



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

**Systementwurf und Umsetzung einer
funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung
für eine wandlungsfähige und effiziente
Transportausführung**

Dipl.-Ing. Univ. Frank Christian Hohenstein

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: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer
Leibniz Universität Hannover

Die Dissertation wurde am 11.09.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.12.2014 angenommen.

Herausgegeben von:

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

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, TU München, 2014

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

Layout und Satz: Frank Christian Hohenstein

Copyright © Frank Christian Hohenstein 2014

ISBN: 978-3-941702-51-6

Printed in Germany 2014

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München. Sie basiert weitestgehend auf den von mir geleiteten Forschungsprojekten „Das Staplerauge“ [GÜN-2014] und „Entwicklung eines flexiblen und präzisen Lagerlogistiksystems für Flurförderzeuge basierend auf Kombination von Outdoor-Ortung mit GPS/GALILEO und Indoor-Ortung mit RFID“ [FML-2011a].

Mein Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml, da die Zusammenarbeit mit Ihnen in den letzten Jahren eine wahre Bereicherung darstellte. In fachlicher wie auch gemeinschaftlicher Hinsicht habe ich die Zeit sehr genossen und Motivation für die Erstellung dieser Arbeit geschöpft. Besonders möchte ich an dieser Stelle Dr.-Ing. Kai Beckhaus, Susanne Rinneberg, Matthias Jung und Michael Mirlach hervorheben. Sie gaben mir in zahlreichen Diskussionen wichtige Anstöße und waren mit Ihrer Meinung für mein weiteres Fortkommen in dieser Arbeit eine wichtige Rückmeldung.

Danken möchte ich darüber hinaus meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner für sein Vertrauen. Dieses hat er mir mit der Möglichkeit zur Promotion von Anfang an entgegenbracht und in der Projektbearbeitung durch zugestandene große Freiräume ausgebaut. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. L. Overmeyer für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Meiner Frau Susanne möchte ich an dieser Stelle ganz besonders danken. Sie hat mit Geduld und Verständnis die ganze Phase der Erstellung dieser Arbeit begleitet und mir damit den nötigen Rückhalt für die Höhen und Tiefen des Promotionsvorhabens gegeben. Darüber hinaus danke ich meinen Eltern und Brüdern für Ihre Unterstützung über meinen ganzen Lebensweg, ohne die es zur Promotion nicht hätte kommen können.

München, im September 2014

Frank Christian Hohenstein

Kurzzusammenfassung

Systementwurf und Umsetzung einer funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung für eine wandlungsfähige und effiziente Transportausführung

Frank Christian Hohenstein

Die Intralogistik sieht sich mit hohen Effizienzanforderungen konfrontiert, denen durch neue organisatorische und technische Ansätze begegnet wird. Im Rahmen dessen zeichnen sich zwei wesentliche Trends ab, die auch das Transportmittel wie z. B. den Gabelstapler erfassen: Die Steigerung der Prozesstransparenz durch Sensoren für die Zustandsdatenerfassung sowie die wachsende Verbreitung von logistischen Assistenzsystemen, die ebenso echtzeitfähige Sensoren am Leistungsobjekt erfordern.

In dieser Arbeit werden Anforderungen, die sich aus diesen Trends und der spezifischen Anwendungsumgebung des Gabelstaplers an entsprechende Sensoren ergeben, herausgearbeitet. Hierbei wird erkannt, dass eine wandlungsfähige und effiziente Transportausführung durch eine funktionsintegrierende Gabelstaplerlokalisierung zu gewährleisten ist.

Daraufhin erfolgt eine funktionale und technologie neutrale Darstellung der Struktur eines Lokalisierungssystems. Sie ist der Leitfaden für die weitere Systemgestaltung und Umsetzung eines entsprechenden Systems in dieser Arbeit. Grundlegend ist hier der Nachweis der Forschungshypothese, dass die Anwendung einer kamerabasierenden Sensorik in Verbindung mit Bildverarbeitungsalgorithmen für diese Aufgabe prädestiniert ist.

Im Ergebnis liefert diese Arbeit mit dem Nachweis der technischen Machbarkeit zur postulierten Forschungshypothese eine durch Praxisversuche abgesicherte Erkenntnis über das zu erreichende Leistungsniveau. Sie ist damit der Grundstein für die weitere Entwicklung kamerabasierender, funktionsintegrierender Sensorlösungen zur Zustandserfassung am Gabelstapler. Ferner liefert die Strukturierung des Lokalisierungssystems Anwendern und Systemintegratoren eine hilfreiche Orientierung in der Gestaltung ihrer spezifischen Lokalisierungsanwendung.

Abstract

System design and implementation of a function integrated localization for forklifts for an adaptable and efficient execution of transport

Frank Christian Hohenstein

Intralogistics are confronted with a growing demand for efficiency, which is met by new organizational and technical approaches. In this regard, two significant trends have emerged that also affect means of transportation such as the forklift: The increase in transparency of processes through sensors for determining the status data and a growing dispersion of logistical assistance systems which require sensors capable of real-time data at the performance objects.

This thesis identifies requirements for sensors resulting from those trends and the specific application environment of the forklift. It becomes apparent that an adaptable and efficient execution of transport needs to be achieved through a function integrated localization for forklifts.

These findings are followed by a functional and technologically neutral description of the structure of a localization system. It is the guideline for the further system design and implementation of the respective system. A proof of the research hypothesis, that the application of a camera-based sensory in combination with image-processing algorithms is predestined for this task, is an integral part.

As a result, this thesis gives evidence of the technical feasibility of the postulated research hypothesis. This is proven through practical tests which lead to a determination of the relevant performance level that is to be achieved. The thesis is thus the basis for a further development of camera-based, function integrated sensory solutions for the compilation of status data with a forklift. In addition, the structuring of the localization system provides a helpful orientation for the design of specific localization applications for users and system integrators alike.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung und Forschungshypothese	5
1.3	Zielsetzung	10
1.4	Vorgehen	12
2	Abgrenzung und weitere Definitionen	15
2.1	Abgrenzung	15
2.2	Weitere Definitionen	16
3	Stand der Technik zur Flurförderzeuglokalisierung in der Intralogistik	21
3.1	Transportsystem und die Anwendungsdomäne Intralogistik	21
3.1.1	Transporteinheit	22
3.1.2	Fördermittel	23
3.1.3	Transportprozess	27
3.1.4	Einsatzumgebung	28
3.2	Anwendungen zur Flurförderzeuglokalisierung	31
3.4	Stand der Technik und Forschung zur Flurförderzeuglokalisierung	39
4	Strukturierung eines Lokalisierungssystems	47
4.1	Funktionale Module eines Lokalisierungssystems	47
4.2	Architekturen eines Lokalisierungssystems	50
4.3	Lokalisierungsmethoden im Lokalisierungssystem	51
4.3.1	Messgrößen	52
4.3.2	Positionsbestimmungsverfahren	57
5	Anforderungsanalyse für ein System zur Gabelstaplerlokalisierung	65
5.1	Grundlegende Kriterien und Anforderungen	67
5.1.1	Lokalisierungsfunktion	67
5.1.2	Lokalisierungsleistung	69
5.2	Anwendungsspezifische Kriterien und Anforderungen	73
5.2.1	Integrationsaufwand	73
5.2.2	Flexibilität	78
5.2.3	Skalierbarkeit	80
		VII

5.2.4 Wandlungsfähigkeit	83
6 Systementwurf	87
6.1 Konkretisierung der Technologiewahl	87
6.2 Systemarchitektur	90
6.3 Tag	94
6.4 Location Sensor zur Markererfassung	98
6.4.1 Objektiv	99
6.4.2 Kamera-Body	102
6.5 Location Engine zur Positionsbestimmung	107
6.5.1 Kandidatenbildung und Markererkennung	108
6.5.2 Posenschätzung	114
6.5.3 Algorithmen zur Schätzung der Pose	121
6.5.4 Optimierungsstrategien für die Posenschätzung	128
6.6 Erweiterung der Zustandserfassung mittels Funktionsintegration	136
6.6.1 Bestimmung der Huhhöhe	137
6.6.2 Bestimmung der Hubmastneigung	139
6.6.3 Zielkonflikte in der Abstimmung des Sensors	140
6.6.4 Erweiterung der Bildverarbeitung	142
7 Nachweis der technischen Machbarkeit	144
7.1 Domänenspezifischer Entwurf und Umsetzung	147
7.1.1 Tag	147
7.1.2 Location Sensor	149
7.1.3 Location Engine	150
7.2 Eigenschaftsabsicherung und Evaluierung	153
7.2.1 Versuchsmethodik	155
7.2.2 Versuchsauswertung Lokalisierung	156
7.2.3 Versuchsauswertung Hubhöhe	166
7.3 Kritik	168
8 Zusammenfassung und Ausblick	171
8.1 Zusammenfassung	171
8.3 Ausblick	175
Literaturverzeichnis	179

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	195
Abbildungsverzeichnis	197
Tabellenverzeichnis	201
Verwendete Formelzeichen	203
Zusätzliche Indizes	207
Verwendete Abkürzungen	209
Anhang A. Literaturübersicht Lokalisierungsmethoden	213
Anhang B. Literaturübersicht Kriterienkatalog	215
Anhang C. Optimierungsstrategien für die Posenbestimmung	217
Anhang D. Darstellung synthetische Versuche	221
Anhang E. Darstellung Praxisversuche	227
Anhang F. Lösung des Zielkonfliktes in der Fokussierung und Belichtungssteuerung	231

1 Einleitung

1.1 Motivation

Durch die fortschreitende horizontale Integration weltweit verzweigter Wertschöpfungsketten gewinnt die Intralogistik in der heutigen Globalisierung an weiterer Bedeutung. Sie wird zum Rückgrat der Supply Chain, wenn es darum geht, effiziente, fehlerfreie und zuverlässige Warenströme zu garantieren [ARN-2006]. Dies erfordert organisatorische und technische Lösungen in der Intralogistik, die Zielabweichungen im Moment der Entstehung erkennen und somit mittelbar auch global verfolgte Zielsetzungen absichern. Hier wird ein schlummerndes Effizienzpotenzial in der Intralogistik gesehen, welches es gerade zur Sicherung von Hochlohnstandorten, wie z. B. Deutschland, zu nutzen gilt [ARN-2006]. In diesem globalen Kontext sind folgende Entwicklungen anzusiedeln, in diese hier zur Darstellung der Motivation dieser Arbeit weiter eingeführt wird.

Sensoren zur echtzeitbasierten Prozesssteuerung

In der heutigen Zeit werden Produkte in einem zunehmenden Maß kundenspezifisch konfiguriert, wodurch ein hohes Maß an Prozesskomplexität hervorgerufen wird [ACA-2013]. Um diese zu beherrschen, wird die fortwährende Kenntnis der realen, augenblicklichen Vorgänge im globalen Wertschöpfungsnetzwerk zur Grundvoraussetzung erhoben [ARN-2006, BAR-2008]. Diese Transparenz ist der Kern heutiger Real Time Enterprises (RTE) bzw. Echtzeitunternehmen. Sie verwenden interne und externe Prozessdaten für die funktionsübergreifende Organisation der betrieblichen Abläufe. Mit der dadurch gewonnenen Transparenz ergibt sich die Fähigkeit, die ehemals sequenzielle Planung und Ausführung heute zu einem integrierten, parallelisierten Vorgehen weiterzuentwickeln. Komplexität wird dadurch beherrschbar [KUH-2005]. Diese Entwicklung beschreibt die Überführung der Prozesssteuerung zu einer echtzeitbasierten sog. Realtime-Prozesssteuerung. In der Vergangenheit dem Prozess nachgelagerte Optimierungen auf der Basis von historischen Daten werden heute im laufenden Prozess anhand von Echtzeitdaten angestrebt [ACA-2013]. Es ist somit die Wandlung von einer post-processing geprägten hin zu einer Realtime-Prozesssteuerung und -optimierung zu erkennen.

Technisch wird dieser Weg u.a. durch die Integration von Sensoren in die Maschinen- und Anlagentechnik beschritten. Diese erfassen Systemzustände des

übergelagerten Leistungsprozesses [ACA-2013]. Durch die Auswertung der Zustände wird mittels Steuerungslogiken in übergelagerten Ebenen der IT-Systeme (vgl. Abbildung 1-1) in den Leistungsprozess in Echtzeit eingegriffen. Hierzu sind gleichermaßen in den Leistungsprozess integrierte Sensoren und Aktoren erforderlich. Entsprechende Sensorsysteme sind z. B. RTLS (Real Time Location Systeme), die durch die Lokalisierung einer Einheit im Leistungsprozess ermöglichen, von ihrem Ort auf ihren Auftragsfortschritt zu schließen. Da Sensorsysteme zunehmend direkt an den Betriebsmitteln und dem Produkt mitgeführt bzw. integriert werden, wird ein bisher vorhandener Medienbruch zwischen Informations- und Leistungsprozess weitestgehend überwunden. Auf die Logistik übertragen beschreibt diese Entwicklung den in der Vergangenheit vorhandenen Medienbruch zwischen Informations- und Materialfluss, wie er nunmehr z. B. durch den Einsatz von AutoID-Technologien bezwungen wird [GÜN-2010b].

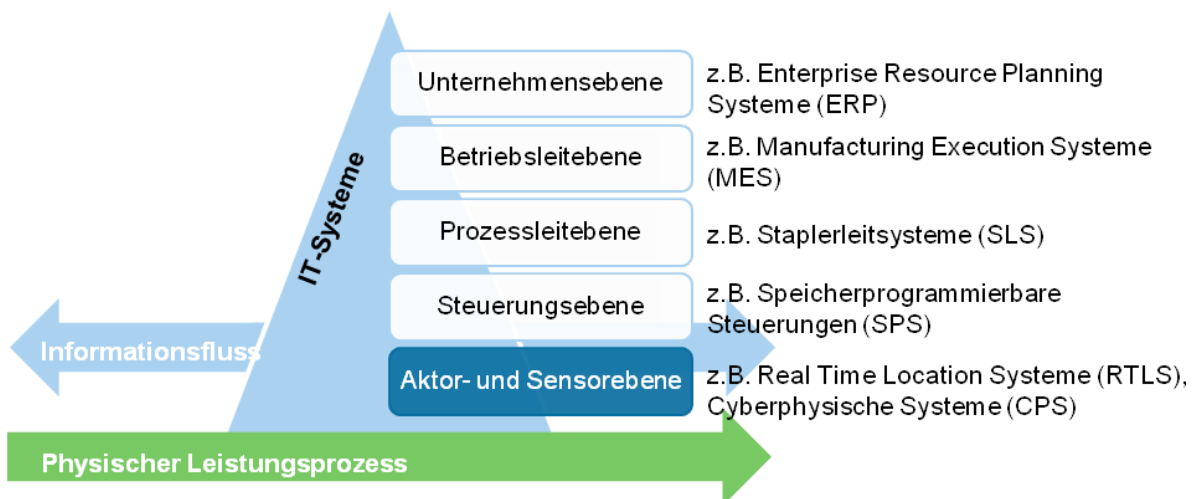


Abbildung 1-1: Sensorsysteme als Kopplungsglied zwischen Informations- und Leistungsprozess (nach [ACA-2013])

Diesen Trend erkennend sieht *Arnold* das Betriebsmittel Flurförderzeug mit großen Herausforderungen konfrontiert [ARN-2006]. Sie rühren im Kern daher, dass das Flurförderzeug als „zentrale Schnittstelle“ im innerbetrieblichen Logistikprozess“ vor allem für den Informationsfluss eine neue Funktion erhält [ARN-2006]. Das Flurförderzeug ist als Betriebsmittel und prozessausführendes Element Teil des Leistungsprozesses. Doch fungiert es durch die Integration von Sensoren als Quelle übergelagerter Steuerungssysteme und wird somit zunehmend die Schnittstelle zum Informationsfluss. Hierbei stellt sich die Frage, wie die Integration entsprechender Sensoren in das Fahrzeug zu erfolgen hat, um einer echtzeitbasierten Prozesssteuerung den Weg zu bereiten.

Sensoren für logistische Assistenzsysteme

Eine weitere relevante Entwicklung stellt in der Intralogistik die Etablierung von Assistenzsystemen zur strategischen Gestaltung bis zur operativen Steuerung dar. Sie verfolgen das Ziel, durch geeignete Hilfestellungen den Experten in seiner Entscheidungsfindung und Prozessausführung zu unterstützen [KUH-2008]. Hierdurch lassen sich in der operativen Steuerung z. B. ineffiziente und häufig manuelle Tätigkeiten optimieren oder sogar eliminieren. In der Kommissionierung, eine der Funktionen mit dem höchsten Anteil manueller Tätigkeiten in der Logistik, halten Assistenzsysteme Einzug. Diese zeigen z. B. auf einer Datenbrille für die direkte, effiziente und zielgerichtete Prozessausführung dem Werker relevante, unterstützende Informationen an. Parallel werden durch eine automatisierte Identifikation Fehlausführungen unmittelbar erkannt [GÜN-2011b].

Demgegenüber steht die klassische Automatisierung, in der dem Werker die Entscheidung abgenommen wird und die Prozessausführung programm basiert, automatisiert erfolgt. Zwar sieht der Gabelstapler sich mit weitreichenden Forderungen nach einer umfassenden Automatisierung konfrontiert [ARN-2006]. Aber auf der anderen Seite ist seine hohe Flexibilität in der Ausführung des Transportprozesses ein starkes Alleinstellungsmerkmal, welches im Konflikt zur Automatisierung stehen kann [HEI-2006]. Im Kern geht es beim Gabelstapler somit darum, den hohen Anteil manueller Tätigkeiten zu reduzieren, sowie auch das in manuellen Tätigkeiten inhärente hohe Fehlerpotenzial zu senken. Hier sind vor allem die Reduktion von Suchvorgängen, Fehlverladungen, Rangiermanövern, Kollisionen etc., die nicht wertschöpfend und somit ineffizient sind, zu nennen. Es bedarf weiterer Ansätze zur Effizienzsteigerung, da nach Experten-Einschätzung zusätzliche Arbeitsvorschriften und Trainingsmaßnahmen kein weiteres Effizienzpotenzial bieten [BOS-2009]. Ebenso ist eine uneingeschränkte Automatisierung kritisch zu sehen, da sie die Flexibilität des Gabelstaplers gefährden kann. Diese weiteren Ansätze zur Effizienzsteigerung finden sich zunehmend in Fahrerassistenzsystemen z. B. zur Navigation, zur Kollisionsvermeidung und zum Tracking & Tracing. Häufig entlehnen sie sich aus dem Automobil und bieten gabelstaplerspezifische Erweiterungen.

Allerdings benötigen auch logistische Assistenzsysteme Sensoren zur Zustandserkennung, damit eine Datenbasis für die situative Entscheidungsfindung im Rahmen des Assistenzsystems existiert [KUH-2008]. Auch diese Sensoren erfassen relevante Zustände des Leistungsprozesses und erfahren somit eine zunehmende Integration in das Betriebsmittel, wie z. B. den Gabelstapler.

Automobilindustrie als Leitbild für den Sensoreinsatz am Fahrzeug

Es ist somit zu beobachten, dass vielfältige Entwicklungen die Einführung von Sensorsystemen zur Zustandserfassung am Gabelstapler erfordern. Im Automobil kann im Vergleich hierzu bereits ein stark wachsender Markt für Sensorsysteme erkannt werden, die dem Fahrer in seiner Aufgabe assistieren oder auch führen. So entspricht beim Automobilzulieferer Continental die Sensor-Jahresproduktion im Jahr 2014 (4,5 Mio. Sensoren) bereits 45% aller seit 1999 durch ihn für die Automobilindustrie gefertigten Sensoren – mit weiterhin stark steigender Tendenz auch für Wettbewerber [GER-2014]. Elektronikkomponenten, die vor allem Sensoren umfassen, stellen im Automobilbau deshalb auch den größten Innovationstreiber der Gegenwart dar [VDA-2012].

Dieser Trend wird insbesondere getragen durch Entwicklungen im Bereich optischer Sensoren. Diese ermöglichen, das Umfeld des Fahrzeuges zu erkennen und relevante Zustände für die Führung des Fahrzeuges automatisiert zu identifizieren. Zwar leiden optische Sensoren weiterhin unter technischen Einschränkungen in der optischen Wahrnehmung der Umgebung, z. B. durch Reflexionen, Abschattungen etc. Allerdings bilden sich mit der Hilfe leistungsfähigerer Software und zugehöriger Rechensysteme neue Ansätze zur Stabilisierung der Erkennung heraus [GER-2014]. Deswegen wird aktuell die Entwicklung neuer Assistenzsysteme im Automobil - quer durch alle Fahrzeugklassen – vor allem durch den Einsatz optischer Sensorsysteme getrieben.

Fazit

Echtzeitbasierte Sensorsysteme sind zur Entscheidungsunterstützung oder auch Prozesssteuerung in dynamischen, volatilen Zeiten eine Grundvoraussetzung [ACA-2012]. Ihr Einsatz ist davon getrieben, dass komplexe Prozesse oder Situationen analysiert und zeitnahe, effiziente Maßnahmen zur Regulierung ergriffen werden müssen. Der Sensor ist jeweils die Quelle für entscheidungsrelevante Daten aus dem Leistungsprozess, in dem es Abweichungen hinsichtlich des verfolgten Gesamtziels sofort zu erkennen gilt.

Im Automobil stehen sensorbasierte Assistenzsysteme im Vordergrund, die das Unfallrisiko senken und den Komfort des Fahrers steigern. In der Logistik besteht am Flurförderzeug insbesondere der Bedarf, die Effizienz der Ausführung des Transportprozesses zu steigern, indem Fehl Ausführungen unterbunden und manuelle Tätigkeiten reduziert werden. Hierdurch leistet die Intralogistik einen wichtigen

Beitrag für zuverlässige, globale Wertschöpfungsketten, wie sie in der heutigen Zeit globaler Märkte notwendig sind.

Kamerasysteme haben im Automobil inzwischen eine hohe Bedeutung erhalten, wenn es um die Wahrnehmung der Umgebung und deren Zustandsbewertung geht. Es stellt sich die Frage, inwiefern sich der Einsatz der Kamertechnologie als Sensor zur Zustandserfassung auf den Gabelstapler übertragen lässt. Hierbei ist entscheidend, ob die Kamertechnologie den an einen Sensor gestellten Anforderungen gerecht werden kann, die sich aus der Transportausführung am Gabelstapler ergeben. Diese Fragestellung ist das Hauptmotiv dieser Arbeit, wie durch die folgende Problemstellung und Zielsetzung weiter detailliert wird.

1.2 Problemstellung und Forschungshypothese

Der grundsätzliche Bedarf für die echtzeitbasierte Zustandserfassung in der Intralogistik und insbesondere am Gabelstapler wurde bereits vielfach erkannt. Einige Forschungsprojekte haben sich in den letzten Jahren dieses Themas angenommen und vornehmlich anwendungsnahe Demonstratoren für die Identifikation oder Lokalisierung entwickelt (siehe z. B. [HEI-2012, TÖD-2013, BOR-2011]). Ferner existieren einzelne Ansätze, die diese Problematik ansprechen und in übergreifenden Tracking & Tracing Lösungen implementieren [BAR-2008]. Allerdings ist in der industriellen Praxis bisher keine relevante Verbreitung festzustellen, da häufig die Wirtschaftlichkeit der Systeme nicht gesichert ist.

Mit der aktuellen Diskussion zu selbstoptimierenden, vernetzten und intelligenten operativen Einheiten der Produktion und Logistik im Rahmen des Konzeptes ‚Industrie 4.0‘ erfährt der Forschungsbedarf einen neuen Schub [ACA-2013]. So soll diese Arbeit ergänzend zum bisherigen Stand der Technik vor allem folgende Problemstellungen ansprechen:

Transparenz der Systemgestaltung

Grundsätzlich ist in der Anwenderschaft ein hohes Aufklärungsbedürfnis zu technischen Lösungen der Echtzeit-Zustandserfassung zu beobachten. Einzelne Kongresse, Messen und Verbände nehmen sich diesem jeweils an. Hervorzuheben ist hier der Verband für Automatische Identifikation, Datenerfassung und Mobile Datenkommunikation (AIM-D e. V.) u. a. mit seinem Arbeitskreis ‚RTLS‘. In dessen

Aktivitäten sind Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in Teilen eingeflossen [AIM-2014].

Begründet ist dieser Aufklärungsbedarf durch die Vielzahl der vorhandenen, unterschiedlichen technischen Ansätze. So wird vor allem für die Zustandserfassung der Position eine hohe Unübersichtlichkeit beklagt, die z. T. auch in einer hohen Spezifizierung jeweiliger Lösungen für einzelne Anwendungen begründet ist [MAL-2009]. Dem gegenüber findet sich eine Vielzahl an Literatur zu Lokalisierungstechnologien, die jeweils einen Kommunikations-Protokollstandard darstellen, der sich auch zur Lokalisierung eignen kann [BEN-2008, BAR-2008, DET-2009, DOT-2010, HOF-2008]. Es sind jedoch über alle Protokollstandards Gemeinsamkeiten in der Herangehensweise an eine Positionsbestimmung, die hier genannten Lokalisierungsmethoden, und dem Systemaufbau zu erkennen. Diese Parameter bestimmen bereits frühzeitig die Leistungsfähigkeit eines Sensorsystems zur Lokalisierung, die von dem Anwender am Ende als Grad der Funktionserfüllung wahrgenommen wird [MAL-2009]. Ein Verständnis dieser grundsätzlichen Parameter würde helfen die beklagte Unübersichtlichkeit bestehender technischer Ansätze zu reduzieren.

Damit ist die zentrale Frage dieses Teils der Problemstellung, wie eine zielführende Strukturierung eines Lokalisierungssystems und die Zusammenführung verbreiteter Lokalisierungsmethoden aussehen. Die Beantwortung dieser Frage sollte technologieutral erfolgen, damit auch eine Übertragung auf zukünftige Protokollstandards stattfinden kann.

Erweiterung der Zustandserfassung am Gabelstapler

Da konventionelle Ansätze zur Steigerung der Effizienz des Gabelstaplers bereits erschöpft sind, erfordert es weiterführender Ansätze hierzu [BEC-2010]. Hierbei ist insbesondere auf eine effiziente Ausführung des Transportprozesses zu achten, da 80% der Lebenszykluskosten eines Gabelstaplers durch seinen Betrieb verursacht werden. Der Fahrer hat durch seine Fachkunde und Sorgfalt wesentlichen Einfluss auf diesen Kostenanteil. Wie bereits erkannt, zielen Assistenzsysteme und weitere echtzeitbasierte Prozesssteuerungen darauf ab, hier eine Hilfestellung darzustellen und zur Absicherung der Effizienzziele beizutragen.

Am Gabelstapler finden sich bereits proprietäre Sensoren zur Erfassung der Betriebszustände. Entsprechende Maschinendaten geben z. B. Auskunft über Lastzustände des Antriebs und der Fahrzeugbedienung, die nicht zwingend in

direktem Zusammenhang mit Zuständen des Transportprozesses stehen [BEC-2010]. Prozesszustände umfassen Parameter des Transportprozesses, wie z. B. die Auskunft über eine erfolgte Be- und Entladung oder die gewählte Hubhöhe für die Identifikation der Einlagerhöhe. Derartige Prozessdaten stehen im Vordergrund des Interesses im Rahmen echtzeitbasierter Prozesssteuerungen und Fahrerassistenzen, da sie Auskunft über Zielabweichungen im Leistungsprozess, dem Transport, geben [ACA-2012, KLE-2005]. Eine hohe Bedeutung hat die Zustandsinformation Position in diesem Kontext bereits erhalten. Diese ist auch daran abzulesen, dass sie in Kommunikationskonzepten für zukünftige, autonome Systeme als Zustandsinformation ‚Aufenthaltsort‘ Bestandteil der Fahrtransportauftragsdaten ist [GÜN-2012a].

Allerdings bietet sich am Gabelstapler darüber hinaus die Erfassung weiterer prozessrelevanter Daten an. Von Hauptinteresse sind hier Daten, die eine unzureichende Fachkunde und Aufmerksamkeit des Fahrers zu erkennen helfen oder eine manuelle Erfassung von Prozesszuständen durch den Fahrer erübrigen [BOS-2009, KAN-2010]. Analysen zeigen, dass dementsprechend heute zwar eine Vielzahl an Sensortechnologien am Fahrzeug integriert werden, diese jedoch überwiegend der Erfassung einer einzelnen Zustandsinformation dienen [HOH-2012a]. Damit verbunden ist somit ein hoher Mehrfachaufwand in der Integration einzelner Sensoren am Fahrzeug, die überwiegend individuell erfolgt [HOH-2012b].

Demgegenüber findet sich zunehmend der Bedarf nach Sensorsystemen, die weitere Zustände mit derselben, womöglich bereits vorhandenen Sensortechnologie erfassen. In Bezug auf ein Lokalisierungssystem, welches somit neben der Position auch weitere zustandsrelevante Informationen erfasst, wird eine verbesserte Wirtschaftlichkeit der Systeme erwartet [WEI-2010, MAL-2009]. Mit dieser Anforderung findet sich auch eine Antwort auf den bereits angesprochenen Mehrfachaufwand in der Integration einzelner Sensortechnologien, die nunmehr in einer Sensortechnologie zusammenzuführen wären.

Offen ist allerdings die Frage, mit welcher Sensortechnologie sich eine entsprechende Zusammenführung von Erfassungsaufgaben hinsichtlich des Prozesszustandes realisieren lässt. Diese Funktionsintegration auf der Basis eines Lokalisierungssystems, die eine der wichtigsten Zustandsinformationen in Form der Position bereits liefert, ist somit ein weiterer Teil der Problemstellung dieser Arbeit.

Wandlungsfähige Zustandserfassung am Gabelstapler

Die Problemstellung der über die Lokalisierung hinausführenden weiteren Zustandserfassung verschärft sich aufgrund der hohen Wandlungsfähigkeit des Gabelstaplers. Mit der Wandlungsfähigkeit wird die Anpassungsfähigkeit des Systems auf nicht von vorneherein definierte und somit vorhergesehene Bedingungen angesprochen [CHI-2010]. Dadurch, dass sich der Gabelstapler durch eine hohe Wandlungsfähigkeit in der Transportprozessausführung und Einsatzumgebung auszeichnet, ist dieser Umstand in der Zustandserfassung ebenso zu berücksichtigen.

Bereits bei Lokalisierungssystemen wird angemerkt, dass die Auswahl eines geeigneten Lokalisierungssystems für eine Anwendung aufgrund der Vielfältigkeit möglicher Einsatzumgebungen erschwert ist [MAL-2009]. Zudem wird festgestellt, dass diese unzureichende Eignung einzelner Lokalisierungssysteme auch der Grund für die Vielzahl bestehender, konträrer Lokalisierungssysteme ist [MAU-2008]. Darum erfolgt auch der Hinweis, dass eine genaue Analyse des Anwendungsprozesses und der Anwendungsumgebung eine wesentliche Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Wahl eines Lokalisierungssystems ist [LIA-2012]. Damit lässt sich in bisherigen Lösungen zur Zustandserfassung, vor allem zur Lokalisierung, keine ausgeprägte Wandlungsfähigkeit erkennen. Jedoch erfährt über den Einsatzzeitraum eines Gabelstaplers der Transportprozess z. B. in der Form alternativer Layouts und abweichender Transporteinheiten Änderungen [JÜN-2009]. Diese muss ein Sensorsystem zur Zustandserfassung ebenso mit abdecken können, damit eine zuverlässige Funktion gegeben ist. Ferner kann sich über die Lebenszeit eines Gabelstaplers die Erfassungsaufgabe ändern, gerade wenn Gabelstapler über Miet- und Leasingkonzepte in ihrer Lebenszeit in wechselnden Anwendungen betrieben werden.

Die Problemstellung umfasst somit nicht nur die Frage nach einer geeigneten Lösung, um Aufgaben der Zustandserfassung zusammenzuführen, sondern sie stellt auch hohe Anforderungen an das Sensorsystem hinsichtlich der Wandelbarkeit der Einsatzbedingungen und Erfassungsfunktion. Dahingehend ist die Problemstellung in dieser Arbeit zu erweitern.

Forschungshypothese

Wie bereits in der Motivation eingeführt, erhalten kamerabasierte Sensoren ergänzt um soft- oder hardwarebasierte Bildverarbeitung in der letzten Zeit starke Aufmerksamkeit. Insbesondere im Automobil stellen sie eine erfolgreiche Technologie für die Bewältigung neuartiger Erfassungsaufgaben als Basis für Fahrerassistenzen dar.

Diese Forschungsarbeit baut ebenso auf einem kamerabasierten Sensorsystem mit softwarebasierter Bildverarbeitung auf. Bereits frühzeitig hat sich eine hohe Umsetzungswahrscheinlichkeit der formulierten Problemstellung mittels dieses technischen Ansatzes abgezeichnet. Entsprechende Indizien werden im Folgenden kurz erläutert.

Eine theoretische Analyse des Autors zu möglichen Erfassungsaufgaben einzelner, verbreiteter Sensortechnologien und deren Umsetzungsgüte wurde im Rahmen einer nicht-repräsentativen Umfrage unter Experten bestätigt [HOH-2012b]. Demnach eignet sich insbesondere der Einsatz einer Kamera, d. h. eines optischen Sensors im Bereich des sichtbaren Lichts, für die Erfassung vielfältiger Zustände. Hierbei ist eine überdurchschnittliche Erfassungsgüte zu erwarten, wobei die Stärke der Kamera in der Breite der abgedeckten Erfassungsaufgaben liegt. Darüber hinaus finden sich in der Fachliteratur Hinweise, die diese Beobachtung untermauern [HOR-2006, GAR-1998].

Daraufhin stellt sich die Frage der Wandlungsfähigkeit eines kamerabasierten Sensors, wie sie in der Problemstellung gefordert wird. Im Kontext wandlungsfähiger Transportsysteme werden kritische Systemeigenschaften, sog. Wandlungsbefähiger, identifiziert, die eine Wandlungsfähigkeit begünstigen. Demnach wird u. a. eine Funktions- und Nutzungsneutralität sowie eine Erweiterungs- und Reduzierbarkeit vom betrachteten System erwartet [HEI-2006]. In der Fachliteratur werden diese Eigenschaften als Stärke der Bildverarbeitung wiederholt angesprochen, sofern der Einsatz von Bildverarbeitungsbibliotheken erfolgt [HOR-2006, BRA-2008]. Im Weiteren spricht die Vielfältigkeit kamerabasierter Anwendungen in der Praxis ebenso für ihre Wandlungsfähigkeit hinsichtlich der Funktionalität und der Einsatzumgebung. So wird die Kamera für die Code- und Objektidentifikation, für die Positionsbestimmung, Vollständigkeitsprüfung, Konturen- und Abmessungserkennung oder die Oberflächenprüfung in einzelnen Anwendungen verwendet [HOR-2006]. Jedoch handelt es sich hier im industriellen Einsatz meistens um allgemeine Prüfaufgaben der Qualitätssicherung, in denen die Kamera oder sogar die Kamera und das Betrachtungsobjekt keine Bewegung erfahren. Entgegen des

Einsatzes am bewegten Gabelstapler findet sie somit eine stabile Einsatzumgebung vor.

Schließlich wird die Kamera zunehmend auch als wirtschaftliche Sensorlösung angesehen. Durch die Verlagerung der eigentlichen Funktionalität aus der Hardware in die Software, d. h. in die Bildverarbeitung, birgt sie ein hohes Standardisierungspotenzial und bietet somit vielfach Kostenvorteile [HOR-2006, GAR-1998]. Insbesondere im Automobil ist dies ein wesentlicher Treiber ehemals mechanische Teilsysteme in ein kamerabasiertes mechatronisches System zu überführen [VDA-2012, GER-2014].

Entsprechend verfolgt diese Arbeit auch das Ziel, einen technischen Nachweis für die Forschungshypothese zu liefern, dass ein funktionsintegrierendes Lokalisierungssystem am Gabelstapler für den wandlungsfähigen Einsatz im Transportprozess durch einen kamerabasierten Sensor möglich ist.

1.3 Zielsetzung

Wie aus der Problemstellung bereits zu erkennen ist, verfolgt diese Forschungsarbeit zwei wesentliche Kernziele. Zum Einen soll diese Arbeit einen Überblick und damit Transparenz zu alternativen Lokalisierungsmethoden sowie Gestaltungsvarianten eines Lokalisierungssystems liefern. Zum anderen soll diese Arbeit mit der Umsetzung der formulierten Forschungshypothese einen Nachweis der technischen Machbarkeit bieten.

Kernziel 1: Strukturierung Systemgestaltung und Lokalisierungsmethoden

Im Rahmen des ersten Kernziels wird dem Anwender und Systemintegrator eine Struktur für Lokalisierungssysteme und Lokalisierungsmethoden an die Seite gestellt. Diese führt in der Fachliteratur vorhandene Konzepte zusammen und ergänzt diese. Das tragende Leitmotiv der Strukturierung ist die Ausrichtung an der Funktion ‚Positionsbestimmung‘ und ihren Teilaufgaben. Im Ergebnis dieser abstrahierten Betrachtung steht eine hohe Übertragbarkeit der Struktur auf neuartige, zukünftige Lokalisierungssysteme. Ebenso wird hierdurch das Ziel erreicht ein Verständnis zu den konträren technischen Ansätzen der Lokalisierung zu schaffen. Dieses befähigt den Leser grundlegende Unterschiede in verschiedenen Lokisierungslösungen strukturiert zu erfassen und gegenüberzustellen. Für den Systemintegrator und Anwender eines Lokalisierungssystems bietet sich damit eine Hilfestellung, anhand

gegebener Anforderungen ein hinsichtlich der Funktion geeignetes Lokalisierungssystem zu wählen.

Kernziel 2: Umsetzung und Nachweis der technischen Machbarkeit zur Forschungshypothese

Das zweite Kernziel liefert die Umsetzung für ein funktionsintegrierendes Lokalisierungssystem eines Gabelstaplers, wie es in der Problemstellung bereits skizziert wurde. Grundlegend für die Umsetzung des Lokalisierungssystems sind an das System gestellte Anforderungen und ein entsprechender Systementwurf.

Die Umsetzung erfolgt durch die Realisierung eines Funktionsdemonstrators, der in realitätsnaher Einsatzumgebung praxisnah erprobt wird. Eine Auswertung dieser Erprobung liefert somit den zweiten Teil dieses Kernziels, den Nachweis der technischen Machbarkeit der aufgestellten Forschungshypothese.

Das Leitmotiv dieser Umsetzung und der technischen Machbarkeitsuntersuchung ist ein möglichst allgemeingültiger Anwendungsfall. Deshalb findet vorbereitend zur Umsetzung eine Analyse zum innerbetrieblichen, Gabelstapler-basierten Transportprozess und sich ergebender Anforderungen an die Lokalisierung statt.

Im Ergebnis wird dem Leser ein Überblick über mögliche Anforderungen gegeben. Darüber hinaus kann er mit dem technischen Nachweis die technische Relevanz einer kamerabasierten Zustandserfassung im innerbetrieblichen Transport erkennen.

Interdependenz der beiden Kernziele

Das erste Kernziel ist nicht ohne Bedeutung für die Realisierung des zweiten Kernziels. Zwar wird in der Strukturierung des Lokalisierungssystems keine Fokussierung auf die Nutzung der Lokalisierungstechnologie Kamera mit Bildverarbeitung und die Anwendung der Gabelstaplerlokalisierung getätigt. Dennoch lässt sich diese neutrale Darstellungsform als Leitfaden für die Gestaltung der Teilfunktionen im Systementwurf des zweiten Kernziels wieder aufgreifen. Sie bietet somit eine Methodik das umzusetzende System einer funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung in seinen Teilfunktionen zu detaillieren und zu definieren. Ein Stück weit wird mit dem zweiten Kernziel zudem die Praktikabilität der im ersten Kernziel formulierten Struktur nachgewiesen. Somit befinden sich beide Kernziele in einem Verhältnis zueinander, welches sie zum festen Bestandteil dieser Arbeit werden lässt.

1.4 Vorgehen

In dieser Arbeit wird eingangs ein gemeinsames Verständnis der hier behandelten Thematik zur Lokalisierung und weiteren Zustandserfassung manuell geführter Flurförderzeuge geschaffen. Nach der Problemstellung und Zielformulierung (vgl. Kapitel 1) endet diese in der Definition und Abgrenzung zentraler Begriffe für die weitere Diskussion (vgl. Kapitel 2).

Anschließend wird der Stand der Technik hinsichtlich der bereits aufgezeigten Problemstellung erarbeitet. Einher geht dies auch mit einer Vertiefung des Verständnisses zur Anwendung von Lokalisierungssystemen in der Einsatzumgebung Intralogistik. Im Fokus steht hier, ein praxisnahes Verständnis der Rahmenbedingungen eines Lokalisierungssystems zu vermitteln (vgl. Kapitel 3).

Im nächsten Schritt wird dieses Verständnis um einen Einblick in die Struktur eines Lokalisierungssystems und entsprechender Lokalisierungsmethoden erweitert. Hierzu wird umfangreiche Literatur ausgewertet, die sich mit einer Vielzahl verschiedenartiger Lokisierungstechnologien beschäftigt und an dieser Stelle durch das Mittel der Abstraktion eine technologie neutrale Konsolidierung erfährt (vgl. Kapitel 4).

Damit ist die Basis für das weitere Vorgehen in der Arbeit geschaffen, das sich dem zweiten Kernziel dieser Arbeit widmet. Da ein Lokalisierungssystem im Sinne der VDI 2206 ein mechatronisches System ist, welches Fragestellungen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und Informationstechnik anspricht, wird für das weitere grundsätzliche Vorgehen dieser Arbeit das V-Modell zugrunde gelegt [VDI 2206]. Dieses stammt aus der Softwareentwicklung und erfährt inzwischen eine vielfache Adaption auf Problemlösungsaufgaben, so auch in der VDI 2206 explizit auf die Entwicklung eines mechatronischen Systems [VDI 2206]. Damit ergibt sich das weitere Vorgehen in folgenden Teilschritten, wobei die Umsetzung den Reifegrad eines Funktionsmusters bzw. Funktionsdemonstrators erreicht (vgl. Abbildung 1-2).

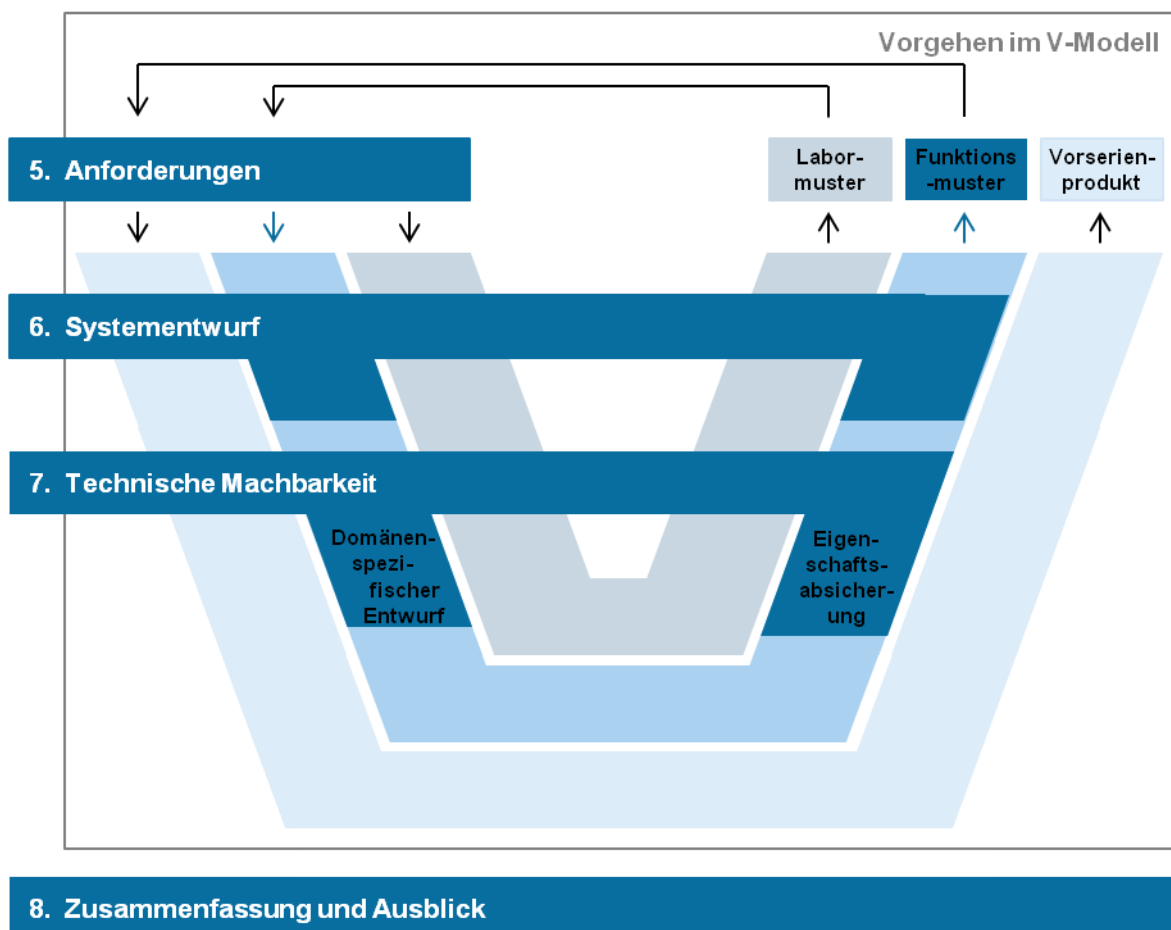
Die Zielsetzung eines wandlungsfähigen Lokalisierungssystems wird anhand von Anforderungen beschrieben und konkretisiert. Hierzu entsteht ein Anforderungskatalog, der den Lösungsraum hinsichtlich der möglichen Anforderungsmetriken eines Lokalisierungssystems aufzeigt und die an die Gabelstaplerlokalisierung gewählten Anforderungen einordnet (vgl. Kapitel 5).

1. Motivation, Problemstellung und Zielsetzung

2. Abgrenzung und weitere Definitionen

3. Stand der Technik zur Flurförderzeuglokalisierung in der Intralogistik

4. Strukturierung eines Lokalisierungssystems



8. Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 1-2: Vorgehen in dieser Arbeit im Kontext des V-Modells (nach [VDI 2206])

Es folgt die Entwicklung eines abgesicherten Konzeptes als Systementwurf (vgl. Kapitel 6), der sich an den zuvor aufgestellten Anforderungen orientiert. Das Konzept nennt die Gestaltungsparameter in den einzelnen Modulen des Systems und stellt somit die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen dar. Mittels synthetischer Versuche werden erste Abschätzungen zur Leistungsfähigkeit der gewählten Lösungen getätigt und bei Bedarf durch weitere Maßnahmen weiterentwickelt. Im Ergebnis entsteht ein Lösungskonzept für die funktionsintegrierende Gabelstaplerlokalisierung.

Für den Nachweis der technischen Machbarkeit (vgl. Kapitel 7) folgt zuerst eine Konkretisierung des Systementwurfs in den einzelnen Domänen des Gesamtsystems (Soft- und Hardware), u. a. durch die Wahl konkreter Komponenten. Hierdurch wird die in dieser Arbeit getätigte Umsetzung des Funktionsdemonstrators beschrieben. Schließlich wird dieser Funktionsdemonstrator im Rahmen von praxisnahen Tests evaluiert, um eine Eigenschaftsabsicherung für das entwickelte System zu tätigen und damit in der Summe den Nachweis der technischen Machbarkeit zu erreichen.

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung des erreichten Umsetzungsstandes (vgl. Kapitel 8). Hierbei wird insbesondere auf die Zielsetzung Bezug genommen und die dieser Arbeit zugrunde liegende Forschungshypothese kritisch hinterfragt. Aus dieser Diskussion entstehen Handlungsempfehlungen für die weitere Realisierung, die den Ausblick darstellen.

2 Abgrenzung und weitere Definitionen

Die Problemstellung und die Zielsetzung dieser Arbeit beziehen sich auf zentrale Begriffe, die im Allgemeinen unterschiedlich verwendet werden. Es ist für die weitere Diskussion dieser Arbeit erforderlich, ein gemeinsames Verständnis dieser und weiterer Begriffe zu erzeugen. Somit wird auch eine Abgrenzung des in dieser Arbeit untersuchten Gegenstandes erreicht.

2.1 Abgrenzung

Die Begriffe Lokalisierung, Lokalisierungstechnologie und Lokalisierungssystem finden in dieser Arbeit eine häufige Verwendung. Hierbei ist jeweils folgende Abgrenzung zueinander grundlegend.

Lokalisierung

Der Wortstamm ‚local‘ ist seiner etymologischen Bedeutung nach aus dem Französischen entlehnt und steht inhaltlich für „Ort, Platz, Stelle“ [KLU-2002]. Lokalisierung ist die Substantivierung des zugehörigen Verbs ‚lokalisieren‘ und beschreibt somit den Vorgang zur Bestimmung des Ortes. Die DIN ISO 8373 präzisiert dies, indem sie den Ort eines Objektes als lokalisiert bezeichnet, wenn die Position und Orientierung des Objektes ermittelt wurden [DIN 8373].

Lokalisierungstechnologie

Der Begriff ‚Technologie‘ hat seinen etymologischen Ursprung im Griechischen ‚téchne‘, welches für „Wissenschaft, Fertigkeit, Kunst, Handwerk“ steht [KLU-2002]. Der *Duden* führt darüber hinaus ‚Technologie‘ als Synonym für ‚Technik‘, welche die Beschreibung eines Vorgehens ist, dem ein Ziel zugrunde liegt [DUD-2012]. Demnach handelt es sich bei der Technologie um eine Wissenschaft, die in ihren grundsätzlichen Formen ein zielgerichtetes Vorgehen beschreibt. Die Lokalisierungstechnologie ist in der Konsequenz eine grundsätzliche Methodenbeschreibung zur Verrichtung der Lokalisierung.

Lokalisierungssystem

Ein ‚System‘ ist nach seiner griechischen Bedeutung eine „Zusammenstellung“ [KLU-2002], während der *Duden* die Bedeutung weiter fasst. Demnach ist ein ‚System‘ die „Gesamtheit von Objekten“, die sich in einem „ganzheitlichen Zusammenhang befinden“ und somit eine Zusammenstellung ergeben [DUD-2012]. Ferner ist ein System durch eine Systemgrenze von seiner Umgebung abzugrenzen. Es ergibt sich damit das System als eine abgrenzbare technische Anlage bzw. Einheit von Elementen, die eine gemeinsame Funktion erfüllen.

