufgeklebtes Kalibriermuster [DAT-2009]	110
Abbildung 5-14: Rückseite des Kalibrierbrettes mit Presenter ¹² als Fernbedienung	111
Abbildung 5-15: Schraubhalterung am Heck der Fahrerkabine (Anbringungspunkt ID01 [GÜN-2014a, S. 39]	112
Abbildung 5-16: Bildschirmfoto der Anwendung zur Darstellung der aktuellen Staplerpose	114
Abbildung 6-1: Systematische Fehler durch Rotationsunterdrückung und statische Distanz zum Marker	116
Abbildung 6-2: Marker gegenüber der Bodenebene a) koplanar und b) geringfügig geneigt	121
Abbildung 7-1: Schema der Fahrstrecken in den praktischen Versuchen a) 8-Kurs, b) Doppelspiel und statische Positionen zur Messung des Bildrauschens (nach [JUN-2015])	127
Abbildung 7-2: Zusammenhang der Algorithmenvariationen	128
Abbildung 7-3: Normierte, individuelle Leistung der Algorithmen	137
Abbildung 7-4: Normierte Gesamtleistung der Algorithmen	137
Abbildung 7-5: a) Scharf abgebildeter Marker und b) Marker mit starker Bewegungsunschärfe	143
Abbildung 7-6: Plot des in mittlerer Geschwindigkeit gefahrenen 8-Kurses bei <15 Lux	144
Abbildung 7-7: Abhängigkeit des Positionsfehlers vom Ladungsgewicht	152
Abbildung 7-8: Dichtefunktion der Normalverteilung und Summe der Beträge ihres positiven und negativen Teils	153
Abbildung 7-9: Präzision der Anbringung der Hallendeckenmarker in der fml Versuchshalle	154

Abbildung 7-10: Position der Marker Referenzwerte und per Teach-in vermessenen Werte	161
Abbildung 7-11: Kumulativer Gierwinkelfehler bei der Vermessung per Teach-in	163
Abbildung 7-12: Kumulativer Positionsfehler bei der Vermessung per Teach-in	163

Anhang A

Abbildung A-1: Überbelichtete Marker	A-1
Abbildung A-2: Unterbelichteter Marker - links Original, rechts die normalisierte Version	A-1
Abbildung A-3: Dynamikumfang der Kamera reicht nicht aus	A-1
Abbildung A-4: Zwei Kanten des Markers sind vollständig im Bild sichtbar	A-2
Abbildung A-5: Eine Kante des Markers ist vollständig im Bild sichtbar	A-2
Abbildung A-6: Keine Kante des Markers ist vollständig im Bild sichtbar	A-2
Abbildung A-7: Ursache für Fehler bei der Extraktion ist bei diesem Bild unklar	A-2

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 2-1:	Anforderungen an die Lokalisierung von Flurförderzeugen	35
Tabelle 3-1:	Zu korrigierende Schwachstellen der Sensorik	38
Tabelle 3-2:	Relevante Zeiträume für die Positionsmessung	41
Tabelle 3-3:	Zeitmessinformationen für Gabelstapler nach MTM Methode [DEU-2010]	42
Tabelle 3-4:	Anforderungen aus dem Transportprozess	42
Tabelle 3-5:	Allgemeine Anforderungen an die Auswertungssoftware	44
Tabelle 3-6:	Anforderungen an die Bildverarbeitungsalgorithmen in den jeweiligen Verarbeitungsschritten nach Jähne [JÄH-2005, S. 15f.]	44
Tabelle 3-7:	Zusätzliche Anforderungen an den Wartungsprozess	46
Tabelle 4-1:	Vor- und Nachteile der verschiedenen Kameratechnologien zur Lokalisierung	48
Tabelle 4-2:	Vor- und Nachteile natürlicher und künstlicher Merkmale zur Posenschätzung	50
Tabelle 4-3:	Laufzeitanalyse der Verarbeitungsschritte zur kamerabasierten Lokalisierung (nach [JUN-2015])	53
Tabelle 4-4:	Marker Erkennbarkeit anhand von Testaufnahmen für verschiedene Bildvorverarbeitungsstrategien	59
Tabelle 4-5:	Gegenüberstellung von Anforderungen und Ergebnissen der Schwachstellenanalyse	66
Tabelle 4-6:	Änderungen an den Komponenten zur Flurförderzeuglokalisierung	69
Tabelle 4-7:	Zusammenfassung der Maßnahmen in der Bildverarbeitungskette	72
Tabelle 4-8:	Wesentliche Komponenten von Labor- und Funktionsmuster	78
Tabelle 5-1:	Zuordnung der Verfahren aus dem Konzept zu den wesentlichen Arbeitsschritten in der Bildverarbeitung nach Jähne [JÄH-2005, S. 15f.]	80
Tabelle 5-2:	Vergleich der Markerextraktion im Vollbild mit der ArUco-Bibliothek	88
Tabelle 5-3:	Mögliche Messungen des Mittelpunktes und der Winkel in einem Quadrat	95
Tabelle 5-4:	Selbstdiagnosemaßnahmen durch die Recheneinheit	99
Tabelle 5-5:	Diagnose durch das IT-System	100
		213