Das Lokalisierungssystem ist damit als eine technische Anlage bestehend aus einzelnen Elementen zu verstehen, die die gemeinsame Funktion ‚Lokalisierung‘ erfüllen. In der logischen Folge zur Definition der Lokalisierungstechnologie bezeichnet ein Lokalisierungssystem somit eine konkrete technische Anlage zur Lokalisierung, die in ihren Elementen und deren Beziehung untereinander definiert ist. Demgegenüber ist die Lokalisierungstechnologie lediglich eine Beschreibung der Lokalisierungsfähigkeit in ihren allgemeinen technischen Grundzügen.

2.2 Weitere Definitionen

Folgende weitere Definitionen stellen eine Konkretisierung der Funktion Lokalisierung dar, die für diese Arbeit grundlegend sind.

Echtzeit(-fähigkeit)

Das Verständnis der ‚Echtzeit‘ ist vielfältig. In der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) wird die Echtzeit durch die Parallelität des Rechenprozesses und des realen Vorgangs, der durch die Datenverarbeitung analysiert wird, beschrieben [DUD-2012]. Für die Logistik ist ein weiter gefasstes Verständnis zielführender: Ein Prozess – wie die Lokalisierung – läuft in Echtzeit ab, wenn nachgelagerte Prozesse in der Realität keine Verzögerung erfahren [GÜN-2012a]. Diese Auslegung der ‚Echtzeit‘ wird häufig als ‚prozessrelevante Echtzeit‘ zusammengefasst und bildet für diese Arbeit die Grundlage der weiteren Diskussion.

Demnach erfolgt die Datenübertragung in einer garantierten maximalen Zeit [VDI 2185-1], die keine Verzögerung des nachgelagerten Prozesses bewirkt. Häufig wird diese auch durch die Einzelgrößen Latenzzeit und Deterministik beschrieben [NE 124], deren Einzelbetrachtung nicht im Vordergrund dieser Arbeit steht.

Real Time Location System (RTLS)/ Echtzeit-Lokalisierungssystem

Ein RTLS ist in seiner wortwörtlichen Übersetzung ein Echtzeit-Lokalisierungssystem. Eine Abgrenzung zu den bereits definierten ‚Lokalisierungssystemen‘ erfolgt durch die Anforderung einer Lokalisierung in Echtzeit, wobei der weitere Aufbau beider Lokalisierungssysteme grundsätzlich identisch ist.

In der *ISO/IEC 19762-5* wird ein weiterführendes Verständnis eines RTLS formuliert. Demnach erfüllt ein RTLS eine weitere Anforderung gegenüber konventionellen Lokalisierungssystemen. Es führt eine kontinuierliche Positionsbestimmung und -übermittlung durch [ISO/IEC 19762-5]. Damit kann die Lokalisierung im Funktionsbereich des RTLS an jedem Punkt durchgeführt werden [BAR-2008, MAL-2009]. In der Folge ermöglicht ein RTLS die zeitlich laufende Bestimmung der aktuellen Position und Orientierung eines Objektes. Andersartige Lokalisierungssysteme, die nur an diskreten, wenigen Punkten eine Lokalisierung ermöglichen, sind dem entgegen lediglich in der Lage die letzt-bekannte Position und Orientierung eines Objektes zu ermitteln [LIA-2012].

Weitere Definitionen für ein RTLS erfolgen in der Regel durch die Festlegung auf eine Lokalisierungstechnologie. Eine derartige Definition, wie sie z. B. *Frost & Sullivan Inc.* mit der Eingrenzung auf funkbasierte Lokalisierungstechnologien vorgibt [FRO-2008], entspricht nicht der Betrachtung der Lokisierungsaufgabe in dieser Arbeit.

Pose

Nach *DIN ISO 8373* besteht die Pose als Beschreibung des Aufenthaltsortes eines Objektes aus den beiden Bestandteilen Position und Orientierung eines Objektes [DIN 8373].

Position

Die Position ist eine räumliche Kennzeichnung des Ortes eines betrachteten Objektes. Eindeutig ist diese räumliche Kennzeichnung, wenn es sich um eine absolute Position handelt, die zum Ursprung eines Bezugssystems in der Form von Koordinaten beschrieben ist [MAL-2009]. Des Weiteren kann die Position auch relativ zu einem anderen Objekt ausgedrückt werden, dessen Position nicht mit dem Ursprung des (kartesischen) Koordinatensystems zusammenfällt. In diesem Fall

2 Abgrenzung und weitere Definitionen

handelt es sich um eine relative Position [MAL-2009], die ohne Angabe des Bezugsobjektes mehrdeutig ist.

In dieser Arbeit wird von einer absoluten Position ausgegangen, sofern nur von einer Position gesprochen wird, deren Bezugssystem ein lokales kartesisches Koordinatensystem ist.

Orientierung

Die Orientierung beschreibt den Differenzwinkel zwischen der jeweiligen Körperachse eines Objektes zu einer den umgebenden Raum beschreibende Raumachse. Diese ist wiederum Teil des als Bezugssystem zugrunde gelegten Koordinatensystems.

Für die weitere Arbeit wird die Pose in folgenden beiden Koordinatensystemen beschrieben:

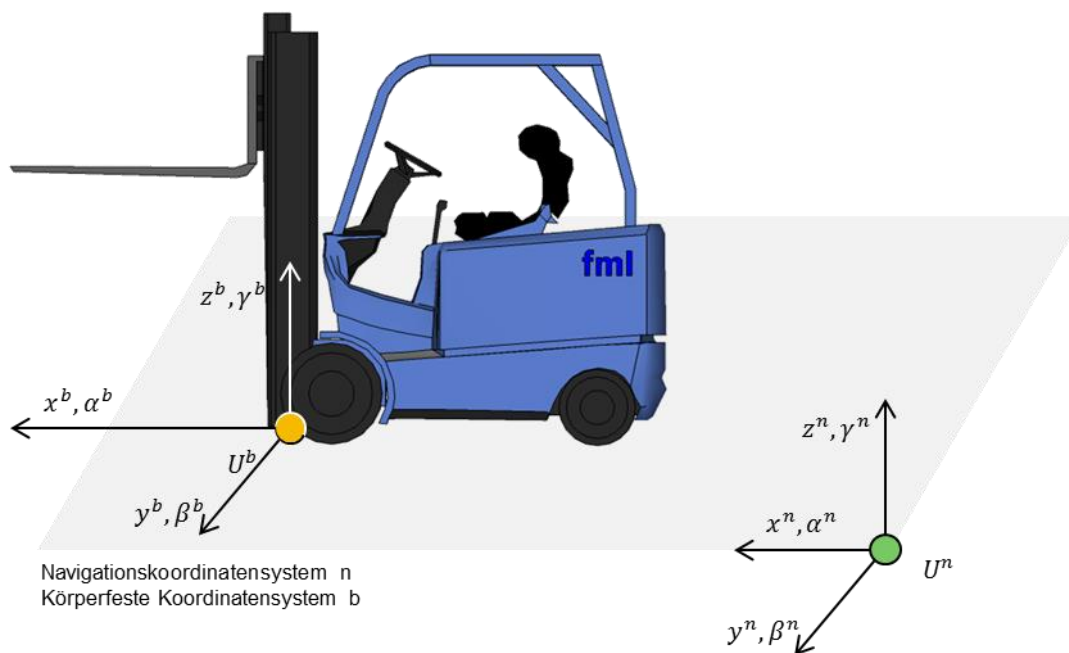


Abbildung 2-1: Koordinatensysteme zur Fördermittellokalisierung

- **Ortsfestes Koordinatensystem n-Frame** bzw. Navigationskoordinatensystem: Der Koordinatenursprung U_n des kartesischen Koordinatensystems liegt in einem Ursprung, der in der jeweiligen Lokalisierungsumgebung vorab zu definieren und mit dem Lokalisierungsobjekt nicht fest verbunden ist.

- **Körperfestes Koordinatensystem b-Frame:** Der Koordinatenursprung U_b und die Koordinatenachsen sind mit dem Lokalisierungsobjekt fest verbunden. Der Koordinatenursprung fällt am Lokalisierungsobjekt Gabelstapler auf den Mittelpunkt des Boden-zugewandten Endes des Hubgerüsts (vgl. Abbildung 2-1), ist allerdings unabhängig von Rotationsbewegungen des Hubgerüsts.

Lokalisierungsgenauigkeit

Die ‚Lokalisierungsgenauigkeit‘ ist ein numerisches Maß in einer vorgegebenen metrischen Einheit für die Abweichung zwischen der Soll- und Ist-Position eines zu lokalisierenden Objektes (nach [ALT-2002]). Diese Abweichung lässt sich in einem Koordinatensystem durch die drei x -, y -, z -Koordinatenachsenabstände Δx , Δy und Δz darstellen. Die Soll-Position ist die reale Position des Lokalisierungsobjektes, während die Ist-Position die vom Lokalisierungssystem bestimmte Position des betrachteten Objektes ist. D. h., die Ist-Position ist gleichbedeutend mit der gemessenen oder auch nach Messung berechneten Position.

Die Verteilung der ermittelten Positionsabweichungen lässt sich als Fehlerellipse um die Soll-Position darstellen, in welche die Ist-Position fällt [DET-2009]. Für diese Arbeit wird allerdings von einer vereinfachten Bestimmung der Lokalisierungsgenauigkeit als Fehlerkreis mit dem Radius r_{xy} für zweidimensionale Fälle ausgegangen.

$$r_{xy} = \sqrt{(x_{Soll} - x_{Ist})^2 + (y_{Soll} - y_{Ist})^2} \quad (2-1)$$

Einheitliche, verbreitete Testverfahren für die Messung der Ist-Position existieren nicht und schränken die Vergleichbarkeit von Angaben zur Lokalisierungsgenauigkeit grundsätzlich stark ein.

Analog ist die Abweichung für die Orientierung zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Betrachtung der Orientierung als erweiterte Lokalisierungsgenauigkeit bezeichnet und im Falle einer Betrachtung explizit auf diese hingewiesen.

3 Stand der Technik zur Flurförderzeuglokalisierung in der Intralogistik

Das größte Effizienzpotenzial der Logistik wird in der Intralogistik gesehen [ARN-2006], sodass die Intralogistik in der Vergangenheit vermehrt in den Fokus von Optimierungsbemühungen gerückt ist. Neben dem Lagern ist das Fördern eine wichtige Funktion der Intralogistik. In der manuellen Ausführung des Förderns wird ein wichtiger Stellhebel für die weitere Optimierung der Intralogistik gesehen. Die Lokalisierung des Flurförderzeuges - vornehmlich des Gabelstaplers - ist eine entsprechende Maßnahme, in der ein hohes Potenzial gesehen wird [EVE-2005, MAN-2009, KLE-2012]. Aus diesem Kontext heraus geht es in diesem Kapitel darum, in die Anwendungsdomäne Intralogistik einzuführen und typische Ausprägungen des Transportsystems vorzustellen. Anschließend werden Anwendungen beschrieben, die in der Intralogistik durch die Lokalisierung des Gabelstaplers realisiert werden und somit den Bedarf für ein Lokalisierungssystem beschreiben. Abschließend wird der Stand der Anwendung und Forschung im Bereich der Flurförderzeuglokalisierung erläutert, um die bereits formulierte Problemstellung im Detail weiter nachzuvollziehen zu können.

3.1 Transportsystem und die Anwendungsdomäne Intralogistik

Die Intralogistik ist der Bestandteil der Logistik, der sich um die Organisation, Steuerung und Durchführung, wie auch Optimierung des innerbetrieblichen Material- und Informationsflusses kümmert [DEL-2010]. Zentraler operativer Bestandteil des innerbetrieblichen Materialflusses ist die Raumüberbrückung zwischen Quelle (Transportursprung) und Senke (Transportziel) mittels Transport. Teilfunktionen des Transportes sind das Stapeln, Umschlagen, Übergeben, Aufnehmen, Verteilen, Sammeln, Sortieren und Kommissionieren, die durch das Transportsystem ausgeführt und gesteuert werden. Dieses Transportsystem setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen. Zum einen ist es die Transporteinheit, zum zweiten die Transporttechnik bzw. Fördermittel, und zum dritten die Transportsteuerung bzw. der Transportprozess (vgl. Abbildung 3-1) [GÜN-2007]. Ein Lokalisierungssystem dient im Transportsystem dazu, durch die Lokalisierung des Fördermittels Transporteinheiten z. B. zielgerichtet anfahren und transportieren zu können,

während die Lokalisierungsinformation in der Dokumentation und Steuerung des Transportprozesses verwendet wird [MAN-2009].

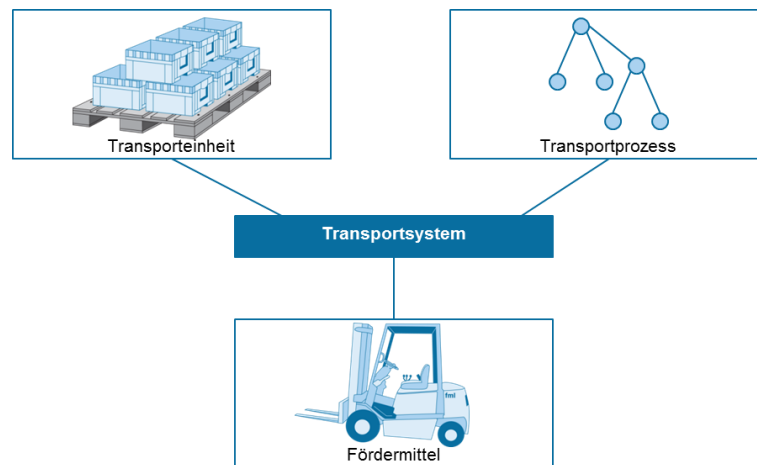


Abbildung 3-1: Bestandteile des Transportsystems [GÜN-2012b]

3.1.1 Transporteinheit

Die Transporteinheit setzt sich aus dem zu transportierenden Gut und ggf. einem Ladehilfsmittel (LHM) zusammen, dessen Aufgabe es ist, ein Bündel an Gütern durch die Bildung einer einzigen logistischen Einheit zusammenzufassen. Durch das LHM wird das Gut vielfach erst transportfähig, insbesondere wenn die Handhabung des Gutes mittels Fördermittel mechanisiert erfolgen soll [GÜN-2007]. Abbildung 3-2 gibt einen Überblick zum in der Logistik verbreiteten Standard-LHM, wobei in dieser Arbeit ein Fokus auf Transporteinheiten vornehmlich für den innerbetrieblichen Transport liegt.

Eine zusätzliche Ladeeinheitensicherung gewährleistet die Formhaltigkeit des Güterverbundes auf dem LHM. Als Ladeeinheitensicherung dient die Umreifung, wie auch alternativ das Schrumpfen oder Stretchen einer Schutzfolie [TEN-2007]. Entsprechende Ladeeinheitensicherungen können Kennzeichnungen der Ladeinheit (partiell) verdecken. Durch organisatorische Maßnahmen ist dies zu vermeiden, damit auch in Systemen zur optischen automatischen Identifikation eine reibungslose Transportprozesssteuerung und -überwachung möglich ist.

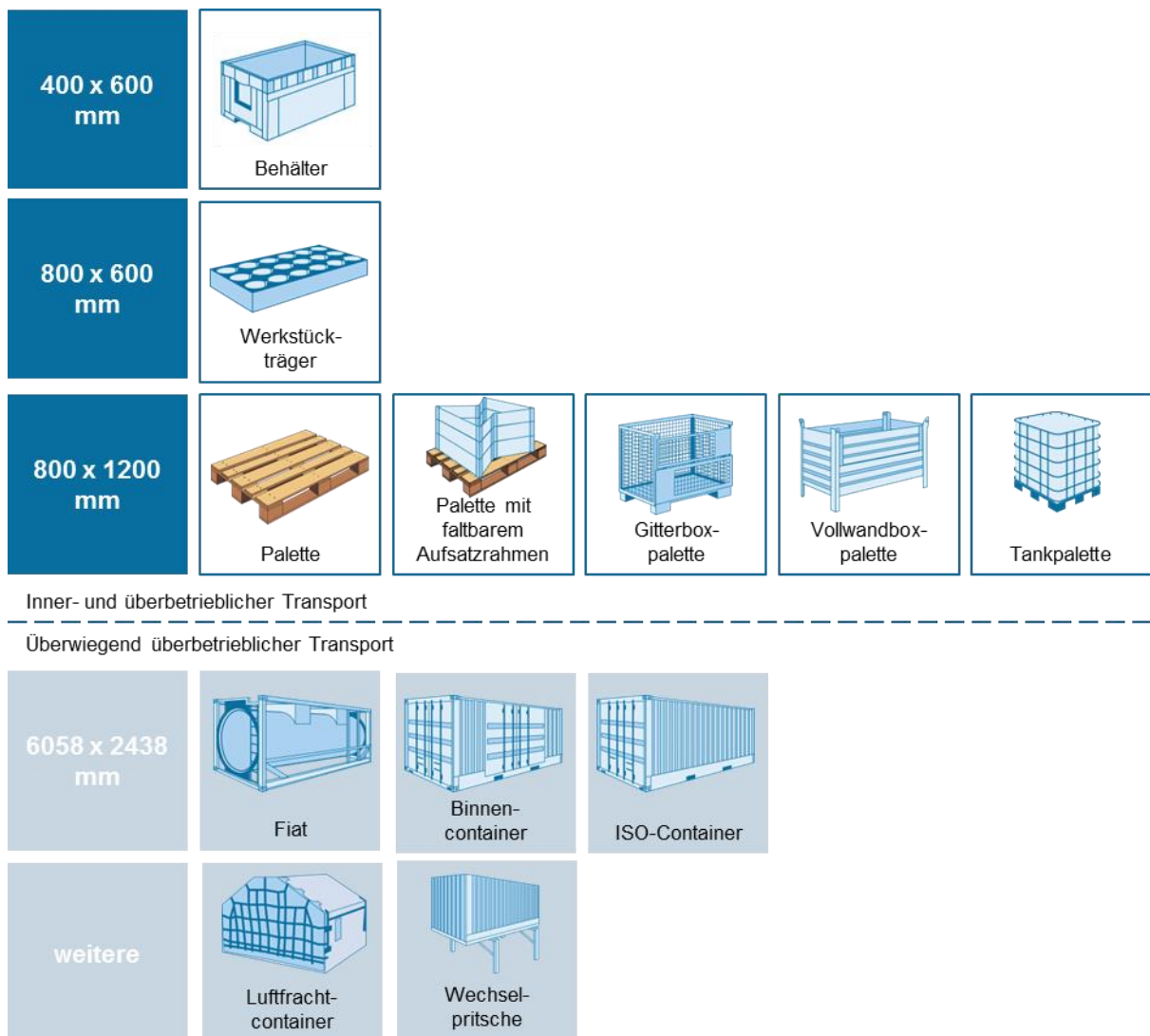


Abbildung 3-2: Übersicht zu Standard-LHM, gruppiert nach den Grundabmessungen

3.1.2 Fördermittel

Es existiert eine Vielzahl an Fördermitteln, die sich in Verkehrsmittel für den überbetrieblichen Transport und Fördermittel für den innerbetrieblichen Transport aufteilen [JÜN-1989]. Letztere sind somit Bestandteil der Intralogistik und Gegenstand dieser Arbeit. Fördermittel sind Geräte bzw. Anlagen für einen stetigen oder unstetigen Materialfluss, der u. a. auf dem Boden, d. h. flurgebunden, erfolgt. Entsprechende unstetige Fördermittel werden als Flurförderzeuge bezeichnet, die für den horizontalen und ggf. auch vertikalen Transport von Gütern ausgelegt sind. Der am vielseitigsten einzusetzende Vertreter eines Flurförderzeuges ist der Gabelstapler. Dieser verfügt über einen Fahrersitz und wird elektrisch oder verbrennungsmotorisch angetrieben [ARN-2008]. Eingesetzt wird er für das Handhaben von Transporteinheiten auf dem Boden, im Regal oder auch zur Übergabe an stetig fördernde

Fördermittel [JÜN-1989]. Zahlreiche an die jeweilige Einsatzumgebung angepasste Bauformen des Gabelstaplers haben sich etabliert, von denen der Gegengewichtsstapler der prominenteste Vertreter ist. In dieser Arbeit wird im weiteren Verlauf insbesondere auf den Gegengewichtsstapler eingegangen, wenn auf den Gabelstapler verwiesen wird. Entsprechende Darstellungen sind auf abweichende Bauformen, wie z. B. Schubmaststapler, überwiegend übertragbar.

Gabelstapler

Ein Gabelstapler nutzt für den vertikalen Transport der Transporteinheit ein z. B. hydraulisch angetriebenes Hubgerüst (vgl. Abbildung 3-3), das im durchschnittlichen Fall aus bis zu drei ineinander geführten Hübten besteht. Darüber hinaus führt das Hubgerüst ein Lastaufnahmemittel bzw. Anbaugerät, welches auf die Transporteinheit abgestimmt zu wählen ist. Für die Aufnahme von unterfahrbaren LHM, wie der Europalette (*EN 13698-1*) und der Gitterbox (*DIN EN 13626*), werden häufig Gabelzinken (vgl. Abbildung 3-3) verwendet, die den Standardfall eines innerbetrieblichen Transportes darstellen [JÜN-1989]. Sie sind die Basis für die weitere Betrachtung in dieser Arbeit. Für die mehrfache Aufnahme von Transporteinheiten können Gabelzinken-Paare auch nebeneinander am Gabelträger (vgl. Abbildung 3-3) des Hubmastes geführt werden, wie Gabelzinken auch doppelt tief gestaltet sein können um mehrere Transporteinheiten hintereinander aufgereiht gleichzeitig aufzunehmen. Um im Transport eine hohe Wendigkeit und damit Flexibilität in der Wahl des Fahrweges zu erreichen, werden Gabelstapler an der Hinterachse (vgl. Abbildung 3-3), an der ein bis zwei Räder geführt werden, gelenkt. In der Vertikalen erfolgt der Transport mittels stufenlosen Hubs, wobei um die Horizontalachse das Hubgerüst geneigt werden kann. Während der Fahrt wird die Transporteinheit somit durch die heckseitige Neigung zusätzlich stabilisiert. [GÜN-2012b]

Der Einsatz des Gabelstaplers erfolgt grundsätzlich in allen Bereichen eines Betriebes [JÜN-1989]. Zum Teil werden durch ihn auch längere Wegstrecken überwunden, sodass grundsätzlich auch Fahrgeschwindigkeiten mit $v_{xy}^n \leq 35 \frac{km}{h}$ erreicht werden können. Das System Methods-of-Time-Measurement (MTM) zur zeitlichen Bewertung von Arbeitsfolgen sieht folgende durchschnittliche Fahrgeschwindigkeiten vor: im Innenbereich $v_{xy}^n = 8 \frac{km}{h}$ und im Außenbereich $v_{xy}^n = 15 \frac{km}{h}$ [MTM-2008]. Die Hubgeschwindigkeit liegt im Bereich von $0,23 \frac{m}{s} \leq v_z^b \leq 0,65 \frac{m}{s}$, wobei der Maximalhub üblicherweise bis zu $h_{max} = 9 m$ bei einer Tragfähigkeit von im Schnitt $2 t \leq L \leq 5 t$ reicht. [TEN-2007]

Die Investitionskosten eines Gabelstaplers stellen nur einen geringen Anteil an dessen Lebenszykluskosten dar. Bis zu 80 % der Lebenszykluskosten entfallen auf die Betriebskosten [NOC-2006], wobei der Personalkostenanteil an den Betriebskosten bei bis zu 75 % liegt [MAR-2009]. Damit ist die Optimierung des operativen Gabelstaplerbetriebs ein wesentlicher Stellhebel für die Effizienzsteigerung dieses grundsätzlich sehr flexiblen, aber auch durch einen hohen Anteil manueller Tätigkeiten geprägten Fördermittels.

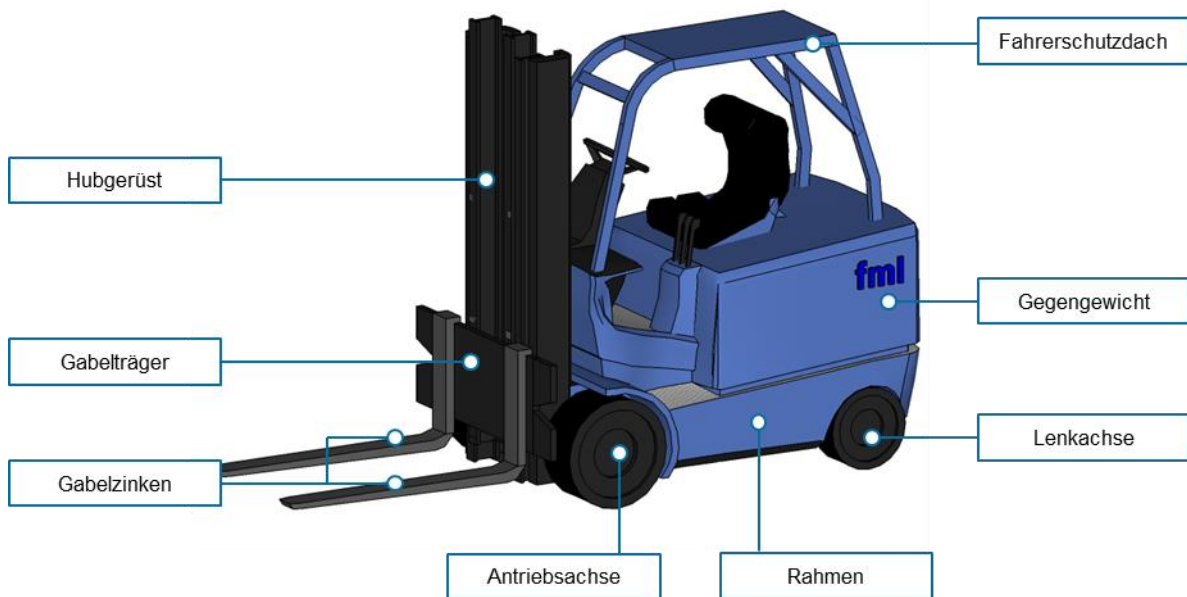


Abbildung 3-3: Begrifflichkeiten am Gabelstapler [DIN ISO 5053]

Fahrerlose Transportfahrzeuge

Insbesondere aufgrund des hohen Aufwands der Personalkosten am Gabelstapler gab es in der Vergangenheit und gibt es gegenwärtig Bestrebungen die Ausführung des innerbetrieblichen Transportes zu automatisieren. Ein wesentlicher Vertreter dieser Fördermittel sind Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) als Bestandteil Fahrerloser Transportsysteme (FTS). FTF sind automatisch gesteuerte Flurförderzeuge mit eigenem Fahrtrieb, die Transporteinheiten unter dem Einsatz eines Lastaufnahmemittels ziehen und/oder tragen können [GÜN-2012b].

Die Steuerung eines FTF teilt sich auf die administrative Leitsteuerung und die operative Fahrzeugsteuerung auf. Die Leitsteuerung übernimmt vornehmlich die Kommunikation mit übergelagerten Materialflusssteuerungen, leitet Transportaufträge ab und führt die Disposition dieser ggf. aus. Fahraufträge und deren Quittierung stellen Kommunikationsinhalte der Leitsteuerung an die Fahrzeugsteuerung dar, die wiederum die Navigation und Energieversorgung gewährleistet. Die Fahrzeugsteuer-

zung stützt sich auf Zustandsmeldungen der Sensoren und Aktoren des Fahrzeuges, die auch eine Lokalisierungsfunktion beinhalten. [VDI 4451-4, GÜN-2012a]

Wenn auch für FTF Lokalisierungslösungen existieren, unterscheiden sich diese grundlegend von einer Gabelstaplerlokalisierung. Dies ist vor allem in dem abweichenden Bewegungsprofil eines FTF zu begründen. Ein FTF verfügt i. d. R. über eine Fahrgeschwindigkeit von $v_{xy}^n = 3,6 \frac{km}{h}$ [VDI 2510]. Ferner verfügen FTF üblicherweise über keine Hubfunktion, sodass ein FTF im Gegensatz zum Gabelstapler nur über zwei mögliche Bewegungsrichtungen in einer Ebene verfügt. Ebenso sind FTF im Gegensatz zum Gabelstapler überwiegend spurgeführt. Nur wenige FTF verfügen über die Fähigkeit sich frei in der Ebene fortzubewegen. Dies bezieht sich allerdings nur auf ein beschränktes Umfeld zum vorgegebenen Weg, um z. B. Überholmanöver autonom auszuführen. Aufgrund der Spurführung erfordert ein FTF üblicherweise eine Infrastruktur, wie z. B. Wegmarken [VDI 2510]. Diese ist für die Fortbewegung eines Gabelstaplers nicht im gleichen Maße erforderlich.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung wesentlicher Charakteristika eines Gabelstaplers und FTF

	Gabelstapler	Fahrerloses Transportfahrzeug
Charakteristische Fahrgeschwindigkeit	$8 \frac{km}{h}$, bzw. $15 \frac{km}{h}$	$3,6 \frac{km}{h}$
Freiheitsgrade der Fortbewegung	3	2
Infrastrukturaufwand	Gering	Hoch
Integration Fahrzeugsensorik	Keine	Erforderlich
Flexibilität Fahrwege	Maximal	Spurgebunden

Diese Arbeit betrachtet jedoch im weiteren Verlauf nicht die Lokalisierung von FTF, da sich ihre Anforderungen und die Rahmenbedingungen, wie bereits dargestellt, von denen einer Gabelstaplerlokalisierung unterscheiden. So differenzieren sie sich ferner durch den Integrationsgrad des Lokalisierungssystems in fahrzeugeigene Sensorik, die bei Gabelstaplern überwiegend aufgrund proprietärer Schnittstellen nicht erfolgt [BOS-2009].

3.1.3 Transportprozess

Der Transportprozess umfasst die Beschreibung des auszuführenden Transportes hinsichtlich der wesentlichen Rahmenbedingungen. Hierunter sind die Definition des einzusetzenden Fördermittels, des Ortes hinsichtlich der Quelle und der Senke des auszuführenden Transportes, die Mengenfestlegung und die zeitliche Priorisierung zu verstehen. Darüber hinaus beinhaltet der Transportprozess die Leistungsanforderung des Transportes.

Der Transportprozess lässt sich in die Transportorganisation und die Transportsteuerung unterteilen [GÜN-2012b]. Diese Unterteilung entspricht abstrahiert betrachtet inhaltlich der Aufteilung der FTS-Steuerung in die Leitsteuerung und die Fahrzeugsteuerung des FTS (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Transportorganisation lässt sich dezentral oder zentral ausgestalten. In der zentralen Form ist der Gabelstapler laufend kommunikationstechnisch an die zentrale Transportorganisation angebunden. In seiner einfachsten Ausprägung ist es eine Sprechfunkverbindung zum Lagerleiter, der die Transportausführung koordiniert. In seiner weiter entwickelten Form ist es die funktechnische Anbindung an einen Leitstandsrechner für die Fahrzeugdisposition und -führung, dessen Fahraufträge dem Gabelstaplerfahrer auf einem Datenterminal am Fahrzeug visualisiert werden.

In der Transportprozessgestaltung liegen wesentliche Stellhebel für die Effizienzsteigerung der gabelstaplerbasierten Transportausführung. Forschungstätigkeiten zur Problematik der Fahrzeugdisposition unter einer zunehmend umfassenden Betrachtung der Rahmenbedingungen des Transportes entwickeln u. a. Dispositionsalgorithmen. Mögliche zugrunde liegende Kriterien nennt [LFU-2011], wie ferner in [MIR-2013] Ansätze für die Disposition simulationsbasiert aufgezeigt werden.

Prozessbeobachtungen bei Industriepartnern des *Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)* haben gezeigt, dass z. B. durch die automatisierte, positionsbezogene Quittierung einer erfolgten Ladungsaufnahme oder -abgabe weitere operative Prozesszeit einzusparen ist. Ferner ermöglicht die Kenntnis des Prozessfortschrittes in Echtzeit eine optimierte Abstimmung von Transportprozessen, vor allem von Übergaben einzelner Transporteinheiten. Wartezeiten zwischen Transportprozessausführungen können schließlich reduziert werden. Weitere Stellhebel zur Effizienzsteigerung sind in der Steigerung des Anteils an Doppelspielen oder in der Minimierung von Anfahrten falscher Ziele zu finden. [FML-2010]

3.1.4 Einsatzumgebung

Bei der Wahl einer technischen Lösung für die Lokalisierung im Transportprozess sind Gegebenheiten in der Einsatzumgebung unbedingt zu berücksichtigen [MAL-2009, MAN-2009]. Hierbei lässt sich die Einsatzumgebung hinsichtlich ihrer physischen Gegebenheiten und organisatorischen Vorgaben wie folgt beschreiben.

Gestaltung der Einsatzumgebung

Die Einsatzumgebung lässt sich räumlich betrachtet in den Innen- und Außenbereich unterteilen, wobei der Innenbereich häufig synonym mit einem überdachten Bereich verstanden wird. Genau genommen kann somit den Innenbereich auch ein durch ein Vordach überdachter Bereich an der Außenwand eines Lagergebäudes darstellen. Dem Innenbereich ist gemeinsam, dass klimatische Bedingungen (z. B. Temperatur, Luftfeuchte) über die Zeit stabil sind, während dies für den Außenbereich unter freiem Himmel keineswegs anzunehmen ist und darin häufig eine Herausforderung für die Auslegung des Lokalisierungssystems liegt. Darüber hinaus herrschen für den Innenbereich als Arbeitsplatz des Menschen detaillierte Vorschriften für die Arbeitsplatzgestaltung, z. B. hinsichtlich der Beleuchtungsstärke und Beleuchtungsregelmäßigkeit [VDI 2199, BUT-2008]. Somit sind die Rahmenbedingungen als stabiler im Vergleich zum Außenbereich anzusehen. Praktische Untersuchungen in der Versuchshalle und auf der Freifläche des *Lehrstuhls fml* bestätigen diese qualitativen Aussagen, wobei dennoch auch im Innenbereich wechselnde Bedingungen zu beobachten sind – wenn auch auf einem geringeren Niveau. Dies trifft insbesondere für die Lichtverhältnisse über die Zeit und den Ort zu. Es wurde mit Hilfe eines Luxmeters die Beleuchtungsstärke E_v in der Einheit Lux¹ gemessen, die den auf einer Empfänger Oberfläche aufgenommen Lichtstrom beschreibt. In Abbildung 3-4 werden die Messergebnisse zu drei Messpunkten dargestellt, an denen jeweils 24 Messungen mit variierender horizontaler und vertikaler Ausrichtung des Messensors erfolgten. Da das menschliche Auge ein logarithmisches Verhältnis zwischen seinem linearen Helligkeitsempfinden und der gemessenen Beleuchtungsstärke zweier Messwerte E_{vn} mit $n = \{1, 2\}$ aufweist, erfolgt die Darstellung der Messergebnisse in Abbildung 3-4 logarithmiert. Es ist zu erkennen, dass im Außenbereich eine vielfach höhere Beleuchtungsstärke über Tag herrscht, jedoch die Varianz zum Abend maximal ist. In Bereichen mit hoher Verschattung und

¹ $1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$

insgesamt niedrigem Beleuchtungsniveau (Innenbereich/ Ort A) herrschen zu allen Messreihen höhere Varianzen als in Bereichen, die ausreichend beleuchtet sind und einen Arbeitsplatz für Personen darstellen (Innenbereich/ Ort B). Somit dienen die oben genannten Bestimmungen zu den Beleuchtungsverhältnissen dazu, konstantere Belichtungsbedingungen unabhängig von Tages- und Nachtzeiten zu erzeugen. In der Konsequenz ist auch das Beleuchtungsniveau fast doppelt so hoch wie an Messpunkten mit hoher Verschattung.

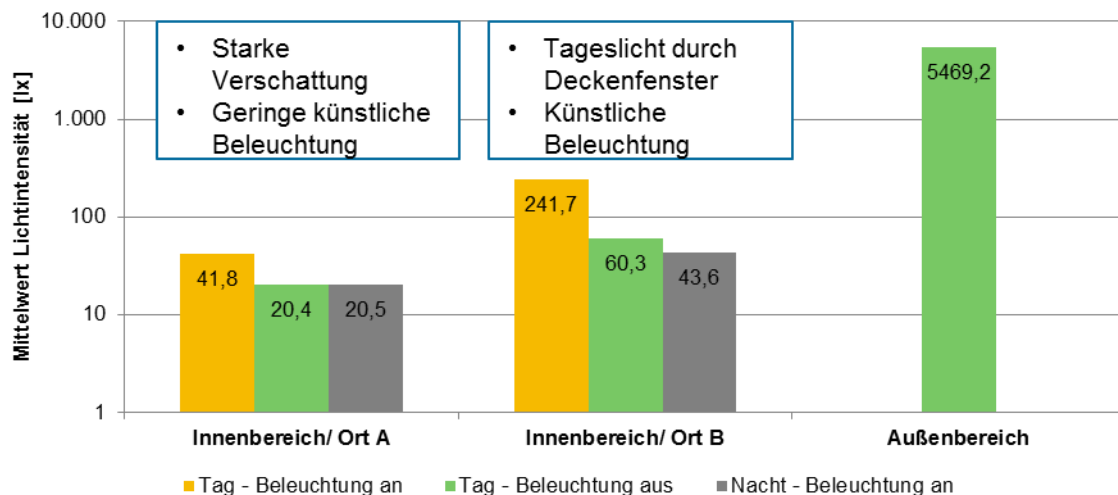


Abbildung 3-4: Ergebnisse der Helligkeitsuntersuchungen in der Versuchshalle des Lehrstuhl fml (nach [FML-2011c])

Ferner ist physisch betrachtet die Fläche der Einsatzumgebung entsprechend der Nutzungsart zu unterteilen. In diesem Kontext sind die beiden relevanten Nutzungsarten die Lagerfläche und Fahrwege, wobei weitere Nutzungsarten wie z. B. Büroflächen im Lagerbereich in dieser Arbeit nicht Betrachtens wert sind.

Gestaltung der Lagerflächen

Lagerflächen werden durch die jeweilige Lagerform beschrieben. Hier steht die Bodenlagerung dem Regallager gegenüber. Die Bodenlagerung ist eine herkömmliche Lagerform, in der das Lagergut in Blöcken (sog. Blocklagerung) oder in Zeilen (sog. Zeilenlagerung) auf der Fläche ggf. in Stapeln angeordnet wird. Die hohe Flexibilität in der Wahl der jeweiligen Anordnung bei geringen Investitionskosten und hoher Flächennutzung ist der Vorteil in der Bodenlagerung. Demgegenüber benötigt die Regallagerung ein Lagergestell, in dem das Lagergut in einzelnen Fächerebenen horizontal und vertikal geordnet eingelagert wird. Hierbei werden Regalhöhen von $2\text{ m} \leq h \leq 55\text{ m}$ erreicht, wobei im letzten Fall eine automatisierte Regalbedienung

erfolgt. Im Regal werden überwiegend standardisierte LHM (vgl. Abschnitt 3.1.1) verwendet, wozu Abbildung 3-5 für die Lagerung von Europaletten typische Abmessungen zeigt. Die Regalfachhöhen werden anhand der Höhe des einzulagernden Gutes zuvor festgelegt. Der Vorteil der Regallagerung liegt in der Ausführbarkeit von spezifischen Strategien zur Lagerorganisation, die sich in einer Bodenlagerung selten umsetzen lassen. [TEN-2007]

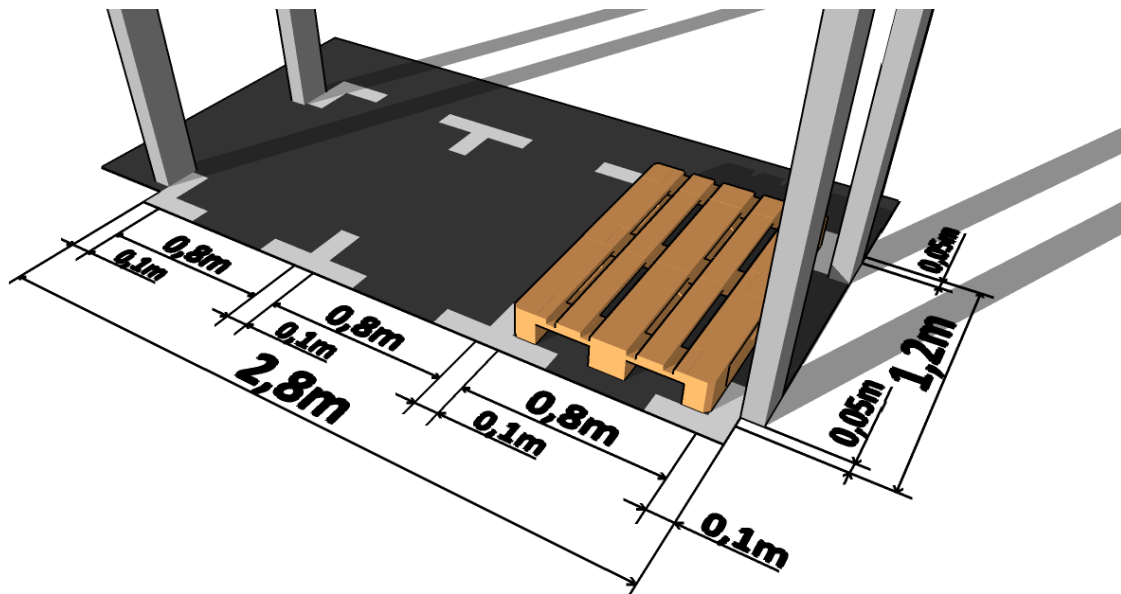


Abbildung 3-5: Typische Abmessungen für drei Europaletten-Stellplätze im Regal [FML-2011b]

Organisationsprinzipien für Lagerflächen

Die Lagerorganisation stellt die organisatorische Sicht auf die Einsatzumgebung dar. Ihre bedeutendste Aufgabe ist die Überwachung und Verwaltung aller Vorgänge sowie Zustände im Lager [TEN-2007]. Hierunter fällt auch die Überwachung und Absicherung von Lagerbetriebsstrategien. Dazu wird durch die Lagerorganisation ggf. auf ein Lokalisierungssystem für Gabelstapler als Hilfsmittel für die automatische Zustandsdatenerfassung zurückgegriffen [TEN-2007]. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu verbreiteten Lagerbetriebsstrategien gegeben:

- Lagerplatzbelegungsstrategien [GÜN-2012b], u. a.:
 - Feste Lagerplatzzuordnung
Festlegung von einzelnen Lagerplätzen zu Gruppen und/oder Sorten an Ladegut.
 - Freie (chaotische) Lagerplatzzuordnung
Freie Wahl eines Lagerplatzes für ein Ladegut. Die Lagerplatzwahl er-

folgt häufig nach freier Entscheidung des Fördermittelfahrers. Hierbei berücksichtigt er die grundsätzliche Eignung des Lagerplatzes für das Lagergut, z. B. hinsichtlich Traglasten, Abmessungen und weiteren Sicherheitsvorkehrungen.

- Schnellläuferkonzept

Einteilung der Lagerflächen in Zonen entsprechend der Umschlagsintensität. Ladegüter mit hohem Durchsatz werden räumlich nahe am Ein- und Auslagerungspunkt des Lagers auf Lagerplätze systemgeführt abgestellt. Dementgegen lagern Ladegüter geringerer Umschlagsintensität in weiter entfernten Bereichen.

- Ein- und Auslagerungsstrategien [TEN-2007], u. a.:

- First-in-First-out (FIFO)

Die Einheit einer Ladegutgruppe, welche bereits die längste Verweildauer im Lager hat, wird zuerst ausgelagert.

- Last-in-First-out (LIFO)

Die Einheit einer Ladegutgruppe, welche zuletzt eingelagert wurde, wird zuerst ausgelagert.

Ein Großteil des innerbetrieblichen Transportes, so wie er hier dargestellt ist, wird durch Flurförderzeuge realisiert. Häufig wird hierbei auf ein Flurförderzeug in der Gestalt eines Gegengewichtsstaplers gesetzt, wobei in Regallagern auch Schubmaststapler verbreitet sind.

In Abstimmung mit den grundsätzlichen Gegebenheiten dieser intralogistischen Anwendungsdomäne, ist die Entwicklung eines Lokalisierungssystems für Gabelstapler im weiteren Verlauf dieser Arbeit zu betrachten. Die jeweilige Transporteinheit besteht aus einem unterfahrbaren LHM als Palette oder Gitterbox. Diese werden im Bodenblocklager oder im Regal gelagert, wobei Lagerbetriebsstrategien die Ausprägung des Transportprozesses vorbestimmen können.

3.2 Anwendungen zur Flurförderzeuglokalisierung

Wie bisher vereinzelt angesprochen, gibt es eine Vielzahl an Anwendungen im innerbetrieblichen Transportprozess, die eine Lokalisierung des Fördermittels Flurförderzeug und hierbei zumeist des Gabelstaplers voraussetzen. Das Ziel der jeweiligen Anwendung ist überwiegend die Effizienzsteigerung im innerbetrieblichen Transport, wie in Kapitel 1 erläutert. Weitere Anwendungen sprechen die Steigerung der Arbeitssicherheit an [BOS-2009] oder dienen der Automatisierung des Fördermit-

tels nach dem Beispiel eines FTF. Jedoch unterscheiden sich die Anforderungen an die Lokalisierung grundlegend, die mit den genannten Zielen verbundenen sind. Abbildung 3-6 stellt exemplarisch die wichtigen Anforderungen zur Lokalisierungs-genauigkeit und zur Echtzeitfähigkeit dem Assistenzgrad sowie der verbleibenden Verantwortung des Fahrers gegenüber. Der Assistenzgrad drückt die Art und Weise der Unterstützung aus, die das System dem zu assistierenden Fahrer bietet. Klassifizieren lässt sich der Assistenzgrad in Anlehnung an [FRE-2004] in die Stufen ‚Information‘, ‚Führung‘, sowie ‚Stabilisierung und Eingriff‘. In der ersten Stufe wird der Fahrer lediglich durch visuelle, haptische oder akustische Signale über eine Situation informiert bzw. vor ihr gewarnt [LIN-2009]. Hierbei geht es primär darum, den Fahrer psychisch zu entlasten, den Komfort zu erhöhen und die Effizienz seines Handelns zu unterstützen. Systeme der Stufe ‚Führung‘ greifen ebenso nicht direkt in die Autonomie des Fahrers ein, bieten aber nicht nur Informationen, sondern auch konkrete Handlungsanweisungen und führen Funktionen in der Umgebung des Fahrers aus, um seine weitere sichere, effiziente Fahrt zu gewährleisten. Diese Funktionen sind teilweise derart weitreichend, dass in dieser Stufe von einem fließenden Übergang der Komfort- zu Sicherheitsfunktionen gesprochen werden kann [FRE-2004]. Demgegenüber sind Assistenzfunktionen der Stufe ‚Stabilisierung und Eingriff‘ überwiegend Sicherheitsfunktionen, die aktiv regelnd in das Fahrzeug eingreifen. Die Zuverlässigkeit dieser Systeme ist um ein Vielfaches höher als vorgenannte Assistenzfunktionen, so dass sie auch autonome Systeme wie ein FTF ermöglichen können [BOS-2009].



Abbildung 3-6: Übersicht zu Anwendungen zur Flurförderzeuglokalisierung (nach [LIN-2009])

Gerade im Kontext dessen, dass Gabelstapler in Zukunft einen geringeren Anteil manueller Tätigkeiten umfassen sollen (vgl. Kapitel 1), ist diese Einstufung von Assistenzsystemen nach dem Assistenzgrad hier zielführend. Alternativ ist in der Fachliteratur auch eine Einteilung nach Komfort- und Sicherheitssystemen verbreitet.

Im Folgenden werden die in Abbildung 3-6 genannten Anwendungen einer Flurförderzeuglokalisierung weiter erläutert. Hiermit ergibt sich ein Überblick über den Stand der Anwendung der Flurförderzeuglokalisierung.

Navigation

Die Navigation für Flurförderzeuge, häufig auch Staplernavigation genannt, stellt ein System zur Vorbestimmung eines optimalen Weges zwischen Quelle und Senke des zu absolvierenden Transportprozesses dar [DIN 8373]. Ferner überwacht es die tatsächliche Wahl eines Fahrweges während der Transportausführung und erkennt Abweichungen vom Soll [VDI 2510]. Bei manuell geführten Gabelstaplern beschränkt sich diese Assistenzfunktion auf eine Information des Fahrers zur Soll-Abweichung mit Handlungsempfehlung [LIN-2009] - ähnlich wie es im automobilen Navigationssystem üblich ist. Lediglich in autonomen Fahrzeugen, wie einem FTF, übernimmt das Navigationssystem auch die Führung.

Für die Bestimmung des optimalen Weges benötigt das Navigationssystem den aktuellen Standort des zu führenden Objektes sowie Vorkenntnisse zur Einsatzumgebung. Diese umfassen ggf. Informationen zum Layout der Fahrwege, zur Fahrwegbeschaffenheit (Breite, Tragfähigkeit), zu Gefährdungspotenzialen, zu Exklusivnutzungsrechten, zu Fahrtrichtungs- und Geschwindigkeitsbeschränkungen.

Damit zielt der Einsatz eines Navigationssystems im innerbetrieblichen Transportprozess insbesondere auf folgende Ziele ab:

- Fehlervermeidung durch Minimierung von Suchzeiten bei der Zielfahrt
- Effizienzsteigerung durch die Wahl von zeit-, kosten- und sicherheits-optimalen Routen
- Steigerung der Sicherheit durch ortsbezogene Gefahrenwarnung und Einhaltung ortsabhängiger Sicherheitsbestimmungen

Der Einsatz eines Navigationssystems für Gabelstapler erfolgt häufig in umschlags- und flächenintensiven Lagern, wie z. B. in Getränkedistributions- und Baustofflagern.