Tabelle 5-6:	Eigenschaften des Entwicklungssystems	100
Tabelle 5-7:	Die fünf wesentlichen Computer-Klassen nach Hennesy und Patterson [HEN-2012, S. 5]	102
Tabelle 5-8:	Wesentliche Eigenschaften eines Markers im entwickelten Lokalisierungssystem	106
Tabelle 6-1:	Systematische Fehler durch Vernachlässigung der Roll- und Nickwinkel	117
Tabelle 6-2:	Systematische Fehler durch ungenaue Distanzwerte	118
Tabelle 7-1:	Evaluierungsmethoden zur Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (vgl. Kapitel 3)	125
Tabelle 7-2:	Reihenfolge und angewandte Verfahren in den jeweiligen Versuchsläufen	129
Tabelle 7-3:	Zuordnung der Kennzahlen zu Lokalisierungseigenschaften	131
Tabelle 7-4:	Übersicht über die Leistungsfähigkeit der einzelnen evolutionären Zwischenstufen	132
Tabelle 7-5:	Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (Labormuster)	139
Tabelle 7-6:	Lokalisierungsleistung des Stands der Technik	142
Tabelle 7-7:	Marker Erkennbarkeit und Präzision des Funktionsmusters (Einzelmessung)	145
Tabelle 7-8:	Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision (Translation) vom Umgebungslicht	147
Tabelle 7-9:	Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision (Translation) von der Fahrgeschwindigkeit	147
Tabelle 7-10:	Abhängigkeit des Mittelwertes der Präzision [mm] vom Versuchsstapler	149
Tabelle 7-11:	Gemessene Abstände bei Einfahrt in zwei benachbarten Paletten	149
Tabelle 7-12:	Einfluss des Bildrauschens bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen	150
Tabelle 7-13:	Mittlere Verschiebung der Pose abhängig vom Ladungsgewicht	151
Tabelle 7-14:	Leistungsfähigkeit der Lokalisierung (Funktionsmuster)	153
Tabelle 7-15:	Einfluss der Markerneigung auf den Gierwinkel [°]	155
Tabelle 7-16:	Kennzahlen für den Vergleich der Markervermessung (alle Angaben in mm, niedrigere Werte sind besser)	160
Tabelle 7-17:	Grobe Schätzung der Kosten der einzelnen Module des Funktionsmusters	165
Tabelle 7-18:	Betriebsdauer des Funktionsmusters mit drei verschiedenen Powerbanks	166
Tabelle 7-19:	Startdauer des Funktionsmusters	166
Tabelle 8-1:	Wesentliche Eigenschaften des Demonstrators	174

Anhang B

Tabelle B-1:	Präzision der Einzelmessung [mm] für verschiedene Algorithmen im Vergleich	B-1
Tabelle B-2:	Präzision der Einzelmessung [°] für verschiedene Algorithmen im Vergleich	B-2
Tabelle B-3:	Präzision der Einzelmessung [mm] für verschiedene Versuche	B-2
Tabelle B-4:	Präzision der Einzelmessung [°] für verschiedene Versuche	B-3
Tabelle B-5:	Versuchsfahrten mit einer Marker Erkennbarkeit <100 %	B-3

Anhang A Nicht erkannte Marker

Das Labormuster kann im Bild teils sichtbare Marker nicht immer erkennen. Die folgenden Abbildungen zeigen einige Beispiele für die in Abschnitt 7.1.4 genannten Ursachen

- Über- bzw. Unterbelichtung und
- (teilweise) Verdeckung durch Deckenelemente.