Staplerleitsysteme

Das Staplerleitsystem (SLS) übernimmt die Disposition von Fahraufträgen über eine Flotte an Fördermitteln, hier Gabelstaplern. Fahraufträge werden über einen zentralen Materialflussrechner koordiniert und an das einzelne Fördermittel mittels Datenfunkanbindung übergeben. Am Fördermittel erfolgt eine Anzeige vornehmlich am Terminal (vgl. Abschnitt 3.1.3). Der Fahrer kann den Transportauftrag nach der Ausführung quittieren und somit seine Verfügbarkeit für weitere Transportaufträge melden. In der Fahrauftragsdisposition bietet das SLS Möglichkeiten zur Umsetzung von Lagerbetriebsstrategien (vgl. Abschnitt 3.1.4). Weitere mögliche Entscheidungskriterien, wie die folgenden, führen zur Optimierung der Fahrauftragsdisposition [LFU-2011]:

- Minimierte Anschlussfahrt
- Umsetzung von Auftragsprioritäten
- Eignung des Ladungsträgertyps (Aufnahme, Abmessungen, Gewicht)
- Eignung des Fördermittels (Fahrzeugtyp, Fahrzeugfunktion, Anhängerkapazität)
- Einhaltung von Schichtmodellen

Hierbei kann die punktuelle oder kontinuierliche Lokalisierung des Gabelstaplers für die Disposition der Fahraufträge eine wichtige Entscheidungsgrundlage bilden. Heutige Systeme nehmen zur Bewertung der kürzesten Anschlussfahrt den Einlagerort des letzten Fahrauftrages der zu disponierenden Gabelstapler als Basis (z. B. in der SLS-Funktion des *SAP Extended Warehouse Management EWM*). Dies erfolgt unabhängig davon, ob sich das Fahrzeug noch zum Dispositionszeitpunkt real am Einlagerort aufhält [LAN-2010]. Durch eine Lokalisierung in Echtzeit ist hier die Qualität der Dispositionsentscheidung zu steigern. Weitere Ansätze gehen dahin eine dynamische Routenplanung im SLS-Betriebsmodus ‚Scheduling‘ zu realisieren, indem Routenabweichungen erkannt und in der weiteren Disposition berücksichtigt werden [ARN-2008].

Durch die Anwendung eines SLS ergeben sich vornehmlich folgende Potenziale mit dem Ziel eines effizienten Transportprozesses (nach [LFU-2011]):

- Leerfahrtenreduktion durch Doppelspiele
- Fahrwegoptimierung durch kürzesten Anfahrtsweg
- Fehlerreduktion in der Ausführung durch Prozessmonitoring

- Reduktion von Instandhaltungskosten durch typengerechte Gabelstaplernutzung
- Aktive Steuerung des Ressourceneinsatzes mittels zeit- und kostenbasierter Disposition

Eine empirische Erhebung des *Instituts für Operations Research und Management GmbH (Inform)*, Aachen, aus dem Jahr 2013 stellt bisher ein noch geringes Anwendungsniveau von intelligenten Systemen - wie einem SLS – fest [LFU-2013]. So ist bei 18,5 % der befragten Unternehmen eine Anwendung zu finden. Allerdings geben weitere 50 % der Befragten an, eine Disposition der Fahraufträge bisher alleine auf der Basis des Zurufs und der eigenen Erfahrung manuell durchzuführen [LFU-2013]. Demnach befinden sich bereits einige Anwendungen eines SLS im Betrieb. Es bedarf jedoch auch einer kritischen Menge zu disponierender Stapler um ein relevantes Potenzial durch den Einsatz eines SLS heben zu können. Vermutlich ist dieses ausschlaggebend für eine weitestgehend manuelle Disposition bei den Befragten der Studie.

Automatische Lagerplatzverwaltung

Die Lagerplatzverwaltung umfasst die Verwaltung der eingelagerten Einheiten und der zugehörigen Lagerplätze. Zu beiden Einheiten erfasst das Lagerverwaltungssystem (LVS) sämtliche Eigenschaften wie z. B. für den Lagerplatz die Lagerplatzdimensionen, -tragfähigkeit und Ortskoordinaten. Die Kenntnis dieser Eigenschaften ermöglicht u. a. die Umsetzung von Lagerbetriebsstrategien (vgl. Abschnitt 3.1.4) wie z. B. eine feste Lagerplatzzuweisung. [TEN-2010]

In automatisierten Lagerplatzverwaltungen entfällt die manuelle Lagerplatzidentifikation durch den Disponenten im Transportprozess. So wird die erfolgreiche Ausführung des Fahrauftrages nunmehr mittels Lokalisierung des Lagerplatzes automatisch identifiziert und damit die Einlagerung einer Lagereinheit automatisiert quittiert. Sofern eine Einlagerung auch in der Höhe erfolgt, ist es vorzuziehen, ebenso die Hubhöhe zu detektieren. Nicht in allen Fällen ist es möglich über Prozesslogik Rückschlüsse auf die Einlagerungshöhe zu ziehen – so z. B. bei der Einlagerung im Regal. Ferner erfordert eine vollständig automatische Lagerplatzverwaltung die sensorbasierte, automatisierte Erfassung des Beladungswechsels der Gabel. In einfachen Realisierungen ist es auch möglich, dass der Fahrer durch eine Eingabe am Terminal den Beladungswechsel z. B. von ‚Beladen‘ auf ‚Unbeladen‘ kennzeich-

net. Gegenüber einer vollständig manuellen Lagerplatzidentifikation wird aufgrund des deutlich einfacheren Handlings jedoch immer noch ein Vorteil realisiert.

Das Potenzial einer automatisierten Lagerplatzverwaltung liegt hierbei aber nicht alleine in der Einsparung zeitintensiver manueller Tätigkeiten, sondern auch in der Absicherung von Belegungsstrategien. Die Einhaltung einer festen Lagerplatzzuweisung sowie die Umsetzung des Schnellläuferkonzeptes können durch eine Lokalisierung des Fördermittels bei der Entladung des Gutes kontrolliert werden. Eine Gegensteuerung im Fehlerfall ist somit im Moment des Auftretens möglich, da am Fördermittel z. B. über ein Terminal entsprechende Fehlermeldungen des LVS an den Fahrer übermittelt werden können.

Tracking & Tracing

Tracing ist ein System zur Sendungsverfolgung im Transportprozess. Es legt eine Historie zum zeitlichen und ortsbezogenen Ablauf des Materialflusses an [ARN-2008]. Ein Tracking System ist hierzu die Voraussetzung, da es die für die Erstellung der Historie erforderlichen Zustandsdaten des Materialflusses liefert. Hierunter fallen die Objektidentität, der Aufenthaltsort, die Zeit und weitere spezifische Eigenschaften wie z. B. die Temperatur [CHA-2011]. Ein Lokalisierungssystem zur Bestimmung des Aufenthaltsortes kann ein Bestandteil eines Tracking Systems sein, insofern die Lokalisierung durchgehend erfolgt [ARN-2008]. Einfache Tracking Systeme beschränken sich allerdings lediglich auf die Erfassung der Identität und des weiteren Zustandes an diskreten, vordefinierten Informationspunkten, sodass sie keine kontinuierliche Lokalisierung zwingend erfordern.

Für den Einsatz von Tracking & Tracing Systemen haben sich vor allem folgende Treiber herausgebildet [BAR-2008]:

- Effizienzanforderungen in der Transportausführung (z. B. dynamische Routenplanung)
- Gesetzliche Bestimmungen/ Standards (z. B. EU-Empfehlung zur Rückverfolgbarkeit von medizinischen Produkten 2013/172/EU)
- Maßnahmen zum Verbraucherschutz (z. B. Fälschungsschutz in der Pharmaindustrie)
- Transparenz für den Verbraucher über die Herkunft der Güter (z. B. Herkunftsnachweis in der Lebensmittelindustrie)

Grundsätzlich wird der Einsatz von Tracking & Tracing Lösungen vor allem im zwischenbetrieblichen Transport gesehen, allerdings gerade unter Effizienzanforderungen findet auch ein vermehrter Einsatz im innerbetrieblichen Bereich statt.

Damit liefert ein Tracking & Tracing System die Möglichkeit den Fortschritt der Leistungserbringung im Materialfluss zu verfolgen wie auch zustandsbezogene Materialflussanalysen durchzuführen.

Materialflussanalysen

Materialflussanalysen dienen dazu Prozesse des Materialflusses, so auch den Transportprozess, auf Schwachstellen und Möglichkeiten zur Optimierung zu durchleuchten. Verbreitet ist, für die Analyse den Ist-Zustand in einer oder mehrfachen Momentaufnahmen durch eine Prozessbeobachtung zu erfassen. Erkenntnisse führen z. B. zu einer Optimierung des Lagerlayouts um Gefahrenbereiche zu entschärfen, gegenseitige Prozessbehinderungen auszuschließen oder Transportwege zu reduzieren. Um Prozessunregelmäßigkeiten erfassen zu können und in der Materialflussanalyse zu berücksichtigen, ist es häufig jedoch erforderlich eine zeitlich umfassendere Prozessaufnahme durchzuführen [ARN-2006]. Hierzu bietet die Lokalisierung im Transportprozess eine wichtige Grundlage [BAR-2008, INS-2010], sofern Positionsdaten zu Transportbewegungen über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Bereits heute greifen Prozessberater für Materialflussanalysen auf Datenlogger zurück, die eine diskrete Lokalisierung im Transportprozess ermöglichen [SEC-2012]. Mit der Möglichkeit zur durchgängigen, kontinuierlichen Lokalisierung im Transportprozess ist aufgrund der höheren Datenqualität ein gesteigertes Potenzial der Materialflussanalysen zu erwarten [ARN-2006].

Weitere Assistenzfunktionen

Darüber hinaus findet sich eine Vielzahl weiterer Assistenzfunktionen am Gabelstapler, für die die Lokalisierung des Fördermittels eine wichtige Voraussetzung ist. So parallelisiert die automatische Hubhöhenvorwahl den vertikalen Hub in Abhängigkeit des Abstandes zum Zielort. Damit wird ein relevanter Anteil der Prozesszeit gegenüber einer Hubausführung erst nach erfolgter Anfahrt eingespart [DHF-2009]. Ferner verhindert die automatische Toröffnung Wartezeiten bei der Ein-/Ausfahrt des Gabelstaplers in Lagerhallen [FUH-2010]. Schließlich wird durch die Assistenzfunktion der automatischen Geschwindigkeitsregulierung in Gefahrenbereichen ortsbezogen die Geschwindigkeitseinhaltung durch automatisiertes Bremsen garantiert

[BOS-2009]. Diese Assistenzfunktionen bilden Bausteine auf dem Weg zu einem autonom fahrenden Gabelstapler. Grundsätzlich stellt dieser gegenüber dem manuell geführten Gabelstapler maximale Anforderungen an die technische Realisierung, insbesondere in der Zuverlässigkeit, in der Lokalisierungsgenauigkeit und in der Echtzeitfähigkeit. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist ferner eine hohe Integration der Systeme in die Fahrzeugsteuerung, die bisher noch in der Hoheit der Flurförderzeughersteller liegt und somit proprietär gestaltet ist.

Ergänzen lassen sich diese Assistenzfunktionen durch weitere in Form von Location Based Services (LBS), welche ihre Funktionalität ortsbezogen zur Verfügung stellen. Hinsichtlich der Steigerung der Sicherheit im Betrieb von Flurförderzeugen ist als Beispiel hierfür die ortsbezogene Gefahrenwarnung z. B. vor Kreuzungen, Gegenverkehr, Passanten etc. zu nennen. Informationen für den Fahrer lassen sich somit auf die für den Moment einzig relevanten reduzieren. Bereits früh wurde das Potenzial von LBS erkannt [BUT-2008]. Gegenwärtig ist jedoch keine flächendeckend relevante Anwendung zu beobachten. Aufgrund zunehmender Bedeutung von Arbeitssicherheitsthemen am Gabelstapler ist mit steigendem Interesse für die Zukunft zu rechnen [KAN-2010].

In allen Assistenzfunktionen dient die Lokalisierung dazu entscheidungsrelevante, posesbezogene Zustände zu unterscheiden [BAR-2008]. Die jeweiligen Rahmenbedingungen und Anforderungen für die Lokalisierung sind verschieden. Dies zeigt eine weitere Diskussion hierzu im Rahmen der Anforderungsdefinition für die Gabelstaplerlokalisierung in Kapitel 4. Im Vordergrund steht hierbei die Lokalisierung mit dem Ziel eine automatische Lagerplatzverwaltung zu realisieren. Eine Fokussierung auf diese Assistenzfunktion erfolgt, weil sie relativ gesehen höhere Genauigkeits- und Echtzeitanforderungen stellt. Ferner bewirkt sie durch die Einsparung manueller Lagerplatzidentifikationen eine im Verhältnis hohe Effizienzsteigerung im Transportprozess (vgl. Abbildung 3-6).

3.4 Stand der Technik und Forschung zur Flurförderzeuglokalisierung

Der folgende Abschnitt liefert einen Überblick zum Entwicklungsstand der Systeme in der Flurförderzeuglokalisierung, wobei auf die Betrachtung von Gabelstaplern der Schwerpunkt gelegt wird. An erster Stelle wird der Stand der Technik aufgezeigt, indem exemplarisch ausgewählte, auf dem Markt verfügbare Systeme zur Flurförderzeuglokalisierung erläutert werden. Anschließend wird auf weitere Forschungsaktivitäten zur Zustandserfassung im Transportprozess eingegangen, um die vorliegende Forschungsarbeit weiter einzuordnen.

Stand der Technik

An dieser Stelle erfolgt ein kurzer, allgemeiner Überblick zu einer Auswahl entsprechender Systeme, die hier als Stellvertreter der bekannten technischen Ansätze näher vorgestellt werden sollen. Der weitere Entwicklungsstand heutiger Systeme zur Lokalisierung eines Gabelstaplers im Transportprozess ist auch [HOH-2012a] zu entnehmen.

Das *Track + Race*® System der *Indyon*® GmbH, Pöcking, nutzt zur Lokalisierung die Radio Frequency Identification (RFID) –Technologie mit einer Sendefrequenz von $f_s = 125 \text{ kHz}$ (Low Frequency LF). Hierzu werden flächendeckend RFID-LF Transponder senkrecht zur Bodenoberfläche in den Boden eingebracht und dieser daraufhin versiegelt. Mittels einer Unterbodenantenne am Fahrzeug lässt sich bei Überfahrt des Transponders dessen ID auslesen und die zugehörige Transponderposition aus einer Datenbank ermitteln. Somit wird die Transponder-ID synonym für die Position des Fahrzeuges verwendet. Dadurch ist die zu erzielende Lokalisierungsgenauigkeit direkt abhängig von der Dichte der im Boden eingebrachten Transponder. In der Praxis werden diese in Abständen von $30 \text{ cm} \leq d \leq 80 \text{ cm}$ verlegt. Im letzten Fall erfolgt lediglich eine Kennzeichnung der (Paletten-) Lagerplätze, wobei im ersten Fall eine annähernd durchgehende Lokalisierung auf der Freifläche erreicht werden kann. Um die damit hohe erforderliche Dichte an Transpondern zu reduzieren, wurde im Projekt ‚Flexible Indoor- und Outdoorortung von Flurförderzeugen‘ (ZIM-FV KF2063702KM8) das Lokalisierungssystem um ein kinematisch korrigiertes Global Positioning System (GPS-RTK) und Inertialsensorik ergänzt [GÜN-2010a]. Hierbei dient die Erweiterung vor allem dem Einsatz auf Außenflächen, die in der Praxis schnell größere Bereiche umfassen können, als es bei Innenflächen der Fall ist. Eine automatische Lagerplatzverwaltung wird mit dem

Indyon® Track + Race® System durch die zusätzliche Integration weiterer Sensoren erreicht. Hier sind ein laserbasierter Abstandssensors zur Beladungserkennung der Gabel, ein Ultraschall-Sensor zur Hubhöhen-Detektion und ein optionaler Magnetkompass zur Lagebestimmung zu nennen.

Das System *VisiblEdge™* der *TotalTrax Inc.™*², Newport DE (USA), setzt zur Lokalisierung auf die optische Identifikation von 2D-Codes an der Hallendecke mittels Laserscanner [RFI-2009]. Diese werden unter der Hallendecke auf einer konstanten Höhe hängend in einem Abstand von $d \approx 2\text{ m}$ zueinander angebracht. Schließlich werden diese zusätzlich eingemessen und inventarisiert - ähnlich dem Ansatz von der *Indyon® GmbH*. Durch die Identifikation des Codes kann die Gabelstaplerposition schließlich mittels Datenbankabgleich zugeordnet werden. Im Gegensatz zum System der *Indyon® GmbH* werden hier jedoch zusätzlich die Lage des Fahrzeuges und die relative Position des Codes im Lesebereich des Laserscanners ausgewertet. Damit wird eine kontinuierliche Lokalisierung erreicht, die im System der *Indyon® GmbH* nur hinsichtlich der Position und lediglich diskret erfolgt. Entsprechend dem Vorgehen von der *Indyon® GmbH* integriert auch die *TotalTrax Inc.™* zusätzliche Sensortechnologien am Fahrzeug, um weitere Zustände im Transport zu erfassen, die in der Summe eine automatische Lagerplatzverwaltung ermöglichen.

Das System *Pilot Pro* der *Zenotrack GmbH*, Wien (Österreich), greift den Ansatz der *TotalTrax Inc.®* auf, mittels Code-Identifikation optisch zu lokalisieren. Allerdings wird im System *Pilot Pro* eine Industriekamera mit Charged-Coupled Device (CCD) Fotosensor und Klartextmarkern verwendet [ESS-2009]. Die Kamera ist z. B. heckseitig am Dach des Gabelstaplers angebracht, um auf dem Boden oder bodennah an der Wand angebrachte Klartextmarker zu identifizieren. Bei der Verwendung einer Kamera mit einem Öffnungswinkel von $\delta = 45^\circ$ und 25 Frames pro Sekunde (FPS) ergibt sich ein Flächenraster für die Anbringung von Markern, in dem ein Marker die Lokalisierung auf einer Fläche von $X = 2,3\text{ m}^2$ ermöglicht [FML-2011b]. Untersuchungen des *Lehrstuhls fml* haben ergeben, dass mit diesem System in einer Lagerumgebung Lokalisierungsgenauigkeiten $r_{xy}^n \leq 20\text{ cm}$ erreicht werden. Allerdings ergeben situationsbedingte Abdeckungen der Sicht bzw. eine fehlende Line-of-Sight (LoS) Verbindung sowie schlechte Beleuchtungsverhältnisse.

² Die *TotalTrax Inc.™* ging 2009 aus der Übernahme der *SkyTrax Inc.* mit dem gleichnamigen System zur Laserscanner-basierten Lokalisierung durch den Systemintegrator *Rush Technologies Inc.* hervor.

Darüber hinaus können auch Bewegungseinflüsse zu einer fehlenden Identifikation der Klartextmarker führen. U. a. für diesen Fall verfügt das System zusätzlich über eine relative Lokalisierungsfunktionalität. Ähnlich dem Optical Flow-Prinzip bei einer Computermouse wird die Bewegung markanter Bildpunkte über eine Bildsequenz verfolgt und analysiert. Dadurch können relative Bewegung geschätzt werden. Untersuchungen zeigen, dass in der Praxis am Gabelstapler diese Lokalisierung nur für kurze Wege ohne Kurvenfahrt plausibel ist. Bei Testfahrten mit mehr als einer rechtwinkligen Kurve, größeren Weglängen und steigender Fahrgeschwindigkeit konnten jeweils und insbesondere in Summe hohe Positionsabweichungen festgestellt werden, die leicht $r_{xy}^n > 1\text{ m}$ übersteigen. Einen weiteren verstärkenden Einfluss auf eine Fehllokalisierung haben schlechte Lichtverhältnisse und sich im Sichtbereich bewegende weitere Fahrzeuge [FML-2011a]. Für die Nutzung der Lokalisierung in einem System zur automatischen Lagerplatzverwaltung wird, wie bei den dargestellten Konkurrenzsystemen, auch bei diesem System weitere Sensorik separat verbaut.

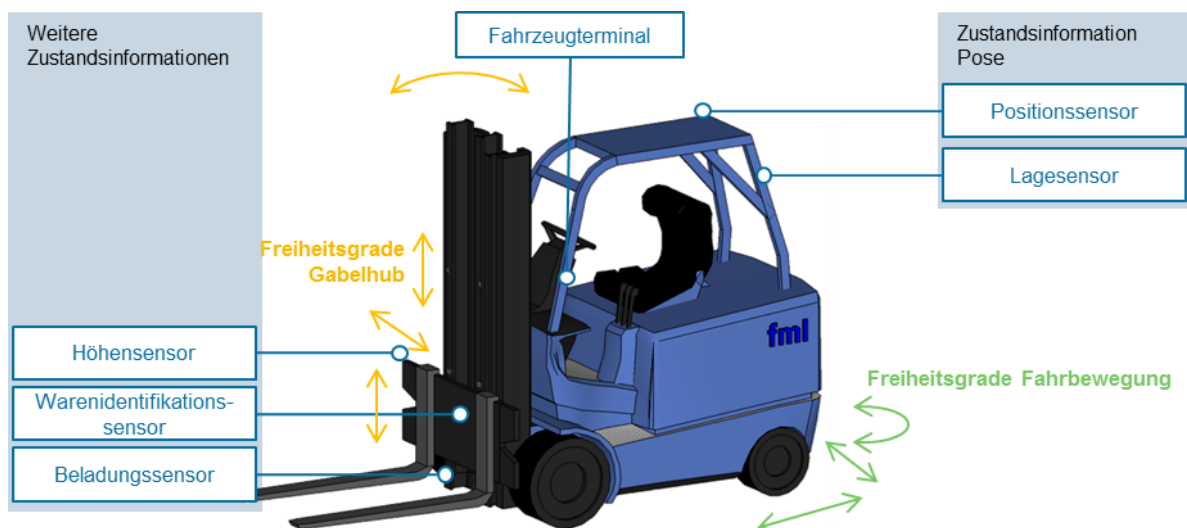


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung für die Integration zahlreicher Sensoren zur automatischen Lagerplatzidentifikation (nach [RUS-2009])

Die Lokalisierungsgenauigkeit ist in allen drei Systemen für die automatische Lagerplatzidentifikation ausreichend. Der Unterschied liegt im Infrastrukturaufwand oder auch im Umfang des verändernden Eingriffs in die Einsatzumgebung. So wird z. B. bei im Boden einzubringenden Transpondern die einhergehende Oberflächenbeschädigung des (Industrie-)Bodens von Anwendern häufig als problematisch angesehen. Auch unterliegen optische Bodenmarkierungen zur Lokalisierung wegen einer Abnutzung durch den Fahrbetrieb der Notwendigkeit zur Reinigung und Wartung. Ohne diese würde die Lokalisierungsreferenz über die Zeit verschwinden.

Von den zum industriellen Einsatz geeigneten Systemen zur Gabelstaplerlokalisierung ermöglicht lediglich die Funktionalität zur relativen Lokalisierung im *Pilot Pro* System eine Lokalisierung ohne Infrastruktur. Dies bedeutet, dass keine künstlichen Marker oder Transponder erforderlich sind. Allerdings erreicht sie im Fall der relativen Lokalisierung nicht die ausreichende Genauigkeit für eine lagerplatzgenaue Lokalisierung. Damit ergibt sich auch für dieses System nur eine unzureichende Eignung auf kurzfristige Layoutänderungen der Stellplätze und/oder Fahrwege flexibel zu reagieren. In allen Systemen existiert ein erhöhter Integrationsaufwand, da wie aus Abbildung 3-7 zu erkennen ist, an verschiedenen Stellen des Fahrzeuges Sensoren verbaut und kabelgebunden am Fahrzeugterminal zusammengeführt werden müssen. Zum Teil sind mitlaufende Kabelführungen am Hubmast aufgrund der zahlreichen Freiheitsgrade in der Hubbewegung (vgl. Abbildung 3-7) erforderlich. Eine kabellose Anbindung unterbleibt im Stand der Technik u. a. wegen der erforderlichen Energieversorgung der Sensoren. Ferner ist den Systemen gemeinsam, dass keine Funktionsintegration in der Sensortechnologie stattfindet. Für jede zu erfassende Zustandsinformation wird eine eigene Sensortechnologie und somit ein eigener Sensor verwendet, der aufwendig in das System durch einzelne Schnittstellen zu integrieren ist. Grundsätzlich zeigt die Kamera hier gegenüber weiteren Sensortechnologien eine hervorgehobene Fähigkeit eine Vielzahl an Sensorfunktionen auszuführen. Ferner zeichnet sich die jeweilige Qualität der Sensorausführung bei der Kamera durch eine durchschnittliche bis gute Eignung aus, wie in Abschnitt 1.2 bereits ausgeführt wurde.

Stand der Forschung

Es existiert eine Vielzahl an Forschungsprojekten, die ergänzend zum aufgezeigten Stand der Technik weiterführende Ansätze verfolgen. Das Projekt ‚Markerbasierte lokale Ortung‘ (MarLO) am *Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung* (FhG IFF), Magdeburg, nimmt den Ansatz der kamera- und markerbasierten Lokalisierung von der *Zenotrack GmbH* auf. Allerdings wird die Kamera nicht auf dem Fahrzeug angebracht. Vielmehr wird in der Lagerumgebung ein Netzwerk an Überwachungskameras installiert, das Bewegungen eines auf dem Dach gekennzeichneten Gabelstaplers analysiert. Dabei wird der optische Code auf dem Fahrzeugdach über alle Kameras mitsamt seiner Orientierung im Raum verfolgt. Die in einem Praxiseinsatz erzielte Lokalisierungsgenauigkeit beträgt $r_{xy}^n = 25 \text{ cm}$ [BOR-2011]. In diesem Praxiseinsatz ist der Integrationsaufwand mit 16 Kameras für die abzudeckende Lagerfläche $X = 3.600 \text{ m}^2$ und einem optischen Code auf dem Fahrerdach gering. Jedoch erfasst die Kamera nicht nur den gabelstaplerbasierten

Transport, sondern auch jedes weitere Ereignis im Lager. Das bedeutet auch die Erfassung von Personen am Arbeitsplatz [BOR-2011]. Zwar existieren Möglichkeiten zum bildverarbeitungs-basierten Retuschieren von Personen. Jedoch fühlen sich Personen unter der Kenntnis einer möglichen kamerabasierten Überwachung psychisch häufig belastet. Es ist zu erwarten, dass bei diesem Ansatz die Wahrung von Persönlichkeitsrechten der Werker im Lager einer breiten Anwendung im Wege stehen wird. Damit hat es für die Praxis keine hohe Relevanz.

Das Projekt ‚Intelligente Schnittstellen in wandlungsfähigen Lieferketten‘ (ISI-WALK) u. a. am *Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH* (IPH), Hannover, entwickelt in einem Teilprojekt eine Lösung zur optischen Lokalisierung. Es verwendet aktive Infrarot-Sender, die in die Hallenbeleuchtung integriert werden. Die Identität der pulsierenden Infrarot-Sender wird mittels Infrarot-Detektor am Fahrzeug erkannt. Eine weitere 2D-Kamera am Fahrzeug analysiert die Lage des Infrarot-Senders im Bild relativ zum Fahrzeug. Aus der Verbindung der beiden Informationen ist eine absolute Lokalisierung möglich, die für die lagerplatzgenaue Lokalisierung von Paletten ausreichend ist [HEI-2012]. Der Vorteil dieser Lösung liegt in einer weitgehenden Unabhängigkeit von den Sonnenlicht- und Beleuchtungsverhältnissen in einem Lager, da es im für den Menschen nicht-sichtbaren Frequenzspektrum betrieben wird. Darüber hinaus ist der Infrastrukturaufwand überschaubar, da lediglich ein Austausch bestehender Hallenbeleuchtung erwartet wird, aber keine zusätzlichen Komponenten in der Infrastruktur eingebracht werden müssen. Die Anbringung der Empfängerkomponenten am Fahrzeugdach ist ebenso leicht möglich, jedoch verfügt das System über kein Konzept für die über die Lokalisierung hinausgehende Zustandserfassung im Transportsystem.

Weitere Projekte zur Lokalisierung am Gabelstapler betreffen die Automatisierung des Flurförderzeuges in die Richtung eines FTF. Entsprechende Systeme dienen überwiegend nicht zur Nachrüstung am Fahrzeug, wie es in den bisher vorgestellten Systemen der Fall ist. Das *Autonomous Navigation System* (ANS) ist ein Vorserienprodukt der *Siemens® AG* und hat sich zum Ziel gesetzt, eine flexible Wahl des Fahrweges ohne separate Infrastruktur zu realisieren. Für die hierzu erforderliche Lokalisierung wird auf einen Laserscanner zurückgegriffen, der im manuellen Teach-in Prozess die Deckenstruktur aufnimmt und mittels ergänzender Odometrie- und Lenkwinkelsensorik trainiert. Dieser Trainingsdatensatz wird für die anschließende wiederholte, gleiche Prozessausführung verwendet. Hierbei macht sich das System zunutze, dass die Hallendecke ihr Äußeres über die Zeit kaum ändert und somit ein sehr stabiles natürliches Merkmal ist [DÜR-2009]. Sofern die Hallendeckenhöhe als weiteres a priori Wissen bekannt ist, lässt sich für den autonom fahrenden Gabel-

stapler in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen eine zentimetergenaue Lokalisierung realisieren [DÜR-2009]. Diese Umsetzung ist von der bisherigen Gabelstaplerlokalisierung grundlegend zu unterscheiden, da es sich jeweils um eine relative Lokalisierung handelt. Die Position kann immer nur in Bezug zu historischen Aufenthaltsorten bestimmt werden. Einen ebenso markerlosen Ansatz zur relativen Lokalisierung verfolgt das Konsortium um das *Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz* (DFKI) im Forschungsprojekt ‚Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten‘ (Marion). In diesem Projekt erfolgt die Entwicklung einer kooperativen relativen Lokalisierung von autonomen Fahrzeugen zueinander, um z. B. Entlade- und hierzu erforderliche Anfahrvorgänge zu koordinieren. Die Sensorik setzt auf einen Laserscanner und eine zusätzlich hohe Fahrzeugintegration unter Nutzung z. B. der Odometrie. Unter der Anwendung von Algorithmen der künstlichen Intelligenz wird in der Fahrzeugsteuerung eine hoch flexible Anpassung und Reaktion auf sich ändernde Umgebungsbedingungen realisiert [TÖD-2013]. Dadurch setzt sich dieses Forschungsprojekt insbesondere von der statischen Ausführung einer Teach-in basierten Lokalisierung im *Siemens® ANS* ab.

Tabelle 3-2: Übersicht zum Stand der Technik und Forschung³

System	Zustand Pose	Weitere Zustände	Wandlungsfähigkeit	Lokalisierungstechnologie	Infrastruktur	Integration Fahrzeugsensorik	
Stand der Technik	Track + Race®	(X)	X	0	RFID-LF	X	0
	VisiblEdge™	X	X	0	Laserscanner	X	0
	PilotPro	X	0	(X)	CCD-Kamera	X	0
Stand der Forschung	ISI-Walk	X	0	0	Infrarot-Sender/Empfänger, CCD-Kamera	X	0
	MarLo	X	0	(X)	CCD-Kamera	X	0
	ANS	X	0	0	u. a. Laserscanner, Odometrie, Lenkwinkel	0	X
	Marion	X	0	0	u. a. Laserscanner, Odometrie, Lenkwinkel	0	X
Diese Arbeit	X	X	X	CCD/CMOS-Kamera	Min.!	0	

³ Legende: X = ja/ zutreffend; (X) = mit Einschränkungen zutreffend; 0 = nein/ nicht zutreffend

Zusammenfassend kann festgestellt werden (vgl. Tabelle 3-2), dass eine Vielzahl an Systemen auf dem Markt und in der Forschung existieren, die eine Gabelstaplerlokalisierung ermöglichen. Einige Systeme setzen auf eine optische Lokalisierung und bewerkstelligen es hierbei den Aufwand für die Schaffung der notwendigen Infrastruktur zu reduzieren. Das System, welches dieses am weitreichendsten realisiert, ist jedoch ein autonom fahrendes System. Hierbei kann flexibel auf Layoutänderungen (Änderung der Fahrwege, Lagerplatzanordnung, etc.) reagiert werden, ohne die Infrastruktur anpassen zu müssen. In den autonomen Systemen findet eine tief greifende Integration in die Fahrzeugsteuerung statt, die eine Nachrüstung des Gabelstaplers nicht sinnvoll macht. Aufgrund immer kürzerer Verweilzeiten eines Gabelstaplers in einer Einsatzumgebung durch den Leasingbetrieb und wachsenden Gebrauchtfahrzeughandel wird dies jedoch zunehmend erforderlich. Keines der vorgestellten Systeme liefert eine Lösung für die Identifikation weiterer transportprozessrelevanter Zustände, wie z. B. die Beladung, Hubhöhe, Warenidentifikation, unter der Verwendung der gleichen Sensortechnologie. Damit ist es z. B. in Systemen zur automatischen Lagerplatzverwaltung immer erforderlich, mehrere Sensorsysteme am Fahrzeug zu verbauen und zu integrieren. Dieser Aufwand steht dem flächenweiten Einsatz einer Gabelstaplerlokalisierung ohne Einschränkung der Flexibilität des Fördermittels Gabelstapler durch z. B. starre und aufwendige Infrastruktur im Wege.

4 Strukturierung eines Lokalisierungssystems

Das Ziel in diesem Kapitel ist es ein Lokalisierungssystem in seiner Struktur zu definieren, indem es in seine funktionalen Bestandteile zerlegt und somit funktionale Module gebildet werden. Ferner entsteht eine Übersicht zu den grundsätzlichen technologieübergreifenden Messgrößen und Positionsbestimmungsverfahren, die im Stand der Technik als Lokalisierungsmethoden verwendet werden. Die Literatur bietet hierzu keine eindeutige technologieneutrale und vollständige Darstellung. Diese soll mit dieser Arbeit in ihren Grundzügen geboten werden. Im anschließenden Systementwurf lassen sich damit die funktionalen Bestandteile und die Lokalisierungsmethodik eines Gabelstaplerlokalisierungssystems in Übereinstimmung mit der Forschungshypothese definieren.

4.1 Funktionale Module eines Lokalisierungssystems

Die *International Standard Organisation (ISO)* hat in Zusammenarbeit mit der *International Electrotechnical Commission (IEC)* in dem Gremium *ISO/IEC JTC 1* im Jahr 2008 eine Definition zu Modulen eines RTLS verabschiedet. Der Fokus der *JTC 1* liegt auf Informations- und Kommunikationstechnologien, die das gemeinsame Verständnis für die Ausarbeitung der *ISO/IEC 19762* darstellen. Im Blatt 3 dieser Richtlinienreihe erfolgt die Definition der Systemmodule eines RFID-Systems unter Verwendung der gleichen Namensgebung für Systemmodule, wie sie im Blatt 5 für Lokalisierungssysteme erfolgt [ISO/IEC 19762-5, DIN EN ISO/IEC 19762-3]. Demnach gliedert sich ein Lokalisierungssystem in den Transmitter zur Beantwortung eines Lokalisierungssignals, welches vom Exciter ausgesendet und im Reader empfangen wird. Dieser führt zugleich die Positionsbestimmung auf Basis der empfangenen Signale durch.

Bensky nimmt für die mobilfunkbasierte Lokalisierung eine Strukturierung eines Lokalisierungssystems vor, die inhaltlich mit der *ISO 19762-5* konform ist. Jedoch werden für die inhaltlich gleichen Module die Bezeichnungen Beacon und Terminal, bzw. Station, verwendet. [BEN-2008]

Malik liefert ebenso eine Einteilung eines RTLS, die inhaltlich der *ISO 19762-5* entspricht. Allerdings wählt *Malik* eine Bezeichnung für die Module, die sich an den Teilfunktionen eines Lokalisierungssystems orientiert und sich von automatischen

Identifikationssystemen und der Mobilfunktechnologie differenziert. Zu nennen sind hier der Tag, der Location Sensor, die Location Engine, die Middleware und die Location Application. [MAL-2009]

Inhaltlich finden sich in den angesprochenen Modulen Übereinstimmungen, wobei Malik in der Modulbezeichnung die Funktion des Moduls für die Lokalisierung hervorhebt. Diese nimmt folgende Darstellung auf, die somit in Anlehnung an [BEN-2008, ISO/IEC 19762-5, MAL-2009, HOH-2012a] erfolgt:

Tag

Zur Positionsbestimmung benötigt ein Lokalisierungssystem die Kenntnis über Referenzpunkte oder die Identität der zu lokalisierenden Objekte. Entsprechende Elemente werden durch einen Tag im Lokalisierungssystem gekennzeichnet und ermöglichen somit die Identifikation und Beobachtung dieser.

Location Sensor

Der Tag steht in einer kontinuierlichen Verbindung zum Location Sensor, der das Signal des Tags empfängt. Diese Verbindung ist uni- oder bidirektional. In letzterem Fall wirkt der Location Sensor gleichzeitig als Sender und Empfänger. Die Kernfunktion des Location Sensors ist das Messen des empfangenen Signals hinsichtlich einer festgelegten, charakteristischen Messgröße.

Die Messgröße gibt hinsichtlich der Position des betrachteten Tags keinen unmittelbaren Aufschluss. Entsprechend des hierarchischen Modells zur Abgrenzung von Daten zur Information von *Rehäuser* werden im Location Sensor lediglich Daten erzeugt [REH-1996].

Location Engine

In der Location Engine findet ggf. eine Vorverarbeitung der Daten aus dem Location Sensor statt, die entsprechend einer vorgegebenen Methode der Positionsbestimmung zur Positionsinformation überführt werden.

Middleware und Location Application

Die Middleware organisiert die Überführung der Positionsinformation aus der Location Engine in übergelagerte IT-Systeme. Die Location Application ist Bestandteil der IT-Systeme, benötigt für seine Funktion die im Lokalisierungssystem ermittelte Positionsinformation und stellt die Schnittstelle zum Anwender dar. Entsprechende IT-Systeme können in Unternehmen Enterprise Resource Planning (ERP)-Systeme darstellen oder Navigationsprogramme mit einer kartenbasierten Visualisierung für den Anwender [LIU-2007].

Die Middleware und die Location Application stellen im weiteren Verlauf nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit dar, weswegen nur vereinzelt separat auf sie eingegangen wird.

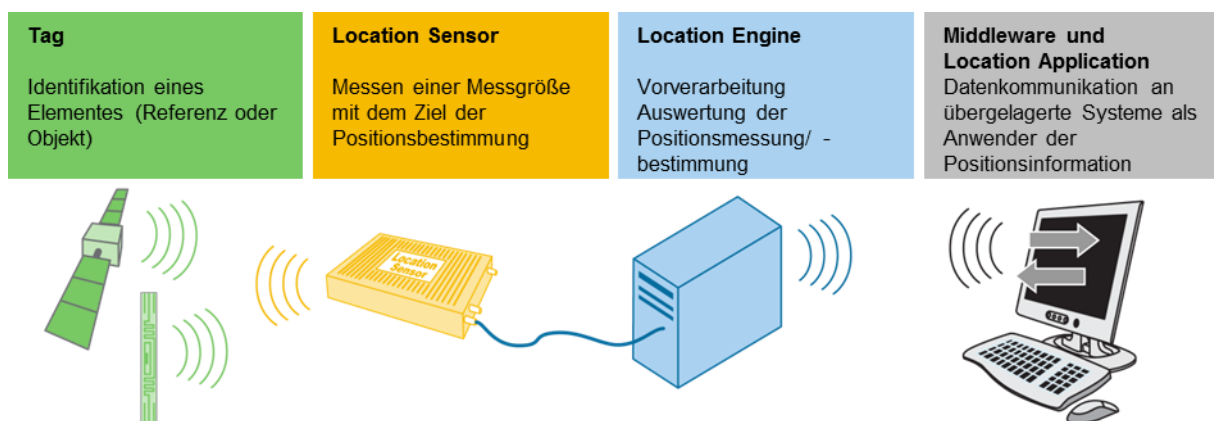


Abbildung 4-1: Funktionale Module eines Lokalisierungssystems

Am Beispiel eines GPS, das als Lokalisierungssystem weitläufig bekannt ist, kann diese hier dargestellte Strukturierung eines Lokalisierungssystems wie folgt veranschaulicht werden: Satelliten stellen Tags dar, deren Identität mittels eines PRN-Codes (Pseudo Random Noise Code) bekannt ist [WEN-2007]. Ferner ist die Laufbahn der Satelliten über die Zeit vorgegeben, so dass sie in dem Lokalisierungssystem als Tag einen Referenzpunkt zur Lokalisierung darstellen [MAN-2010]. Sie senden Signale in definierten Frequenzbereichen bei einer vorgegebenen Modulation an den Location Sensor, der sich im Location Sensor in Form einer GPS-Antenne auf dem Lokalisierungsobjekt befindet und das Signal aufnimmt. Neben dem Location Sensor befindet sich auf dem Lokalisierungsobjekt die Location Engine im sog. GPS-Receiver, die eine Positionsbestimmung auf der Basis des aufgelösten Signals durchführt. Das Positionsergebnis wird über eine Schnittstelle (z. B. mittels RS232-Schnittstelle im NMEA 108 Code) als Element der Middleware an ein Computersystem übergeben, das z. B. eine Kartenvisualisierung für die Nutzung der

4 Strukturierung eines Lokalisierungssystems

Positionsinformation zur Navigation als Location Application bereithält (vgl. Abbildung 4-2).

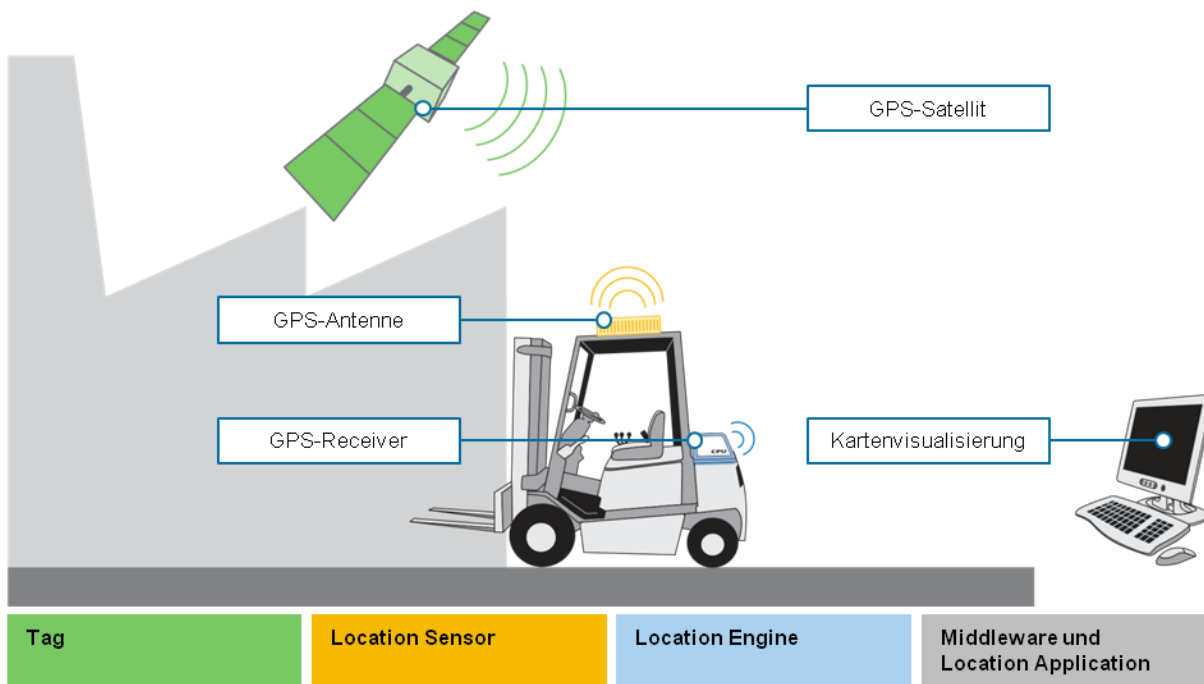


Abbildung 4-2: Funktionale Module eines Lokalisierungssystems am Beispiel GPS

4.2 Architekturen eines Lokalisierungssystems

Die vorgestellte Strukturierung eines Lokalisierungssystems in funktionalen Modulen lässt die Frage ungeklärt, inwieweit sich diese Module auf dem Lokalisierungsobjekt direkt befinden oder in der Umgebung als Infrastruktur zur Lokalisierung bereitgehalten werden. Hiermit wird die Architektur eines Lokalisierungssystems angesprochen, die den räumlichen Aufbau der funktionalen Module klassifiziert [HOH-2012a]. In der Literatur wird in diesem Kontext auch von Ortungsvarianten [LIU-2007] und Ortungsmethoden [STR-2008] gesprochen.

Hierzu bieten *Strang* und *Figueiras* eine erste Differenzierung in der Form, dass sie zwischen einer Positionsbestimmung innerhalb oder außerhalb des Lokalisierungsobjektes unterscheiden [STR-2008, FIG-2010]. Die erste Variante zeichnet sich dadurch aus, dass die Positionsbestimmung an Bord des Lokalisierungsobjektes autonom erfolgt, wozu sich die Location Engine direkt auf dem Lokalisierungsobjekt befindet. Demnach ist das Lokalisierungsobjekt fähig sich selbst zu lokalisieren, was auch als Eigenortung bezeichnet werden kann. Dazu entgegengesetzt entspricht die

Anordnung der Location Engine in der Infrastruktur außerhalb des Lokalisierungsobjektes einer Fremddortung [MAL-2009].

Hiermit ist allerdings noch nicht betrachtet, wie der Location Sensor räumlich im Verhältnis zur Location Engine angeordnet ist. Liu stellt in seiner Beschreibung zu den Architekturen eines Lokalisierungssystems eine weiterführende Einteilung vor. So hält er sich zwar an das Grundprinzip einer Eigen- und Fremddortung, jedoch spricht er weiter von einer indirekten Eigen- oder Fremddortung, wenn der Location Sensor räumlich nicht zusammen mit der Location Engine angeordnet ist [LIU-2007]. Eine Anordnung der Location Engine außerhalb des Lokalisierungsobjektes in der Infrastruktur entspricht bekanntlich einer Fremddortung. Jedoch ist es eine indirekte Fremddortung, wenn der Location Sensor sich auf dem Lokalisierungsobjekt mit bewegt und seine Messdaten zur Positionsbestimmung an die in der Infrastruktur angeordnete Location Engine übermittelt. In diesem Zusammenhang wird die Location Engine vereinzelt auch als Location Server bezeichnet [ISO/IEC 19762-5].

Tabelle 4-1 gibt zu den möglichen Architekturen eines Lokalisierungssystems einen zusammenfassenden Überblick. Dieser ist für die Diskussion verschiedener Gestaltungsmöglichkeiten eines Lokalisierungssystems zur Fördermittel-Lokalisierung in der Intralogistik im weiteren Verlauf dieser Arbeit grundlegend.

Tabelle 4-1: Architekturen eines Lokalisierungssystems

		Location Engine	Location Sensor	Tag
Fremddortung	<i>remote positioning</i>	Infrastruktur	Infrastruktur	Lokalisierungsobjekt
Indirekte Fremddortung	<i>indirect remote positioning</i>	Infrastruktur	Lokalisierungsobjekt	Infrastruktur
Eigenortung	<i>self positioning</i>	Lokalisierungsobjekt	Lokalisierungsobjekt	Infrastruktur
Indirekte Eigenortung	<i>indirect self positioning</i>	Lokalisierungsobjekt	Infrastruktur	Lokalisierungsobjekt

4.3 Lokalisierungsmethoden im Lokalisierungssystem

Im Abschnitt 4.1 wird beschrieben, dass im Location Sensor Messgrößen betrachtet werden, die in der Location Engine durch Kombination in eine Positionsinformation überführt werden. Die Literatur und der Stand der Technik in Lokalisierungssystemen bieten eine Vielzahl an Methoden, um entsprechend dieses strukturierten Vorgehens eine Lokalisierung durchzuführen. Um den Lösungsraum für die Funktion der

Lokalisierung zu strukturieren teilt *Strang* Lokalisierungsmethoden in die Messung spezifischer Messgrößen und in die darauf aufbauende Positionsbestimmung ein [STR-2008]. Entsprechend der Literaturübersicht im Anhang A können für diese Arbeit folgende Messgrößen und Positionsbestimmungsverfahren als Bestandteile einer Lokalisierungsmethode erkannt werden:

4.3.1 Messgrößen

Messgrößen sind physikalisch gemessene Größen, die durch den Location Sensor mittels Analyse des empfangenen Signals ermittelt werden. Das Niveau oder die Struktur der gemessenen Messgröße ist häufig charakterisierend für einen Ort bzw. kann in Angaben zu Abständen überführt werden.

Zeit

Durch das Messen der Zeit wird ein Zeitpunkt oder ein Zeitraum für die uni- oder bidirektionale Kommunikation zwischen dem Location Sensor und dem Tag bestimmt. Folgende Messungen lassen sich unterscheiden:

- Ankunftszeit/ Time of Arrival (ToA)

Synonym: Time of Flight (ToF) (nach [MAL-2009])

Es wird die Ankunftszeit eines Signals t_E gemessen, in dem der ursprüngliche Sendezeitpunkt des Signals t_S codiert enthalten oder anderweitig dem Location Sensor bekannt ist. Dadurch kann die Laufzeit $\Delta t = t_E - t_S$ des Signals zwischen dem Sende- und dem Empfangszeitpunkt bestimmt werden und bei Kenntnis der Signalgeschwindigkeit in einen Abstand d überführt werden [MAL-2009]. Entsprechende Messungen benötigen insbesondere aufgrund hoher Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Signals, z. B. der Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 * 10^8 \frac{m}{s}$, eine hohe zeitliche Auflösung. Ggf. ist zudem eine Zeitsynchronisierung zwischen Sender und Empfänger des Signals erforderlich, damit $\varepsilon_{syn} = 0$ gilt [MAL-2009, FIG-2010].

$$t_E = t_S + \frac{d}{c} + \varepsilon_{sync} \quad (4-1)$$

- Differenz-Ankunftszeit/ Time Difference of Arrival (TDoA)

Im Gegensatz zur reinen Betrachtung der Ankunftszeit t_E werden bei der Differenz-Ankunftszeit Signale verschiedener Sender S_1, \dots, S_n betrachtet. Durch

die zeitliche Differenz der Ankunft einzelner Signale t_{E1}, \dots, t_{En} bei der Kenntnis der Sendezeitpunkte t_{S1}, \dots, t_{Sn} lassen sich Abstände d_1, \dots, d_n zu den jeweiligen Sendern ableiten. Hierzu ist eine zeitliche Synchronisierung der Sender notwendig. Sofern die Sender das Lokalisierungssignal zeitgleich aussenden, entfällt die Notwendigkeit einer zeitlichen Synchronisierung mit dem Empfänger [FIG-2010]. [MAL-2009]

$$t_E = t_{S1} + \frac{d_1}{c} + \varepsilon_{sync} - (t_{S2} + \frac{d_2}{c} + \varepsilon_{sync}) \quad (4-2)$$

$$t_E = \frac{d_1 - d_2}{c} \quad (4-3)$$

- Rundflugzeit/ Round Trip Time (RTT)
Synonym: Round Trip of Flight (RTof)

In den vorgenannten Varianten der zeitbasierten Signalmessung wird von einer unidirektionalen Kommunikation zwischen dem Sender S und dem Empfänger E ausgegangen. Der Messung der Rundflugzeit liegt demgegenüber eine bidirektionale Kommunikation zugrunde. Es wird die Laufzeit zwischen dem Senden des Ursprungssignals t_S und der Ankunft des Antwortsignals t_E für die Übertragungsstrecke $2d$ gemessen [MAL-2009]. Dabei sind der Sender S des Ursprungssignals und der Empfänger E des Antwortsignals häufig identisch. Eine zeitliche Synchronisierung des Senders und Empfängers mit weiteren Systemelementen ist dadurch nicht notwendig.

$$t_E - t_S = \frac{2d}{c} \quad (4-4)$$

Signalphase

Die Messung der Signalphase erfolgt durch die Messung der jeweiligen Signalamplitude y zu einem Phasenzeitpunkt $\varphi(t)$ bzw. die Integration über die Zeit als Phasengang ϕ . Grundsätzlich unterliegt die Messung der Signalamplitude y aufgrund des periodischen Signalverlaufs (vgl. Abbildung 4-3) einer Mehrdeutigkeit, die jeweils durch zusätzliche mathematische Verfahren zu lösen ist [MAN-2004].