Der besseren Sichtbarkeit der Marker im Druckbild dieser Arbeit halber sind die Bilder auf das Intervall $[0; 255]$ normalisiert [BRA-2008, S. 70f.].

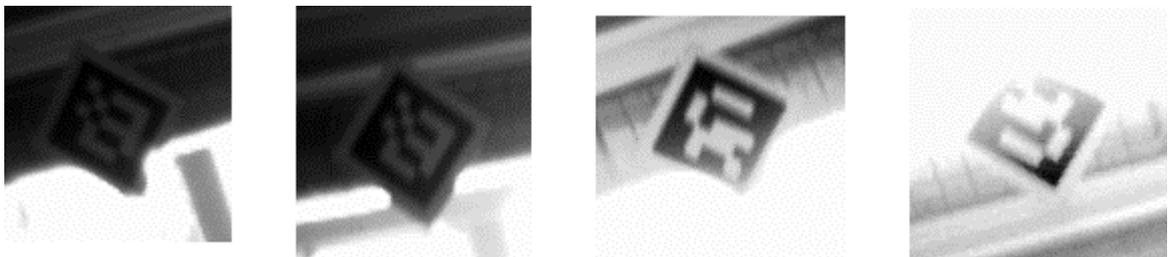


Abbildung A-1: Überbelichtete Marker



Abbildung A-2: Unterbelichteter Marker - links Original, rechts die normalisierte Version