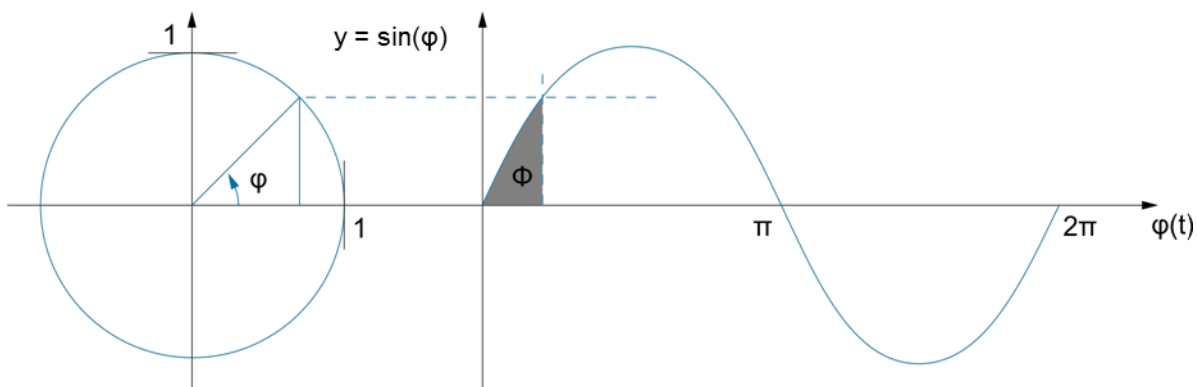


Abbildung 4-3: Messung der Signalphase

- Ankunftsinkel/ Angle of Arrival (AoA)

Synonym: Direction of Arrival (DoA)

Es werden mehrere Signale eines Senders S konkurrierend gemessen, indem ihre Signalphasengänge $\Phi_{E1}, \dots, \Phi_{En}$ beim Auftreffen auf n Antennenelemente des Empfängers E, die als einzelne Empfänger E_1, \dots, E_n modelliert werden können, gemessen werden. Unter der Kenntnis der Signalausbreitungsgeschwindigkeit c , des Abstandes d zwischen den Antennenelementen und der Sendefrequenz f_s lässt sich der Ankunftsinkel θ bestimmen [MAL-2009]. Der Ankunftsinkel beschreibt die räumliche Orientierung des Senders S zum Empfänger E.

Die Messung erfordert eine sehr hohe Auflösung, sodass die Phasendifferenz hochgenau bestimmt werden kann. Kleine Messabweichungen haben bei zunehmenden Abständen zwischen Sender und Empfänger einen wachsenden Positionsfehler in der anschließenden Positionsbestimmung zur Folge [MAL-2009, FIG-2010].

$$\Delta\Phi = \Phi_{E1} - \Phi_{E2} = \frac{2\pi d \sin\theta}{\lambda} \tag{4-5}$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi d f_s \sin\theta}{c} \tag{4-6}$$

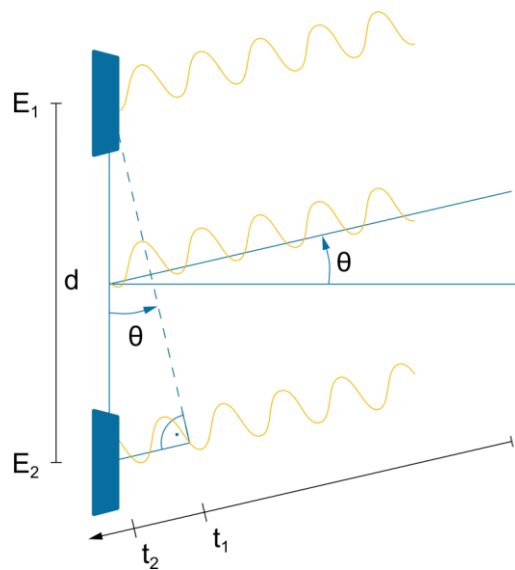


Abbildung 4-4: Messprinzip Ankunftsrichtungssignal (AoA)

- Dopplernavigation (DN)

In der Dopplernavigation wird die zeitliche Wiederkehr der Maximalamplitude y_{max} eines Signals f_D betrachtet, das von einem sich bewegenden Objekt gesendet wird. Durch die Kenntnis der Sendefrequenz f_s und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Signals lassen sich die radiale Geschwindigkeit v_r und bei der Integration über die Zeit t die radiale Strecke des sich bewegenden Objekts relativ bestimmen [DOD-2010].

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\varphi)}{dt} \quad \text{mit } d(\varphi) = \frac{-4\pi v_r}{\lambda} \text{ und } c = f_s \lambda \quad (4-7)$$

Signalstärke

Die Signalstärke wird durch das Messen der Signalintensität i_E an einem Ort bestimmt. Sie wird häufig im Verhältnis zur Intensität des Signals i_S am Sender interpretiert. Zusätzliche Kenntnisse zur Datenrate, Zeitsynchronisierung und Modulationsverfahren des Signals sind nicht erforderlich [BEN-2008].

- Empfangssignalstärke/ Received Signal Strength (RSS)

Die zu messende Empfangssignalstärke i_E unterliegt den physikalischen Gesetzen der Freiraumausbreitung eines Signals. Diese wird durch *Friis* beschrieben und mittels des Parameters β modelliert [FRI-1946]. Demnach nimmt die Signalstärke i mit zurückgelegtem Weg d abhängig vom Übertragungsmedium ab. Auf der Basis einer Modellierung dieser medium- und dis-

tanzabhängigen Freiraumausbreitung kann über die Messung der Signalstärke i_E auf eine Entfernung d geschlossen werden [FIG-2010].

Aufgrund eines exponentiellen Zusammenhangs zwischen dem Abstand d des Senders zum Empfänger und der gemessenen Signalstärke i_E ist eine hohe Genauigkeit und Auflösung in der Signalstärkenmessung erforderlich [MAL-2009].

$$i_E = \alpha - 10\beta \log(d) \quad \text{mit } \alpha = \alpha(i_S) \quad (4-8)$$

- Empfangssignalstärken-Identität/ Received Signal Strength Identifier (RSSI)

Das Messen der Empfangssignalstärken-Identität baut auf der RSS-Messung auf, indem die Signalintensität i_E in Bezug zur Sender-Signalintensität i_S gesetzt wird. Anhand von Korrelationstabellen oder Skalen findet eine Überführung dieser relativen Signalintensität in eine Entfernung d statt, die die Basis für eine Positionsbestimmung darstellen kann. Aufgrund einer geringen Auflösung der Korrelationstabellen unterliegt die Überführung der RSSI-Werte in eine Entfernung höheren Lokalisierungsfehlern als womöglich bei RSS-basierten Lokalisierungen. [FIG-2010]

Identität

Mittels der Messung der im Signal codierten Identität wird der Ursprung, d. h. der Sender, des analysierten Signals ermittelt. Häufig ist die Identität des Signals einem Referenzpunkt zuzuordnen, mit dessen Hilfe die weitere Positionsbestimmung erfolgt.

- Zellen-Identität/ Cell-Identity (Cell-ID)

Synonym: Cell of Origin (CoO)

Es wird die ID einer Sendeeinheit in dessen Sendebereich ermittelt, der sog. Funkzelle [FIG-2010]. Z. B. ist im GPS die ID des Senders im PRN-Code als 1023 Bit umfassende Zahlensequenz abgebildet und für jeden Satelliten als Sender des Systems eindeutig (vgl. Abschnitt 4.1) [MAN-2010].

Eine von der Identität abzuleitende Position des zu lokalisierenden Objektes unterliegt in der Regel der Annahme, dass sich dieses im Sendebereich der bekannten Sender-ID aufhält. Damit ist die zu erreichende Lokalisierungsgenauigkeit mit der Größe der durch die Sendeeinheit gebildeten Funkzelle vorgegeben. Durch weitere Verfahren besteht die Möglichkeit die relative Lage

innerhalb der Zelle zusätzlich zu analysieren. Die Verwendung von gerichteten Antennen oder die Bildung einzelner Sektoren einer Funkzelle mit jeweils eigener ID ermöglicht es, die Lokalisierungsgenauigkeit zu steigern [FIG-2010]. Da GPS-Satelliten weltweit einen großen Sendebereich haben, erfolgt in GPS eine Positionsbestimmung nicht alleine auf Basis der Cell-ID.

4.3.2 Positionsbestimmungsverfahren

Vorgestellte Messgrößen ergeben nur eine Aussage zu einem Abstand des Location Sensors zu einem Tag oder auch nur über die Existenz einer bestehenden Signalverbindung zwischen Location Sensor und Tag. Eine Bestimmung des Aufenthaltsortes des zu lokalisierenden Objektes und damit seiner Position ist noch nicht erfolgt. Messgrößen sind lediglich Daten in Bezug auf die am Ende zu bestimmende Position. Deren Überführung zu einer Information, der Position, die den Zweck eines Lokalisierungssystems darstellt, ist die Aufgabe der im weiteren Verlauf vorgestellten Positionsbestimmungsverfahren.

Lateration

Die Lateration stützt die Positionsbestimmung auf Abstände des Lokalisierungsobjektes zu Referenzorten. Unter der Kenntnis der Position der Referenzorte bilden die bekannten Abstände d_n des zu lokalisierenden Objektes Radien r_n um die Referenzorte U_n (d. h. $d_n = r_n$). Schnittpunkte der n Kreisradien bilden mögliche Positionen des zu lokalisierenden Objektes. Mehrdeutigkeiten der gesuchten Position lassen sich mit steigender Anzahl n von Abständen d_n zu bekannten Referenzen U_n reduzieren. Folgende speziellen Formen der Lateration haben sich in der Lokalisierung etabliert, die die Anzahl betrachteter Abstandsbeziehungen n definieren:

- Trilateration

Die Positionsbestimmung stützt sich auf $n = 3$ Referenzorte $U_n \in \{U_1, \dots, U_3\}$ und drei bekannte Abstände $d_n \in \{d_1, \dots, d_3\}$ des zu lokalisierenden Objektes zu einem Zeitpunkt t [MAL-2009].

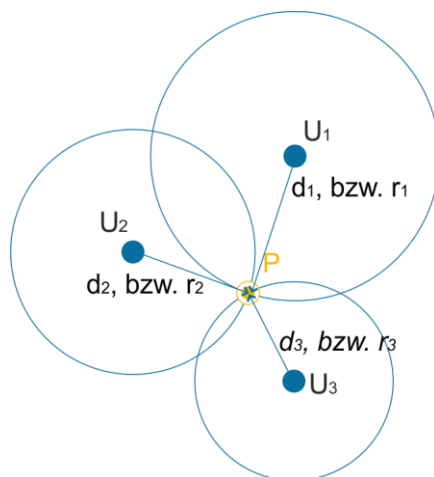


Abbildung 4-5: Trilateration zur Positionsbestimmung

- Multilateration

Die Positionsbestimmung stützt sich auf $n > 3$ Referenzorte $U_n \in \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_i\}$ und die entsprechende Anzahl n Abstände $d_n \in \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_i\}$ zu einem Zeitpunkt t .

Eine Sonderform der Lateration stellt das Hyperbelschnittverfahren dar. Hier geht die Positionsbestimmung nicht von bekannten Referenzorten U_n und zugehörigen Abständen d_n zu einem Zeitpunkt t aus. Vielmehr wird eine Vielzahl von Abständen $d_{n,t}$ über eine Zeitsequenz $t_m \in \{t_1, \dots, t_i\}$ zu dem gleichen Referenzpunkt U_n betrachtet, die einen Hyperbelverlauf bilden.

- Hyperbelschnittverfahren/ hyperbolic navigation

Im Hyperbelschnittverfahren werden eine Vielzahl an bekannten Hyperbelverläufen $g_n(x)$ mit $n > 2$ betrachtet, die jeweils einen relativen Bewegungsverlauf zu einem Referenzpunkt darstellen. Ein Schnitt mehrerer ermittelter Hyperbelverläufe $g_n(x)$ mit jeweiligem Referenzpunkt U_n bildet schließlich die absolute Position des zu lokalisierenden Objektes [FIG-2010].

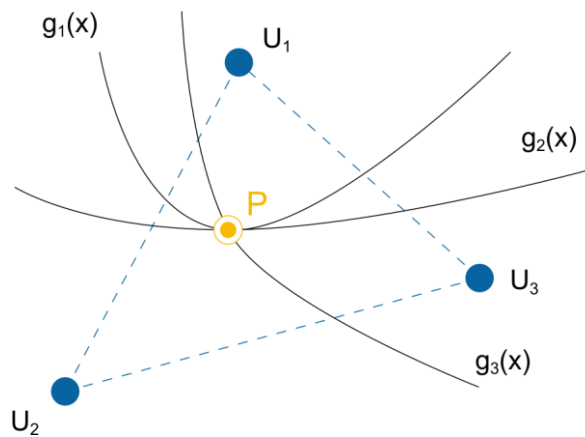


Abbildung 4-6: Hyperbelschnittverfahren zur Positionsbestimmung

Eine starke Vereinfachung der Lateration ist die Positionsbestimmung nach dem Prinzip der Nachbarschaftsbeziehung.

- Nachbarschaftsbeziehung/ proximity
Es besteht die Kenntnis, dass sich das Lokalisierungsobjekt im Empfangsbereich des Senders befindet, der durch den Radius r_{\max_n} gekennzeichnet wird. Sofern mehrere Nachbarschaftsbeziehungen vorliegen, kann der Aufenthaltsort P des Lokalisierungsobjektes auf einen Bereich, die Schnittmenge der durch die Radien r_{\max_n} aufgespannten Empfangsbereiche, eingegrenzt werden. [BEN-2008]

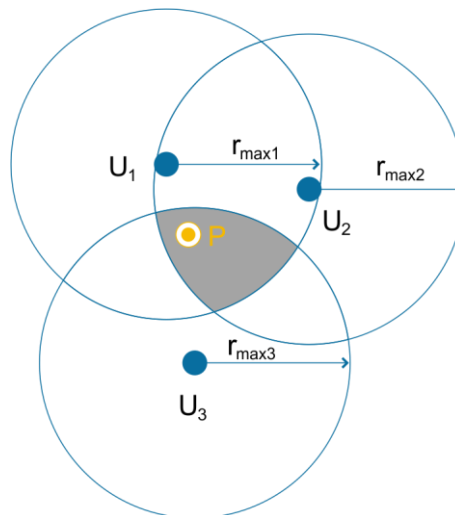


Abbildung 4-7: Nachbarschaftsbeziehung zur Positionsbestimmung

Angulation

Die Angulation ist eine der ältesten Methoden der Positionsbestimmung, die in der Seefahrt auch als Kreuzpeilung bezeichnet wird. Die Positionsbestimmung baut auf der Kenntnis eines jeweiligen Einfallwinkels θ des Signals auf. Dieser trifft vom in seiner Identität und damit Referenzort U_n bekannten Sender am zu lokalisierenden Objekt ein. Alternativ kann auch der Austrittswinkel α des Signals am Sender bekannt sein. Durch die geometrische Kombination von n Richtungsbeziehungen zwischen Sender und Empfänger lässt sich durch Bildung von Schnittpunkten die jeweilige Position des zu lokalisierenden Objektes ermitteln. Folgende spezielle Formen der Angulation sind analog zur Lateration bekannt: [MAL-2009]

- Triangulation
Die Positionsbestimmung erfolgt auf der Basis von $n = 3$ Richtungsbeziehungen.
- Multiangulation
Die Positionsbestimmung erfolgt auf der Basis von $n > 3$ Richtungsbeziehungen.

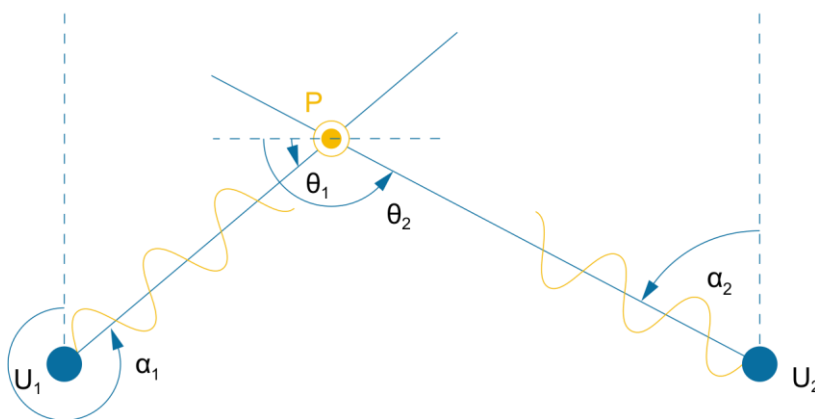


Abbildung 4-8: Angulation für $n=2$ Richtungsbeziehungen zur Positionsbestimmung

Mustererkennung/ Pattern Recognition

Die Mustererkennung basiert auf der Erkennung von wiederkehrenden Strukturen in zur Lokalisierung verwendeten Signalen. Zu erkennende Strukturen bestehen aus charakteristischen Merkmalen, die einen Merkmalvektor bilden. Dieser bildet sich durch das gemessene Niveau einer oder einer Kombination von Messgrößen, die einen Merkmalraum aufspannen (vgl. Abbildung 4-9).

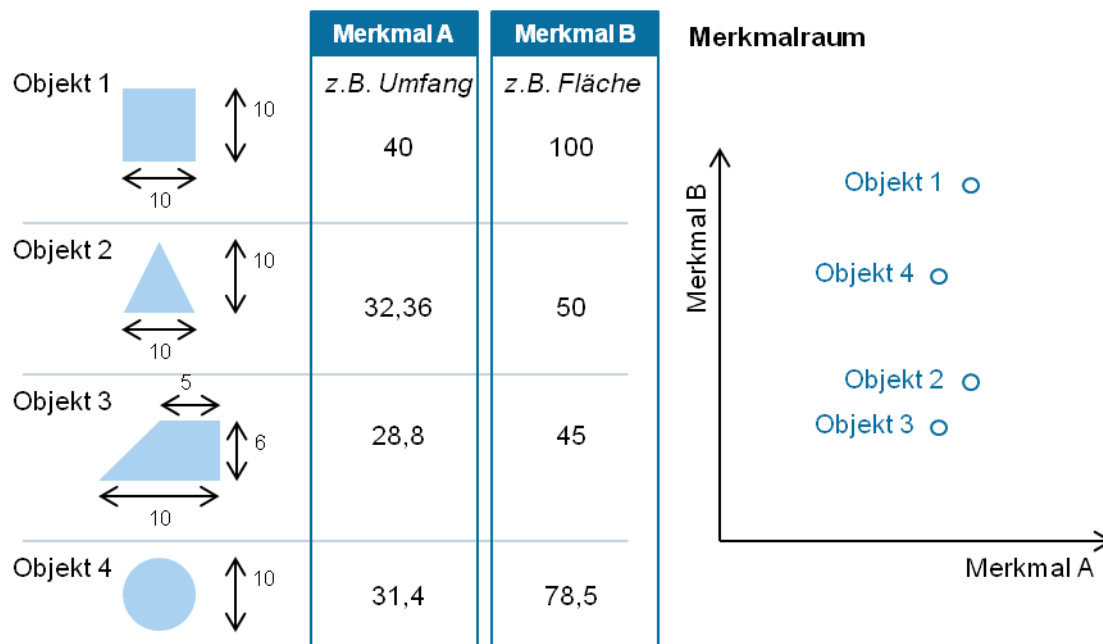


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Merkmalvektors im Merkmalraum [LAN-2013]

Dabei besteht die Mustererkennung aus zwei Phasen. Die Offline-Phase umfasst die Bildung von a priori Wissen. Das Signal wird hinsichtlich Regelmäßigkeiten, Gesetzmäßigkeiten, Wiederholungen und Ähnlichkeiten analysiert. Daraufhin werden entsprechend erkannte Strukturen in der Form eines idealen Merkmalvektors in Datenbanken gespeichert. Ergänzt wird dieser Datensatz durch einen Ortsbezug, der meistens durch ein unabhängiges Lokalisierungssystem als Referenzposition bestimmt wird. Diese Phase ist der eigentlichen Positionsbestimmung vorgelagert und ist für die Lokalisierung erforderliches Vorwissen, das für den jeweiligen Einsatzbereich des Lokalisierungssystems neu zu bilden ist. Unterliegen die Strukturen einer zeitlichen Veränderung, so wird die spätere Lokalisierungsgenauigkeit im Wesentlichen durch die Aktualität dieser Vorkenntnisse bestimmt [FIG-2010]. Die anschließende Online-Phase, die die eigentliche Positionsbestimmung umfasst, besteht aus dem Erfassen der relevanten Messgrößen. Diese bilden einen Merkmalvektor für die anschließende Klassifikation. Die Klassifikation ist eine Untersuchung der Merkmalvektoren auf Übereinstimmung mit bekannten Strukturen, bzw. idealen Merkmalvektoren, die in der Offline-Phase erkannt wurden [FRI-1999]. Anhand der Art der Überprüfung auf Übereinstimmung lassen sich verschiedene Verfahren der Mustererkennung unterscheiden [FRA-2008]:

- Syntaktische Mustererkennung
Die Einteilung in eine Klasse erfolgt aufgrund einer Grammatik, die zwischen einer Menge an Merkmalen erkannt wird. Diese Grammatik ist eine Beschreibung der Folge von Merkmalen.

- Statistische Mustererkennung
Eigenschaften der Merkmale werden als Zahlenwert gemessen und in einem Merkmalsvektor zusammengefasst. Die Klassifizierung erfolgt mittels einer mathematischen Funktion.
- Strukturelle Mustererkennung
Eine Klassifizierung kann auch aufgrund einer kombinierten syntaktischen und statistischen Mustererkennung erfolgen, sodass dann von einer strukturellen Mustererkennung gesprochen wird.

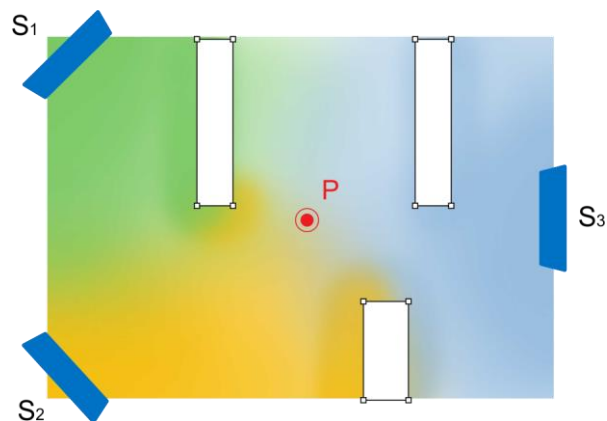


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung für eine Mustererkennung basierend auf einer Signalstärkenmessung

Zusammenfassung

Dieses Kapitel hat eine grundsätzliche Übersicht (vgl. Abbildung 4-11) über gängige Verfahren zur Positionsbestimmung und deren Messgrößen gegeben, die im Rahmen der Positionsbestimmung weiterverarbeitet werden. Sie bietet dem Anwender und Systemintegrator ein erstes Verständnis der funktionalen Zusammenhänge im Rahmen der Lokalisierung. Aufbauend auf einem physikalischen Grundverständnis ist er nunmehr in der Lage u. a. Einflüsse der Einsatzumgebung auf die Positionsbestimmung in Grundzügen zu erkennen. Damit ist eine Basis geschaffen die Komplexität der Positionsbestimmung in Lokalisierungssystemen zu durchdringen und in einer genauen Analyse der Rahmenbedingungen eine geeignete Entscheidung für einen Lokalisierungsansatz zu fällen.

In dieser Arbeit bietet dieser Überblick für den weiteren Systementwurf den Lösungsraum für die Gestaltung der kamerabasierten Lokalisierung. Hervorzuheben ist, dass Lokalisierungstechnologien grundsätzlich die Summe der hier beschriebenen

nen Messgrößen und Positionsbestimmungsverfahren nutzen können, wobei in einzelnen Lokalisierungstechnologien Präferenzen für die Messung der einen oder anderen Messgröße, wie auch für die Anwendung einzelner Positionsbestimmungsverfahren zu beobachten sind. In hoch-genauen Lokalisierungssystemen werden auch zunehmend parallel konträre Signalauswertungen realisiert, die das Ziel verfolgen Schwächen eines Positionsbestimmungsansatzes durch Stärken eines weiteren Positionsbestimmungsansatzes auszugleichen. Diese mehrfache Positionsbestimmung kann sowohl unter der Nutzung der gleichen Technologie, wie z. B. in GPS-Systemen für den militärischen Einsatz [DOD-2010], als auch unter der Nutzung verschiedenartiger Technologien und damit Signalfrequenzen erfolgen. Letztere Systeme werden auch als Multi-Sensorsysteme [LIG-2009] oder Systeme der integrierten Navigation [HOF-2008] bezeichnet.

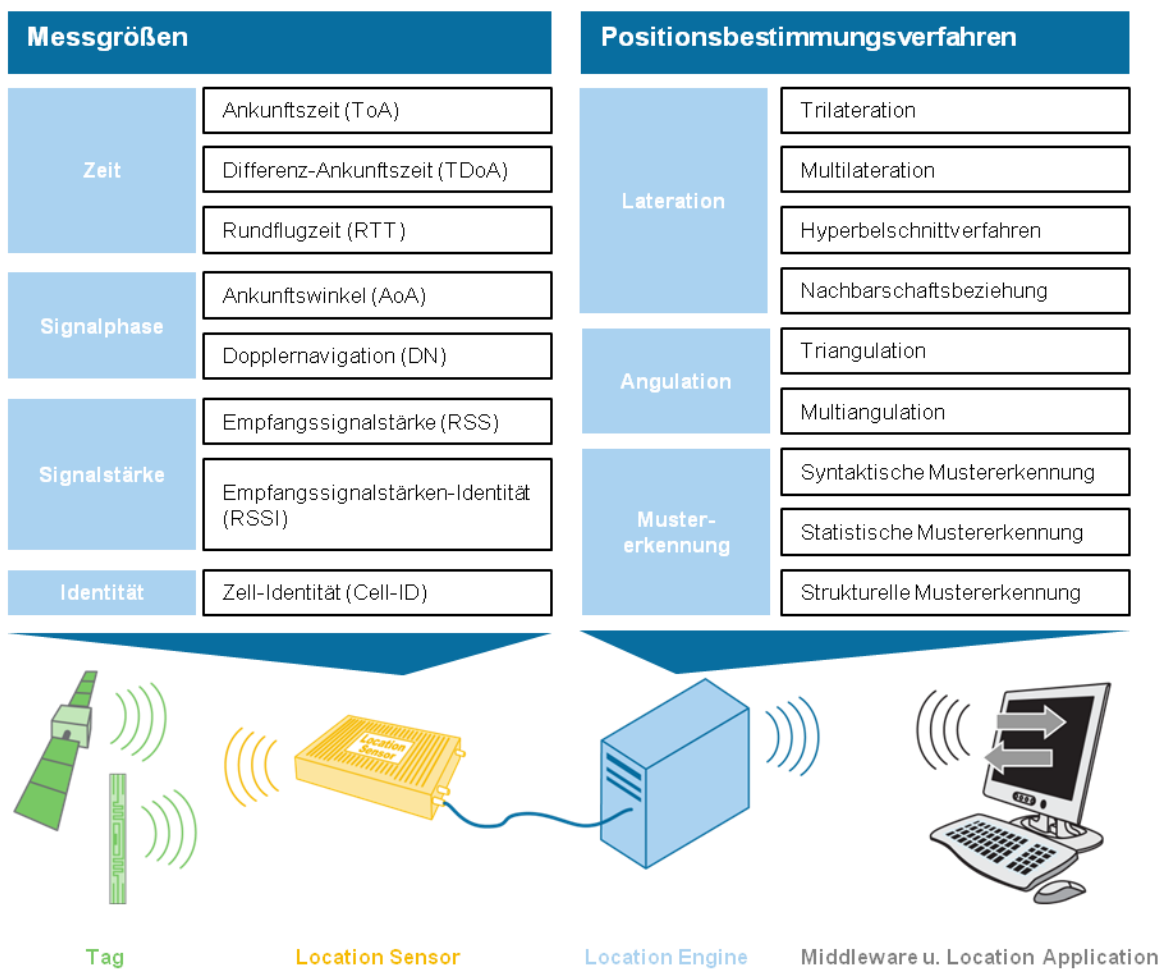


Abbildung 4-11: Übersicht zu den Lokalisierungsmethoden

5 Anforderungsanalyse für ein System zur Gabelstaplerlokalisierung

Anforderungen an Sensoren werden in der Regel nach den Kriterien ‚Zeit‘, ‚Qualität‘ und ‚Kosten‘ gestellt. In logistischen Systemen besteht zwischen diesen Größen häufig ein Zielkonflikt [ARN-2008], der auch als magisches Dreieck beschrieben wird. Hierbei bewertet die ‚Zeit‘ die Dauer und den zeitlichen Moment der Zustandserfassung. Die ‚Qualität‘ betrachtet die erreichte Güte der Zustandserfassung, während die ‚Kosten‘ eine monetäre Bewertung des Aufwandes für die Zustandserfassung darstellen. Diese Zielkriterien sind im Allgemeinen für die Bewertung und Anforderungsdefinition von Sensorsystemen ebenso zielführend. Sie bedürfen allerdings bei der konkreten Betrachtung eines Lokalisierungssystems für Fördermittel im innerbetrieblichen Transportprozess einer weiteren Detaillierung.

Deshalb diskutiert die Literatur eine Vielzahl an verschiedenartigen weiteren Kriterien, die für die Gestaltung und Wahl eines Lokalisierungssystems in logistischer Einsatzumgebung zu betrachten sind. Abbildung 5-1 stellt das Ergebnis einer umfangreichen Literaturrecherche dar (vgl. Anhang B), die es zum Ziel hat, relevante Kriterien herauszuarbeiten, die die Basis einer Entscheidung für eine bestimmte Lokalisierungsform bilden. Jedes dieser Kriterien lässt sich wiederum in eine Beziehung zu den einzelnen Zielgrößen des magischen Dreiecks bringen. In der weiteren Anforderungsanalyse und -definition werden diese Kriterien zugrunde gelegt und spezifiziert, so dass in Abschnitt 6.1 ein Systementwurf unter Berücksichtigung dieser Anforderungen ermöglicht wird.

Der Großteil der betrachteten Literatur sieht in der Detaillierung der Lokalisierungsfunktion und der Lokalisierungsleistung die wesentlichen Kriterien für die Wahl eines geeigneten Lokalisierungssystems (vgl. Abbildung 5-1). In dieser Arbeit stellen sie darum grundlegende Kriterien dar:

Die Arbeiten von *Borstell* und *Malik* weisen einen hohen Praxisbezug auf [MAL-2009, BOR-2011]. Sie gehen darum in ihren Arbeiten explizit auf den Integrationsaufwand eines Lokalisierungssystems in die Einsatzumgebung und am Lokalisierungsobjekt ein. Die weiteren Quellen behandeln das Thema der Wahl eines Lokalisierungssystems auf einem im Verhältnis technisch grundlegenderem Niveau und setzen sich vor allem mit der Flexibilität der Lokalisierung auseinander. Diese umfasst auch die

Robustheit des Systems gegenüber Veränderungen und resultierenden Störwirkungen der Umgebung auf das Lokalisierungssystem. *Pflaum* formuliert u. a. eine Handlungsempfehlung für die weitere Entwicklung von Lokalisierungssystemen und nennt hier die Forderung, in Zukunft auch die Skalierbarkeit und Wandlungsfähigkeit von Lokalisierungssystemen zu betrachten [PFL-2004]. So sind sie auch für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit der Lokalisierung zentrale Anforderungen und somit als Kriterium für die Systemwahl zu verwenden. Lediglich *Malik* greift diese Diskussion weiter auf und erwartet von Systemen, Zusatznutzen in der Form weiterer Funktionalitäten zur Zustandserfassung zu bieten. Alternativ sollen lediglich grundsätzliche Fähigkeiten im System bestehen um einen zukünftigen Zusatznutzen zu realisieren [MAL-2009]. Diese Fähigkeit ist somit in der Systemwahl zu beachten. Hiermit wird eine Vielzahl weiterer anwendungsspezifischer Kriterien genannt, die in die Betrachtung dieser Arbeit aufgenommen werden.

Diese grundlegenden und anwendungsspezifischen Kriterien lassen sich um weitere Kriteriengruppen ergänzen, die jedoch hier aufgrund der geringen Relevanz für die formulierte Problemstellung außerhalb der weiteren Betrachtung bleiben. So finden sich bei *Liard* und *Malik* Darstellungen zur Koexistenzfähigkeit von Lokalisierungssystemen zu weiteren in der Anwendungsumgebung in Betrieb befindlichen Kommunikationstechnologien [MAL-2009, LIA-2012]. Diese bisher technisch geprägten Kriterien lassen sich ferner durch zahlreiche wirtschaftlich geprägte Kriterien ergänzen, wie sie besonders bei *Dodel* und *Malik* angesprochen werden [MAL-2009, DOD-2010].

Grundlegende Kriterien		Anwendungsspezifische Kriterien	
Lokalisierungs-funktion	Freiheitsgrad	Integrations-aufwand	Maximale Reichweite
	Kontinuität		Vernetzungsform
Lokalisierungs-leistung	Genauigkeit	Flexibilität	Physikalische Anpassbarkeit
	Präzision		Spannungsversorgung
	Auflösung	Skalierbarkeit	Maximale Systemteilnehmer
	Echtzeitfähigkeit		Wirtschaftliche Anordnung
		Wandlungs-fähigkeit	Funktionsintegration

Abbildung 5-1: Kriterienkatalog für die Auswahl eines Lokalisierungssystems

Im weiteren Verlauf werden die bisher eingeführten grundlegenden und anwendungsspezifischen, technisch geprägten Kriterien erläutert und anhand jeweiliger

Teilaspekte mit zugehörigen Metriken detailliert. Metriken stellen ein Messzahlensystem dar, um einen Raum möglicher Parameter für ein Kriterium zu quantifizieren. Hier wird unter Metrik in Anlehnung an [BSI-2012] vielmehr eine qualitative Einordnung verstanden, die eine Beschreibung der geforderten Ausprägung des Kriteriums liefert. Damit wird das geforderte Niveau des Kriteriums bestimmt.

Diese Anforderungsdefinition durch die Festlegung geforderter Metriken stützt sich in Teilen auf Erfahrungen aus zahlreichen Prozessbeobachtungen im produzierenden Gewerbe und im Handel (vgl. [FML-2010]). Ferner fließen hier Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit Systemintegratoren, Hardwareherstellern und Industrieanwendern im projektbegleitenden Ausschuss themenbezogener Forschungsprojekte am *Lehrstuhl fml* ein [FML-2011, GÜN-2014]. Ergänzt wird diese Anforderungsdefinition durch ein umfassendes Studium der Literatur. Insgesamt ist jedoch einschränkend anzumerken, dass eine über die hier gewählte Stufe hinausreichende Detaillierung der Betrachtung einer expliziten Anwendung bedarf [MAN-2009]. Diese stellt allerdings eine Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auf weitere Anwendungen infrage und wird darum entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit hier nicht verfolgt.

5.1 Grundlegende Kriterien und Anforderungen

Wie in der Problemstellung und Zielsetzung bereits festgelegt wurde, erfolgt die hier vorliegende Anforderungsdefinition für die Lokalisierung eines Gabelstaplers im innerbetrieblichen Transportprozess. Ergänzend hierzu wurde als Zielanwendung im Abschnitt 3.2 die automatische Lagerplatzverwaltung identifiziert, um ein hohes Effizienzpotenzial im Transportprozess zu heben. In diesem Kontext ist der folgende Anforderungskatalog bestehend aus Kriterien und konkreten Anforderungsniveaus bzw. Metriken zu interpretieren.

5.1.1 Lokalisierungsfunktion

Die Lokalisierungsfunktion beschreibt die Art und Vollständigkeit, bzw. Quantität, der Information zur Pose, die durch das Lokalisierungssystem ermittelt wird.

Freiheitsgrad

Hierbei ist zum einen der Freiheitsgrad der bestimmten Pose zu betrachten, d. h. die Summe der einzelnen Freiheiten in der die Bewegung eines Objektes im Raum

differenziert werden kann. Es sind drei Translations- und drei Rotationsfreiheitsgrade zu unterscheiden, die maximal durch ein Lokalisierungssystem zur Beschreibung der verfolgten Bewegung in Form der Pose ermittelt werden können (vgl. Kapitel 2). Die Maximalkonfiguration wird auch 6 DoF (Degrees of Freedom) genannt, wie auch die einzelne Freiheit umgangssprachlich Freiheitsgrad genannt werden kann [BRO-2009].

Kontinuität

Durch die Kontinuität wird die räumliche und zeitliche Wiederholung der Ausführung der Lokalisierungsfunktion beschrieben. *Strang* stellt hierbei insbesondere die räumliche Durchgängigkeit der Bestimmung der Pose in den Vordergrund, um eine kontinuierliche von einer diskontinuierlichen Lokalisierung zu trennen [STR-2008]. Eine diskontinuierliche Lokalisierung ist demnach die Einschränkung der Posenbestimmung auf wenige vordefinierte Wegpunkte innerhalb einer Fläche. Diese Form der Lokalisierung wird auch diskrete Lokalisierung, Choke Point Lokalisierung oder Pseudo-Lokalisierung genannt [STR-2008, LIA-2012, WIE-2010].

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-1: Anforderungsdefinition zur Lokalisierungsfunktion

Freiheitsgrad	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • 2 translatorische Freiheitsgrade (xy) und • 1 rotatorischer Freiheitsgrad (γ) ergeben für die Bestimmung der Fahrzeugpose $P^n(x^n, y^n, \gamma^n)$
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Das Fahrzeug bewegt sich flurgebunden in der xy-Ebene und dreht sich um die z^n-Achse (bzw. γ^n-Drehung), sodass die Freiheitsgrade x^n, y^n, γ^n existieren.
Kontinuität	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Bestimmung der Pose
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Bedienung eines flexiblen Bodenlagers erfordert eine freie, spurungebundene und somit kontinuierliche Lokalisierung [DÜR-2009]. • Ferner erfolgen in der Blocklagerung Umlagerungen, die eine Pufferung von Ladeeinheiten auf nicht vordefinierten Plätzen bedingen, auf denen ebenso eine Lokalisierung erforderlich sein muss.

5.1.2 Lokalisierungsleistung

Die Lokalisierungsleistung ist das Kriterium zur qualitativen Beschreibung der Information Pose, die das Lokalisierungssystem ermittelt und dem Nutzer zur Verfügung stellt. Die Lokalisierungsleistung unterliegt grundsätzlich systemeigenen und umgebungsbedingten Fehlern. Sie stellt für den Nutzer das Kriterium dar, das den Gebrauchsnutzen eines Systems einzuschätzen hilft [DOD-2010] und somit für die Systemwahl von hoher Bedeutung ist.

Genauigkeit

Das Verständnis zum Kriterium Genauigkeit entspricht der im Abschnitt 2.2 erfolgten Definition.

Grundsätzlich ist zu bedenken, dass die Genauigkeit in Lokalisierungssystemen durch die Anpassung der Dichte von Systemmodulen (Location Tags und Location Sensoren) beeinflusst werden kann [PFL-2004]. Ferner spielt das Layout der angebrachten Systemmodule in Abhängigkeit der Umgebung eine Rolle [ATT-2008, LAU-2009, DOD-2010]. Deshalb können Angaben in der Literatur und Ergebnisse aus Versuchsdurchführungen nur als Tendenzaussage verstanden werden und müssen für den jeweiligen Anwendungsfall in der Praxis verifiziert werden.

Dennoch ist die Betrachtung der Genauigkeit von hoher Bedeutung, da sich mit steigender Genauigkeit in der Regel weitere Anwendungsmöglichkeiten des Lokalisierungssystems erschließen lassen [ECO-2002].

Präzision

Die Präzision beschreibt die Wiederholgenauigkeit eines Messergebnisses, sofern die Durchführung der Messung unter unveränderten Bedingungen erfolgt [DIN 53350-13]. Hierbei wird die Standardabweichung der jeweiligen erreichten Genauigkeit betrachtet [EUR-1998]. Die Bewertung der Präzision erfolgt i. d. R. qualitativ [DIN 53350-13].

Allerdings ist mit diesem Kriterium grundsätzlich das Ziel verbunden, einen stabilen und sicheren Lokalisierungsprozess zu realisieren. In der Industrie hat sich zur Messung der Qualität eines Prozesses die Six Sigma (6σ)-Methodik etabliert. Im Falle einer Normalverteilung einer Leistungsmessung wird dort der Anspruch formuliert, dass der Messwert vom Mittelwert um sechs Sigma abweicht. Dies

entspricht der sechsfachen Standardabweichung $\pm 6\sigma$ vom Mittelwert. Messwerte in diesem Korridor unter und oberhalb des Mittelwertes sollen unter/über der oberen/unteren Leistungsgrenze bzw. dem geforderten Niveau liegen. Dies ist im Falle der Normalverteilung gleichbedeutend mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99966%, dass der Messwert innerhalb des Korridors von sechs Standardabweichungen $\pm 6\sigma$ liegt. Allerdings erreichen wenige Prozesse dieses hohe Niveau [BUS-2014].

In diesem Kontext stellt die Präzision in dieser Arbeit eine Betrachtung der Wahrscheinlichkeit dar, dass die geforderte Genauigkeit wiederholt erreicht wird. Sofern eine Normalverteilung vorliegt, entspricht sie einem zu bestimmenden Vielfachen der Standardabweichung. Damit orientiert sich dieses Verständnis zur Präzision an der Definition im Handbuch zum Weltkoordinatensystem WGS-84 und nimmt Bezug auf in der Industrie etablierte Qualitätsmessmethoden [EUR-1998].

Auflösung

Unter der Auflösung wird der kleinste Abstand zwischen zwei benachbarten Messpunkten verstanden, den das Lokalisierungssystem bestimmen kann [EUR-1998, DIN 8373]. Damit werden auch die kleinsten möglichen Veränderungen der Pose beschrieben, die das Lokalisierungssystem ermitteln kann [HES-2009]. Die Auflösung kann neben der hier dargestellten räumlichen Auflösung auch hinsichtlich einer zeitlichen Auflösung differenziert werden [PFL-2004], die aber nicht in der weiteren Diskussion dieser Arbeit thematisiert wird.

Die Auflösung ist eine entscheidende Größe für die Bewertung der Fähigkeit zur Automatisierung einer Anwendung, die sich durch die Implementierung der Lokalisierungslösung ergeben kann [LIU-2007]. Dies trifft vor allem bei FTF zu.

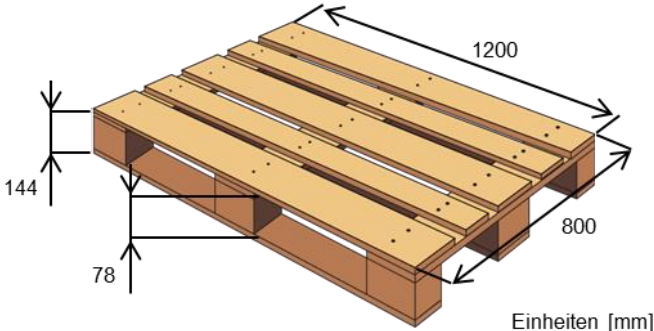
Echtzeitfähigkeit

Das Verständnis zum Kriterium Echtzeitfähigkeit entspricht der in Kapitel 2 erfolgten Definition.

Um die Echtzeitfähigkeit eines Lokalisierungssystems beurteilen zu können, ist es erforderlich, die Latenzzeit der Posenbestimmung zu ermitteln. D. h. die Zeitdifferenz zwischen der erfolgten Messung und der abgeschlossenen Auswertung der Messung hinsichtlich der Pose ist zu betrachten.

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-2: Anforderungsdefinition zur Lokalisierungsleistung

Genauigkeit	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • Maximalabweichung in der xy-Ebene $r_{xy}^n(p_{pz}) \leq 40 \text{ cm}$ • Maximalabweichung in der Orientierung um die z-Achse $\omega_y^n(p_{pz}) \leq 45^\circ$
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Die Europoolpalette ist für den Gabelstapler im europäischen Wirtschaftsraum ein verbreitetes Format einer Ladeeinheit und das Grundmaß für eine Vielzahl weiterer LHM (vgl. Abbildung 3-2). • Hierbei wird die kürzeste Seite einer Europalette mit einer Kantenlänge von $l = 800 \text{ mm}$ und Einfahrtiefe in das LHM von $h = 100 \text{ mm}$ zugrunde gelegt [DIN 15146-4]. • Für die sichere Lokalisierung und positionsbezogene Unterscheidung von Paletten bei Auf-/Abnahme durch den Gabelstapler ist eine Genauigkeit von $r_{xy}^n \leq 40 \text{ cm}$ (maximaler Fehlerradius in der xy-Ebene) erforderlich [PFL-2004]. <div style="text-align: center;">  <p>Einheiten [mm]</p> </div> <p>Abbildung 5-2: Relevante Abmessungen einer Europoolpalette (nach [DIN EN 13698-1])</p> <ul style="list-style-type: none"> • Damit die richtige Ausrichtung des Fahrzeuges zum Lagerplatz für die Ein- und Auslagerung sichergestellt werden kann, ist die Unterscheidung zwischen einer Längs- und Querstellung zum Lagerplatz notwendig. Somit ergibt sich die Genauigkeitsanforderung von $\omega_y^n < 45^\circ$ (Maximalabweichung) für die Lage um die z-Achse.

5 Anforderungsanalyse für ein System zur Gabelstaplerlokalisierung

Präzision

Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• Es wird eine stabile und zuverlässige Wiederholgenauigkeit gefordert, sodass die gegebene Genauigkeitsanforderung zu einer Wahrscheinlichkeit von $p_{pz} = 99,7\%$ erreicht wird.
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Da Ladeeinheiten auf nicht vorgesehenen Flächen zur Umlagerung gepuffert werden können (vgl. Beispiel Getränkedistribution [FML-2010]) und somit bei nochmaliger Anfahrt über ihre Pose sicher aufgefunden werden müssen, muss ein Lokalisierungssystem eine geringe Schwankung in der Genauigkeit aufweisen.• Das Qualitätsniveau durchschnittlich guter Prozesse liegt im Bereich von 3σ bis 4σ [BUS-2014]. Für die Abweichung von $\pm 3\sigma$ um den Mittelwert entspricht dies einer Wahrscheinlichkeit von $p = 99,7\%$ im Falle einer Normalverteilung, die in dieser Arbeit als Richtschnur dient.

Auflösung

Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• cm-Bereich, d. h. $d_{AL} < 1 dm$)
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Im gabelstaplerbasierten Umschlag sind Pufferungen von Ladeeinheiten auf nicht vordefinierten Lagerplätzen möglich (vgl. Beispiel Getränkedistribution [FML-2010]). In der Folge ist nicht nur das sichere Wiederauffinden (vgl. Anforderung Präzision) von Bedeutung, sondern auch eine kleinauflösende Posenbestimmung relevant.• Im Vordergrund dieser Arbeit steht allerdings nicht das Ziel, eine automatisierte Wegführung des Gabelstaplers zu realisieren, weswegen eine Auflösung im cm-Bereich (d. h. $d_{AL} < 1 dm$) ausreichend ist.

Echtzeitfähigkeit

Anforderung

- Prozessrelevante Echtzeit, d. h. eine Latenz $t_{LT} < 0,5 \text{ s}$

Erläuterung

- Entsprechend der MTM-Methodik, einer Systematik vorbestimmter Zeiten zur zeitlichen Bewertung von Arbeitsabläufen, bedarf das Anfahren eines Regal-lagerplatzes 80 TMU , bzw. $2,88 \text{ s}^4$. Hierbei teilt sich der Vorgang auf das Einbiegen und ausgerichtete Zufahren auf den Lagerplatz auf. [FIS-2009]
- Unter Zuhilfenahme der MTM-Zeitanalyse ist anzunehmen, dass ca. 1 s nach dem Einbiegen am Lagerplatz, d. h. unmittelbar vor dem Betätigen des anschließenden Hubs auf die Einlagerhöhe von $h = 2,5 \text{ m}$, die Anfahrt eines falschen Lagerplatzes erkannt werden muss.
- Eine Latenz von $t_{LT} \approx 0,5 \text{ s}$ wird vermutlich gerade ermöglichen im laufenden Vorgang ‚Auf Regal ausrichten‘ dessen fehlerhafte Ausführung zu erkennen, ohne dass die Ausrichtung unnötig bereits abgeschlossen und der nachgelagerte Prozess ‚Hub auf $2,5 \text{ m}$ ‘ begonnen wurde. Verschwendung würde somit nicht auftreten.