Abbildung A-3: Dynamikumfang der Kamera reicht nicht aus

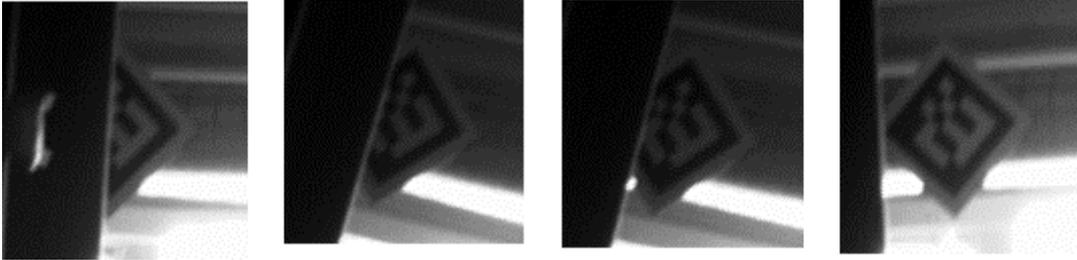


Abbildung A-4: Zwei Kanten des Markers sind vollständig im Bild sichtbar

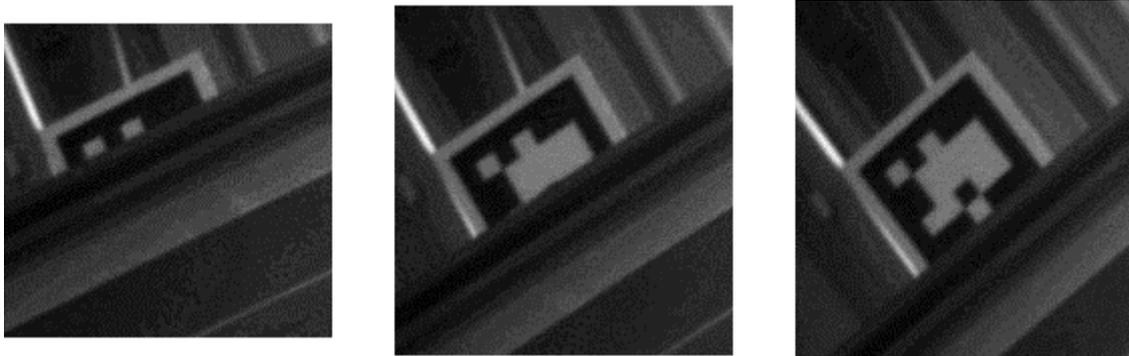


Abbildung A-5: Eine Kante des Markers ist vollständig im Bild sichtbar

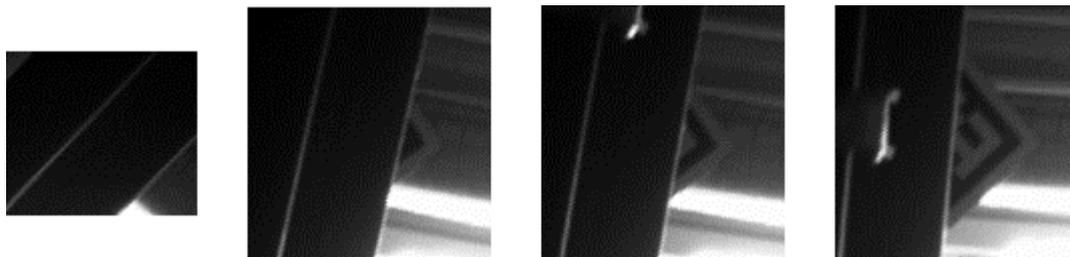


Abbildung A-6: Keine Kante des Markers ist vollständig im Bild sichtbar

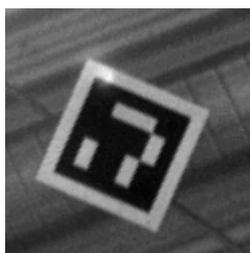


Abbildung A-7: Ursache für Fehler bei der Extraktion ist bei diesem Bild unklar

Anhang B Weitere Messdaten

In diesem Anhang werden weitere Messdaten aufgelistet, auf die im Text der Arbeit nicht näher eingegangen wird. Die Informationen sollen dem Leser als Anhaltspunkte zum weiteren Verständnis der entwickelten Verfahren dienen.

B.1 Messergebnisse Labormuster

Tabelle B-1 und Tabelle B-2 zeigen die Präzision des Labormusters für verschiedene Algorithmen (vgl. Tabelle 7-2) in Bezug auf weitere Perzentile. Die jeweiligen Werte charakterisieren den Trade-off zwischen Verfügbarkeit und Präzision.

Tabelle B-1: Präzision der Einzelmessung [mm] für verschiedene Algorithmen im Vergleich

Algorithmus	Messwerte	Median	Mittelwert	Stabw.	68,3 %	95,5 %	99,7 %	99,99 %	100 %
1	24840	17,5	19,2	10,0	20,7	35,4	85,4	233,5	313,4
2	25541	14,7	16,0	6,7	17,5	28,2	47,0	167,1	275,7
3	25775	14,7	16,1	6,8	17,5	28,4	47,3	167,1	275,7
4	30453	15,7	18,1	11,2	19,5	35,5	88,8	318,1	321,1
5	30351	15,6	16,9	7,7	18,8	32,4	48,1	62,7	63,5
6	30443	15,5	16,6	7,5	18,5	31,8	47,0	63,5	68,2
7	40272	15,6	16,8	7,9	18,8	32,8	48,5	63,3	64,4
8	40462	15,7	16,9	7,9	18,8	32,8	48,9	63,8	68,4
9	40492	15,7	16,9	7,9	18,9	32,8	48,1	65,7	68,7
10	25727	9,0	10,7	17,7	11,5	22,7	61,4	1315,8	1381,4
11	25727	8,9	10,7	18,5	11,4	22,7	63,3	1351,3	1524,6
12	34895	10,8	31,3	125,9	15,3	102,8	1347,2	2539,9	2717,4
13	35438	10,7	30,7	123,0	15,3	102,3	1246,3	2517,5	2675,0
14	21753	437,1	377,5	290,8	557,2	779,1	1223,2	2110,2	2141,2
15	21753	437,0	377,5	291,1	557,0	779,1	1223,4	2108,8	2139,7
16	21753	10,2	15,2	15,9	15,9	50,3	102,9	224,4	243,9

Tabelle B-2: Präzision der Einzelmessung [°] für verschiedene Algorithmen im Vergleich

Algorithmus	Messwerte	Median	Mittelwert	Stabw.	68,3 %	95,5 %	99,7 %	99,99 %	100 %
1	24840	0,14	0,17	0,17	0,21	0,47	1,13	1,89	2,02
2	25541	0,12	0,13	0,08	0,17	0,27	0,36	2,80	2,82
3	25775	0,12	0,13	0,09	0,17	0,27	0,38	2,80	2,82
4	30453	0,12	0,14	0,12	0,17	0,31	0,99	2,71	2,72
5	30351	0,04	0,06	0,05	0,07	0,17	0,29	0,62	0,63
6	30443	0,03	0,05	0,05	0,06	0,15	0,25	0,62	0,63
7	40272	0,03	0,05	0,04	0,06	0,14	0,24	0,36	0,38
8	40462	0,03	0,05	0,04	0,06	0,14	0,25	0,47	0,50
9	40492	0,03	0,05	0,04	0,06	0,14	0,24	0,39	0,49
10	25727	0,11	0,14	0,35	0,15	0,31	2,04	16,84	16,86
11	25727	0,11	0,14	0,33	0,15	0,31	2,14	18,56	18,62
12	34895	0,13	0,49	1,79	0,19	1,55	15,21	19,89	20,98
13	35438	0,13	0,48	1,73	0,19	1,76	15,15	18,37	18,69
14	21753	0,11	0,16	0,55	0,15	0,36	3,44	17,22	17,25
15	21753	0,11	0,16	0,52	0,15	0,36	2,90	17,18	17,21
16	21753	0,13	0,14	0,09	0,18	0,28	0,40	0,94	1,03

B.2 Messergebnisse Funktionsmuster

Die Präzision dieses Demonstrators für unterschiedliche Versuchskategorien detaillieren Tabelle B-3 und Tabelle B-4. Die Werte für alle dynamischen Versuche und die realitätsnahen Fahrten (Doppelspiele) weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit auf. Die Gesamtheit der dynamischen Versuche bildet folglich realistische Szenarien gut ab.

B.2.1 Präzision

Tabelle B-3: Präzision der Einzelmessung [mm] für verschiedene Versuche

Versuch	Messwerte	Median	Mittelwert	Stabw.	68,3 %	95,5 %	99,7 %	99,99 %	100 %
Statisch	215493	18,5	19,5	10,3	21,7	37,2	56,3	59,3	61,5
Dynamisch	248208	17,2	19,1	12,4	22,3	43,2	70,7	100,2	131,6
Doppelspiel	22083	14,3	18,1	12,7	22,3	42,8	65,1	94,8	107,1

Tabelle B-4: Präzision der Einzelmessung [°] für verschiedene Versuche

Versuch	Messwerte	Median	Mittelwert	Stabw.	68,3 %	95,5 %	99,7 %	99,99 %	100 %
Statisch	215493	0,04	0,06	0,05	0,07	0,16	0,26	0,45	0,51
Dynamisch	248208	0,06	0,09	0,09	0,09	0,27	0,65	1,12	1,40
Doppelspiel	22083	0,05	0,10	0,11	0,10	0,35	0,67	0,91	1,06

B.2.2 Marker Erkennbarkeit

Die *Marker Erkennbarkeit* beträgt immer 1, außer in den folgend gelisteten Versuchen (siehe Tabelle B-5). Versuchsfahrten im Dunkeln werden nicht berücksichtigt (siehe Unterkapitel 7.2).

Tabelle B-5: Versuchsfahrten mit einer Marker Erkennbarkeit <100 %

Versuch	Stapler	Licht	Geschwindigkeit	Wdh.	Anzahl Bilder	Kein Marker erkannt	Marker Erkennbarkeit [%]
Vorwärts	EFG 220	Tag	maximal	1	300	2	99,33
Vorwärts	EFG 220	Tag	maximal	2	300	13	95,67
Vorwärts	EFG 220	Tag	maximal	3	300	1	99,67
Vorwärts	EFG 220	Tag	langsam	2	900	1	99,89
Vorwärts	EFG 220	Tag+Licht	maximal	1	300	3	99,00
Vorwärts	EFG 220	Tag+Licht	maximal	3	300	3	99,00
Vorwärts	EFG 220	Tag+Licht	langsam	3	900	1	99,89
8-Kurs	EFG 110	Nacht	maximal	1	600	1	99,83
8-Kurs	EFG 220	Nacht	maximal	1	600	1	99,83
8-Kurs	EFG 220	Nacht	maximal	2	600	1	99,83
8-Kurs	EFG 220	Nacht	mittel	2	900	1	99,89
8-Kurs	EFG 220	Tag	maximal	2	600	3	99,50
8-Kurs	EFG 220	Tag	maximal	3	600	5	99,17
8-Kurs	EFG 220	Tag	mittel	1	600	9	98,50
8-Kurs	EFG 220	Tag	mittel	2	600	11	98,17
8-Kurs	EFG 220	Tag	mittel	3	900	6	99,33
8-Kurs	EFG 220	Tag	langsam	2	1500	18	98,80
8-Kurs	EFG 220	Tag+Licht	maximal	1	600	7	98,83
8-Kurs	EFG 220	Tag+Licht	maximal	3	600	1	99,83

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe.

Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Garching, 17. November 2017

Matthias, Jung