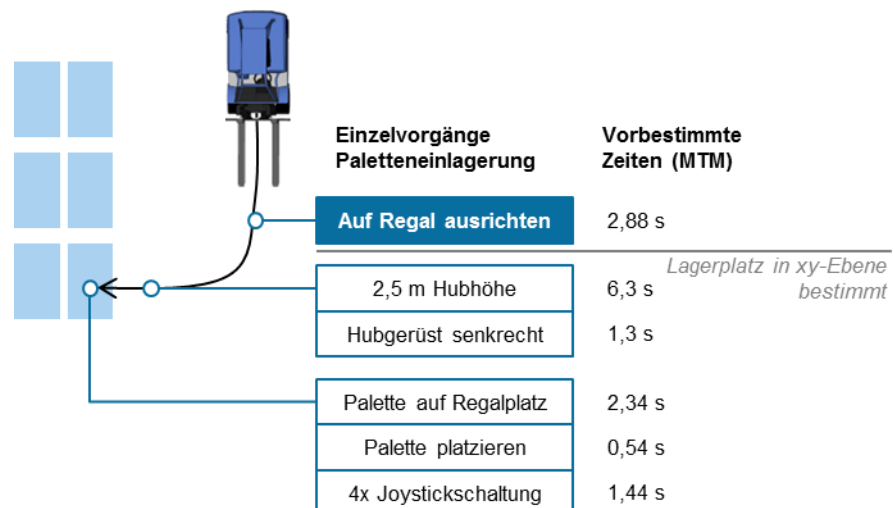


Abbildung 5-3: Zeitliche Betrachtung der Einzelschritte in der gabelstaplerbasierten Paletteneinlagerung (nach [FIS-2009])

5.2 Anwendungsspezifische Kriterien und Anforderungen

5.2.1 Integrationsaufwand

Ähnlich wie es für die Anbringung von Lokalisierungslösungen bei FTS in der VDI 2510 beschrieben ist [VDI 2510-1], muss ebenso für die Einführung eines

⁴ 1 TMU entspricht einer Ausführungszeit von $t=0,036 \text{ s}$ [MTM-2008]

Lokalisierungssysteme zur Gabelstaplerlokalisierung der Integrationsaufwand bewertet werden. Hierbei ist grundsätzlich zwischen dem Integrationsaufwand am Lokalisierungsobjekt bzw. dem Flurförderzeug und dem Integrationsaufwand in der Infrastruktur zu unterscheiden. Die *ISO/IEC 19762-5* [ISO/IEC 19762-5] bezieht diesen auf den Aufwand, der zur Integration der Komponenten von der Luftschnittstelle am Location Tag bis zur Location Engine erfolgt. Damit ist letztlich der Integrationsaufwand sowohl am Lokalisierungsobjekt und in der Infrastruktur angesprochen, sodass die Systemarchitektur hier keine Unterscheidung erfordert (vgl. Abschnitt 4.2).

Als Aufwand im Rahmen der Integration eines Lokalisierungssystems in die Einsatzumgebung und dem Lokalisierungsobjekt fallen insbesondere folgende Posten an:

- Montage, abhängig von:
 - Anzahl der Systemmodule und ggf. Nähe der jeweiligen Anbringungs-
punkte zueinander.
 - Physikalische Abstimmung des Systemmoduls mit dem Anbringungs-
tergrund und -umgebung, z. B. hinsichtlich der Vermeidung elektro-
magnetischer Kopplungen.
- Spannungs- und Kommunikationsanbindung, sofern sie kabelgebunden erfolgt
und/oder die Anforderung zur Synchronisierung der Systemmodule besteht.
- Einmessung und Kalibrierung in Abhängigkeit des jeweiligen Lagerzustandes
(z. B. Lagerfüllgrad).
- Transformationskosten aufgrund Umbauten und Prozessänderungen in
bestehenden Einsatzumgebungen.
- Protokollbasierte Integration der Lokalisierung in Unternehmens- und weitere
IT-Systeme.
- Training der Mitarbeiter hinsichtlich Pflege, Wartung und Nutzung der Lokali-
sierung.
- Systemtests zur Funktionsabsicherung bei Inbetriebnahme.

Der Integrationsaufwand einer Lokalisierungslösung erfordert vor allem bei der Nachrüstung der Lokalisierung in einer bestehenden Produktivumgebung eine detaillierte Betrachtung. Dies gilt umso mehr, da nicht nur *Mannel* explizit auf die Betrachtung der Vorort-Begebenheiten hinweist, sofern die Inbetriebnahme eines Lokalisierungssystems vorgesehen ist [MAN-2009].

Die Schwierigkeit besteht, den Integrationsaufwand in dieser Arbeit allgemeingültig durch die Bewertung des finanziellen Aufwandes pro Quadratmeter erschlossener Lokalisierungsfläche zu bewerten, wie *Mannel* es vorschlägt [MAN-2009]. Dies ist nur in der Einzelfallbetrachtung möglich, da die konkrete Gestaltung und das Layout des Lokalisierungssystems in Abstimmung mit dem konkreten Anwendungsfall hierauf grundlegenden Einfluss haben. In dieser Arbeit wird der Integrationsaufwand durch folgende Ersatzgrößen diskutiert:

Maximale Reichweite

Bereits die Technologie- und Trendberatung *IDTechEx Inc.* moniert an Lokalisierungssystemen die Problematik, dass Lokalisierungssysteme in Realanwendungen aufgrund limitierter Reichweite der Systemmodule in unterschiedlicher Dichte angebracht werden müssen [IDT-2008]. Verantwortlich ist hierfür die maximale Signal-Reichweite der Systemmodule, die ortsabhängig lokalen weiteren Limitierungen unterliegen kann. An dieser Stelle steht grundsätzlich die maximale Reichweite im Vordergrund der Betrachtung, die sich auf die Signalübertragung zwischen Location Tag und Location Sensor bezieht. Bei bidirektionalen Signalübertragungen zwischen Location Tag und Location Sensor ist die Rückwärtsreichweite vom Location Tag zum Location Sensor einschränkend, sofern passive Location Sensoren verwendet werden. Anderenfalls ist der Engpass die Vorwärtsreichweite. Diese Differenzierung erfolgt in Analogie zur Diskussion der maximalen Lesereichweite bei aktiven und passiven Ultra High Frequency (UHF)-RFID Systemen [FIN-2012].

Damit wird durch die maximale Reichweite der Systemmodule die Anzahl der zu erfolgenden Montagen von Systemmodulen in der Infrastruktur und am Lokalisierungsobjekt beschrieben. Unter der Annahme, dass der Integrationsaufwand proportional zur Anzahl zu erbringender Montagen ist, findet sich somit durch die Betrachtung der maximalen Reichweite eine Größe zur Bewertung des Integrationsaufwandes von Lokalisierungssystemen.

Jedoch ist zu beachten, dass sofern diese Betrachtung auf der Basis theoretischer Angaben zur Reichweite erfolgt, lediglich eine Tendenzaussage möglich ist. Entsprechende Angaben der Hersteller und der Literatur basieren nicht auf dem gleichen Testszenario. Demnach werden temporäre Störwirkungen auf die Reichweite durch das jeweils verschiedene Testszenario nicht in der Betrachtung dieser Arbeit erkannt werden können. Dieses Kriterium ist somit immer um eine Betrachtung der Robustheit und Flexibilität der Signalträgerfrequenz gegen

temporäre Einfluss- bzw. Störwirkungen der Umgebung zu ergänzen (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Vernetzungsform

Die Systemmodule eines Lokalisierungssystems erfordern eine Spannungsversorgung und stehen häufig auch in einer direkten Kommunikationsverbindung untereinander. Diese kann z. B. durch den Synchronisierungsbedarf interner Uhren der Location Sensoren oder Tags bestehen, wie z. B. bei GPS zwischen den Satelliten und der Master Control Station [DOD-2010]. Sofern eine Vernetzung zwischen den Systemmodulen erforderlich ist, kann diese funk- oder drahtgebunden erfolgen. Letztere Verbindungsform ist insbesondere bei zeitkritischer Kommunikation erforderlich, verursacht aber durch gegebenenfalls nachträgliche Anbringung der Verdrahtung in der Infrastruktur und am Lokalisierungsobjekt einen deutlich größeren Aufwand. Es wird somit im weiteren Verlauf dieser Arbeit zwischen einer drahtlosen und einer drahtgebundenen Vernetzung der Systemmodule zur Kommunikation unterschieden. Diese erfolgt jeweils unabhängig von dem eigentlichen Lokalisierungssignal. Ferner wird angenommen, dass Location Sensoren wegen eines grundsätzlich hohen Energiebedarfs eine Spannungsversorgung benötigen, die drahtgebunden erfolgt. Dem entgegen können Tags passiv mit Energie versorgt werden oder mittels Energiespeichern autark agieren.

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-3: Anforderungsdefinition zum Integrationsaufwand

Maximale Reichweite	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • $d_{max} < 10 m$
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Die Signalreichweite ist zu maximieren, da durch ein Lokalisierungssystem zu erschließende Lagerbereiche große Flächen darstellen. Nach <i>Pflaum</i> stellen Flächen von $X = 5.000 m^2$ ein verbreitetes Ausmaß dar [PFL-2004]. Es können aber auch Flächen von $X = 200.000 m^2$ erreicht werden [AKW-2010]. • Eine maximale Signalreichweite ermöglicht eine deutlich reduzierte Anzahl anzubringender Systemkomponenten bei derartig großen Flächen und reduziert somit u. a. den Integrationsaufwand [IDT-2008]. Allerdings ist bei der Maximierung der Signalreichweite auch die Wahrscheinlichkeit zu berücksichtigen, inwiefern die betrachtete Reichweite in der gewünschten Einsatzumgebung in der Realität auch erzielt werden kann (vgl. Abschnitt 5.2.1). • Mit einer maximalen Reichweite von $d_{max} < 10 m$ ergibt sich für die genannten Flächen eine theoretische Anzahl von 50 bis im Extremfall 2.000 Markern, wenn keine Signalunterbrechungen durch Hindernisse o.ä. berücksichtigt werden. Da auf eine Vernetzung in der Infrastruktur verzichtet wird (siehe folgende Anforderung Vernetzungsform), wird diese Anforderung als realistisch angesehen.
Vernetzungsform	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Vernetzung der Systemmodule über die Luftschnittstelle zwischen Lokalisierungsobjekt und Infrastruktur zur Synchronisierung oder Ähnlichem. • Keine drahtgebundene Vernetzung der Systemmodule in der Infrastruktur.
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgrund der großen Lokalisierungsflächen (vgl. Anforderung maximale Reichweite) ist von einer kabelgebundenen Vernetzung der Systemmodule in der Infrastruktur abzusehen. Dies trifft insbesondere zu, wenn es gilt eine aufwendige Integration mit vorausgehender Gebäudetechnikplanung bei bestehenden Lagern zu vermeiden. • Aus Gründen der Systemstabilität ist eine für die Positionsbestimmung erforderliche weitere Kommunikation zwischen Systemmodulen auf dem Lokalisierungsobjekt und der Infrastruktur zu vermeiden, die nicht aus dem eigentlichen Positionssignal besteht. Als Beispiel hierfür ist eine für die Positionsbestimmung erforderliche Zeit-Synchronisierung oder Feldstärkenkarten-Aktualisierung zwischen Lokalisierungsobjekt und Infrastruktur zu nennen.

5.2.2 Flexibilität

Mit der Flexibilität wird die Fähigkeit zur Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen des Lokalisierungssystems beschrieben, die zukünftig für möglich gehalten werden und somit eintreten können [WILL-2006]. Sie ist damit nicht von gleicher Reichweite der zuvor genannten Wandlungsfähigkeit.

Mit Bezug auf Materialflusssysteme wird bei der Flexibilität vor allem die Layout-, Fördergut- und Durchsatzflexibilität zusammengefasst [CHI-2010]. Hierdurch werden physikalische, geometrische und weitere Veränderungen der Eigenschaften der Bestandteile des Materialflusssystemes angesprochen, die im Rahmen des operativen Betriebs entstehen können [CHI-2010]. Da das Lokalisierungssystem zur Lokalisierung des Fördermittels Bestandteil des Materialflusssystemes ist, entsteht die Anforderung an das Lokalisierungssystem, beschriebene Anpassungsfähigkeit in Form von Flexibilität ebenso aufzuzeigen. Im Rahmen dieser Arbeit wird an dieser Stelle zwischen der Flexibilität der Einsatzumgebung und der Flexibilität des Lokalisierungsobjektes unterschieden, die ein Lokalisierungssystem aufzeigen muss. Die angesprochen Durchsatzflexibilität wird separat im Kriterium Skalierbarkeit (vgl. Abschnitt 5.2.3) angesprochen.

Physikalische Anpassbarkeit

Die Flexibilität der Einsatzumgebung beinhaltet die Layoutflexibilität, die den Aufwand für die Veränderung der Topologie und der Fahrwege in der Einsatzumgebung des Lokalisierungssystems erläutert [JÜN-1989]. Entsprechender Bedarf zur Flexibilität des Lokalisierungssystems ergibt sich z. B. bei der Änderung von Transportbeziehungen [HEI-2006]. Vergleichbare Situationen werden auch von der Richtlinie *VDI 2510* in der Wahl eines Lokalisierungssystems für FTS berücksichtigt [VDI 2510].

Layoutveränderungen bewirken eine physikalische Veränderung der Umgebung, mit der das Lokalisierungssystem über das zu messende Lokalisierungssignal in einer engen Wechselbeziehung steht und somit von Veränderungen direkt betroffen ist. Physikalisch äußert sich eine Layoutveränderung z. B. hinsichtlich eines veränderten Reflexions-, Transmissions- und/oder Absorptionsverhaltens [AIM-2014].

Besteht nunmehr das Bedürfnis, dass ein Lokalisierungssystem hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit durch Layoutveränderung weitestgehend unberührt bleiben soll, bedarf es eines selbststeuernden Mechanismus zur Anpassung der Signalauswer-

tung und schließlich der Lokalisierung. Demgegenüber kann eine im Vergleich geringere Layoutflexibilität auch durch ein Teach-in Verfahren erreicht werden, welches nach erfolgter Layoutänderung (manuell) auszuführen ist (vgl. *Siemens Autonomous Navigation System* [DÜR-2009]).

Spannungsversorgung

Mit der Flexibilität des Fördergutes ist die Fähigkeit beschrieben, Fördertechnik für verschiedenartige Güter hinsichtlich ihrer Abmessungen und weiteren Beschaffenheit zu nutzen [JÜN-1989, CHI-2010]. Auf das Problem des Lokalisierungssystems übertragen, entspricht diese Betrachtung einer Analyse der Fähigkeit des Lokalisierungssystems verschiedenartige Objekte zu lokalisieren.

Eine Voraussetzung hierzu ist, dass das Lokalisierungsobjekt entsprechende Module des Lokalisierungssystems mit sich führen kann. Hierzu ist z. B. bei aktiven Modulen erforderlich, dass das Lokalisierungsobjekt dem Lokalisierungsmodul eine Spannungsversorgung bereitstellen kann. Demgegenüber ist dies für passive Module des Lokalisierungssystems, die auf dem Lokalisierungsobjekt angebracht werden, nicht erforderlich. Je nach der Beschaffenheit des Lokalisierungsobjektes kann die Anbringung von aktiven Modulen somit eine Einschränkung erfahren.

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-4: Anforderungsdefinition zur Flexibilität

Physikalische Anpassbarkeit	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none"> • Selbststeuernde Anpassung an dynamische Umgebung
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none"> • Durch den fortwährenden Güterumschlag verändert sich die Ausprägung eines Lagers über die Zeit [MAN-2009]. • Ferner verändert sich die Einsatzumgebung aufgrund von Tages- und Jahreszeiten, wobei sich der Erfolg des Lokalisierungssystems GPS insbesondere in der Unabhängigkeit seiner Leistung von diesen auszeichnet [DOD-2010]. • Es ist eine konstante Lokalisierungsleistung zu garantieren, damit manuelle Tätigkeiten durch eine (Teil-)Automatisierung abgelöst werden können, wie z. B. in der automatischen Lagerplatzverwaltung.

Spannungsversorgung

Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• Aktive Spannungsversorgung am Lokalisierungsobjekt
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Grundsätzlich ist bei Systemen mit Infrastrukturaufwand insbesondere darauf zu achten eine Vielzahl verschiedenartiger Lokalisierungsobjekte zugleich lokalisieren zu können um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu erhöhen.• In dieser Anwendung wird bereits das Ziel der Minimierung des Infrastrukturaufwandes verfolgt (vgl. Abschnitt 5.2.1).• Der Gabelstapler, wie auch eine Vielzahl weiterer innerbetrieblicher Fördermittel, zeichnen sich durch einen motorgetriebenen Vortrieb aus und verfügen somit über eine Spannungsquelle.• Eine Spannungsquelle ist für eine Vielzahl an Sensorsystemen erforderlich, so auch in dieser Arbeit bei dem verfolgten Ansatz einer kamerabasierten Lokalisierung.

5.2.3 Skalierbarkeit

Die Skalierbarkeit ist das Kriterium um das Verhältnis zwischen dem Umfang eingesetzter Lokalisierungsinfrastruktur und erzielbarer Anzahl lokalisierbarer Objekte zu betrachten. Materialflusssysteme erfahren den Bedarf zur Skalierbarkeit auch in der Form der Durchsatz- und Erweiterungsflexibilität (vgl. hierzu [WILL-2006]). Die entsprechende Skalierbarkeit eines Lokalisierungssystems wird somit durch die Anpassbarkeit der durch das Lokalisierungssystem erschlossenen Fläche (Skalierbarkeit der Einsatzumgebung) beschrieben. Darüber hinaus ist die Fähigkeit zur Veränderung der Anzahl lokalisierbarer Objekte (Skalierbarkeit der Lokalisierungsobjekte) eine weitere Einflussgröße.

Außerhalb dieser technisch geprägten Betrachtung liegt die durchaus ebenso relevante Diskussion der Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Skalierung. Hier ist auf eine günstige Kostenverteilung zwischen den Systemmodulen zu achten. Wird ein Lokalisierungssystem skaliert, so soll sich nach Möglichkeit nur die Anzahl der kostengünstigen Systemmodule erhöhen. Je nach der Form der Skalierung, d. h. Skalierung der Einsatzumgebung oder Skalierung der Lokalisierungsobjekte, ist somit eine Anordnung des kostengünstigen Systemmoduls in der Einsatzumgebung oder am Lokalisierungsobjekt wirtschaftlicher.

Ein weiterer Aspekt der Skalierbarkeit, der an dieser Stelle aus Gründen des Umfangs und der Fokussierung nicht detailliert wird, ist die Einflusswirkung der Skalierung des Systems auf die Lokalisierungsleistung. Z. B. führt in einzelnen Systemen, abhängig von den angewendeten Lokalisierungsmethoden, eine

Erhöhung der Lokalisierungsobjekte zu wachsender Latenz in der Positionsbestimmung und somit geringerer Echtzeitfähigkeit. Insbesondere in Systemen der Fremdortung ist dies ein separat zu berücksichtigender Zusammenhang. Hier stellt die Location Engine häufig ein zentrales Modul des Gesamtsystems dar, welches die Gefahr eines Engpasses in der Datenübertragung mit sich bringt.

Damit ist eine Bewertung der Skalierbarkeit eines Lokalisierungssystems an dieser Stelle als Tendenzaussage zu verstehen. Dies gilt für beide betrachteten Formen der Skalierbarkeit. Der Tendenzaussage liegt im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Annahme zugrunde, dass Systeme mit höherem Infrastrukturaufwand schlechter in der Fläche skalierbar sind. Ebenso wird aufgrund höherer Anschaffungskosten eine geringere Skalierbarkeit von aktiven Systemmodulen angenommen.

Maximale Systemteilnehmer

Betrachtet wird die Skalierbarkeit anhand der Anzahl maximaler Systemteilnehmer in Form von Location Tags oder Location Sensoren. Abhängig von der Architektur des Lokalisierungssystems stellt sich der limitierende Faktor in einer der beiden Systemmodule dar.

Im Falle der Eigenortung steht der Location Sensor auf dem Lokalisierungsobjekt nur mit einer überschaubaren Anzahl an Location Tags in seiner direkten Umgebung in Kontakt, i. d. R. mindestens 4 (d. h. für die Bestimmung des Ortes und der Zeit). Somit ist hier die Anzahl maximal im System zu verwendender Location Sensoren die Einschränkung für die Skalierung der Lokalisierungsobjekte. Die maximal definierte Anzahl an Location Tags ist wiederum die Einschränkung für die Skalierung der Einsatzumgebung. Im Fall der Fremdortung stellt sich dieses Szenario umgekehrt dar. Z. B. ist die maximale Anzahl der Location Tags hier die Einschränkung für die Skalierung der Lokalisierungsobjekte. Dementsprechend erfolgt die weitere Diskussion der Skalierbarkeit immer unter der Annahme einer konkreten Systemarchitektur, die für den jeweiligen Fall vorgegeben ist.

Wirtschaftliche Anordnung der Systemmodule

Bereits *Pflaum* weist auf die Bedeutung einer günstigen Verteilung der Kosten in einem Lokalisierungssystem hin [PFL-2004]. Hierunter ist die wirtschaftlich sinnvolle Anordnung kostenintensiver Module in der Infrastruktur oder am Lokalisierungsobjekt zu verstehen. Vereinfacht lässt sich hierzu sagen, dass bei großen Lokalisierungsflächen und einer geringen Anzahl an Lokalisierungsobjekten, das kostentreibende

Systemmodul auf dem Lokalisierungsobjekt zu führen ist. Wird allerdings eine Anwendung betrachtet, die vor allem eine hohe Anzahl an zu lokalisierenden Objekten beinhaltet, so ist die Anordnung des kostentreibenden Systemmoduls in der Infrastruktur vorzuziehen.

Der Aspekt der wirtschaftlichen Anordnung der Systemmodule beeinflusst somit direkt die Wahl einer entsprechenden Systemarchitektur (vgl. Abschnitt 4.2). Mittelbar ist dadurch auch die Auswahl einer Lokalisierungstechnologie betroffen, da diese die Umsetzung der geforderten Systemarchitektur ermöglichen muss.

Das Kriterium zur wirtschaftlichen Anordnung der Systemmodule betrachtet somit die Frage, wo im System der Fokus auf kosteneffiziente Module zu legen ist.

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-5: Anforderungsdefinition zur Skalierbarkeit

Maximale Systemteilnehmer	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• Bis zu 80 Gabelstapler
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Anwendungsbeispiele für die Gabelstaplerlokalisierung zeigen, dass die Lokalisierung einer Gabelstaplerflotte von bis zu 80 Fahrzeugen erforderlich sein kann [AKW-2010, FML-2010]. Der Durchschnitt zu lokalisierender Fahrzeuge liegt nach Expertenmeinung jedoch in einem Korridor von 5 bis 20 Fahrzeugen.• Zur Bewältigung z. B. saisonal bedingter Umschlagspitzen in den jeweiligen Lagern können Fahrzeuge hinzugenommen werden, wie auch Flächen kurzzeitig erschlossen werden [GÜN-2010a]. Somit ist ein Flexibilitätskorridor für die Skalierung der im System vorhandenen Fahrzeuge vorzusehen, der sich in der formulierten maximalen Anforderung wiederfindet.

Wirtschaftliche Anordnung der Systemmodule

Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• Anbringung kostengünstiger Module in der Infrastruktur• Eigenortung oder indirekte Fremdortung als Systemarchitektur
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Die Signalverarbeitung im Location Sensor erfordert, dass das Systemmodul aktiv ist und somit einer Energiequelle bedarf. Unter der Annahme, dass aktive Systemmodule kostenintensiver sind als passive Systemmodule, ist in allen Fällen zumindest der Location Sensor auf dem Lokalisierungsobjekt anzubringen.• Ein Gabelstapler verfügt über eine eigene, autarke Energiequelle für die eigene Fortbewegung. Diese kann auch dem Location Sensor als Energiequelle dienen.• In Abstimmung mit der Diskussion der maximalen Reichweite ist hier die Anzahl der Gabelstapler geringer als die der anzubringenden Tags. Somit ist hier ebenso zu erwarten, dass es wirtschaftlicher ist den Kostentreiber auf dem Lokalisierungsobjekt Gabelstapler als in der Infrastruktur zu platzieren.• In Übereinstimmung mit Abschnitt 4.2 ergeben sich die entsprechenden Systemarchitekturen Eigenortung oder indirekte Fremdortung als Anforderung.

5.2.4 Wandlungsfähigkeit

Häufig wird die Wandlungsfähigkeit auch als erweiterte Flexibilität bezeichnet, da sie ebenso die Fähigkeit zur Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen bezeichnet. Im Unterschied zur Flexibilität bezieht sich die Wandlungsfähigkeit allerdings auf die Anpassungsfähigkeit hinsichtlich unvorhergesehener, bzw. nicht vorgedachter Veränderungen [CHI-2010].

Wandlungsfähig werden Lokalisierungssysteme aufgrund ihrer innewohnenden Eigenschaften, die auch als Wandlungsbefähiger bezeichnet werden. *Heinecker* nennt als Wandlungsbefähiger eine Reihe an Eigenschaften, wie z. B. Modularität oder Funktions- und Nutzungsneutralität [HEI-2006]. In heutigen Automatisierungstechnologien wird beklagt, dass deren Wandlungsfähigkeit häufig noch nicht ausreichend ausgeprägt ist. Selten sind sie fähig, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen, die außerhalb des Investitionshorizonts liegen [WEI-2010]. Geforderte Veränderungen sind häufig die Erfüllung angepasster Funktionen. Bereits im Abschnitt 1.2 wurde festgestellt, dass Lokalisierungslösungen ebenso eine zu geringe Funktionsneutralität aufzeigen. Darum ermöglichen sie keine Umsetzung einer Vielzahl weiterer Funktionen, wie sie in diesem hier aufgestellten Kontext auch als Kriterium für Wandlungsfähigkeit aufgegriffen wird. Da die Wandlungsfähigkeit ein

abstraktes Kriterium darstellt, wird darum im weiteren Verlauf die Wandlungsfähigkeit stellvertretend durch die Betrachtung der Fähigkeit zur Funktionsintegration diskutiert.

Funktionsintegration im Location Sensor

In der Betriebswirtschaft beschreibt die Funktionsintegration die Zusammenführung mehrerer Funktionen an einem Arbeitsplatz [GAB-2013]. In der Konstruktionslehre ist darunter das Ziel zu verstehen, in einem Bauteil möglichst viele technische Funktionen zu vereinen [HOE-2009]. In dem Kontext des hier diskutierten Themas ist unter der Funktionsintegration somit zu verstehen, in einer Sensortechnologie eine Vielzahl an Sensorfunktionen zusammenzuführen. Hierzu sind angesprochene Wandlungsbefähiger wie z. B. Funktions- und Nutzungsneutralität förderlich. Das Gegenteil dieses Konzeptes ist die Vorstellung eines Single-Use Sensors, der konzipiert ist, um lediglich eine Sensorfunktion, z. B. nur die Lokalisierung, zu bewältigen. Nach allgemeiner Einschätzung herrschen in heutigen Sensorsystemen am Gabelstapler Single-Use Sensoren vor [GOR-2007].

Anforderungsdefinition

Tabelle 5-6: Anforderungsdefinition zur Wandlungsfähigkeit

Funktionsintegration	
Anforderung	<ul style="list-style-type: none">• Erweiterungsfähigkeit des Sensorsystems um weitere Sensorfunktionen zur Zustandserfassung, z. B. der hier im weiteren Verlauf betrachteten Hubhöhenbestimmung.
Erläuterung	<ul style="list-style-type: none">• Zur lückenlosen Prozessverfolgung und -steuerung ist die gleichzeitige Bestimmung von Ort, Identität und weiterer Zustände in den jeweiligen Parametern erforderlich. Hierbei ist insbesondere an die Detektion fehlerhafter Zustände zu denken [BAR-2008].• Heutige Systeme zeigen keine Erweiterungsfähigkeit auf und stellen somit in jetzigen volatilen Zeiten ein Investitionsrisiko dar [WIE-2010].• Um z. B. eine automatische Lagerplatzerkennung mit automatischer Quittierung von Transportaufträgen zu realisieren (vgl. Abschnitt 3.2), ist es erforderlich, mehrere Zustände gleichzeitig zu bestimmen. Neben der zweidimensionalen Position und eindimensionalen Orientierung des Fahrzeuges ist zusätzlich die Hubhöhe der Gabel zu erkennen. Vor allem in Lagern mit Regalbereichen besteht alternativ keine Möglichkeit lagerplatzbezogen eine automatische Bestandsführung durch zusätzliche logische Regeln in der Lagerverwaltung zu realisieren.

Zusammenfassung

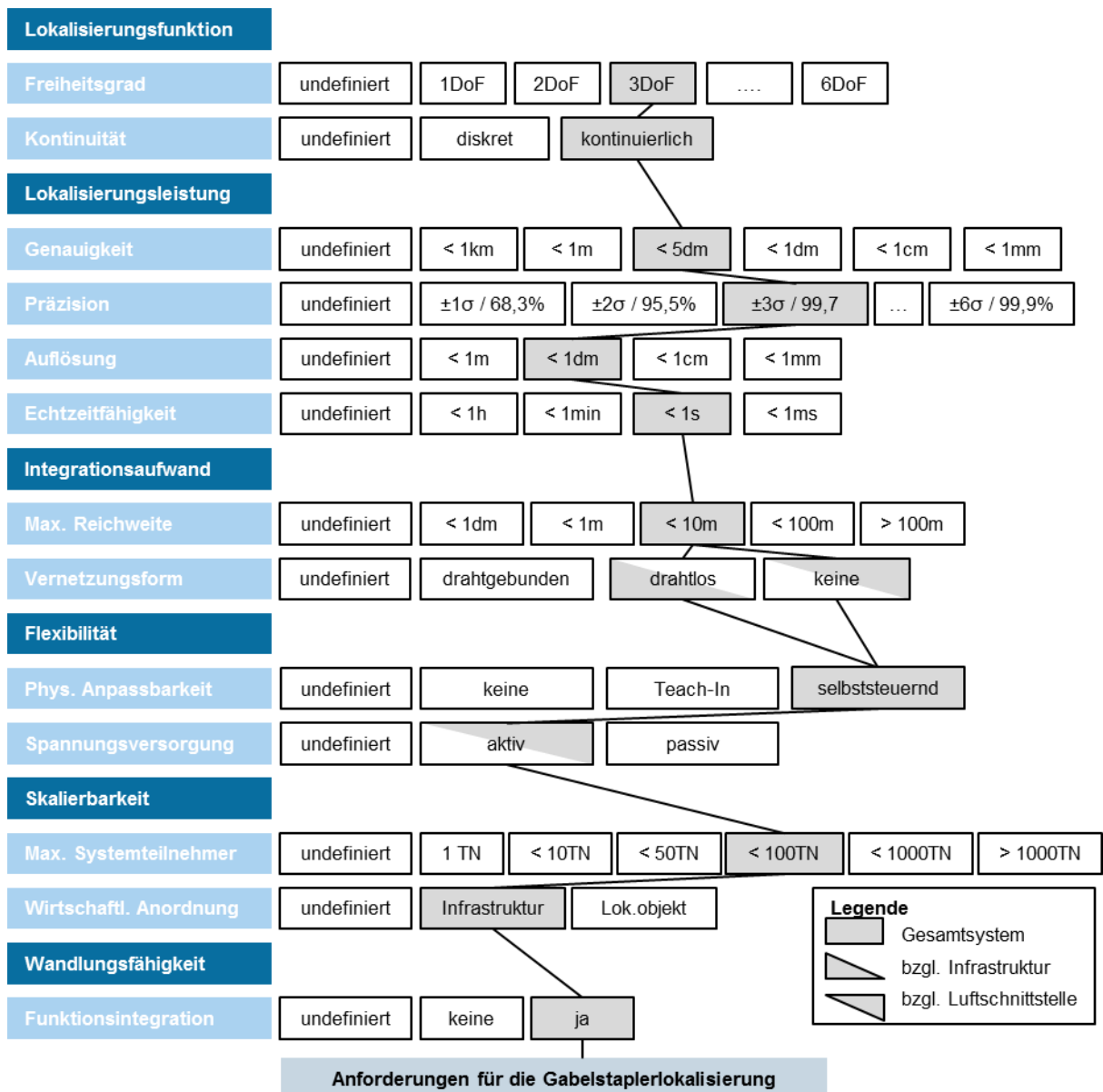


Abbildung 5-4: Metriken des Anforderungskatalogs mit der Auswahl für die Gabelstaplerlokalisierung

Im Folgenden stellt Abbildung 5-4 sämtliche Metriken des Anforderungskatalogs zusammen und kennzeichnet die getätigte Wahl hinsichtlich des Anforderungsniveaus an die Gabelstaplerlokalisierung. Grundsätzlich lassen sich Anforderungen an weitere Lokalisierungsanwendungen im Bereich der Intralogistik und darüber hinaus mittels des hier aufgestellten Anforderungskatalogs, der sich an dem Prinzip eines morphologischen Kastens orientiert, artikulieren. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass in der Aufstellung der Metriken in Abbildung 5-4 zur rechten Seite hin ein steigendes Anforderungsniveau zu erkennen ist. Somit wird die Umsetzung des jeweiligen

5 Anforderungsanalyse für ein System zur Gabelstaplerlokalisierung

Lokalisierungssysteme anspruchsvoller, sofern eine Vielzahl der Anforderungen im rechten Bereich des Anforderungskatalogs einzuordnen ist. Die hier verfolgte Staplerlokalisierung zeichnet sich demnach durch ein im Verhältnis mittleres Anforderungsniveau aus.

6 Systementwurf

Die Funktion des Systementwurfs ist es die einzelnen Module des Lokalisierungssystems in einem Konzept für die betrachtete Aufgabe der Gabelstaplerlokalisierung grundsätzlich festzulegen. Dieser Entwurf erfolgt in enger Abstimmung mit den in Kapitel 5 ermittelten Anforderungen und aufbauend auf den Grundlagen zur funktionalen Gestaltung eines Lokalisierungssystems in Kapitel 4.

Im Folgenden findet eine Konkretisierung der optischen Technologie Kamera statt, die entsprechend der Forschungshypothese als Kerntechnologie für diese Entwicklung zu verwenden ist. Anschließend werden sukzessive die einzelnen funktionalen Module beginnend vom Tag über den Location Sensor bis zur Location Engine spezifiziert. Hier erkannte grundsätzliche Zusammenhänge setzen den Lösungsraum für die Umsetzung eines Funktionsdemonstrators in Kapitel 7.1.

6.1 Konkretisierung der Technologiewahl

Optische Sensoren bzw. Fotosensoren sind eine Detektorzelle bestehend aus Photodioden, die von der erfassten Szene ausgesendetes oder reflektiertes Licht in Form von Photonen aufnehmen. Eine zur aufgenommenen Lichtmenge proportionale elektrische Ladung bildet sich daraufhin in der Photodiode. Diese wird ausgelesen und hinsichtlich eines Farb- oder Helligkeitswertes quantifiziert. Hierbei wird zwischen CCD-Fotosensoren und Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)-Fotosensoren unterschieden, die sich in den Eigenschaften zur Erfassung der Szene voneinander differenzieren.

Grundsätzlich teilt sich das Licht in diesem Kontext in drei charakteristische Gruppen auf, die anhand der Wellenlänge differenziert werden können [DIN 5031-7]:

- Ultraviolettes (UV-) Licht mit einer Wellenlänge von $10 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$
- Sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von $380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$
- Infrarotes (IR-) Licht mit einer Wellenlänge $\lambda \geq 780 \text{ nm}$, welches sich für nahes IR-Licht bis zu einer Wellenlänge von $\lambda \leq 3000 \text{ nm}$ erstreckt

Der UV- und IR-Anteil am Licht künstlicher Beleuchtung ist abhängig von der jeweiligen Leuchttechnik. So zeichnen sich z. B. Halogen-, Leuchtstoff- und

Entladungslampen durch einen geringen IR-Anteil aus. Um eine höhere Unabhängigkeit von den lokalen Lichtverhältnissen zu erreichen verwenden zahlreiche Anwendungen aktive IR- oder UV-Lichtquellen (vgl. [RUS-2009, HEI-2012]). Deshalb haben sich IR- und UV-Lichtanwendungen insbesondere in Anwendungen etabliert, in denen die Lichtverhältnisse vollständig kontrolliert werden können. So wird UV-Licht z. B. in der Medizintechnik und den Werkstoffwissenschaften zur Analyse von Molekülstrukturen verwendet. Anwendungen des nahen IR-Lichtes ohne Kontrolle der vollständigen Lichtverhältnisse betreffen Einsätze mit widrigen Sichtverhältnissen (z. B. Niederschlag). Im Ergebnis kann keine spezielle Eignung des UV- und IR-Lichtes für die hier verfolgte Gabelstaplerlokalisierung erkannt werden. Darum wird im weiteren Verlauf auf das konventionelle, sichtbare Licht zur Zustandserfassung im Transportprozess gesetzt. Damit entsteht eine ähnliche Situation zu der der Sichtkontrolle des Werkers. Hier liegt der Vergleich zum menschlichen Auge nahe. Allerdings liefert das menschliche Auge gegenüber dem optischen Sensor Kamera ein vielfach höheres räumliches Auflösungs- und Interpretationsvermögen, welches es durch Bildverarbeitung nachzubilden gilt [HOL-1998].

Gegenüberstellung des 2D- zum 3D-Bild

Bei der Wahl eines optischen Sensors ist die Entscheidung für eine zweidimensionale oder dreidimensionale Bilderfassung der betrachteten Szene zu fällen. Beide Abbildungsformen unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich der Datenbasis und der Analysemethoden. Das 2D-Bild ist ein Abbild bestehend aus einem Raster an Bildpunkten, sog. Pixeln. Jeder Pixelwert stellt eine Information über die Farbsättigung oder Helligkeit des abgebildeten Gegenstandes dar. Damit ergibt sich eine Datenbasis, die hinsichtlich ihrer Muster, auch Texturen genannt, und Konturen bzw. Geometrien analysiert werden kann. Zu erfassende Zustände sind dadurch mittels Hypothesen zu beobachtbaren Texturen oder Konturen zu detaillieren. Im 3D-Bild wird die Szene durch eine Punktwolke repräsentiert, die einer Liste kartesischer Koordinaten entspricht. Im Allgemeinen verursachen 3D-Bilder ein deutlich höheres Datenaufkommen als 2D-Bilder und stellen somit i. d. R. höhere Ansprüche an die Datenverarbeitungseinheit. Analysen erfolgen hinsichtlich räumlicher und damit metrischer Zusammenhänge, sodass Zustände durch Hypothesen mit Bezug auf zu erkennende Volumina auszudrücken sind. Die Fähigkeit zur Lokalisierung mittels 3D-Bild ist dadurch auf den ersten Blick naheliegend.

Einschränkungen in 3D-Bild Kamerakzepten

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene technische Methoden zur Erfassung von 3D-Bildern. Zum einen können zwei monokulare Kameras verwendet werden, die ein Stereosystem ergeben und aus unterschiedlicher Perspektive eine überdeckende Szene betrachten. Durch die Analyse von Punktkorrelationen in beiden Bildern lässt sich die gemeinsame Szene dreidimensional rekonstruieren. Entsprechende Systeme ermöglichen eine hohe genaue räumliche Auflösung, sind jedoch sehr rechenintensiv. Ferner gestaltet sich die Anbringung am Flurförderzeug schwierig, da eine feste räumliche Beziehung zwischen den beiden Kameras existieren muss. Dies bedeutet auch, dass mindestens zwei Module an unterschiedlichen Anbringungsstellen hinsichtlich der Energieversorgung und Datenkommunikation einzubinden sind. Deshalb erscheinen reine monokulare Ansätze zur 3D-Bilderfassung vorteilhafter. Ein verbreiteter Ansatz ist die Verwendung einer Time-of-Flight Kamera, die als Messgröße für die Bestimmung von Abständen die Signallaufzeit oder Signalphase betrachtet (vgl. Abschnitt 4.3.1). Das analysierte Signal wird durch die Kamera aktiv ausgesendet und anschließend von der Szene reflektiert analysiert. Durch die Verwendung optischer Signale, insbesondere von IR-Signalen, besteht eine hohe Gefahr für Mehrwegeausbreitungen durch Mehrfachreflexionen. Ferner ist das Reflexionsverhalten sehr abhängig von den Materialoberflächen der betrachteten Szene, sodass das Ergebnis einer höheren Ungenauigkeit unterliegt [HAN-2013]. Bei Sensorsystemen, die nicht für hochpreisige und anspruchsvolle Geodäsie-Anwendungen entwickelt werden, hat die kamera-interne Uhr eine beschränkte zeitliche Auflösung. Sie ist nicht in der Lage, eine ausreichende räumliche Auflösung des empfangenen Signals vorzunehmen, welches sich durch eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) auszeichnet. Diese und weitere Gründe führen zu einem merklichen Bildrauschen bei bewegten Szenen, sofern eine Korrektur der Messdaten durch Kenntnis der jeweiligen (relativen) Bewegung nicht möglich ist. In erfolgreichen logistischen Anwendungen herrscht meist eine gerichtete und im Betrag bekannte Bewegung des zu erfassenden Objektes vor. So wird dieses z. B. auf einer Förderstrecke am ToF-Sensor in vordefinierter Bewegungsrichtung vorbeigeführt [HAN-2013]. Diese Situation ist auf die Lokalisierung des Flurförderzeuges nicht zutreffend, da dessen Bewegungsprofil variantenreicher ist. Ferner ist es gerade Ziel der Lokalisierung, die räumliche Bewegung des Fahrzeuges quantitativ zu ermitteln.

Für weitere monokulare Ansätze zur 3D-Bilderfassung mittels strukturierter Lichtprojektionen (sog. structured light) und gerichtetem Schattenwurf (sog. shape-from-shading) existieren ebenso Einschränkungen, die eine Anwendung zur

Gabelstaplerlokalisierung ausschließen. Sie erfordern konstante, definierte Lichtbedingungen, da der Gradient zu Helligkeitsänderungen in der erfassten Abbildung hinsichtlich einer Bildtiefe analysiert wird [JÄH-2005]. Im Rahmen der Gabelstaplerlokalisierung herrschen durch fortwährende Abdeckungen, Ortswechsel und auch variierende Tageszeiten (vgl. Abschnitt 3.1.4) Bedingungen, die entsprechende technische Ansätze verhindern.

Auswahl des 2D-Bildes

Aufgrund der bisherigen Diskussion wird für diese Arbeit auf ein Sensorsystem zur Erfassung eines 2D-Bildes gesetzt, auch wenn für eine Lokalisierungsanwendung das 3D-Bild auf den ersten Blick naheliegender erscheint. Die Umsetzung einer Lokalisierung mittels einer Datenbasis, die für sich genommen somit keine direkte Information zu metrischen Zusammenhängen liefert, stellt somit eine höhere Herausforderung an die weitere Bildverarbeitung dar. Die verwendete Datenbasis liefert lediglich Informationen zu relativen Zusammenhängen zwischen Texturen und Konturen. Unterstützt wird diese Entscheidung dadurch, dass gegenüber der Verwendung von 3D-Bildern eine geringere Abhängigkeit der Lokalisierungsergebnisse von der gabelstaplereigenen Bewegung zu erwarten ist. Ebenso sind die Anforderungen an die Konstanz der Lichtverhältnisse in der Einsatzumgebung geringer. Somit wird mit der Wahl eines 2D-Systems zwei wesentlichen, dynamischen Faktoren der Gabelstaplerlokalisierung Rechnung getragen.

Festlegung für den Systementwurf:

- Verwendung eines optischen Sensors bzw. Kamera zur Erfassung einer Szene als 2D-Abbildung
- Nutzung des Lichtspektrums im sichtbaren Bereich ($380 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$)

6.2 Systemarchitektur

Eigenortung vs. Indirekte Fremdortung

In dem zu entwickelnden kamerabasierten, funktionsintegrierten Lokalisierungssystem für Gabelstapler wird auf die Eigenortung als Systemarchitektur gesetzt. Sie bietet eine optimale wirtschaftliche Verteilung der Systemmodule zwischen der Infrastruktur und dem Lokalisierungsobjekt. Zwar wäre ebenso ein Systemaufbau nach dem Prinzip der indirekten Fremdortung möglich (vgl. Abschnitt 5.2), allerdings

erfordert dies eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit in der Signalübertragung zwischen Location Sensor und Location Engine. Der Aufwand die entsprechende Verfügbarkeit der Signalübertragung zu erreichen erscheint bei dem großflächigen Einsatzbereich, wie er in einem Lager mit Gabelstapler-Nutzung vorzufinden ist (vgl. Abschnitt 3.1.4), unverhältnismäßig. Durch die Wahl der Kamertechnologie wird diese Anforderung noch verschärft, da die entsprechende Signalübertragung eine hohe Bandbreite für die Übertragung von Bildsequenzen ermöglichen muss. Ein weiterer Vorteil der dezentralen Bestimmung der Pose durch eine Eigenortung ist, dass das Lokalisierungssystem am Gabelstapler während der Prozessausführung ebenso autark von übergelagerten Unternehmenssystemen agieren kann. Dies ist von Bedeutung, wenn z. B. auf der Lokalisierungsfläche keine wirtschaftliche, flächendeckende und/oder stabile Kommunikationsanbindung des Lokalisierungssystems realisiert werden kann. Über die Pufferung von Lokalisierungsinformationen in der Location Engine kann eine nachträgliche Übertragung an die Location Application erfolgen. Somit bleibt eine vollständige positionsbezogene Erfassung und Dokumentation, z. B. Tracking & Tracing (vgl. Abschnitt 3.2), trotzdem möglich.

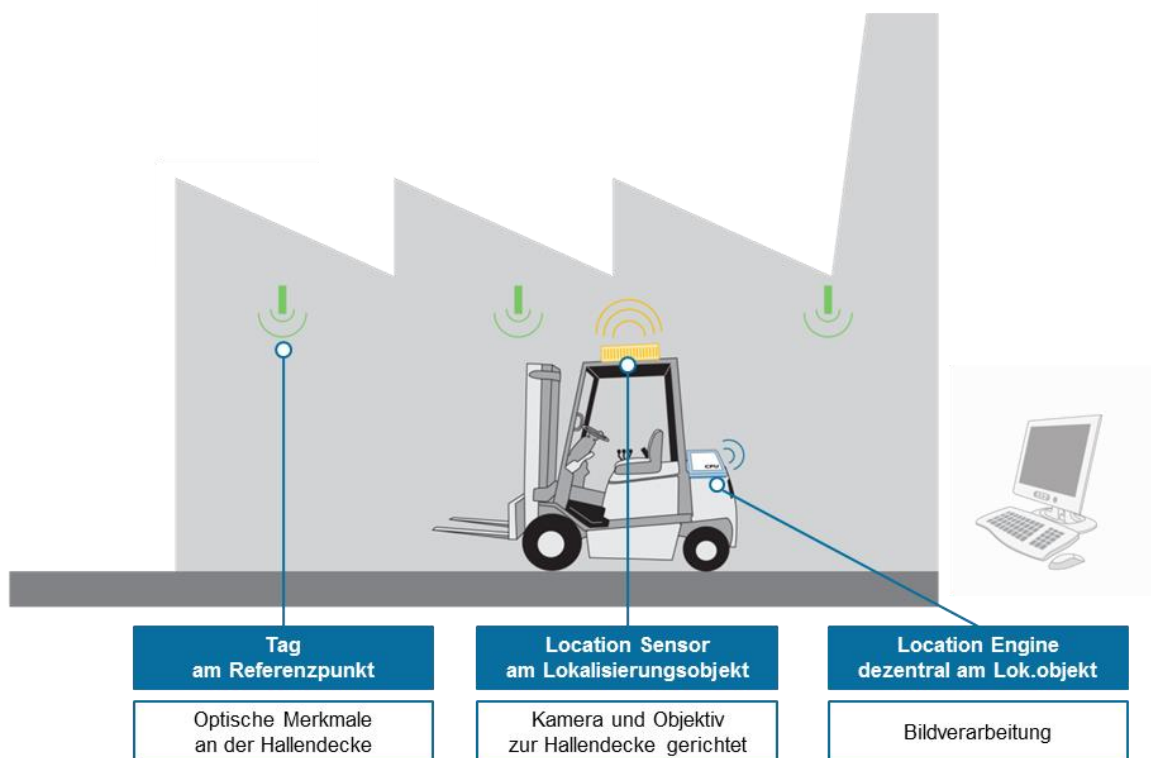


Abbildung 6-1: Konzept zur Gabelstaplerlokalisierung in Eigenortung

Damit ergibt sich das in Abbildung 6-1 dargestellte Konzept für die Gabelstaplerlokalisierung. Als Location Tag sind optische Merkmale in der Infrastruktur zu identifizieren und als Referenzposition für die Bestimmung der Fahrzeugpose zu verwenden.

Die Kamera mitsamt Objektiv auf dem Gabelstapler erfasst diese optischen Merkmale. In der Location Engine werden diese z. B. mittels Mustererkennung basierend auf Vorwissen, welches zu den betrachteten optischen Merkmalen einen räumlichen Bezug ermöglicht, in der Positionsbestimmung verwendet. Eine weitere Anbindung und Verwendung der Positionsinformation in der Location Application wird in dieser Arbeit nicht spezifiziert, da sie nicht Bestandteil der hier aufgezeigten Zielsetzung ist (vgl. Abschnitt 1.3).

Ausrichtung des Location Sensors zum Tag

Da die Kamera ein optischer Sensor ist, der zur Funktion eine direkte Sichtlinie zwischen betrachtetem Objekt und der Kamera erfordert, ist es notwendig an dieser Stelle zudem die relative Lage der Location Tags zur Kamera zu definieren. Im Rahmen der praktischen Realisierung einer kamerabasierten Lokalisierung sind in der Literatur zwei gegensätzliche Konzepte zu erkennen [DÜR-2009, DRO-2011]. Zum einen besteht die Möglichkeit, optische Merkmale an der Decke bei einer nach oben ausgerichteten Kamera zu betrachten. Zum anderen können auch optische Merkmale auf dem Boden verfolgt werden, während die Kamera nach unten ausgerichtet wird. Im Zuge einer stabilen und integrationsarmen Lokalisierungslösung ist zu überlegen, welches der beiden Konzepte das Entwicklungsziel am weitesten unterstützt. Ferner ist zu bedenken, welche der beiden Perspektiven weitere Sensorfunktionen ermöglicht und damit das weitere Entwicklungsziel einer wandlungsfähigen bzw. funktionsintegrierenden Sensortechnologie für die Lokalisierung begünstigt. Im Vordergrund steht hier die Hubhöhenbestimmung mit dem Ziel einer automatischen Lagerplatzverwaltung (vgl. Abschnitt 3.2).

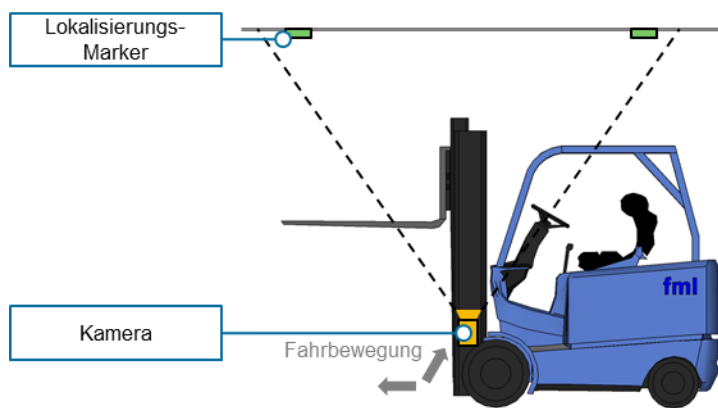


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des favorisierten Anbringungskonzeptes

Dürr bezeichnet optische Merkmale an der Decke eines Gebäudes als sehr stabile Merkmale, da sie in einer dynamischen Umgebung wie dem Lager am wenigsten Änderungen erfahren [DÜR-2009]. Es ist lediglich zu gewährleisten, dass sich in der optischen Achse keine weiteren, nicht relevanten Objekte befinden können, die zu einer vollkommenen optischen Abdeckung der gesuchten Merkmale führen. Demgegenüber steht, dass Merkmale am Boden des Einsatzbereiches im Verhältnis instabilere Referenzen darstellen. Gerade in einem produktiven System wie einem Lager bewirken Fahrbewegungen der Fördermittel, Standortveränderungen der Güter und Bewegungen des Personals eine fortwährende optische Veränderung des Bodens. Zum einen sind hier Reifenabrieb, Flüssigkeiten, Abfälle und Materialrisse in der Oberfläche als Beispiele zu nennen. Zum anderen kann aber auch das Umlagern von Gütern zur kurzfristigen Abdeckung relevanter Merkmale führen. Alternativ könnten gezielt flächendeckend Markierungen auf dem Boden angebracht werden. Doch auch diese unterliegen einer hohen Wahrscheinlichkeit sich im Produktivprozess durch Abnutzung zu verändern. Eine Zuordnung der verbliebenen Bodenmerkmale zu ihrem Modell ist in diesen Fällen über die Zeit nicht mehr gesichert [DRO-2011], sofern nicht durch hoch-adaptive Modelle entsprechende Veränderungen abgebildet werden können. Aufgrund der Vielfältigkeit möglicher optischen Veränderungen des Bodens und der Erfordernis eines echtzeitfähigen Lokalisierungssystems wird dieses Konzept der Bodenmerkmale für diese Arbeit als nicht realisierungswürdig angesehen.

Da in diesem System eine zweidimensionale Lokalisierung gefordert ist, die als weitere Sensorfunktion auch die Hubhöhen-Bestimmung der Gabelzinke einschließt, ist ferner eine freie Sichtachse auf den Gabelträger und/oder die Gabelzinke zu gewährleisten. Zur Betrachtung von Deckenmerkmalen wird die Kamera nach oben ausgerichtet. Bei einer entsprechenden Anbringung im Bereich des Hubmastes liegen somit auch der Gabelträger und ggf. die Gabelzinke im Sichtfeld. Würde alternativ aufgrund von Bodenmerkmalen mit einer nach unten gerichteten Kamera die Szene betrachtet, wäre die Kamera mit dem Hub in der Höhe verfahrbar anzubringen. Diese Integration am Fahrzeug gestaltet sich durch eine erforderliche mitlaufende Hubmastverkabelung im Verhältnis deutlich aufwendiger. Darüber hinaus ist das nach unten ausgerichtete Objektiv der Kamera direkt möglichen Verschmutzungen durch die Fahrbewegung ausgesetzt. Auf der anderen Seite sind die Lichtverhältnisse deutlich konstanter, da sich die betrachtete Szene zum Teil in der eigenen Abschattung befinden kann. Darum ist für eine zur Decke ausgerichtete Kamera eine adaptive Belichtungszeitanpassung vorzusehen. Bei Lichtänderungen, die z. B. durch künstliche Beleuchtung und Dachfenster verursacht werden, kann

somit eine konstante, kontrastreiche Abbildung der betrachteten Szene dennoch ermöglicht werden.

Eine weitere Detaillierung des hier skizzierten Systementwurfs erfolgt in der Beschreibung der folgenden Systemmodule eines Lokalisierungssystems.

Festlegungen für den Systementwurf:

- Systemarchitektur entspricht dem Prinzip der Eigenortung
- Verwendung von Deckenmerkmalen
- Ausrichtung der Kamera zur Decke mit adaptiver Belichtungszeitanpassung

6.3 Tag

In diesem Lokalisierungssystem dienen Marker dazu, Referenzpunkte im Raum zu kennzeichnen und eine Korrespondenz der erfassten Bildszene zu einem Umgebungsmodell zu ermöglichen [FIA-2010]. Deshalb besteht die Anforderung, dass entsprechende Marker eindeutig zu identifizieren sind. Ferner müssen sie es ermöglichen den räumlichen Bezug sowohl translatorisch als auch rotatorisch zu bestimmen (vgl. Abschnitt 5.1.1). Entsprechend muss der Marker eine definierte Ausrichtung erfahren und in seinen Abmessungen bestimmt sein.

Marker sind Merkmale der Umgebung, die natürlich bereits existieren oder aber künstlich zum Zweck der Lokalisierung in diese eingebracht werden [VDI 4451-6]. Optische Merkmale zeigen eine charakteristische Struktur auf, die z. B. durch Unterschiede der Farbgebung bzw. Helligkeit gekennzeichnet sind. Entsprechend wird die Messung der Signalintensität für den Location Sensor zur Positionsbestimmung die Ausgangsbasis sein. Um den Integrationsaufwand in der Einsatzumgebung zu reduzieren, wird auf aktive Marker verzichtet. Derartige aktive Marker sind Objekte, die z. B. ein Lichtsignal aussenden, welches hinsichtlich der Laufzeit- oder Signalphase analysiert werden kann (vgl. hierzu [HEI-2012]).

In diesem System sind robuste Marker zu verwenden, deren Anbringung statisch ist, um die geforderte Lokalisierungsleistung erreichen zu können [GEN-2002]. Darüber hinaus ist auf eine rechenarme Möglichkeit zur Auswertung und zum Tracking des Markers zu achten. Sie ermöglicht die stabile Lokalisierung des bewegten Lokalisierungsobjektes, auch wenn aufgrund der Bewegung des Lokalisierungsobjektes eine hohe Bildrate der Kamera erforderlich wird. Eine weitere Stellgröße ist hier auf Marker zu verzichten, deren optische Struktur sich in feinen Unterschieden

auszeichnet. Bei nicht ausreichender Auflösung der Kamera besteht in diesem Fall eine hohe Verwechslungsgefahr, welche ebenso zu einer ungenauen Lokalisierung führt [FIA-2010].

Natürliche und künstliche Merkmale

Wie bereits genannt gibt es zwei Arten Marker: solche, die aus natürlichen Merkmalen und welche, die aus künstlichen Merkmalen bestehen. Natürliche Merkmale können z. B. Gebäudeecken, Säulen, Pfeiler, Türen oder auch Lagereinrichtung darstellen bzw. Teilelemente dieser Objekte [VDI 4451-6], die sich durch farbliche Übergänge oder Ähnliches auszeichnen. Der Vorteil dieser Marker ist es, dass kein Eingriff in die Einsatzumgebung erforderlich ist und somit die Einsatzumgebung keine Einschränkung erfährt. In Verbindung mit lernenden Algorithmen ist es auch möglich deren zeitliche Veränderung zu verfolgen und laufend mit aktuellen Modellen zu arbeiten. Dieses Arbeitsgebiet stellt allerdings ein separates Forschungsthema dar, wobei in der Robotik für eingegrenzte Einsatzbereiche bereits erste vielversprechende Fortschritte für diesen Lokalisierungsansatz zu beobachten sind [CUM-2007]. In der Form einer ersten Studie für die innerbetriebliche Lokalisierung wurde das Konzept begleitend zu dieser Arbeit bereits geprüft [FML-2013a]. Dabei wurde erkannt, dass in der Bewältigung des Rechenaufwandes durch den rechenintensiveren Prozess der Mustererkennung im Rahmen der Positionsbestimmung, wie auch der begleitenden Aktualisierung des a priori Wissens (z. B. Umgebungsmodelle) eine wesentliche Herausforderung liegt. Für die Anwendung in der Einsatzumgebung Logistik ist somit eine Übertragung dieser Lokalisierungskonzepte basierend auf natürlichen Markern bei gegebenen wirtschaftlichen und technischen Anforderungen (vgl. Kapitel 5) noch nicht möglich [FIA-2010].

Fiala unterscheidet bei Markern, die auf künstlichen Merkmalen beruhen, zwischen Barcodes und Referenzmarkern. Erstere sind anfällig für perspektivische Fehler, da sie im Verhältnis vor allem viele und kleine Merkmale enthalten. Somit ergeben sich hohe Anforderungen an die optische Auflösung. Ferner ist die Kernfunktion von Barcodes die Informationsspeicherung z. B. im Rahmen von Warenidentifikationsprozessen. Dies ist ein weiterer Grund, weswegen sie in Summe für die hier betrachtete Aufgabe der Posenbestimmung zu wenige verwertbare, definierte Referenzpunkte im Bild bieten. [FIA-2010]

Gestaltung künstlicher Merkmale

Referenzmarker haben eine zweidimensionale Struktur, die häufig von einem schwarzen Rahmen umgeben wird. Dieser hilft zum einem beim schnelleren Finden eines Markers durch Pixeloperationen im Bild. Zum anderen ist der schwarze Rahmen eine geometrisch günstige Kontur, um mittels Bildanalyse die Perspektive des Bildes (vgl. Vorgehen zur Positionsschätzung in Abschnitt 6.5.2) sicher zu rekonstruieren. Kreisförmige Marker mit einem vergleichbaren schwarzen Rahmen zeigen hier Schwächen [FIA-2010].

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Bestimmung der Pose ist, dass sich in Referenzmarkern eine intern codierte Kennzeichnung ihrer Ausrichtung findet. Alternativ ist die Erscheinung des Referenzmarkers asymmetrisch zur Rotation, sodass ein Marker nicht nach Rotation die Bedeutung eines anderen Markers erhalten kann. So wird die Bestimmung eines translatorischen und rotatorischen Bezugs zwischen Abbildung und Realität mit dem Ziel der Posenbestimmung möglich. Diese Referenzmarker werden heute überwiegend für Anwendungen im Bereich der Augmented Reality (AR) oder der LBS verwendet. Sie enthalten nur einen geringen Informationsgehalt.

Ein weiterer Aspekt, der wesentlichen Einfluss auf die Erkennbarkeit des Markers insbesondere unter wechselnden Lichtbedingungen der Umgebung hat, ist das Farbspektrum, aus dem sich der Marker zusammensetzt. Durch die Verwendung mehrfarbiger Marker lässt sich die Informationsmenge deutlich steigern. Jedoch liegt der Vorteil von lediglich zweifarbigen, sog. bi-tonalen Markern in ihrer Robustheit in der Erfassung bei guten wie auch schlechten Lichtbedingungen [FIA-2010]. Dadurch, dass eine relative Betrachtung zwischen den beiden verwendeten Farbtönen durch eine relative hell-dunkel Unterscheidung möglich wird, ist weitestgehend eine Unabhängigkeit von den Umgebungsbedingungen erreicht. Eine bei Farbmarkern zuvor erfolgte fotometrische Kalibrierung ermöglicht es nicht vollständig unabhängig von temporären Lichtbedingungen zu werden [FIA-2010].



Abbildung 6-3: Übersicht zu künstlichen Merkmalen in Form von Barcodes u. Referenzmarkern (nach [FIA-2010])

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass im Hinblick auf den technischen Entwicklungsstand künstliche Merkmale als Marker noch zu bevorzugen sind. Gerade um zukünftig ohne Integrationsaufwand in der Einsatzumgebung eine sehr flexible Anwendung von Lokalisierungssystemen in der Logistik zu erreichen ist jedoch als Vision die Verwendung von natürlichen Merkmalen zu verfolgen. Ferner sind als Marker Referenzmarkern einem Barcode vorzuziehen, da die Ausrichtung der Struktur zweidimensional bestimmt ist und hierdurch die Stabilität der Identifikation signifikant steigt. Aus diesem Grund sind ferner die Marker an der Decke der Einsatzumgebung anzubringen. Insgesamt erfolgt damit die im Folgenden aufgelistete Festlegung für die weitere Implementierung des funktionalen Moduls Tag.

Festlegungen für den Systementwurf:

- Künstliche Merkmale vom Typ Referenzmarker mit vorbestimmten Abmessungen und Lage
- Verwendung bi-tonaler, quadratischer Referenzmarker mit Rahmen
- Gering auflösende passive Marker
- Deckenanbringung der Marker

6.4 Location Sensor zur Markererfassung



Abbildung 6-4: Komponenten und Gestaltungsgrößen des Kamerasystems (nach [HOL-1998])

Als Location Sensor fungiert ein Kamerasystem, welches sich aus den Komponenten Kamera-Body und Objektiv zusammensetzt (vgl. Abbildung 6-4). Dabei ist die Kamera nur mittelbar mit dem menschlichen Auge zu vergleichen. Gegenüber dem Auge hat die Kamera z. B. nur einen beschränkten Erfassungsbereich, eine beschränkte zeitliche und räumliche Auflösung. In der Folge erfasst sie die dreidimensionale Realität nur als zweidimensionale Abbildung. [HOL-1998]

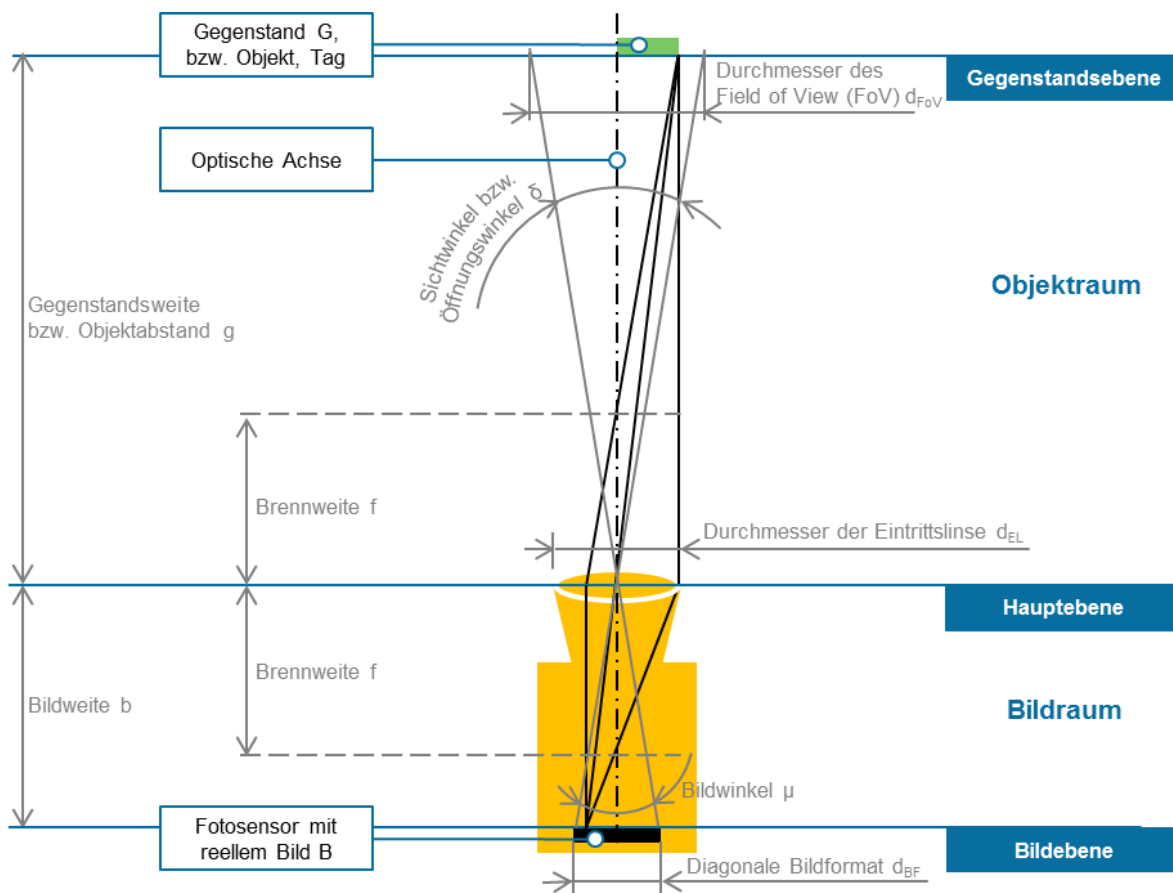


Abbildung 6-5: Relevante Parameter zur Beschreibung der Bilderfassung

In der Summe erfasst die Kamera nur einen Bruchteil dessen, wozu das menschliche Auge fähig ist. Dementsprechend ist eine genauere Abstimmung der Eigenschaften der Kamera mit dem Anwendungsfall erforderlich. Im weiteren Verlauf folgt eine Betrachtung der relevanten Größen nach *Holst* [HOL-1998] für das Objektiv und den Kamera-Body, welche die beiden Kernbestandteile eines kamerabasierten Sensors sind. Hierfür wird das geometrische Modell zur Bilderfassung in Abbildung 6-5 zugrunde gelegt. Der zu erfassende Gegenstand befindet sich in diesem Modell in der Gegenstandsebene, während die Objektivoberfläche die Hauptebene und der Fotosensor des Kamera-Bodys die Bildebene definiert. Somit spannt sich zwischen dem Gegenstand und dem Objektiv der Objektraum auf, während der Bildraum sich im Kamerasystem zwischen Objektiv und Fotosensor befindet.

6.4.1 Objektiv

Öffnungswinkel bzw. Sichtwinkel δ [°]

Der Öffnungswinkel δ des Objektivs wird auch als Sichtwinkel bezeichnet. Hiermit wird der Winkel gekennzeichnet, unter dem sich das Sichtfeld (Field of View FoV) des Objektivs aufspannt (vgl. Abbildung 6-5). In Abhängigkeit der Gegenstandsweite g bzw. des Abstands zwischen Objektiv und Gegenstandsebene, wird über den Öffnungswinkel des Objektivs das Sichtfeld bestimmt [SCH-2007]. Die Größe des Sichtfeldes wiederum ist relevant um die Anzahl der anzubringenden Marker M zu bestimmen. Die Anzahl anzubringender Marker ist in diesem Systementwurf die maßgebliche Einflussgröße auf den zu tätigen Integrationsaufwand in der Infrastruktur. Da es gilt den Infrastrukturaufwand zu minimieren, sollen möglichst wenige Marker angebracht werden. Aufgrund des reziproken Verhältnisses zwischen Markeranzahl N und erforderlichem FoV bei der zu erschließenden Lokalisierungsfläche X , ist der Durchmesser des Sichtfeldes d_{FoV} und somit auch der Öffnungswinkel δ zu maximieren.

$$N \approx \frac{X}{d_{FoV}} \text{Min!} \quad (6-1)$$

$$d_{FoV} = 2g \tan \frac{\delta}{2} \text{Max!} \quad (6-2)$$

Damit ist der Öffnungswinkel δ eine wichtige Gestaltungsgröße in diesem System. Nach *Schröder* werden Objektive anhand des Öffnungswinkels δ wie folgt klassifiziert [SCH-2007]:

Tabelle 6-1: Klassifizierung von Objektiven (nach [SCH-2007])

Klassifikation	Öffnungswinkel ⁵	Weitere Eigenschaften
Fernobjektiv, Teleobjektiv	$\delta < 20^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> • Lange und schwere Bauweise des Objektivs • Die Lichtstärke ist proportional zum Objektivdurchmesser d_{EL}. Das Kamerasystem erhält mit größerem Objektivdurchmesser d_{EL} einen ungünstigen Schwerpunkt.
Objektiv mit langer Brennweite	$20^\circ < \delta < 45^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> • Insbesondere gute Lichtstärke, wenn auch leicht reduziert gegenüber dem Normalobjektiv • Relative neutrale Vergrößerung der erfassten Szene • Kompromiss in den positiven und negativen Eigenschaften eines Tele- und Normalobjektivs
Normalobjektiv	$40^\circ < \delta < 55^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> • Entspricht dem horizontalen Öffnungswinkel des menschlichen Auges $\delta_{Mensch} \approx 48^\circ$ • Hohe optische Fertigungsqualität vorausgesetzt: keine Verzeichnungen in der Abbildung • Handliche Abmessungen und hohe Lichtstärke • Hoher Schärfegrad • Neutrale Abbildung der erfassten Szene
Weitwinkelobjektiv	$55^\circ < \delta$	<ul style="list-style-type: none"> • Tonnenförmige Verzeichnungen im Randbereich der optischen Abbildung erfordern höheren Korrekturaufwand • Objektive sind lichtschwächer • Extreme Weitwinkelobjektive mit $\delta > 110^\circ$ werden auch als Fisheye-Objektiv bezeichnet und haben extreme, tonnenförmige Verzeichnungen

Auch wenn Weitwinkelobjektive im Vergleich zu den weiteren Objektiv-Klassen mit Nachteilen hinsichtlich der Abbildungsgüte (insbes. Verzerrung, Lichtarmut) belegt

⁵ Angaben gelten für die Voraussetzung, dass die Brennweite $f = \text{Formatdiagonale } d$

sind, sind moderate Weitwinkelobjektive für dieses Lokalisierungssystem zu favorisieren. Bei einem moderat weitwinkligen Objektiv mit $\delta \approx 60^\circ$ ist die Verzeichnung mittels vorheriger Kalibrierung durch die Bildvorverarbeitung zu korrigieren, auch wenn dies zusätzliche Rechenleistung erfordert. Ferner ist auch die Lichtabhängigkeit durch die Wahl eines großflächigen Sensorformates zu entschärfen. Dafür wird jedoch ein größerer Sichtbereich realisiert, der in dieser Anwendung zu einer geringeren Anzahl anzubringender Marker M führt.

Schärfebereich

Durch den Schärfebereich wird festgelegt, welche Gegenstandsebene für eine scharfe Bildwiedergabe die relevante ist, wenn verschiedene Gegenstände mit ihrer jeweiligen Gegenstandsebene erfasst werden sollen [SCH-2007]. Damit wird der Schärfebereich in Übereinstimmung mit der Gegenstandsweite g gewählt.

Da eine Anbringung der Marker an der Decke vorgesehen ist und die Kamera am Gabelstapler mitgeführt wird, ist die Deckenhöhe abzüglich der Anbringungshöhe am Fahrzeug maßgeblich für die Wahl des Schärfebereichs. Daraus folgt für den allgemeinen Fall im Lager, dass bei einer Mindestdeckenhöhe von $h_{\text{Decke min.}} = 5 \text{ m}$ und einer maximalen Anbringungshöhe von $h_{\text{Anbringung max.}} = 2 \text{ m}$ am Fahrzeug (entspricht einer Anbringung am Fahrzeugdach) eine minimale Gegenstandsweite von $g_{\text{min}} = 3 \text{ m}$ herrscht.

Ein entsprechendes Objektiv hat damit keine erhöhten Anforderungen an den Schärfebereich. Es sind Objektive vorzusehen, die sich nicht durch einen geringen minimalen Objektabstand (sog. Minimal Object Distance MOD) auszeichnen, der in der Regel im cm-Bereich liegen würde. Entsprechende Objektive würden im Unendlichen – wie hier gerade nicht erforderlich – an Schärfentiefe verlieren.

Blendenzahl

Die Blendenzahl k_{BZ} eines Objektivs berechnet sich aus dem Quotienten der Brennweite f und dem Durchmesser d_{EL} der Eintrittslinse des Objektivs [SCH-2007]. Die Blendenzahl k_{BZ} ist am Objektiv in einem vorgegebenen Spektrum anpassbar.

Damit ist die Blendenzahl k_{BZ} reziprok abhängig vom Durchmesser der Eintrittslinse d_{EL} des Objektivs, der zu maximieren ist um ein lichtstarkes Objektiv zu erhalten. Damit besteht insbesondere in der logistischen Einsatzumgebung, die sich durch wechselnde Lichtbedingungen auszeichnet, das Bedürfnis die Blendenzahl k_{BZ} zu

minimieren. Somit ist es auch in schlecht ausgeleuchteten Bedingungen zuverlässiger das Bild zu erfassen und somit eine Lokalisierung möglich.

$$k_{BZ} = \frac{f}{d_{EL}} \text{ Min!} \quad (6-3)$$

Ferner ist für große Gegenstandsweiten $g \rightarrow \infty$ der zu maximierende Öffnungswinkel δ reziprok abhängig von der Blendenzahl k_{BZ} [SCH-2007]. Ein Zielkonflikt besteht somit zwischen Öffnungswinkel δ und Blendenzahl k_{BZ} nicht. Damit ist folgendes Auslegungsziel festzuhalten:

$$k_{BZ} = \frac{1}{2 \tan \frac{\delta}{2}} \text{ Min!} \quad (6-4)$$

6.4.2 Kamera-Body

Sensortyp

Es existieren im Kern die beiden Sensortypen CCD und CMOS. Beiden ist gemeinsam, dass sie einfallendes Licht proportional in Ladung umsetzen. Der für die Anwendung zur Lokalisierung relevante Unterschied ist das unterschiedliche Vorgehen der konträren Sensortypen bei der A/D-Wandlung der Ladung. Diese findet in der jeweiligen Sensordiode bzw. bei der Bestimmung der Lichtintensität für jeden Bildpunkt statt. Während bei CMOS-Sensoren diese Wandlung in jeder Diode separat und über alle Dioden sequenziell vorgenommen wird (sog. Rolling Shutter), wandelt der CCD-Sensor die Spannung des Photonenstroms über die gesamte Sensorfläche zum gleichen Zeitpunkt (sog. Uniform Synchron Shutter) um. Da es sich bei dieser Anwendung um bewegte Szenen handelt, führt der Rolling Shutter tendenziell zu verschmiert wirkenden Bilderfassungen. Durch die synchrone A/D-Wandlung aller Sensordioden zum gleichen Zeitpunkt ist die Stärke des CCD-Sensors somit die schärfere Erfassung bewegter Szenen. Software-basierte Möglichkeiten der Bildstabilisierung, um den Rolling Shutter-Effekt zu reduzieren, bestehen zwar, erfordern allerdings auch erhebliche Rechenleistung, die in dieser Anwendung für die Bildverarbeitung überwiegend zur Lokalisierung reserviert ist. Somit stellen CMOS-Sensoren in dieser betrachteten dynamischen Anwendung keinen zu favorisierenden Lösungsansatz dar, weswegen CCD-Sensoren zu bevorzugen sind.

Sensorgröße [“]

Durch die physischen Abmessungen des Sensors wird die Lichtempfindlichkeit, das Rauschverhalten im Bild und das Seitenverhältnis der erfassten Szene bzw. des FoV bestimmt.

Abbildung 6-6 setzt etablierte Sensorabmessungen in einen qualitativen Bezug zur Lichtempfindlichkeit. Grundsätzlich erfordern schlecht beleuchtete Situationen, in denen eine Bilderfassung zuverlässig erfolgen soll, lichtempfindliche Sensoren. Größere Sensorflächen, wie ein 1“-Sensor, ermöglichen somit je Diode auf einer größeren Diodenfläche die kritische Signalspannung durch Lichtaufnahme schneller zu erzeugen. Die Bilderfassung wird hierdurch stabiler [SCH-2007]. Ferner führt Bildrauschen zu Bildaufnahmen, die in einzelnen Bildpunkten in Farbe und Helligkeit von der realen Szene abweichen. Der Grund hierfür liegt u. a. in unterschiedlicher Lichtempfindlichkeit der einzelnen Dioden auf demselben Sensor, die sich aus der nicht konstanten Fertigungsqualität ergeben. Die Bedeutung dieses Phänomens steigt bei miniaturisierten Fotosensoren wie z. B. 1/4“-Sensoren, da es hier umso anspruchsvoller ist eine konstante Fertigungsqualität über alle Fotodioden zu realisieren.

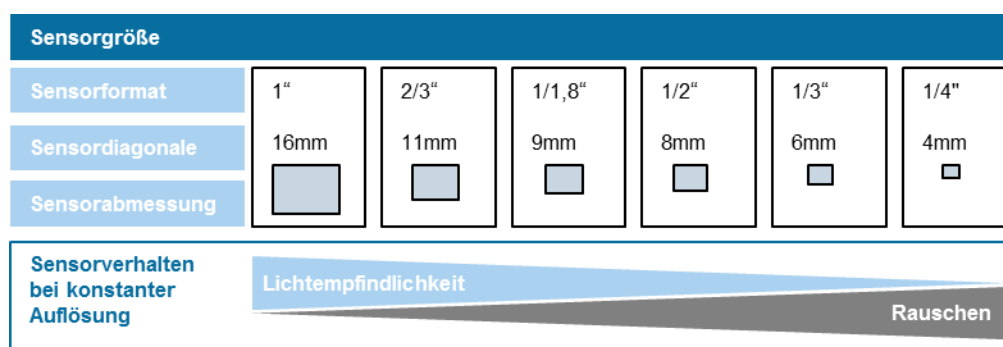


Abbildung 6-6: Sensorgröße im Kontext des Sensorverhaltens

Durch die Längen- und Breitenabmessung des Fotosensors wird das Verhältnis zwischen horizontal und vertikal zu erfassendem FoV festgelegt. Ein Seitenverhältnis nahe am hier zu verfolgenden Ideal 1:1 ermöglicht es, dass das Layout der anzubringenden Marker maximal unabhängig von dem Bewegungsprofil der Lokalisierungsobjekte ist. Dreht sich das Lokalisierungsobjekt um z. B. 90° in der Ebene mit der körperfest angebrachten Kamera, so verändert sich bei unterschiedlichen Seitenlängen des Sichtfeldes die erfassbare Bildszene. Die Folge ist, dass der Abstand zwischen den Markern in Abhängigkeit der kleinsten Seitenlänge des Sichtfeldes zu bestimmen wäre. Der Vorteil eines größeren Sichtfeldes bietet

zumindest in eine Richtung die theoretische Möglichkeit eines größeren Abstandes zwischen anzubringenden Markern, d. h. eines geringeren Infrastrukturaufwandes. Um jedoch die Flexibilität des Gabelstaplers in der Wahl des Fahrweges bzw. seiner Ausrichtung im Fahrweg nicht einzuschränken, kann eine Auslegung anhand der längeren Seite des Sichtfeldes nicht erfolgen. Dementsprechend ist ein maximal großer Fotosensor für die Lokalisierungslösung mit einem idealen Seitenverhältnis von 1:1 zu favorisieren.

Bildrate/ Frame Rate [1/s]

Die Bildrate f_B ist eine Größe, die die Anzahl ausgeführter Bilderfassungen je Sekunde angibt.

Da in dieser Anwendung das zu lokalisierende Objekt bewegt wird, ist die Bildrate f_B für die Systemgestaltung von Relevanz. Grundsätzlich ist mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit v des zu lokalisierenden Objektes die Bildrate f_B zu erhöhen, sofern die Lokalisierungsgenauigkeit unverändert bleiben soll. Die Lokalisierungsgenauigkeit ergibt sich zum nicht unwesentlichen Teil daraus, dass im Zeitraum Δt zwischen zwei Bilderfassungen ein Weg $\Delta s(v, \Delta t)$ zurückgelegt wird, der durch die bildbasierte Lokalisierung nicht aufgelöst werden kann. Unter weiteren systemischen Fehlern der bildbasierten Lokalisierung kann Δs einen wesentlichen Anteil der Lokalisierungsgenauigkeit ausmachen und ist somit zu minimieren. Aufgrund des reziproken Verhältnisses zwischen Bildrate f_B und Weg Δs ist somit die Bildrate f_B grundsätzlich zu maximieren.

$$f_B = \frac{1}{\Delta t} = \frac{v}{\Delta s} \quad \text{Max!} \quad (6-5)$$

Folgende Tabelle dient zur Abschätzung der quantitativen Wirkung der für Gabelstapler typischen Fahrgeschwindigkeiten v auf die erforderliche Bildrate f_B bei geforderter Lokalisierungsgenauigkeit von $r_{xy}^n(p_{PZ}) \leq |0,4 \text{ m}|$.

Tabelle 6-2: Aus Fahrgeschwindigkeit und Bildrate resultierende Fahrstrecke zwischen zwei Frames und deren Anteil an der geforderten Lokalisierungsgenauigkeit

Fahrgeschwindigkeit [km/h]	Bildrate f_B [1/s]				
	5	10	15	20	25
2,5	0,138 m 34 %	0,069 m 17 %	0,046 m 11 %	0,034 m 8 %	0,027 m 6 %
8	0,444 m 111 %	0,222 m 55 %	0,148 m 37 %	0,111 m 27 %	0,088 m 22 %
15	0,833 m 208 %	0,416 m 104 %	0,277 m 69 %	0,208 m 52 %	0,166 m 41 %

Unter der Berücksichtigung üblicher Bildraten in heute verfügbaren Industriekameras und gleichzeitig zur Verfügung stehender Rechenkapazität wird eine Bildrate $f_B \geq 15 \frac{1}{s}$ gefordert. Hierfür ist bei einer Fahrgeschwindigkeit $v_{max} = 15 \frac{km}{h}$ die geforderte Lokalisierungsgenauigkeit $r_{xy}^n(p_{pz}) \leq |0,4 m|$ noch erreichbar, da die zurückgelegte Strecke zwischen zwei Posenbestimmungen $\Delta s_{v_{max}} = 0,277 m < r_{xy}^n(p_{pz})$ ist. In der weiteren Realisierung ist darauf zu achten, dass die Lokalisierungsgenauigkeit weitestgehend unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist, um nicht neben dem in Tabelle 6-2 aufgezeigten Zusammenhang eine weitere signifikante Einflusswirkung berücksichtigen zu müssen. Grundsätzlich wird eine Herausforderung in dem System darin bestehen, auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten v eine ausreichende Lokalisierungsgenauigkeit zu erzielen.

Optische Auflösung [px]

Die optische Auflösung beschreibt das Produkt der Anzahl an Dioden je Seitenlänge des Fotosensors. Jede Diode ist das physische Element zur Erzeugung einer Abbildung der betrachteten Szene in Bildpunkten, sog. Pixeln. Sofern die Sensorgröße bereits bestimmt ist, führt die Festlegung der Auflösung direkt zur physischen Festlegung der Größe einer Fotodiode.

Die Auflösung dient dazu, sicherzustellen dass in der Umgebung zu erfassende Merkmale auf dem Fotosensor aufgenommen werden können. Dies bedeutet, dass im erzeugten Bild relevante Elemente der erfassten Szene erkannt werden können. Das Nyquist Abtasttheorem (vgl. Formel (6-6)) gibt für diese Aufgabe in der Signalverarbeitung vor, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so groß wie die Frequenz des zu erfassenden Signals sein muss [HOL-1998].

$$f_{Abtast} \geq 2f_{max} \quad (6-6)$$

Übertragen auf die Aufgabe der Bilderfassung bedeutet dies, dass das Abbild B_{min} des kleinsten abzubildenden Elementes G_{min} des zu erfassenden Gegenstandes G mindestens auf zwei Fotodioden der jeweiligen Seitenlänge s_{px} abzubilden ist [AND-2013]:

$$B_{min} = k_{NY}s_{px} \text{ mit } k_{NY} \geq 2 \quad (6-7)$$

Aufgrund des Abbildungsmaßstabs m im optischen System ist B_{min} unter weiterer Kenntnis der Größe des kleinsten abzubildenden Elementes G_{min} zu bestimmen (vgl. Formel (6-10)). In dieser Anwendung ist G_{min} die eindimensionale Abmessung des kleinsten Elementes, welches im Marker (vgl. Abschnitt 6.3) zu unterscheiden ist. Zur Bestimmung des Abbildungsmaßstabs (vgl. Formel (6-9)) ist die Linsengleichung (vgl. Formel (6-8)) mit aus den Objekteigenschaften gegebener Brennweite f zu verwenden [SCH-2007].

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (6-8)$$

$$-m = -\frac{B}{G} = \frac{b-f}{f} \quad (6-9)$$

$$B_{min} = G_{min} \left(\frac{g}{g-f} - 1 \right) \quad (6-10)$$

Allerdings ist zu bedenken, dass bei einer Maximierung des Nyquistfaktors k_{NY} und somit der Auflösung des Fotosensors, die Abmessung der Fotodiode s_{px} nur begrenzt minimiert werden kann. Sehr kleine Abmessungen der Fotodiode führen zu einem höheren Signalrauschen mit negativem Einfluss auf die Abbildungsgüte. Dies ist auch darin zu begründen, dass die Lichtempfindlichkeit mit sinkenden Abmessungen der einzelnen Fotodiode ebenso sinkt [SCH-2007]. Demnach ist in der finalen Auswahl einer Komponente dieser Zielkonflikt zu berücksichtigen und eine Abwägung zu führen.

Festlegungen für den Systementwurf:

- Moderates Weitwinkelobjektiv mit $\delta \approx 60^\circ$
- Hohe Schärfentiefe im unendlichen Schärfebereich
- Minimale Blendenzahl k_{BZ}
- CCD-Sensortyp

- Bildrate $f_B \geq 15 \frac{1}{s}$
- Bestimmung eines Gesamtoptimums im Zielkonflikt
 - Maximale Sensorgröße mit einem Seitenverhältnis nahe 1:1
 - Mittlere Auflösung mit $B_{min} > 2s_{px}$, bzw. Nyquistfaktor $k_{NY} \gg 2$

6.5 Location Engine zur Positionsbestimmung

Die Funktion der Location Engine ist die Ableitung einer Positionsinformation aus den Daten des Location Sensors. Eine hierfür verwendete Kamera übermittelt an die Location Engine lediglich ein Bild in der Form einer Matrix, die die jeweiligen Farb- bzw. Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte beinhaltet.

Für die Bildverarbeitung in der Location Engine ergeben sich nun fünf Aufgaben (vgl. Abbildung 6-7). Zum einen sind Merkmale als Kandidaten im Bild zu finden, z. B. Marker, und diese zum zweiten hinsichtlich ihrer Identität zu erkennen. Zum dritten ist eine Korrektur der Abbildung um durch die Kameraoptik bedingte Fehler durchzuführen und anschließend zum vierten die Pose des Merkmals im Bild zu bestimmen. Darauf basierend erfolgt durch sog. Pose Estimation-Verfahren die Schätzung zur Pose der Kamera bzw. des Lokalisierungsobjektes. Ggf. ist in einem fünften Schritt eine weitere Optimierung der Posenschätzung erforderlich und mit entsprechenden Optimierungsstrategien zu beschreiben. Im weiteren Verlauf wird auf diese Teilaufgaben mit Ausnahme der Kalibrierung⁶ einzeln eingegangen. Es wird in die wesentlichen Grundlagen eingeführt und deren Bedeutung für die weitere Gestaltung des hier betrachteten Systems zur Gabelstaplerlokalisierung erläutert.

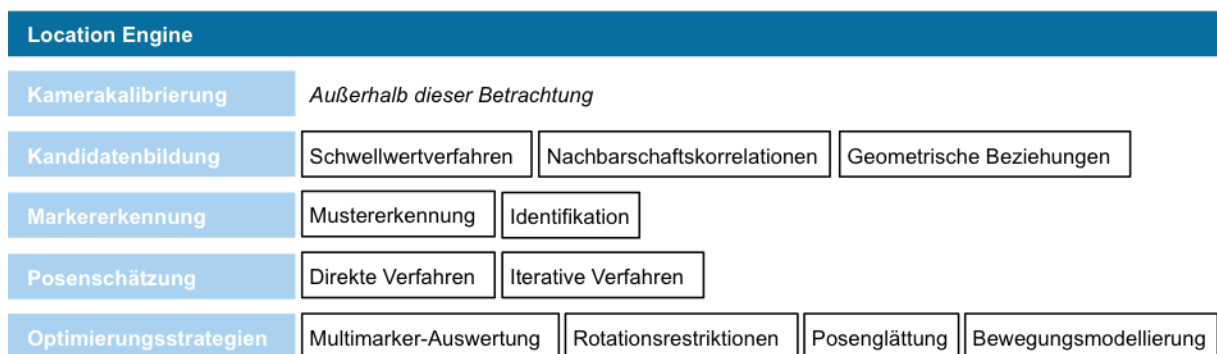


Abbildung 6-7: Bildbasierte Teilaufgaben und ihre Methoden in der Location Engine

⁶ Die Kamerakalibrierung ist eine Standardfunktion in der Bildverarbeitung und wird somit aus dieser Diskussion ausgenommen. Für detaillierte Informationen zur Kamerakalibrierung siehe [BRA-2008, ZHA-2000].

6.5.1 Kandidatenbildung und Markererkennung

Im bisherigen Systementwurf ist die Verwendung von bi-tonalen Referenzmarkern mit Rahmen vorgesehen, die an der Decke des Lokalisierungsbereichs angebracht werden. Mittels eines Ansatzes zur Kandidatenfindung geht es nun darum, Hypothesen zu bilden, wo im erfassten Bild Bereiche sind, in denen ein Marker abgebildet wird. Die anschließende Markererkennung dient der Überprüfung der Hypothese und vornehmlich der Identitätsbestimmung des jeweiligen Markers bzw. des Merkmals. Die Qualität dieses Prozesses hat somit wesentlichen Einfluss auf die spätere Lokisierungsleistung, da fehlerhafte Markererkennungen für die Posenbestimmung fehlerhafte Referenzpunkte liefern. Allerdings existiert bereits eine Vielzahl an softwarebasierten Bibliotheken, die diese beiden Bildverarbeitungsaufgaben umsetzen. Ihre Anwendung bezieht sich vornehmlich auf Augmented Reality Anwendungen, in denen die Markererkennung im Bild dem Nutzer ermöglicht kontextbezogene Inhalte an der Stelle des realen Markers im Bild darzustellen. Für die Lokisierungsaufgabe dieser Arbeit sind diese Bibliotheken in Betracht zu ziehen. Sie sind ebenso für den Echtzeitbetrieb ausgelegt und überwiegend auf mobilen Plattformen ablauffähig. Somit zeichnen sie sich auch durch geringe Anforderungen an die Rechnerarchitektur aus [FIA-2010].

Zur Kandidatenbildung wird das Bild nach Merkmalen durchsucht um schließlich für die weitere Betrachtung relevante Bereiche vom Bildhintergrund zu trennen. Es existiert eine Vielzahl an Verfahren, die zum Teil sehr spezifische Anforderungen erfüllen. Ihnen ist jedoch das Prinzip in der Modellierung der gesuchten Merkmale gemeinsam. Demnach wird nach einer Prozessvorschrift jedes Pixel oder vielmehr jede Pixelregion nach Merkmalen durchsucht. Hierzu erfolgt eine Entscheidung nach einem Kriterium ob ein Pixel oder eine Pixelregion zu einer Kategorie möglicher Marker zugehörig ist. Diese Kriterien basieren in der Regel auf Schwellwerten, auf Nachbarschaftsbeziehungen und/oder Geometriebeschreibungen. Schwellwerte werden statisch definiert, indem z. B. ein Pixel einen absolut definierten Helligkeitswert unter- oder überschreiten muss um einer Kategorie zuzugehören. Andere Schwellwertverfahren definieren einen dynamischen Schwellwert, der sich in Relation zu einem weiteren Kennwert eines betrachteten Bildes befindet. Z. B. wird hier der durchschnittliche Helligkeitswert eines ganzen Bildes oder auch nur eines Bildbereichs herbeigezogen. Durch letztere Verfahren wird es möglich eine gewisse Unabhängigkeit von zeit- und ortsbezogenen Helligkeitsbedingungen (vgl. Abbildung 3-4) zu erhalten, wie sie in Anwendungen erforderlich sind, die einer Eigenbewegung unterliegen [WAG-2007]. Diese Herausforderung stellt sich somit auch in der hier betrachteten Gabelstaplerlokalisierung. In der Nachbarschaftsanalyse wird

untersucht ob z. B. signifikante Helligkeitsänderungen sich bei benachbarten Pixeln fortsetzen, so dass mit einer weiteren Konturenanalyse betrachtet werden kann ob diese Helligkeitsänderungen z. B. die Form eines Rechteckes ergeben. Im Systementwurf erfolgte bereits die Wahl rechteckig umrahmter Marker, so dass mit diesem Vorwissen nach Markern mit rechteckigem Rahmen gesucht werden kann. Dies bedeutet, dass sich anhand dieser Bedingung erste Kandidaten finden lassen. Bei einer latenten Gefahr unscharfer Abbildungen, wie sie bei wechselnden Deckenhöhen und nicht ausreichender Bildschärfentiefe ohne adaptiver Fokussierung besteht, ist es jedoch erforderlich nicht nur auf dynamische Schwellwertverfahren, sondern gerade auch auf Nachbarschaftsbeziehungen zu setzen. Im Falle einer unscharfen Abbildung erstrecken sich konturenbedingte bzw. rahmenbedingte Helligkeitsänderungen über mehrere Helligkeitsabstufungen in räumlicher Nachbarschaft zueinander. Ein dynamisches Schwellwertverfahren wird diese demnach am ehesten detektieren können.

Für die Markeridentifikation erfolgt zuvor eine modellgestützte, perspektivische Bereinigung der Abbildung. Im Ergebnis haben perspektivische Verzerrungen z. B. der Konturen oder auch des Markerinhaltes keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die Identität des Markers. Hierzu wird in Bildfolgen eine Homographiematrix bestimmt, die auf zu betrachtende Merkmalsbereiche angewandt wird. Hierbei handelt es sich um eine genähert projektive Transformation [SCH-2005, FIA-2010]. Für die eigentliche Markeridentifikation nennt *Köhler* zwei mögliche Varianten [KÖH-2010]: Die Decodierung der Identität und die Mustererkennung von Farb- oder Helligkeitsintensitäten. Diese entsprechen den Messgrößen Identität und Signalstärke, wie sie im Abschnitt 4.3 als Messgrößen für die Positionsbestimmung mittels Nachbarschaftsbeziehung oder Mustererkennung eingeführt wurden.

Die Markeridentifikation durch eine Mustererkennung unterliegt einem tendenziell höherem Verwechslungsrisiko zwischen verschiedenen Markern [ZHA-2002]. Es ist wichtig, bereits bei der Wahl des Markers darauf zu achten dieses Verwechslungsrisiko zu berücksichtigen. Ebenso ist auch ein stabiles und sicheres Verfahren zur Identifikation des Markers zu wählen. Einzelne Markertypen versuchen dieses bereits bei der Gestaltung ihrer Markerbibliothek zu berücksichtigen, indem achsensymmetrische oder auch punktsymmetrische Marker nicht existieren. Für die Decodierung der Identität werden ebenso Mechanismen im Marker vorgehalten, die eine Verwechslungsgefahr reduzieren. So bestehen codierte Marker z. T. aus Parametern für die Fehlerdetektion und Absicherung mittels Prüfsummenverwendung [FIA-2010]. Ebenso kann der Anwender die Gefahr beeinflussen, indem er aus der Bibliothek nur die Teilmenge an Markern verwendet, die sich durch eine maximale Hamming-

Distanz auszeichnen. Nach *Fiala* wird hierdurch eine maximal mögliche Unterscheidung der Zeichenketten und damit der Marker erreicht [FIA-2010]. Eine weitere Übersicht und Erläuterung zur Kandidatenbildung und Markererkennung unter dem Grundsatz einer robusten Ausführung findet sich in [FIA-2010].

Im weiteren Verlauf werden softwarebasierte Bibliotheken vorgestellt, deren Funktionen u. a. die Kandidatenbildung und Markererkennung umfassen und in einer C- oder C++-Implementierung zur Verfügung stehen. Damit ist eine Integration in die weitere C++-basierte Bildverarbeitung dieser Arbeit möglich. Ferner setzen sie alle gemeinsam die Verwendung ebener, rechteckiger umrahmter Marker voraus, wie sie als Tag bereits vorgesehen wurden (vgl. Abschnitt 6.3).

ARToolKit⁷

Mit dem *ARToolKit* wurde von *Kato* an der *Hiroshima City University* in Zusammenarbeit mit dem *Human Interface Technology Laboratory* an der *University of Washington* das erste in der Wissenschaft und Anwendung geschätzte Werkzeug für die kamerabasierte Implementierung von AR-Lösungen geschaffen.

Es werden statische Schwellwert- und Konturenanalyseverfahren zur Bildung von Markerhypothesen verwendet. Die Identifikation der Marker erfolgt durch die Mustererkennung (vgl. Abschnitt 4.3.2), wobei der Inhalt der Marker keinem vordefinierten Codeschema unterliegt. Es können grafische bi-tonale Abbildungen ohne weitere Einschränkung verwendet werden, die umrahmt werden.

Die Erkennungsleistung setzte bei ihrer Veröffentlichung Maßstäbe, doch ist sie heute als durchschnittlich zu bewerten [WAG-2007, FIA-2010]. Für die hier vorgesehene Anwendung kommt erschwerend hinzu, dass statische Schwellwertverfahren zur Kandidatenbildung wechselnde Lichtbedingungen im betrachteten Lokalisierungsbereich nicht berücksichtigen. Ferner eignet sich die Markeridentifikation nur eingeschränkt, da eine Mustererkennung einem hohen Verwechslungsrisiko unterliegt. Um dieses zu senken, sind die physischen Abmessungen des Markers im Verhältnis zu binär codierten Markern deutlich zu erhöhen oder alternativ die Auflösung des Fotosensors zu steigern. Ebenso sieht das *ARToolKit* keine Fehlerkorrekturmechanismen vor, die es ermöglichen z. B. bei der Abdeckung von Markerbestandteilen diese zu rekonstruieren. Durch Hindernisse in der optischen

⁷ verwendet in der Version V2.72.1, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>, aufgerufen am 26.02.2014.

Achse zwischen Kamera am Gabelstapler und Marker an der Hallendecke besteht aber grundsätzlich die Neigung zu kurzzeitigen, zum Teil anteiligen Abdeckungen. Somit ist die *ARToolKit*-Bibliothek aufgrund von unzureichenden Leistungsaspekten nicht in die engere Auswahl einzubeziehen.

ARTag⁸

Die *ARTag*-Bibliothek wurde von *Fiala* am *National Research Council of Canada* entwickelt und stellt zum Zeitpunkt der Veröffentlichung eine Fortentwicklung zum *ARToolKit* dar. Die wesentliche Neuerung ist die Verwendung von 6 x 6 Zellen⁹ großen codierten Binärmarkern, die Mechanismen zur Prüfsummenkorrektur und Fehlerdetektion enthalten. Es stehen 1.001 Marker sowie bei zusätzlicher Invertierung in der Summe 2.002 Marker zur Verfügung. Hierdurch bedingt wird die Identität der Marker durch eine Decodierung bestimmt, wobei jeder Markerkandidat eine vierfache Rotation erfährt um die richtige Ausrichtung zu bestimmen. Es sind achsen- und punktsymmetrische Marker in der Bibliothek ausgeschlossen, sodass gegenüber dem *ARToolKit* kein signifikantes Verwechslungsrisiko in der Markeridentifizierung besteht. Tests bei steigendem Bildrauschen von *Fiala* bestätigen dies eindrucksvoll [FIA-2010]. Die Kandidatenbildung erfolgt mittels eines Gradientenverfahrens, das eine adaptive Kantenerkennung durch Nachbarschaftsbetrachtung darstellt. Somit ist eine gewisse Unabhängigkeit von instabilen Lichtbedingungen gegeben.

ARToolKitPlus¹⁰

ARToolKitPlus ist eine Weiterentwicklung und Zusammenführung von Konzepten der *ARToolKit*- und *ARTag*-Bibliotheken durch *Wagner* und *Schmalstieg* an der *Technischen Universität Graz* [WAG-2007]. Somit enthalten Marker 9-bit codierte Zeichenketten in vierfacher Redundanz. Ferner ist mit *ARToolKitPlus* eine Überführung in eine C++-Implementierung erfolgt, sodass ein objektorientierter Ansatz in der Softwarebibliothek Einzug erhält.

⁸ Verwendet in der Version Rev2, <http://www.artag.net/>, aufgerufen am 26.02.2014.

⁹ Angabe ist zzgl. weiterer Zellen für den Rahmen.

¹⁰ Verwendet in der Version V2.1.1, <http://handheldar.icg.tugraz.at/artoolkitplus.php>, aufgerufen am 26.02.2014.

Das *ARToolKitPlus* verwendet codierte Marker mit Fehlerdetektions- und Prüfsummenmechanismen. Das ergibt sich eine geringere Wahrscheinlichkeit einer Zwischen-Marker-Verwechslung, sodass das *ARToolKitPlus* grundsätzlich gegenüber bisherigen Bibliotheken zu favorisieren ist. Allerdings erfährt die Softwarebibliothek seit 2006 keine Betreuung und Weiterentwicklung mehr, wie auch keine Dokumentation verfügbar ist. An der *Technischen Universität Graz* wurden Grundmechanismen des *ARToolKit* in das neue Framework *Studierstube Tracker* eingebracht und für den Einsatz auf mobilen Endgeräten optimiert [GRA-2014]. Eine Open Source Lizenz ist hierfür allerdings nicht verfügbar.

Aruco¹¹

Aruco ist eine an der *Universität von Cordoba* entwickelte Augmented Reality Bibliothek, die Bildverarbeitungsrouitinen der *OpenCV*-Bildverarbeitungsbibliothek integriert. Es werden wie in der *ARTag*-Bibliothek codierte Marker verwendet, die einen Inhalt mit 5 x 5 Zellen¹² beschreiben. Durch den hohen Anteil von drei Fehlerkorrekturbits je Zeile besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit einer Markerverwechslung. Um darüber hinaus schwarze Flächen als Markerkandidaten auszuschließen wird das erste Bit invertiert dargestellt. Im Ergebnis lässt sich die Zahl an Markerkandidaten und damit die Prozesszeit hierdurch wirksam weiter reduzieren. Markerkandidaten werden mittels eines adaptiven Schwellwertes und nachgelagerter Konturenerkennung gewonnen. Im Rahmen der anschließenden Identifizierung wird das lokale und adaptive Otsu-Verfahren [OTS-1979] zur Kontrastverstärkung des Markerinhaltes eingesetzt. [UCO-2014]

¹¹ Verwendet in der Version V1.2.4, <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>, aufgerufen am 26.02.2014.

¹² Angabe ist zzgl. weiterer Zellen für den Rahmen.

Auswahl

Tabelle 6-3: Bewertung der Bibliotheken zur Kandidatenbildung u. Markererkennung¹³

	Verfahren Marker- analyse	Marker- anzahl	Abhängig- keiten	Dokumen- tation u. Verfügbarkeit	Erkennungs- rate	Erkennungs- sicherheit
ARToolKit	Muster- erkennung	∞	Keine	0	-	-
ARTag	Identitäts- erkennung	1.001 bzw. 2.002	Keine	0	+	0
ARToolKit Plus	Identitäts- erkennung	∞	ARToolKit	-	+	+
Aruco	Identitäts- erkennung	1.024	OpenCV	+	+	+

In der betrachteten Gabelstaplerlokalisierung sind instabile Lichtverhältnisse zu erwarten. Demnach ist für eine hohe und sichere Funktionalität auf eine adaptive Kandidatenbildungen und eine Identitätserkennung durch Decodierung für die Markererkennung zu setzen. Wie Tabelle 6-3 aufzeigt, kommen hierdurch lediglich die *ARToolKitPlus*- und *Aruco*-Bibliotheken in Betracht, wobei *Aruco* aufgrund der existierenden Dokumentation und Verfügbarkeit als Open Source-Entwicklung hervorsticht. Die Abhängigkeit von der *OpenCV*-Bibliothek ist kein Hindernis, da *OpenCV* eine mächtige und in der Wissenschaft weit verbreitete Open Source-Bibliothek für Bildverarbeitungsalgorithmen darstellt. In dem Software-Framework, welches für die weitere Umsetzung dieser Arbeit aus dem IGF-Forschungsprojekt ‚Das Staplerauge‘ genutzt wird [GÜN-2014], ist *OpenCV* bereits ein Kernbestandteil. Ebenso finden sich Kalibrierungsmechanismen für die Kandidatenbildung und Markererkennung in *OpenCV*, die an dieser Stelle vorausgesetzt und nicht weiter thematisiert werden. Details zu entsprechenden Kalibrierungsmechanismen sind u. a. [BRA-2008] zu entnehmen. Insgesamt ist damit eine Auswahl der *Aruco*-Bibliothek für die Kandidatenbildung und Markererkennung zu rechtfertigen.

Ergänzend zur Nutzung der *Aruco*-Bibliothek ist darauf zu achten, sofern eine Teilmenge aller möglichen 1.024 Marker zur Lokalisierung verwendet wird, dass eine Auswahl der Marker unter Berücksichtigung der Hamming-Distanz erfolgt. Hierdurch kann die Gefahr einer Zwischen-Marker-Verwechslung weiter gesenkt werden. Im

¹³ Legende: - geringe Eignung/nein; 0 = mittlere Eignung/ mit Einschränkung; + = gute Eignung/ ja

Folgenden findet sich eine zusammenfassende Auflistung der wesentlichen Entscheidungen für die weitere Umsetzung dieser Teilaufgabe der Location Engine.

Festlegungen für den Systementwurf:

- Nutzung der *Aruco*-Implementierung
 - Quadratische 5×5 Binärmarker zzgl. Rahmen
 - Kandidatenbildung mittels adaptivem Schwellwert und Konturenerkennung
 - Markererkennung durch Identitätserkennung mittels Decodierung unter Anwendung des Otsu-Verfahrens
- Markerauswahl unter Beachtung der Hamming-Distanz
- Nutzung von *OpenCV* für weitere Bildverarbeitungsaufgaben integriert im Software-Framework ‚Das Staplerauge‘

6.5.2 Posenschätzung

Die Schätzung der Pose umfasst im Kern die Rekonstruktion der relativen Lage der Kamera zur erfassten Szene durch die Analyse einer bijektiven Abbildung - hier eines 2D-Bildes. Sie führt die eigentliche Posenbestimmung der Location Engine in diesem Kontext einer Bildverarbeitungsaufgabe aus. Zur geometrischen Beschreibung der Aufgabe wird das Modell einer Lochkamera zugrunde gelegt [SCH-2005], welches die wesentlichen Abbildungsgeometrien des optischen Systems enthält. Das Modell umfasst kein Objektiv und betrachtet somit nicht die Bündelung des Lichts, sondern es sieht als Blende lediglich ein infinitesimal kleines Loch vor. Hierdurch werden fast alle Lichtstrahlen, mit der Ausnahme eines kleinen Lichtbündels, in fast gerader Verbindung zwischen Objekt- und Bildpunkt ausgeblendet. Das verbleibende Lichtbündel führt zu einer Abbildung der betrachteten Szene auf dem Fotosensor (vgl. Abbildung 6-8).

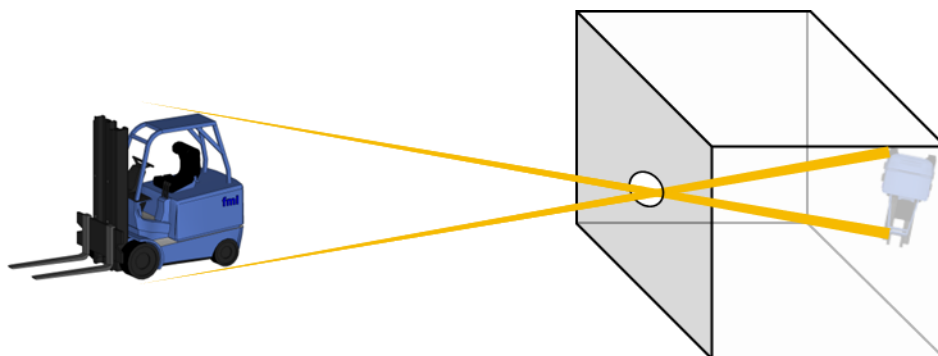


Abbildung 6-8: Grundprinzip einer Lochkamera

Abhängig von der relativen Lage zwischen betrachtetem Objekt und Kamera ergibt sich eine andersartige Perspektive. Zur geometrischen Vereinfachung dieser komplexen Abbildungsgeometrie haben sich Näherungen unter der Annahme einer Orthoperspektive, Paraperspektive und einer schwachen Perspektive etabliert (zur Detaillierung des mathematischen Modells siehe [DEM-1992]).

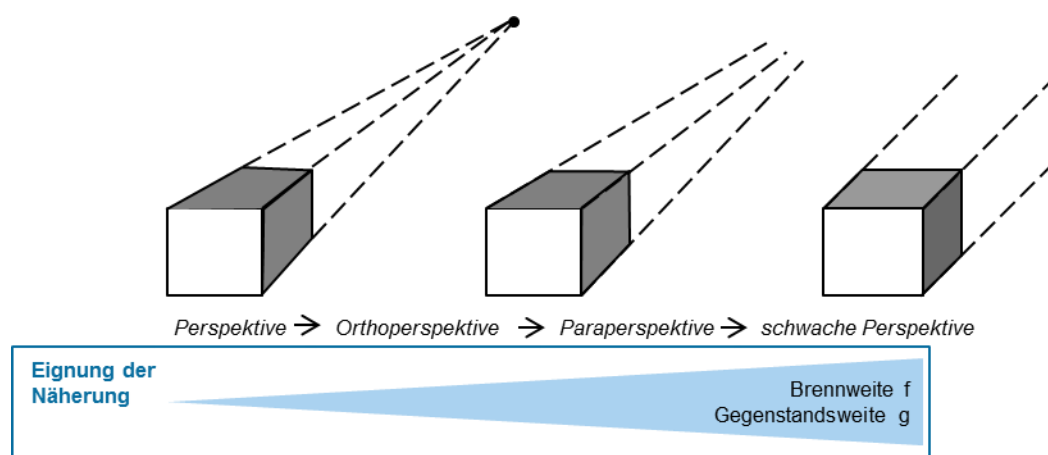


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Näherungen einer Perspektive (nach [HAR-2010, SCH-2005])

Die schwache Perspektive stellt hierbei die Näherung geringster Güte einer realen perspektivischen Abbildung dar, wobei die in dem Modell umgesetzten Annahmen mit wachsender Gegenstandsweite g und mit wachsender Brennweite f zu weniger relevanten Ungenauigkeiten führen (Abbildung 6-9). Da im Rahmen der Gabelstaplerlokalisierung in diesem Kontext von einem mittleren Abstand zwischen Objekt und Kamera ausgegangen werden kann, wird die schwache Perspektive in der weiteren Diskussion, sofern nicht anders gekennzeichnet, zugrunde gelegt.

Transformationen im Rahmen der Posenschätzung

Das mathematische Modell einer Lochkamera betrachtet zwei Parametergruppen. Interne Parameter umfassen kameraspezifische Parameter, die durch die Fertigung und Konstruktion der Kamera gegeben und somit je Kamera und Objektiv zu bestimmen sind. Entsprechende Parameter werden in der Kameramatrix $K \in R^{3 \times 3}$ zusammengefasst und mittels einer Kamerakalibrierung vorab bestimmt. Hier wird zwischen vielfältigen Verfahren der Selbst-Kalibrierung und Fotogrammetrie unterschieden, wobei Letztere in sehr anspruchsvollen, überwiegend wissenschaftlichen Messaufgaben angewendet werden. Selbst-Kalibrierungen zeichnen sich durch geringen Aufwand für die Erstellung eines Kalibriermusters und die Durchführung der Kalibrierung aus. Im Stand der Technik erhält das Verfahren von *Zhang* große

Anerkennung, da es ein Optimum an Nutzen zum Aufwand liefert [ZHA-2000]. Eine kalibrierte Kamera gilt als gerichteter Sensor und kann somit für metrische Vermessungsaufgaben, d. h. auch die Lokalisierung, verwendet werden.

Darüber hinaus erfassen externe Parameter die Rotation R und Translation t der Kamera. Dies sind die Bestandteile ihrer Pose gegenüber einem Bezugssystem der Umwelt, einem Weltkoordinatensystem. Externe Parameter werden in der Matrix $C \in R^{3 \times 4}$ zusammengeführt. In manchen Fällen werden in der Matrix C auch farbmetrische Abweichungen erfasst, die jedoch aufgrund der Verwendung bi-tonaler Marker hier nicht Bestandteil der weiteren Betrachtung sind. Abbildung 6-10 liefert eine schematische Darstellung der externen Parameter im Kontext der Koordinatensysteme, die im Rahmen der Posenschätzung bestehend aus den Parametern R und t zu berücksichtigen sind.

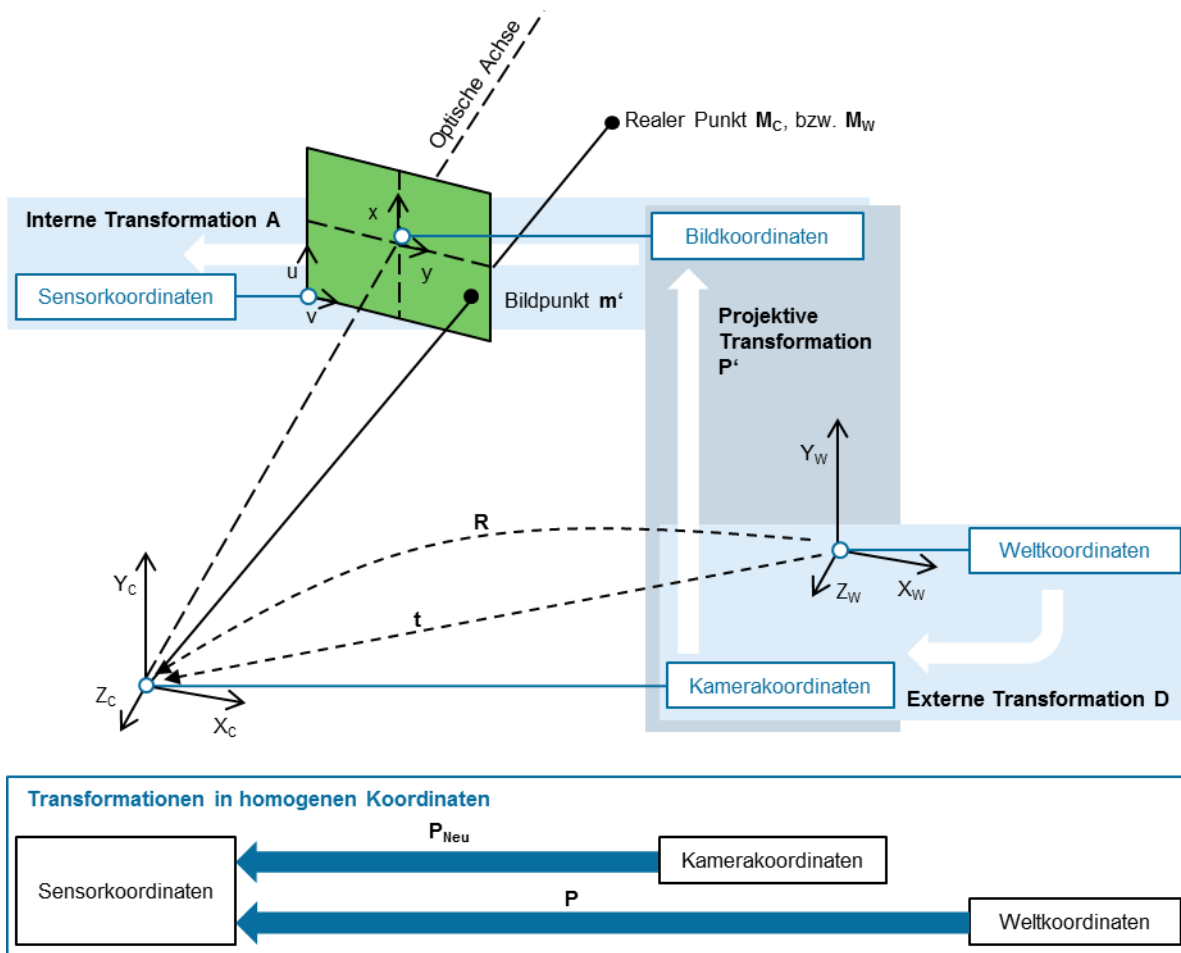


Abbildung 6-10: Schematische Darstellung der Bild- und Kamerageometrie im Kontext erforderlicher Transformationen zur Posenschätzung (nach [SCH-2005])

Um Bild- und Objektpunkte miteinander in einen Bezug setzen zu können, sind einzelne Transformationen erforderlich. Konform mit dem optischen Abbildungsvorgang erfolgt die Überführung eines Objektpunktes auf den korrespondierenden Bildpunkt in drei Schritten, die unter Verwendung homogener Koordinaten wie folgt auszuführen sind [SCH-2005]:

- Externe Transformation

Ein Objektpunkt M_w im Weltkoordinatensystem wird in das Kamerakoordinatensystem mittels Rotation R und Translation t überführt.

$$\widetilde{M}_C = D \widetilde{M}_W \text{ mit } D = \begin{bmatrix} R & t \\ 0_3^T & 1 \end{bmatrix} \text{ und mit } 0_3 = [0 \ 0 \ 0]^T \quad (6-11)$$

- Projektive Transformation

Mittels projektiver Transformation wird unmittelbar der durch die Zentralprojektion beschriebene Prozess der Projektion des Objektpunktes M_c auf den korrespondierenden Bildpunkt m' beschrieben.

$$s\widetilde{m}' = P' \widetilde{M}_C \text{ mit } P' = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ und } s = S \quad (6-12)$$

bzw.

$$s\widetilde{m}' = P' D \widetilde{M}_W \quad (6-13)$$

- Interne Transformation

Abschließend erfolgt eine Transformation des Bildpunktes m' von metrischen Bildkoordinaten in entsprechende pixelbasierte Sensorkoordinaten. Hierbei werden sensorbedingte Skalierungs- und Scherungsfehler in der Abbildung durch die Parameter k_v, k_u und s korrigiert. Ferner findet eine Verschiebung des Koordinatenursprungs aus der Bildmitte an einen Eckpunkt der Fotosensorfläche statt, der durch die Parameter u_0 und v_0 ausgedrückt wird.

$$\widetilde{m} = H \widetilde{m}' \text{ mit } H = \begin{bmatrix} k_u & s & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6-14)$$

bzw.

$$s\tilde{m} = H P' \tilde{M}_C \text{ mit } P_{neu} = H P' = \begin{bmatrix} f k_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f k_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6-15)$$

Aufgrund inzwischen hoher Fertigungsgenauigkeiten bei CCD-Fotosensoren kann i. d. R. die Scherung der u- und v-Koordinatenachsen gegenüber den x- und y-Koordinatenachsen mit $s = 0$ vernachlässigt werden.

Üblicherweise wird in diesem Transformationsschritt ferner eine Normierung unter der Annahme vorgenommen, dass der Ursprung des Kamerakoordinatensystems im Abstand der Brennweite $f = 1$ zur Bildebene liegt. Die hervorgehende Matrix A wird als intrinsische Matrix bezeichnet und umfasst die intrinsischen Parameter.

$$s\tilde{m} = A P_N \tilde{M}_C \text{ mit } P_{neu} = A P_N; P_N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ und} \quad (6-16)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_u & s & u_0 \\ 0 & a_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ mit } a_u = f k_u \text{ und } a_v = f k_v$$

Im Ergebnis lässt sich die vollständige Transformation eines Objektpunktes M_W im Weltkoordinatensystem in seine pixelbasierte 2D-Abbildung in Sensorkoordinaten wie folgt zusammenfassen:

$$s\tilde{m} = A \tilde{m}' = A P_N \tilde{M}_C = A P_N D \tilde{M}_W = A [R, t] \tilde{M}_W = P \tilde{M}_W \quad (6-17)$$

$$P = A [R, t] \quad (6-18)$$

Für die Projektionsmatrix P der perspektivischen Projektion gilt $P \in R^{3 \times 4}$. Unter Vernachlässigung der Scherung s zeigt die Projektionsmatrix zehn Freiheitsgrade auf, wobei auf die Rotation R und Translation t jeweils drei entfallen. Diese gilt es im Rahmen der Posenschätzung zu ermitteln, da sie letztendlich die Pose der Kamera im Weltkoordinatensystem ausdrücken (vgl. Formel (6-18)). Lediglich Punktkorrelationen bestehend aus Objektpunkten M_{Wi} und Bildpunkten m_i ermöglichen es durch oben dargestellte Transformationsschritte die gesuchte Pose durch die Bestimmung der Projektionsmatrix P unter Kenntnis der intrinsischen Matrix A zu bestimmen (für weitere Erläuterungen siehe [HAR-2010]).

Bestimmung der Projektionsmatrix

Ansätze zur Bestimmung der Projektionsmatrix P basierend auf obigem mathematischem Modell werden unter der sogenannten Perspective-n-Point (PnP-) Problematik behandelt. Hierbei steht die Frage im Vordergrund, wie viele Punktkorrespondenzen von Objekt- und Bildpunkten zur sicheren, genauen und eindeutigen Rekonstruktion der Projektionsmatrix P erforderlich sind. Entsprechende Verfahren zur Lösung der PnP-Problematik umfassen die Absicherung korrekter Punktkorrespondenzen¹⁴, sowie die Lösung des Gleichungssystems für die Projektionsmatrix P bzw. der Rotation R und Translation t . Hierbei handelt es sich abhängig von der Anzahl betrachteter Punktkorrespondenzen um ein über- oder unterbestimmtes Gleichungssystem. Es ist festzustellen, dass alle Verfahren eine Näherung liefern, deren Güte sich von der Qualität betrachteter Punktkorrespondenzen und verfahrensspezifischen Annahmen unterscheidet. Eine exakte Lösung des Gleichungssystems um die Projektionsmatrix P gibt es in der Praxis nicht, da alle Bildpunkte m_i einem Rauschen z. B. des Fotosensors unterliegen. Zur Bewertung der Näherung stützen sich PnP-Verfahren auf eine Betrachtung des algebraischen oder des geometrischen Fehlers zwischen gemessener und berechneter Punktkorrespondenz [NÖL-2010]. Eine Betrachtung des geometrischen Fehlers ist für die Anwendung zur Lokalisierung, wie in dieser Arbeit betrachtet, zielführender und anschaulicher [HAR-2010].

Ferner existieren zwei sich im Ablauf unterscheidende Gruppen an Verfahren für die Lösung der PnP-Problematik. Zum einen gibt es direkte Verfahren, die üblicherweise analytisch mittels komplexer Algorithmik eine Lösung für die Projektionsmatrix P bestimmen. Demgegenüber stehen iterative Verfahren, die mit einer gegebenen oder ermittelten Startlösung beginnen und anschließend diese Näherung iterativ bis zu einer Abbruchbedingung mit jedem weiteren Durchlauf des Algorithmus optimieren. Iterative Verfahren weisen meistens eine höhere Rechenlaufzeit auf, erreichen dafür gegenüber direkten Verfahren jedoch überwiegend bessere Lösungen [LEP-2009]. Deshalb sind im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich iterative Verfahren zu bevorzugen, sofern eine Startlösung intern durch das Verfahren zur Posenschätzung bestimmt wird. Eine Einschränkung stellt hier allerdings die zu erreichende Bildrate des Location Sensors dar, die durch die Laufzeit einer Positionsbestimmung bei leicht erhöhter Rechenzeit in iterativen Verfahren weiterhin erzielt werden muss.

¹⁴ Entsprechende Verfahren sind z. B. RANSAC, M-Estimator

Für die PnP-Problematik gibt es den Sonderfall, dass betrachtete Punktkorrespondenzen im Objektraum zueinander komplanar, d. h. in einer parallelen Ebene zur Fotosensorfläche, sind. In diesem Fall geht die Information zur dritten räumlichen Dimension verloren, da nun nicht durch eine relative Betrachtung der Punktkorrespondenzen diese ausgedrückt werden kann. Damit wird die Lösung für die Posenschätzung mehrdeutig, sodass entsprechende Verfahren für diesen Sonderfall weitere Methoden zur Schätzung und/oder Bewertung mehrerer Lösungen benötigen. Durch die Plausibilitätsprüfung von Positionsänderungen einer Bewegungsfolge bestehen Möglichkeiten zur Eingrenzung mehrdeutiger Lösungen. Ebenso liefert die Betrachtung der geometrischen Anordnung von bestimmten Lösungen in räumlicher Relation zur Kamera weitere Anhaltspunkte zur Lösung des Problems. Z. B. können Lösungen, die auf der Objektiv-abgewandten Seite der Kamera liegen, bereits ausgeschlossen werden, da sie aufgrund der fehlenden Sichtverbindung bei einer Kamera nicht existieren können. Allerdings führen diese Eingrenzungen in der Regel noch nicht zum benötigten Erfolg in der Form, dass das Problem auf eine einzige, richtige Lösung reduziert werden kann. Deshalb umfassen Verfahren zur Posenschätzung häufig komplexere Methoden als hier exemplarisch dargestellt wurden. Bei der Lokalisierung mittels Marker, wie sie hier für die Gabelstaplerlokalisierung betrachtet wird, trifft das Problem komplanarer Punktkorrespondenzen zu. Da aufgrund sichtbarer ebener optischer Marker lediglich Objektpunkte und korrespondierende Bildpunkte einer Ebene bekannt sein können, ist es erforderlich diesen Sonderfall der Komplanarität in der Wahl eines Verfahrens zur Posenschätzung zu berücksichtigen.

Festlegungen für den Systementwurf:

- Geometrische Optimierung der Posennäherung zur Lösung mehrdeutiger Schätzungen
- Interne Bestimmung einer Startbedingung, sofern Anwendung eines iterativen Verfahrens zur Posenschätzung erfolgt
- Berücksichtigung komplanarer Punktkorrespondenzen
- Erforderliche Vorkenntnisse (a priori Wissen) zum Systemaufbau und Szene:
 - Interne Parameter des Sensors aufgrund Kalibrierung
 - Brennweite f des Objektivs
 - Skalierungs- und Scherungsparameter des Fotosensors
 - Punktkorrespondenzen durch vorgelagerte Markererkennung
 - Bildpunkte m_i mit $i \geq 3$ inkl. korrespondierenden Objektpunkten M_{Wi}

6.5.3 Algorithmen zur Schätzung der Pose

Im weiteren Verlauf werden Verfahren zur Posenschätzung vorgestellt, die dem Stand der Technik entsprechen. In der gegenwärtig regen Forschung auf dem Gebiet der bildbasierten Lokalisierung finden sich für diese Verfahren bereits zahlreiche Anwendungen, die Hinweise auf die Praktikabilität der Verfahren liefern. In der Regel sind diese Verfahren in die Open Source-Bildverarbeitungsbibliothek *OpenCV* eingeflossen und stehen damit einem breiten und aktiven Nutzerkreis zur Verfügung. Hinzu kommt ein pragmatischer, schlanker Ansatz zur Posenbestimmung, der auf den hier zutreffenden Sonderfall einer parallelen Anordnung von Marker und Fotosensor aufbaut.

Levenberg-Marquardt Iteration (LMI)¹⁵

Das Levenberg-Marquardt Verfahren ist ein iteratives Verfahren, das einen numerischen Optimierungsalgorithmus für nicht-lineare Probleme beinhaltet und auf dem Gauss-Newton Verfahren aufbaut. Im ersten Schritt bestimmt es eine Startlösung. Im zweiten Schritt wird diese mittels des Gradientenverfahrens und paralleler Bewertung durch das Gauss-Newton Verfahren auf eine mögliche weitere Optimierung hin untersucht. Eine geometrische Quantifizierung des Fehlers der bestimmten Lösung findet durch die Berechnung des Reprojektionsfehlers statt. Hierbei wird der quadratische Abstand zwischen gemessenem Bildpunkt und durch die bestimmte Projektionsmatrix berechneten Bildpunkt betrachtet.

Die Leistung des Verfahrens ist stark abhängig von der Qualität der Startlösung, da lediglich lokale Minima bestimmt werden. Liegt die Startlösung somit in der Nähe des globalen Minimums, wird das Verfahren eine Lösung hoher Güte liefern, anderenfalls nicht.

Eine genauere Vorstellung des Verfahrens ist in [HAR-2010] zu finden.

¹⁵ verwendet in der Implementierung `solvePNP(CV_Iterative)` in der OpenCV Version V2.4.5, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/2.4.5/>, aufgerufen am 21.10.2013.

Extended Pose from Orthography and Scaling with Iterations (ePOSIT)¹⁶

In dem zugrunde liegenden ‚Pose from Orthography and Scaling with Iterations‘-Verfahren (POSIT) wird unter der Annahme einer orthogonalen Projektion für dieses iterative Verfahren eine Startbedingung ermittelt. D. h. dass alle Objektpunkte den gleichen Abstand zur Bildebene aufzeigen. Dieser Fall ist besonders für die Gabelstaplerlokalisierung zutreffend, sofern die Kamera waagrecht montiert wird und auf Deckenmarkierungen ausgerichtet wird, die ebenso in der Waagerechten angebracht wurden.

Im zweiten Schritt erfolgt im POSIT-Verfahren eine Optimierung der zuvor ermittelten Lösung. Es werden die berechneten Objektpunkte auf ihrer jeweiligen optischen Achse in der Tiefe auf eine Ebene verschoben, was einer optischen Deformation gleich kommt. Findet anschließend durch die berechnete Projektionsmatrix eine genaue Abbildung dieser verschobenen Objektpunkte auf die gemessenen Bildpunkte statt, so wurde eine optimale Lösung bestimmt, anderenfalls wird die Iteration fortgeführt. Hiermit findet auch eine Optimierung der Schätzung mit geometrischem Bezug statt.

DeMenthon und *Davies* haben zu ihrem POSIT-Verfahren eine Erweiterung veröffentlicht, die auch die Verwendung komplanarer Punkte ermöglicht und ‚extended POSIT‘-Verfahren genannt wird [DEM-1992]. Die Implementierung des ePOSIT-Verfahrens wurde bisher nicht in *OpenCV* integriert, steht aber als Open Source-Skript durch die Autoren zur Erweiterung der *OpenCV*-Bibliothek zur Verfügung [OBE-2014].

Der Vorteil des POSIT-Verfahrens und seiner Erweiterung ePOSIT liegt in seinem effizienten, schnellen Algorithmus und seiner guten Fähigkeit mit rauschenden Bildpunkten im Rahmen der Punktkorrespondenzen umzugehen.

Eine genauere Vorstellung des POSIT-Verfahrens ist in [DEM-1995] zu finden.

¹⁶ verwendete Implementierung ‚POSIT for Coplanar Points (C)‘, http://www.cfar.umd.edu/~daniel/Site_2/Code.html, aufgerufen am 21.10.2013.

Robust Pose Estimation from a Planar Target (RPP)¹⁷

Das RPP-Verfahren ist eine Weiterentwicklung des POSIT-Verfahrens. *Schweighofer* und *Pinz* stellen in ihren Untersuchungen fest, dass POSIT bei einer mehrdeutigen Lösung, wie sie insbesondere für komplanare Punktkorrespondenzen existiert, als optimierte Lösung häufig ein lokales statt eines globalen Minimums liefert. Der Grund hierfür ist die Annahme einer orthogonalen Projektion im POSIT-Verfahren, welche nur bei hohen Abständen zwischen Objekt- und Bildebene sowie einer großen Tiefe der erfassten Szene zutreffend ist [SCH-2006]. In dem RPP-Verfahren wird die Projektionsmatrix dahingehend verändert, dass die Fehlerfunktion bzw. Kostenfunktion lediglich eindimensional rotations- und vollständig translationsabhängig ist.

In eigenen Untersuchungen von *Schweighofer* und *Pinz* konnte gegenüber iterativen Verfahren die erhöhte Genauigkeit gerade auch bei stärker verrauschten Punktkorrespondenzen nachgewiesen werden [SCH-2006].

Das RPP-Verfahren wurde von *Ho* in der Version von [SCH-2006] für die *OpenCV*-Bibliothek implementiert und steht auf seiner Homepage [HON-2011] zum Import in die *OpenCV*-Bibliothek zur Verfügung.

Complete Analytical Solution with the assistance of Solution Classification (CASSC)¹⁸

Das CASSC-Verfahren liefert alle numerischen Lösungen für die P3P-Problematik, d. h. sie stützt sich auf 3 Punktkorrespondenzen. Im ersten Schritt wird analytisch eine mehrdeutige Lösung bestimmt, wobei im zweiten Schritt echte positive Lösungen für die Rotation R und Translation t gefiltert werden.

Da dieses Vorgehen vor allem bei komplanaren Punktkorrespondenzen noch keine eindeutige Lösung liefert, hat die Umsetzung des CASSC-Verfahrens in *OpenCV* eine Erweiterung erfahren. Mittels der Betrachtung des Reprojektionsfehlers wird hier der Lösungsraum auf die geometrisch plausibelste Lösung eingegrenzt.

Eine genauere Vorstellung des Verfahrens ist in [GAO-2003] zu finden.

¹⁷ verwendete Implementierung in der Version V1.1.2, <http://nghiaho.com/?p=447>, aufgerufen am 21.10.2013.

¹⁸ verwendet in der Implementierung `solvePNP(CV_P3P)` in der *OpenCV* Version V2.4.5, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/2.4.5/>, aufgerufen am 21.10.2013.

Efficient Perspective n-Point Camera Pose Estimation (EPnP)¹⁹

Im ersten Schritt führt das EPnP-Verfahren eine Gewichtung der gegebenen komplanaren und/oder nicht-komplanaren Punktkorrespondenzen hinsichtlich der Eignung für die PnP-Problematik durch. Anschließend wird für die weitere Posen-schätzung eine optimale Teilmenge der gegebenen Punktkorrespondenzen verwendet. Im allgemeinen Fall sind es 4 Punktkorrespondenzen; im komplanaren Fall lediglich 3. Anschließend findet eine direkte Bestimmung einer Näherung für die Rotation R und Translation t statt.

Da dieses Verfahren sich durch eine geringe Berechnungslaufzeit und linearer Abhängigkeit von der Anzahl gegebener Punktkorrespondenzen gegenüber anderen iterativen Verfahren absetzt, unterliegt es einer geringeren Genauigkeit. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass durch eine nachgelagerte Gauss-Newton Optimierung (vgl. LMI-Verfahren) eine schnelle optimierte Lösung möglich ist, die eine vergleichbare Genauigkeit zu iterativen Verfahren aufzeigt. [LEP-2009]

Das direkte EPnP-Verfahren zeichnet sich nicht nur durch seine geringe Berechnungszeit, vor allem bei einer großen Anzahl gegebener Punktkorrespondenzen aus, sondern ebenso durch eine geringe Abhängigkeit vom Bildrauschen in den gegebenen Punktkorrespondenzen.

Eine genauere Vorstellung des Verfahrens ist in [LEP-2009] zu finden.

Pose for Planar Parallel Target (PPP)

Dieses Verfahren ist eine unter Nutzung der Zusammenhänge der Zentralprojektion (vgl. Formel (6-19)) und des Abbildungsmaßstabs (vgl. Formel (6-20)) erfolgende direkte Posenbestimmung [SCH-2005]. Sie geht davon aus, dass eine Zwangsparallelität zwischen dem Fotosensor und dem Marker besteht. Somit werden u. a. Rotationen um die x – und y –Achse unterdrückt, bzw. entsprechende Freiheitsgrade eingeschränkt.

$$\frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \quad (6-19)$$

Die Position des Markers im Kamerakoordinatensystem C lautet somit [FML-2013c]:

¹⁹ verwendet in der Implementierung solvePNP(CV_EPNP) in der OpenCV Version V2.4.5, <http://sourceforge.net/projects/opencvlibrary/files/opencv-win/2.4.5/>, aufgerufen am 21.10.2013.

$$z_c = \frac{G}{B} * f \quad (6-20)$$

$$x_c = \frac{z_c}{f_u} * (u - u_0) \quad (6-21)$$

$$y_c = \frac{z_c}{f_v} * (v - v_0) \quad (6-22)$$

Grundsätzlich kann für die horizontale und vertikale Brennweite $f_u \approx f_v \approx f$ angenommen werden.

Die weitere Bestimmung der Lage bzw. z – Achsenrotation erfolgt mittels Betrachtung des Winkels zwischen einer Horizontalen durch den ersten Bildpunkt m_1 und der Verbindungslinie zweier Bildpunkte $\{m_1, m_2\}$, sofern beide Bildpunkte m_1, m_2 auf der gleichen Markerkante liegen.

Erste Eingrenzung der Verfahren

Tabelle 6-4: Übersicht zu Verfahren der Posenschätzung²⁰

	Verfahrensart	Anzahl Punktkorrespondenzen	Komplanare Punkte	Geometrische Kostenfunktion	OpenCV-Implementierung	Bewertung	
LMI	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 4	+	+	+	0 <ul style="list-style-type: none"> • Sehr weit verbreitetes Verfahren zur Posenschätzung • Hohe Genauigkeit möglich, allerdings stark abh. von der Qualität der Startlösung 	
ePOSIT	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 3	+	+	0	+	<ul style="list-style-type: none"> • Gute Genauigkeit bei im Verhältnis geringer Laufzeit • Jedoch bessere Genauigkeit als z. B. EPnP
RPP	iterativ (interne Startlsg.)	≥ 4	+	+	0	+	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel höherer Genauigkeit gegenüber iterativen Verfahren insbes. bei verrauschten Punktkorrespondenzen
CASSC	direkt	≥ 4	-	+	+	-	<ul style="list-style-type: none"> • Fokus auf Identifikation robuster, plausibler Lösungen innerhalb der mehrdeutigen P3P-Lösung • Unterstützt keine komplanaren Punktkorrespondenzen.
EPnP	direkt	≥ 4	+	+	+	-	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel einer geringen Laufzeit auf Kosten von Genauigkeit im Vergleich zu iterativen Verfahren
PPP	direkt	k.A.	+	0	-	0	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Genauigkeit bei optimaler Anbringung der Komponenten, ansonsten hohe Abweichungen zu erwarten • Effiziente Berechnung

Die bisherige Gegenüberstellung der Verfahren zur Posenschätzung (vgl. Tabelle 6-4) zeigt, dass die direkten Verfahren CASSC und EPnP in der weiteren Betrachtung auszuschließen sind, während das direkte Verfahren PPP und die indirekten Verfahren LMI, ePosit und RPP nach der Prüfung bisheriger Ausschlusskriterien

²⁰ Legende: - geringe Eignung/nein; 0 = mittlere Eignung/ mit Einschränkung; + = gute Eignung/ ja

weiterhin eine Option darstellen. Bei der EPnP wird eine Optimierung nur hinsichtlich der Laufzeit der Berechnung verfolgt und damit eine für die hier verfolgte Anwendung nicht zu akzeptierende geringere theoretische Genauigkeit hingenommen. Demgegenüber ist die CASSC nicht in der Lage komplanare Punktkorrespondenzen eindeutig aufzulösen.

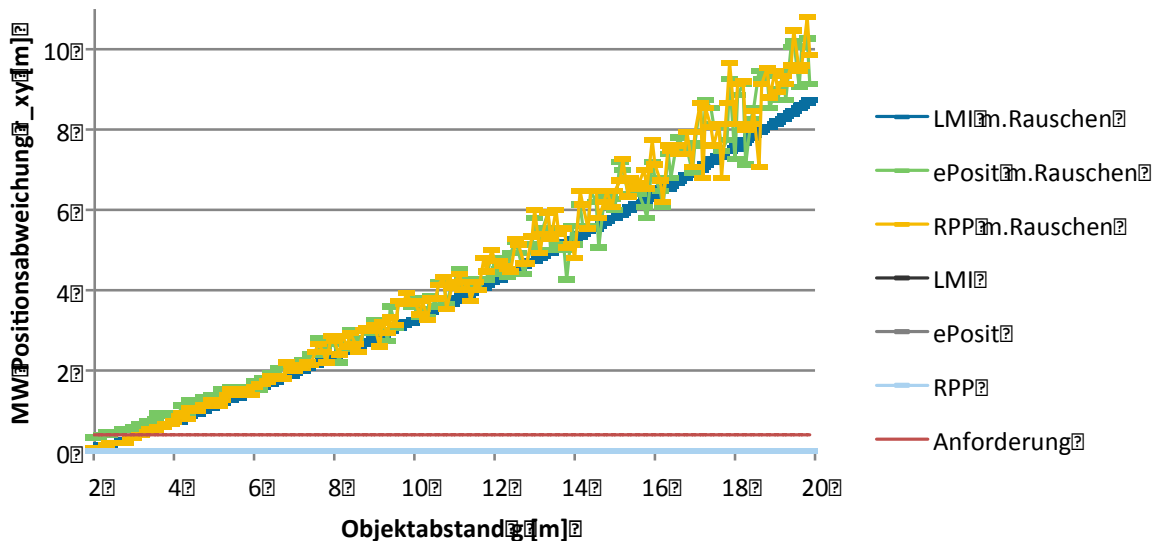


Abbildung 6-11: Synthetischer Benchmark zu den Verfahren der Posenschätzung LMI, ePOSIT, RPP (nach [FML-2013])

In einem Benchmark (Versuchsplan siehe Tabelle 8-3) der indirekten Posenschätzverfahren LMI, ePOSIT und RPP zeigen die Verfahren relativ zueinander eine ähnliche Genauigkeit auf (vgl. Abbildung 6-11). Dieser Benchmark erfolgte basierend auf synthetisch erzeugten Referenzbildern. Unter Idealbedingungen, d. h. ohne die Berücksichtigung eines Pixelrauschens, beträgt die maximal auftretende Positionsabweichung $r_{xy}^n_{max.} = 0,046 \text{ m}$. Die maximal erlaubte Abweichung von $r_{xy}^n(p_{pz}) \leq 0,4 \text{ m}$ (vgl. Abschnitt 5.1) ist somit um ein Vielfaches größer (Faktor 8,6). Allerdings sieht die Situation vollkommend anders aus, wenn der durch Abbildungs- und Sensorfehler in der Realität sehr wahrscheinliche Fall eines Pixelrauschens simuliert wird. Indem auf die Messdaten ein stochastisches Pixelrauschen von ± 1 Pixel angewendet wird, verhält sich die Positionsabweichung nahezu linear abhängig von der Gegenstandsweite g für alle betrachteten indirekten Posenschätzverfahren LMI, ePOSIT und RPP. Das LMI-Verfahren zeichnet sich allerdings durch einen streng linearen Verlauf der Fehlerkurve und leicht bessere Genauigkeit aus. Allerdings zeigt dieser Benchmark auch, dass in der Realität eine grundsätzlich hohe Abweichung

auftreten wird, die bereits bei einem Objektabstand von $g \approx 3m$ die kritische Positionsabweichung von $r_{xy}^n = |40 \text{ cm}|$ erreicht.

6.5.4 Optimierungsstrategien für die Posenschätzung

Ansätze zur Optimierung

Hiermit ist zu erkennen, dass für die Anwendung einer Gabelstaplerlokalisierung weitere Maßnahmen zur Stabilisierung und Genauigkeitssteigerung der Posenschätzung erforderlich sind. Dies ergibt sich aus den systembedingten Fehlern wie Sensorrauschen, Abbildungs- und Referenzfehlern. Denn bei einem Objektabstand $g = 3 \text{ m}$ wird bereits mit an der Hallendecke angebrachten Markern die tolerierte Lokalisierungsungenauigkeit in den meisten Fällen übertroffen (vgl. Abbildung 6-11). Dramatischer stellt sich diese Lokalisierungsungenauigkeit für ebenso in der Praxis mögliche Hallenhöhen $h > 6 \text{ m}$ dar. Es besteht somit Handlungsbedarf für weitere Optimierungsstrategien.

Eine Analyse zur bisher erfolgten Systemgestaltung und der grundsätzlichen, physikalisch bedingten Schwächen optischer Sensoren hat zu folgenden Beobachtungen geführt. Sie werden im weiteren Verlauf die Basis für die Entwicklung von Optimierungsstrategien darstellen [FML-2013c]:

- Berücksichtigung von Verzerrungen im Objektiv
Es existiert eine hohe Wahrscheinlichkeit von optischen Verzerrungen im Randbereich des weitwinkligen Objektivs, welches jedoch bevorzugt wird um eine geringere Anzahl an Markern in der Umgebung anbringen zu können (vgl. Abschnitt 6.4). Bereits mittels einer Kalibrierung wird versucht, diesen Einfluss auf die Abbildungsqualität zu reduzieren. Ergänzend kann zur Berücksichtigung dieses Abbildungsfehlers der Abstand des abgebildeten Markers zum Bildmittelpunkt in der Posenschätzung einbezogen werden. Die Annahme lautet, dass dieser grundsätzlich proportional zum Maß der Verzerrung im Objektiv ist.
- Einschränkung der Freiheitsgrade
Während die Marker an der Hallendecke starr angebracht sind und somit überhaupt keine Freiheitsgrade aufzeigen, bewegt sich das Lokalisierungsobjekt in der xy-Ebene und dreht sich um seine körpereigene z-Achse. In den Transformationsschritten der Posenschätzung können durch Abbildungs- oder auch Markererkennungsfehler bedingte vermeintliche Ro-

tationen um die x – und y –Achse entstehen und für diesen Anwendungsfall jedoch ignoriert werden.

- **Erhöhung der Anzahl sichtbarer Marker**
Im Idealfall reicht für eine ausreichend genaue Lokalisierung die Anbringung von Markern bzw. Tags in einem Abstand aus, der die Sichtbarkeit mindestens eines Markers an allen Bereichen der Lokalisierungsfläche garantiert. Ferner besteht die stochastisch begründete Annahme, dass durch eine höhere Dichte an Markern eine durch Bildrauschen bedingte ungenaue Abbildung eines Markers sich im Mittel mit anderen gleichzeitig sichtbaren Markern ausgleicht. Somit wird die Lokalisierungsleistung stabiler und zeigt ggf. ein höheres Niveau auf.
- **Filterung von Ausreißern durch Bewegungsmodellierung**
Es besteht aufgrund einer Historie erfolgter Positionsänderungen die Möglichkeit eine Modellierung für zu erwartende Positionsänderungen durchzuführen. Dadurch kann die ermittelte Pose hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft und ggf. gefiltert werden. Hierbei ist zwischen einer dynamischen und statischen Modellierung zu unterscheiden. Erstere betrachtet die augenblickliche Fahrgeschwindigkeit, die maximale Beschleunigung und Fahrtrichtung um eine erfolgte Posenschätzung auf Plausibilität zu prüfen. Demgegenüber verfolgt eine statische Modellierung den weit einfacheren Ansatz, lediglich aufgrund des Zeitunterschiedes zur letzten Positionsbestimmung und der Kenntnis der Maximalgeschwindigkeit eine maximal mögliche Positionsänderung zu bestimmen - ohne die Orientierung weiter in diese Betrachtung einzubeziehen. Grundsätzlich wird jede dieser Filterungen nachgelagert zu zuvor beschriebenen Optimierungsstrategien ausgeführt, sofern noch keine ausreichende Lokalisierungsleistung vorliegt.

Im Anhang C wird in entsprechendes Vorgehen zur Optimierung der Posenschätzung eingeführt, das auf der Basis obiger Grundsätze entwickelt wurde und kombiniert angewendet werden kann. Um eine für die Praxis relevante Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Optimierungsstrategien zu untersuchen, sind Versuchsdurchführungen erforderlich. Im Rahmen einer synthetischen Versuchsdurchführung werden dazu exemplarische Fehler eingeführt und in ihrer Wirkung auf die Optimierungsstrategien betrachtet. Dadurch, dass diese Fehlermodellierung in einem synthetischen Test hinsichtlich ihrer Einflusswirkung untersucht wird, ist eine gesicherte Aussage zur weiteren Systemgestaltung der Posenbestimmung zu treffen. Im Rahmen von Praxisversuchen, die schließlich Bestandteil der in dieser Arbeit zu führenden Eigenschaftsabsicherung sind (vgl. Abschnitt 7.2), ist eine genaue

Rekonstruktion der Ursache-Wirkungsketten nur unzureichend möglich. Dazu müssten die Umgebungszustände der Praxisversuche vollständig dokumentiert werden können, so dass sie uneingeschränkt reproduzierbar werden.

Ansätze zur Fehlermodellierung

Für den Prozess der Bilderfassung und Markererkennung werden somit in der weiteren Diskussion folgende Fehlereinflüsse auf die Posenbestimmung näher betrachtet [FML-2013c]:

- Fehler Objektpunkte
Die Posenschätzung basiert auf der a priori Kenntnis der Koordinaten systembekannter Objektpunkte M_{iW} . Die Qualität der Posenschätzung ist somit direkt abhängig von der Qualität der erfolgten Einmessung der Marker im Rahmen der Inbetriebnahme des Systems, die am Ende die Koordinaten der Objektpunkte M_{iW} liefert. Mit professioneller Messtechnik und ausreichender Vermessungskunde kann eine exaktere Vermessung erfolgen, als mit dem hier eingeführten zufälligen Fehler in der Einmessung von $d_G = \pm 5 \text{ cm}$ angenommen wird.
- Fehler Bildpunkte
Durch eine unzureichende Kalibrierung der Kamera, Eigenbewegung des Lokalisierungsobjektes, schlechte Beleuchtung und daraus resultierendem mangelhaftem Signal-Rausch-Verhältnis kann es zu Abbildungsfehlern auf dem FOTOSENSOR kommen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Auch eine geringe Genauigkeit des Algorithmus zur Erkennung des Markers im Bild kann zu einer fehlerhaften Bestimmung der Bildpunkt-Koordinaten führen. Auf Basis derer wird schließlich die Pose in Korrelation mit den zugehörigen Objektpunkten geschätzt. Um diese Ungenauigkeiten in der weiteren Auswahl eines Verfahrens zur Posenschätzung zu berücksichtigen, wird ein zufallsbedingter Positionsfehler von $d_B = \pm 2 \text{ Pixel}$ in den synthetischen Bildern eingeführt, der für jeden einzelnen im Bild sichtbaren Marker zutrifft.
- Fehler Parallelität
Die Ursachen für eine fehlerhafte Ausrichtung der Sensorfläche zum Marker können vielfältig sein. Im Betrieb kann die Ausrichtung der Kamera unbeabsichtigte Änderungen z. B. durch Stöße und weitere Gewalteinwirkung

erfahren. Deswegen ist bei der Wahl des Anbringungsortes und der Befestigungsart grundsätzlich auf entsprechenden Schutz der Kamera Wert zu legen. Durch Sorgfalt in der Anbringung und der Inbetriebnahme des Systems kann die Fehlerwahrscheinlichkeit somit minimiert werden. Dies betrifft ebenso die Absicherung einer korrekten Ausrichtung der Marker z. B. bei der Anbringung an der Hallendecke. In der weiteren Betrachtung wird ein zufallsbedingter Fehler in der Ausrichtung der Kamera von $\omega_P = \pm 5^\circ$ berücksichtigt, der Fälle abdeckt in denen die angesprochene Sorgfalt in der Anbringung und dem Betrieb nicht ausreichend erfolgt.

Eingrenzung des Lösungsraums durch synthetische Versuche

Entsprechend dem Versuchsplan in Tabelle 8-9 wurden synthetische Versuche durchgeführt, in denen die Positions- und die Rotationsabweichung für die 20 Kombinationen aller weiter zu betrachtenden Posenschätzverfahren und zur Auswahl stehenden Optimierungsstrategien ermittelt wurden [FML-2013c].

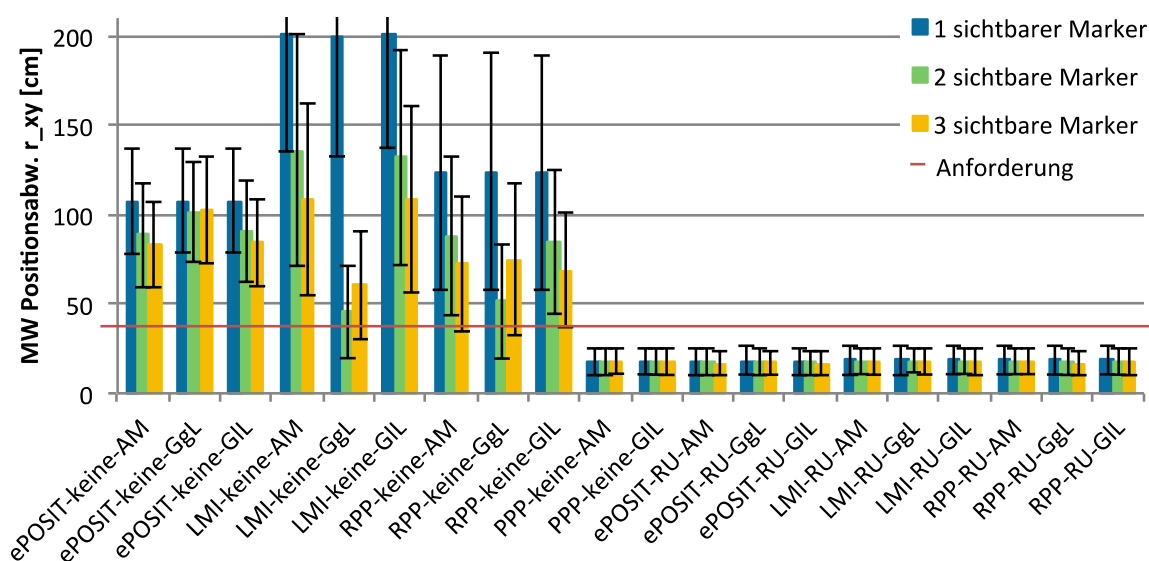


Abbildung 6-12: Mittlere Positionsabweichung $\overline{r_{xy}^n}$ zzgl. Standardabweichung σ_{xy}^n für eine variierende Anzahl sichtbarer Marker

Durch Abbildung 6-12 ist bereits direkt ersichtlich, dass sich alle Verfahrenskombinationen, die u.a. auf eine Rotationsunterdrückung aufbauen, absetzen. Ferner ist die mittlere Positionsabweichung bei diesen Verfahrenskombinationen mit $\overline{r_{xy}^n} \approx 20 \text{ cm}$ deutlich besser als die geforderte Lokalisierungsgenauigkeit von $r_{xy}^n \leq |40 \text{ cm}|$.

Ebenso ist zu beobachten, dass im Mittel für diese Verfahren keine signifikante Verbesserung der Positionsgenauigkeit mit einer größeren Anzahl im Sichtfeld sichtbarer Marker erreicht werden kann.

Allerdings ist anhand der Betrachtung der maximal erreichten Positionsabweichung hinzuzufügen (vgl. Abbildung 6-13), dass mit wachsender Anzahl sichtbarer Marker die Lokalisierungsgenauigkeit stabiler wird bzw. sich maximal gemessene Positionsabweichungen reduzieren. Für Verfahrenskombinationen mit Rotationsunterdrückung ist aber, mit Ausnahme des LMI-Verfahrens, hier eine in der Tendenz eher gleichmäßige Lokalisierungsleistung bei variierender Anzahl sichtbarer Marker zu erkennen. Die jeweils gewählte Multimarkerstrategie hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit. Tendenziell setzen sich die Verfahren basierend auf einer lokalen (GIL) oder globalen (GgL) Gewichtung der verschiedenen gemessenen Positionen in einem Bild von dem Verfahren einer einfachen Bildung des arithmetischen Mittels (AM) positiv ab.

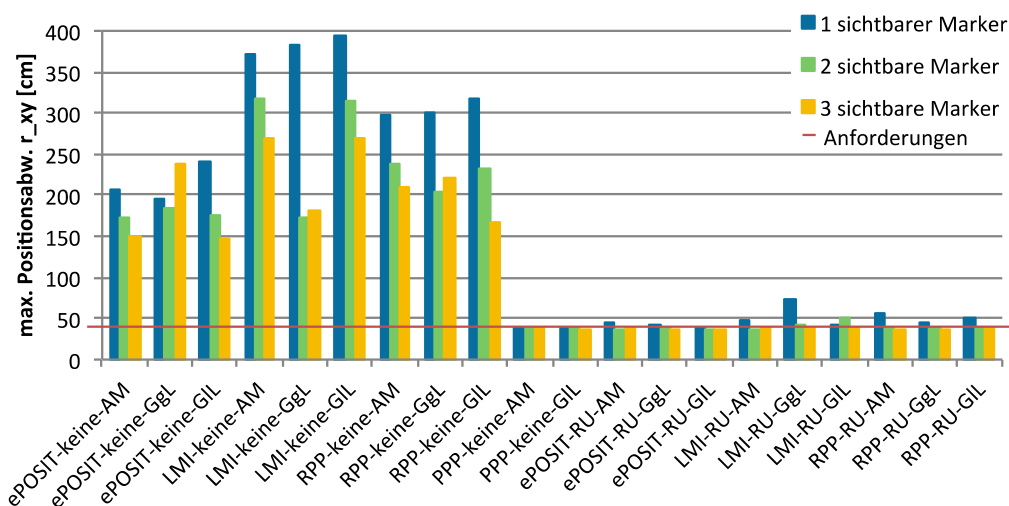


Abbildung 6-13: Maximale Positionsabweichung r_{xy}^n für eine variierende Anzahl sichtbarer Marker

Die Anwendung Gabelstaplerlokalisierung ist bekanntlich dadurch geprägt, dass über die Fahrstrecke grundsätzlich eine variierende Anzahl an gleichzeitig sichtbaren Markern zu erwarten ist, auch wenn eine Layoutplanung der anzubringenden Marker erfolgt ist. Entsprechend den bisherigen Ergebnissen kann allerdings in Tendenz dennoch mit einer konstanten Positionsgenauigkeit gerechnet werden. Hierfür ist die Anwendung der Unterdrückung von Rotationen um die x- und y-Achse, bzw. der die Fahrebene aufspannenden Achsen, zwingend.

Dabei ist zu hinterfragen, inwiefern diese Ergebnisse wesentlich von der hier erfolgten Fehlermodellierung abhängig sind. Abbildung 6-14 gibt Auskunft über die verbleibende mittlere Positionsabweichung, sofern einer der drei betrachteten Fehler jeweils aus der Modellierung herausfällt. Demnach ist der Einfluss der fehlenden Parallelität zwischen Marker und Fotosensor signifikant. Besteht eine optimale Ausrichtung, so reduziert sich die mittlere Positionsabweichung von $\overline{r_{xy}^n} \approx 20 \text{ cm}$ auf ein Niveau von $\overline{r_{xy}^n} \approx 3 \text{ cm}$. Hierbei ist das Verhalten aller Verfahrenskombinationen in der Tendenz wieder einheitlich. Demgegenüber führt die Nicht-Betrachtung eines Bildpunkt- oder Objektpunktfehlers nur zu einer moderaten Verbesserung der Positionsgenauigkeit auf ein Niveau von $\overline{r_{xy}^n} \approx 17 \text{ cm}$.

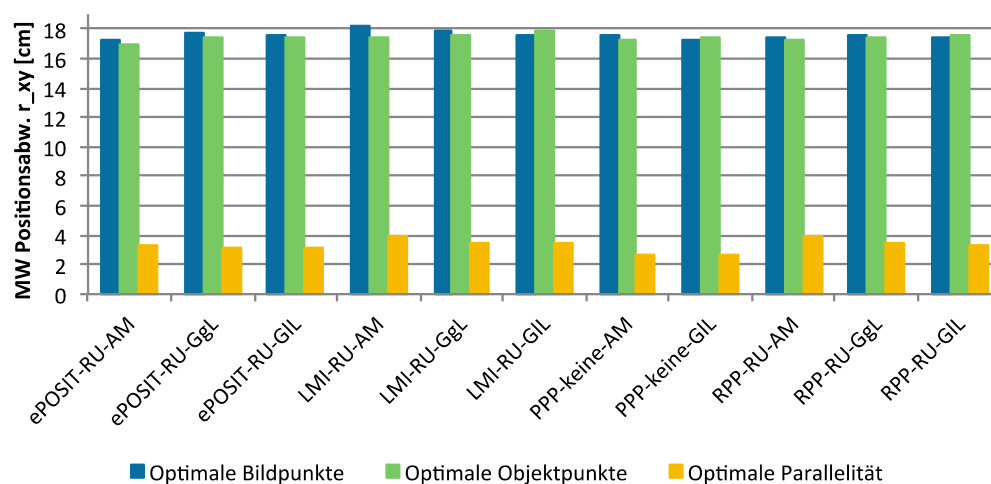


Abbildung 6-14: Mittlere Positionsabweichung $\overline{r_{xy}^n}$ für die Veränderung der Fehlermodellierung

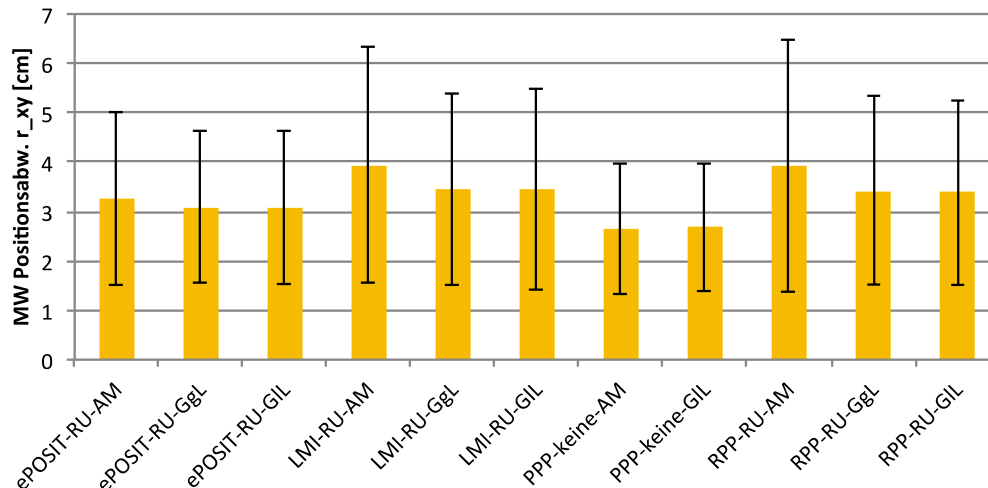


Abbildung 6-15: Mittlere Positionsabweichung \bar{r}_{xy}^n zzgl. Standardabweichung σ_{xy}^n bei optimaler Parallelität

Abbildung 6-15, welche einen Ausschnitt der Abbildung 6-14 darstellt, bestätigt hierbei die Beobachtung aus der Positionsbestimmung: Multimarkerstrategien mit einer lokalen oder globalen Gewichtung der im Bild gleichzeitig bestimmten Posen zeigen in der Tendenz eine leicht bessere Lokalisierungsleistung als die arithmetische Mittelwertbildung. Allerdings ist über alle Analysen auch eine in der Tendenz bessere Lokalisierungsleistung der Posenschätzverfahren ePOSIT und PPP zu erkennen. Insbesondere in Abbildung 6-15 ist hier die eindrucksvolle mittlere Lokalisierungsgenauigkeit von $\bar{r}_{xy}^n(ePosit - RU - GIL) \approx 3,08 \text{ cm}$ und $\bar{r}_{xy}^n(PPP - keine - GIL) \approx 2,69 \text{ cm}$ zu beobachten.

Die entsprechenden Verfahrenskombinationen ePOSIT-RU-GIL und PPP-keine-GIL stellen ferner für die Lagebestimmung eine gute Verfahrensauswahl dar, da hier für das PPP-Verfahren eine maximal gute Lagebestimmung erreicht wird (vgl. Abbildung 6-16).

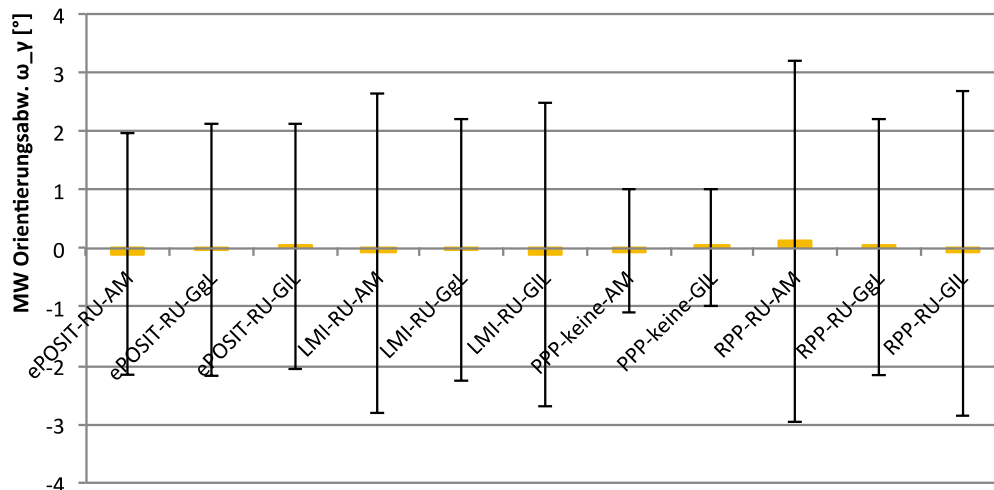


Abbildung 6-16: Mittlere Orientierungsabweichung $\bar{\omega}_Y^n$ zzgl. Standardabweichung σ_Y^n bei optimaler Parallelität

Eine Eingrenzung auf die Verfahrenskombination PPP-keine-GIL erfolgt allerdings nicht, da durch die Bedingung der Zwangsparallelität auch erhöhte Anforderungen an die Umgebungsbedingungen und Sensoranbringung am Lokalisierungsobjekt bestehen. In der Eigenschaftsabsicherung im folgenden Kapitel sind die beiden Verfahrenskombinationen ePOSIT-RU-GIL und PPP-keine-GIL für die Posenschätzung gegenüber zu stellen. Somit sind sie in Praxisversuchen für den realen Einsatz zu evaluieren.

Aus dieser Diskussion ist nicht nur eine Einschränkung des Lösungsraums für die Posenschätzung in der Location Engine zu entnehmen. In der Konsequenz der an dieser Stelle gezeigten Ergebnisse ist beim Aufbau eines kamerabasierten Lokalisierungssystems ferner besonderes Augenmerk auf eine parallele Ausrichtung des Location Sensors und des Tags zu legen. Geringfügige Fehler in der Einmessung des Markers oder auch in der Bilderfassung des Markers können demgegenüber begrenzt in Kauf genommen werden (vgl. Abbildung 6-14).

Festlegung für den Systementwurf

- Posenschätzverfahren ePOSIT oder PPP mit
- Rotationsunterdrückung für Drehungen um die x- und y-Achse, sowie
- Multimarker-Auswertung unter der Gewichtung der Lage des Markers

6.6 Erweiterung der Zustandserfassung mittels Funktionsintegration

Es besteht das Ziel neben der Bestimmung der Pose des Gabelstaplers weitere Zustände des Fördermittels und damit des Transportprozesses zu erfassen. Für die exemplarische Umsetzung wird die Hubhöhenbestimmung gewählt, da sie eine weitere wichtige Zustandsinformation ist um z. B. eine automatische Lagerplatzverwaltung zu realisieren (vgl. Abschnitt 3.2). Das durch eine Kamera gelieferte Bild ist somit hinsichtlich der Pose des Fahrzeuges und hinsichtlich der Hubhöhe der Gabelzinke zu analysieren.

Um das mit Kapitel 5 für die Lokalisierung formulierte Anforderungsniveau auch für eine Hubhöhen-Bestimmung zu erreichen, muss berücksichtigt werden, dass die Gabelzinkenspitze bei unverändertem Hub dennoch eine Höhenänderung erfährt, wenn der Hubmast geneigt wird (vgl. Abbildung 6-17). Gerade während der Ein- und Auslagerung von Gütern am Lagerplatz ist die Veränderung der Hubmastneigung jedoch erforderlich. In der Annahme einer bei Gabelstaplern üblichen maximalen Hubmastneigung von $\Delta\beta_{N\ max.} = \pm 6^\circ$ [JUN-2008] aus der Senkrechten ergibt sich eine Hubhöhenveränderung an der Gabelzinkenspitze von $\Delta h_{GZ\text{-}spitze} \approx \pm 12\ cm$. Die Gabelzinkenspitze ist für die Hubhöhenbestimmung der relevante Bezugspunkt, da sie die Höhe kennzeichnet auf der das Gut aufgenommen oder abgestellt wird. Somit ergibt sich im Rahmen der Hubhöhenbestimmung die Notwendigkeit zur zusätzlichen Bestimmung der Hubmastneigung.

Da das bisherige Konzept eine starre Anbringung der Kamera am Hubmast vorsieht, ist von der Hubmastneigung auch die Lokalisierungsfunktion betroffen (vgl. Abbildung 6-17). Durch die Hubmastneigung befindet sich die Kamera bzw. der Fotosensor nicht zwangsläufig in einer parallelen Ausrichtung. In der Realität erfährt die Gabelzinkenspitze somit nicht nur in der Hubhöhe, sondern auch in der xy -Ebene abhängig von der jeweiligen Hubmastneigung eine Verschiebung Δs_{xy}^n (vgl. Abbildung 6-17). Für eine Hubhöhe von $h^b = 100\ cm$ ist mit einer Ortsänderung der Gabelzinke von $\Delta s_{xy}^n \approx 17\ cm$ zu rechnen.

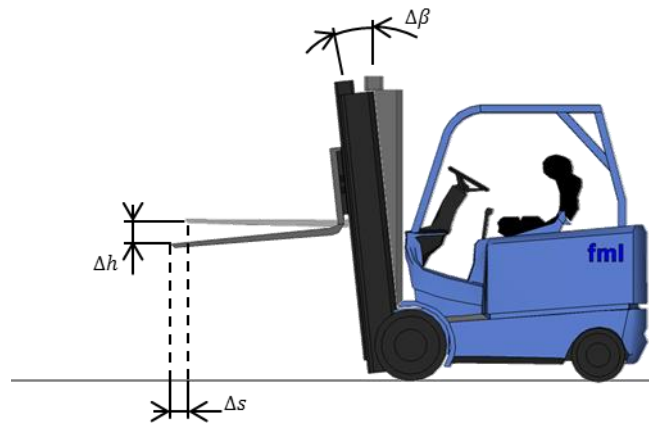


Abbildung 6-17: Schematische Darstellung zur Hubmastneigung und resultierenden Hubhöhenänderung

Damit ergibt sich aufgrund der gestellten Genauigkeitsanforderungen an die Hubhöhe und Lokalisierung der Bedarf für die Erfassung einer weiteren Zustandsfunktion, der Hubmastneigung, unter dem Grundsatz der Funktionsintegration. Im weiteren Verlauf wird zuerst auf die Hubhöhen-Bestimmung eingegangen und anschließend zur Unterstützung dieser ein Systementwurf für die Hubmastneigungs-Bestimmung getätigt.

6.6.1 Bestimmung der Hubhöhe

Für die Detektion der Hubhöhe stellt sich, wie bei der Bestimmung der Fahrzeugpose im Rahmen der Lokalisierung, die Frage nach geeigneten Merkmalen für die Bildanalyse. Es eignen sich hier grundsätzlich ebenso natürliche wie künstliche Merkmale (vgl. Abschnitt 6.3). Als natürliche Merkmale stehen im Rahmen der 2D-Bilderfassung Geometrien und Texturen zur Auswahl. Als Geometrien bieten sich im vorhandenen Sichtfeld die Konturen der Gabelzinke und des Gabelträgers an, wobei als Textur lediglich die Oberfläche der Gabelzinke einen Anhaltspunkt für die Hubhöhe bieten kann. In allen Fällen erfolgt die Hubhöhenbestimmung durch eine Betrachtung der Abbildungsgröße in Relation zur realen Objektgröße des betrachteten Merkmals um auf einen metrischen Abstand schließen zu können. D. h. ein umso größeres optisches Merkmal bietet eine umso sicherere Detektion und höhere Genauigkeit, besonders in größeren Hubhöhen. Alternativ lässt sich dieser Zusammenhang durch die Anpassung der optischen Auflösung entschärfen. Als künstliches Merkmal ist gerade unter Synergie-Betrachtungen mit der Lokalisierung auf Referenzmarker zu setzen. Es ist zu erwarten, dass Teilfunktionen der Bildverarbeitung für die Hubhöhen-Bestimmung und Lokalisierung somit gemeinsam ausgeführt werden können. Diese Synergien betreffen nicht alleine den Implementie-

rungsaufwand, sondern gerade auch die operative Prozesszeit in der rechnergestützten Bildauswertung, so z. B. die Kandidatenbildung und Markererkennung (vgl. Abbildung 6-7).

Tabelle 6-5: Bewertung möglicher Merkmale zur Hubhöhen-Bestimmung

	Bewertung	Fazit
Natürliches Merkmal – Geometrien	<ul style="list-style-type: none"> • Beladung der Gabelzinke bedingt Verdeckungen der Konturen. • Optische Eigenschaften der beladungsbedingten Verdeckung der Gabelzinkenkontur ist abhängig vom jeweiligen LHM. • Sicht auf die Gabelzinkenkontur erfordert für geringe Hubhöhen ein sehr weitwinkliges Objektiv mit den spezifischen Nachteilen in der Abbildungsqualität (vgl. Abschnitt 6.4.1). • Gabelträger ist nur ein sehr schwaches Merkmal, da er seine Flächenausbreitung senkrecht zur optischen Achse hat und somit nur geringfügige Konturen im Bild erkannt werden können. 	0 Geringe Eignung
Natürliches Merkmal – Texturen	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenstruktur der Gabelzinke, insbesondere der Unterseite, erfährt durch Abrieb fortwährende Veränderung, sodass Merkmale keine zeitliche Konstanz haben. • Texturen am Gabelträger unterliegen ansonsten gleichen Einschränkungen wie Geometrien als natürliches Merkmal. 	- Nicht geeignet
Künstliches Merkmal – Referenzmarker	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlich ist jedes zeitstabile, flächige Merkmal mit definierten Abmessungen möglich, so auch ein Referenzmarker. • Synergien in der Bildverarbeitung mit der Lokalisierung bestehen, so z. B. in den Bildvorverarbeitung, Teilfunktionen Kandidatenbildung, Markererkennung. • Eine Anbringung des künstlichen Merkmals erfordert entsprechenden Freiraum im Bereich des Hubmastes und Gabelträgers. • Gefahr der Beschädigung des Merkmals im operativen Transportprozess ist zu reduzieren, indem z. B. die Anbringung innerhalb der Fahrzeugkonturen vorgesehen wird. 	+ Hohe Eignung

Mit der Einschränkung, dass auf eine geeignete Anbringung des Referenzmarkers am Gabelträger zu achten ist, wird somit das Konzept zur Hubhöhenbestimmung mittels künstlicher Merkmale für die weitere Umsetzung gewählt (vgl. Tabelle 6-5). Demnach ergeben sich für die Algorithmen der Hubhöhen-Bestimmung zwei Ansätze. Zum einen kann auf bereits für die Lokalisierung aufgezeigte Posen-schätzverfahren zurückgegriffen werden, wobei nunmehr die Tiefeninformation für die Hubhöhenbestimmung relevant ist. Da hier allerdings die wesentliche Schwäche eines 2D-Bildes liegt und somit mit höheren Ungenauigkeiten in der Hubhöhen-Bestimmung als in der Posenbestimmung der bisherigen Lokalisierung auszugehen

ist, wird ein weiterer Ansatz betrachtet und favorisiert: Mittels Analyse und Vergleich des Markerumfangs bzw. Perimeter der Abbildung gegenüber den realen Abmessung besteht ein starkes Merkmal zur Bestimmung der Hubhöhe, auf der sich der betrachtete Marker befindet. Im Kontext der im Posenschätzverfahren eingeführten Unterscheidung zwischen direkten und iterativen Verfahren ist bei der Perimeteranalyse von einem direkten Verfahren zu sprechen.

Um den im Bild gemessenen Markerumfang d_m zu bestimmen, werden im Rahmen der Kandidatenbildung durch eine Kantendetektion (vgl. Abschnitt 6.5.1) die vier Eckpunkte m_i des Markers bestimmt. Der Markerumfang d_m entspricht schließlich der Summe der Punktabstände $\overline{m_i m_j}$. Eine in seinen Parametern a_1, a_2 experimentell zu bestimmende Exponentialfunktion drückt schließlich den Zusammenhang zwischen der Hubhöhe h und dem gemessenen Markerumfang im Bild d_m aus.

$$d_m = \sum_{i,j=1}^4 m_i m_j \quad (6-23)$$

$$d_m = a_1 e^{a_2 h^n} \quad (6-24)$$

Durch die Betrachtung des gesamten Umfangs der Markerabbildung gegenüber der Betrachtung einer einzelnen Markerseite ergibt sich der Vorteil, dass Pixelabweichungen mit einem geringeren Gewicht in das Gesamtergebnis eingehen. Somit wird eine geringere Abhängigkeit von Abbildungsfehlern erreicht. Grundsätzlich steigt jedoch der negative Einfluss eines Abbildungsfehlers mit wachsender Hubhöhe, sodass das Ausmaß dieser Wirkung in der Eigenschaftsabsicherung im Abschnitt 7.2 weiter einzugrenzen ist.

6.6.2 Bestimmung der Hubmastneigung

In der Bestimmung der Hubmastneigung wird der für die Lokalisierung und Hubhöhenenerkennung gewählte Ansatz zur markerbasierten Erkennung fortgeführt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, durch die im Bild erfasste Perspektive des Hubhöhen-Markers Rückschlüsse auf seine räumliche Lage anzustellen. Hierzu ist es allerdings erforderlich, dass die Kamera nicht starr mit dem Hubmast verbunden ist und somit selbst die Hubmastneigung nicht erfährt. Aus Gründen der Minimierung des Integrationsaufwandes für eine kosteneffiziente Lösung zur Zustandserfassung am Gabelstapler wird eine starre Anbringung favorisiert. Ansonsten wären für den Fall einer Entkopplung der Kamera von der Hubmastneigung aufwendige Vorkehrungen für eine platzsparende kardanische Lagerung zu tätigen. Diese müsste zudem

den hohen Stoß- und Vibrationsbelastungen des Transportprozesses standhalten und wäre somit sehr robust zu gestalten.

In der Variante der starren Befestigung der Kamera erfährt diese relativ zum Hubhöhenmarker keine Rotation. Deshalb ist für die Rotationsbestimmung eine zusätzliche Referenzmarkierung im Sichtfeld anzubringen, die keine relevante Sichtfeldeinschränkung für die Hubhöhen-Bestimmung und Lokalisierung ergibt und zusätzlich unabhängig von der Hubmastneigung ist. Wie in Abbildung 6-18 aufgezeigt, besteht hierzu durch eine Befestigung des Rotationsmarkers an der Frontseite der Fahrerschuttkabine die Möglichkeit. Somit lässt sich die Rotation des Hubmastes aus einer räumlichen Relativbetrachtung zwischen Rotations- und Hubhöhen-Marker im Bild bestimmen.

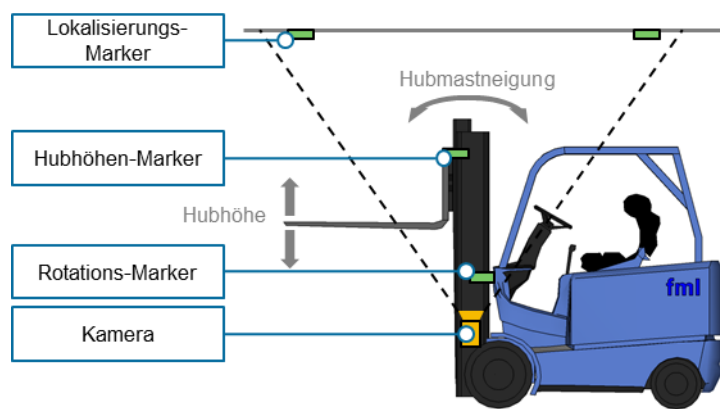


Abbildung 6-18: Schematische Darstellung des diskutierten Anbringungskonzeptes erweitert um die Hubhöhen-Bestimmung

6.6.3 Zielkonflikte in der Abstimmung des Sensors

Für die Parametrisierung des Sensors der Kamera ergeben sich durch die gleichzeitige Betrachtung gleichartiger Marker in unterschiedlichen räumlichen Bereichen sowie bei unterschiedlichen Relativbewegungen der Marker im Bild eine Vielzahl von Zielkonflikten. In Tabelle 6-6 erfolgt eine Bewertung der jeweiligen Zielkonflikte sowie die Darstellung einzelner, sich ergänzender Handlungsempfehlungen für den Systementwurf. Entsprechende Handlungsempfehlungen zielen insbesondere auf die Wahl der physischen Abmessungen des Markers und damit des Nyquistfaktors k_{NY} in Zusammenhang mit der optischen Auflösung ab. Ihnen liegt die grundsätzliche Erkenntnis zugrunde, dass eine Markererkenntnis und -identifikation mit höherer Überabtastung erleichtert wird, auch wenn die Markererfassung unter zu geringer Belichtung oder Schärfe leidet (vgl. Abschnitt 6.4). Darüber hinaus ist eine adaptive

schwellewertbasierte Auflösung des Referenzmarkers erforderlich, wie bereits im Systementwurf vorgesehen (vgl. Abschnitt 6.5.1).

Tabelle 6-6: Bewertung von Zielkonflikten aufgrund der Funktionsintegration im Sensor Kamera

	Bewertung	Handlungsempfehlung
Schärfebereich/ Fokus	<ul style="list-style-type: none"> • Lokalisierungs- und Rotationsmarker befinden sich in starrer Anbringung im Nah- und Fernbereich der Kamera. Eine Fokussierung kann lediglich auf einen der beiden Marker optimal erfolgen. • Der Hubhöhenmarker erfährt im Bild in die Bildtiefenrichtung eine fortwährende Bewegung. Eine Fokussierung müsste automatisch adaptiv erfolgen. Die für die Lokalisierung erfolgte Wahl einer kosteneffizienten und robusten manuellen Fokussierung ermöglicht dies nicht. • Bei einer entsprechend hohen Überabtastung des Markers, d. h. entsprechend hohem Nyquistfaktor, ist es dennoch möglich den Hubhöhen-Marker zu detektieren und zu identifizieren. • Eine Abwägung zur Wahl des Fokusbereichs findet sich in Anhang F. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maximierung des Nyquistfaktors für alle Marker • Fokussierung auf den Fernbereich
Blendenzahl/ Belichtungszeit	<ul style="list-style-type: none"> • Im Nah- und Fernbereich können unterschiedliche Helligkeitsbedingungen herrschen. Die Adaption der Belichtungszeit an einen der beiden Bereiche durch die Wahl, der entsprechenden Region-of-Interest (ROI) stellt somit kein Gesamtoptimum dar. • Eine Abwägung zur Wahl der ROI findet sich in Anhang F. 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimale Belichtungszeit-anpassung für den Hubhöhenmarker • Nyquistfaktor des Rotationsmarkers ist größer als der Nyquistfaktor des Hubhöhenmarkers für maximale Hubhöhe $k_{NY Rot} > k_{NY Max.hub}$
Öffnungswinkel	<ul style="list-style-type: none"> • Der Hubmast ergibt bei der Wahl eines moderaten Weitwinkelobjektivs (vgl. Abschnitt 6.4.1) eine signifikante Sichteinschränkung auf den Deckenbereich und somit die Lokalisierungsmarker. • Durch eine seitliche Neigung der Kamera und damit des FoV kann die Abschattung des Hubmastes reduziert werden. 	<ul style="list-style-type: none"> • Initiale, fixierte Neigung α_0^b des Kamerasensors aus der realen Parallelität zum Lokalisierungsmarker, die virtuell im Rahmen der Bildverarbeitung durch eine Koordinatentransformation bereinigt wird

	Bewertung	Handlungsempfehlung
Auflösung	<ul style="list-style-type: none"> Durch die Auflösung und aus der Stabilität der Markererkennung resultierende Anforderungen an die zu erreichende Überabtastung des jeweiligen Markers (Nyquistfaktor k_{NY}) ergeben sich erforderliche reale Abmessungen der Marker. Im Bereich des Hubmastes besteht allerdings nur ein begrenztes Platzangebot für die Anbringung von Markern, welcher bei der Abstimmung der Markergröße mit der Überabtastung und Auflösung berücksichtigt werden muss. Es ist erforderlich, dass insbesondere bei rückwärtiger Hubmastneigung ein berührungsloses Passieren von Hubhöhen- und Rotationsmarker bei variierenden Hubhöhen möglich ist. 	<ul style="list-style-type: none"> Maximierung der realen Abmessungen der Rotations- und Hubhöhenmarker bei Abstimmung auf den Engpass rückwärtige Hubmastneigung

6.6.4 Erweiterung der Bildverarbeitung

Durch den dargestellten Systementwurf für die weitere Zustandserfassung der Hubhöhe und Hubmastneigung ergibt sich eine Erweiterung der in Abbildung 6-7 aufgezeigten Teilaufgaben der Bildverarbeitung. Die Bildvorverarbeitung, Kandidatenbildung und Markererkennung sind neben der Lokalisierung ebenso für die Hubhöhen- und Hubmastneigung erforderlich, so dass das erfasste Bild für alle drei Zustandserfassungen gemeinsam verarbeitet werden kann (vgl. Abbildung 6-19).

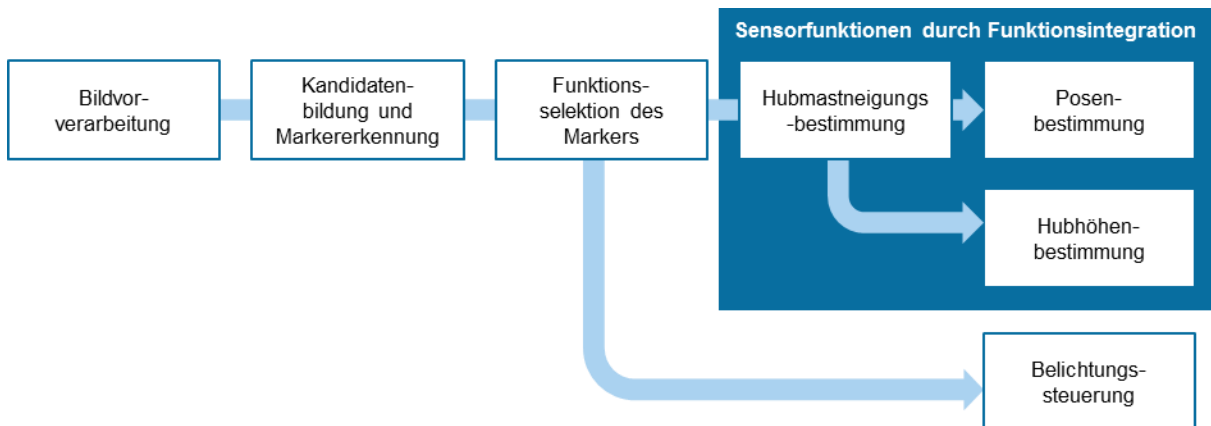


Abbildung 6-19: Schematischer Überblick zu Teilfunktionen der implementierten Location Engine

Vor der Ausführung der eigentlichen Funktion der Zustandserfassung wird eine Selektierung der weiteren Bildverarbeitung in Abhängigkeit der Marker-ID und der damit vorbestimmten Funktion durchgeführt. In einer Datenbank sind für die jeweilige Funktion der Lokalisierung, der Hubhöhen- oder Hubmastneigungsbestimmung die jeweiligen Marker mitsamt ihren physischen Abmessungen und ggf. zugehörigen Objektpunkten abgespeichert, auf welche im Rahmen der Selektierung zurückgegriffen wird.

Festlegung für den Systementwurf

- Bestimmung der Hubhöhe und Hubmastneigung mittels anzubringenden Referenzmarkern
- Direkte Berechnung der Hubhöhe durch Perimeteranalyse
- Direkte Berechnung der Hubmastneigung durch geometrische Auswertung
- Abstimmung der physischen Markerabmessungen unter dem Grundsatz der Maximierung auf den räumlichen Engpass der rückwärtigen Hubmastneigung – bei der Wahl eines höheren Nyquistfaktors $k_{NY\ rot}$ für den Rotationsmarker
- Umsetzung einer Belichtungszeitanpassung optimiert für den Hubhöhenmarker

7 Nachweis der technischen Machbarkeit

Für die Umsetzung des im Systementwurf aufgestellten Konzeptes (siehe Kapitel 6) stand die Versuchshalle des *Lehrstuhls fml* mitsamt einem Dreirad-Elektro-Gegengewichtsstapler der *Jungheinrich AG* zur Verfügung. Die Detaillierung des Systementwurfs erfolgt in diesem Kapitel somit hinsichtlich der dortigen örtlichen Gegebenheiten. Die Eigenschaftsabsicherung wurde anhand von synthetischen und praxisnahen Versuchen durchgeführt, wobei Erstere im Labor und Letztere in der im Folgenden beschriebenen Einsatzumgebung am *Lehrstuhl fml* durchgeführt wurden.

Die Versuchshalle des *Lehrstuhls fml* umfasst eine Fläche von ca. 1.000 m^2 , wobei im relevanten Bereich eine Deckenhöhe²¹ von 12 m vorherrscht. Abbildung 7-1 gibt hierzu einen Überblick und kennzeichnet den Lokalisierungsbereich. Ferner werden in dieser Abbildung relevante Orte räumlich eingeordnet, auf die in weiteren Untersuchungen Bezug genommen wird. Ergänzend hierzu findet sich in Tabelle 7-1 eine Beschreibung der Bezugsorte, welche die Umgebungsbedingungen beinhaltet. Diese sind zwischen den gekennzeichneten Orten in Teilen unterschiedlich ausgeprägt und für spätere Analysen zur Flexibilität von Bedeutung. So sind z. B. die Lichtverhältnisse in der Halle räumlich heterogen. Sie decken in dieser Form das breite Spektrum der Möglichkeiten einer realen Anwendungsumgebung ab.

Tabelle 7-1: Beschreibung der Umgebungsbedingungen an Bezugsorten

	Ort A	Ort B	Ort C
Natürliches Licht	Gering, Abschattungen durch umgebende Lagertechnik (z. B. dem Shuttle)	Mittel	Hoch, direkte Sonneneinstrahlung auf das Kamerasystem
Künstliches Licht	Mittel	Mittel	Hoch
Bereich der üblichen Lichtintensität [lx] (vgl. [FML-2011c])	< 40	40 bis 240	> 200

²¹ Bezogen auf das Hallendach. Unter dem Hallendach befinden sich tragende Strukturen und Gebäudetechnik.

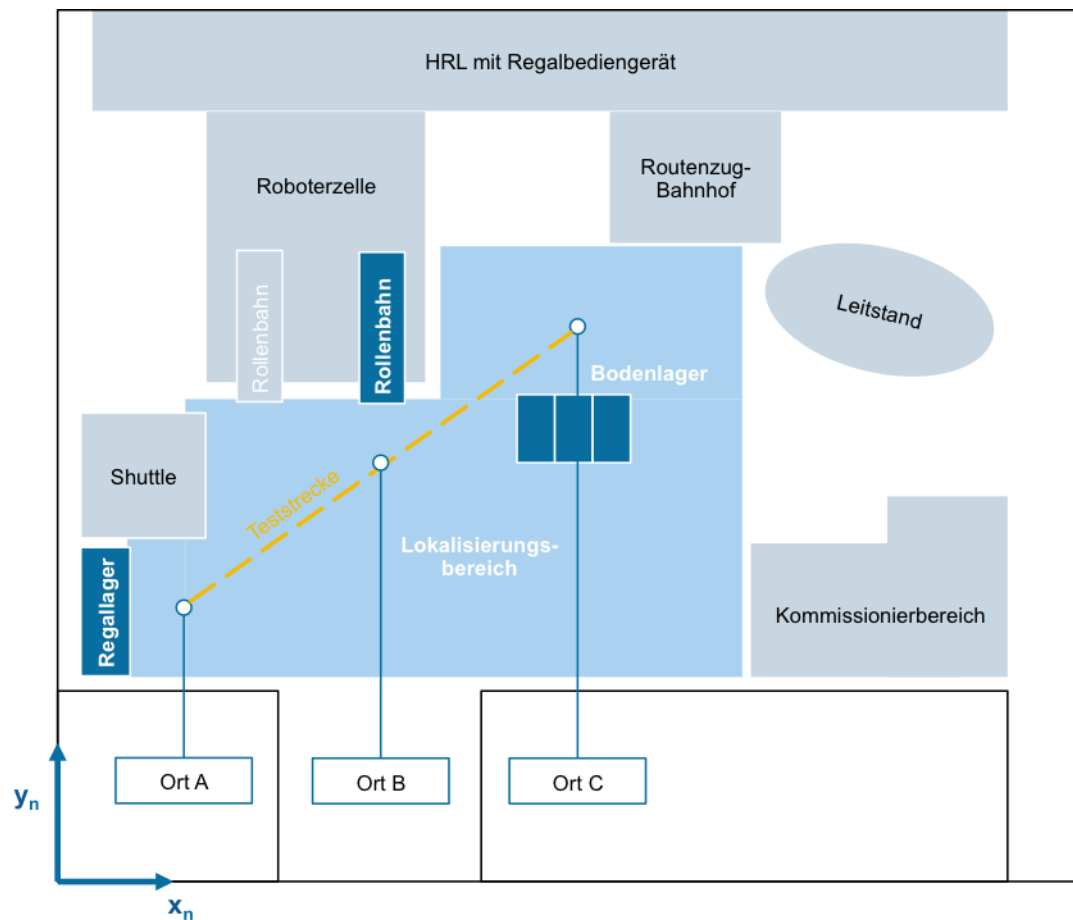


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung Versuchshalle fml

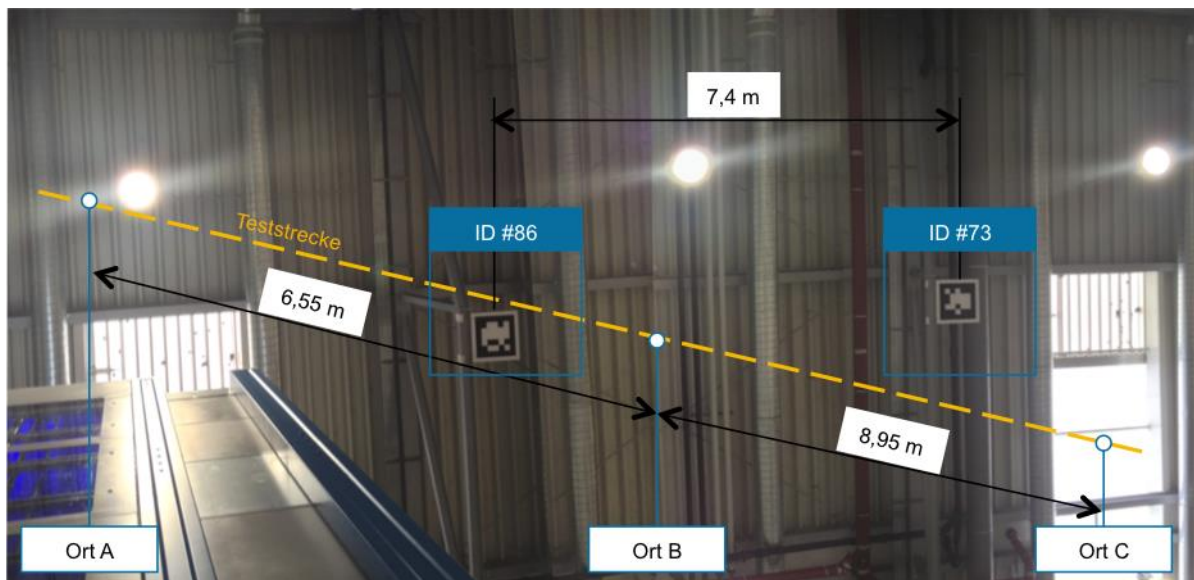


Abbildung 7-2: Räumliche Anordnung von Bezugspunkten und Referenzmarkern in der Versuchshalle

Der in praxisnahen Versuchen verwendete Versuchsgabelstapler ist ein *Jungheinrich EFG-110k*, Baujahr 2003 mit 1t Tragfähigkeit [JUN-2008]. Damit entspricht der

7 Nachweis der technischen Machbarkeit

Versuchsgabelstapler einem Kompaktgabelstapler. Damit verbunden sind stärkere platzbedingte Einschränkungen in der Anbringung der Systemkomponenten, die an größeren Fahrzeugen nicht in der Form bestehen würden. Tabelle 7-2 nennt weitere technische Daten des verwendeten Versuchsgabelstaplers.

Tabelle 7-2: Technische Daten des Versuchsgabelstaplers Jungheinrich EFG-110k [JUN-2008]

Fahrgeschwindigkeit mit/ohne Last [km/h]	Maximale Hubhöhe [cm]	Hubneigung vor/zurück [°]	Hubgeschwindigkeit mit/ohne Last [m/s]	Senkgeschwindigkeit mit/ohne Last [m/s]
12 / 12,5	300	5 / 6	0,28 / 0,5	0,58 / 0,6

Aufgrund anderer Versuchsaufbauten am Versuchsgabelstapler verfügt das Fahrzeug über keine Hydraulik zum seitlichen Verfahren des Gabelträgers. Weitere Einschränkungen gegenüber einem Serienfahrzeug bestehen nicht.



Abbildung 7-3: Vorbereitung des Versuchsstaplers für den Betrieb einer Kamera

Für den Betrieb von Kameras am Fahrzeug wurde dieses entsprechend vorbereitet (vgl. Abbildung 7-3). Hierzu wurden für eine Vielzahl an Anbringungspunkten (Abbildung 7-3 zeigt lediglich den im weiteren Verlauf verwendeten Kameraanbringungspunkt) am Fahrzeug USB3.0- und Ethernet-Gigabit-Datenkabel gelegt. Ferner wurde zusätzlich ein zwölf-adriges Kabel zur Stromversorgung der Kamera und einer optionalen Beleuchtungssteuerung angebracht. Die Stromversorgung wird über die Fahrzeugbatterie gewährleistet. Am Fahrerplatz ist ein dem Stand der Technik

entsprechendes Versuchsnotebook (zu technischen Daten siehe Tabelle 7-3) zur Ausführung von Datenverarbeitungsaufgaben und zur Visualisierung vorhanden.

Tabelle 7-3: Technische Daten des Versuchsnotebooks Fujitsu Lifebook E780 [FUJ-2011]

Prozessor	Taktrate	Anz. Transistoren	Arbeitsspeicher	Betriebssystem
Intel™ i5 M560	2 x 2,67 GHz ²²	382 Millionen	4GB – DDR3	Win7 Enterprise 64-bit

7.1 Domänenspezifischer Entwurf und Umsetzung

Im weiteren Verlauf werden die Module Tag, Location Sensor und Location Engine des bestehenden Konzeptes zur optischen, kamerabasierten Lokalisierung des Gabelstaplers für die hier vorgestellte Testumgebung konkretisiert.

7.1.1 Tag

Aufgrund der Nutzung der *Aruco*-Softwarebibliothek werden als Tag Referenzmarker genutzt, die in einem 5 x 5 Schema eine codierte ID enthalten. Zusätzlich werden sie durch einen schwarzen Rahmen gekennzeichnet.

Für die Sensorfunktion Lokalisierung werden 50 x 50 cm große Marker (inkl. Außenrahmen) unter der Hallendecke schwebend in nahezu horizontaler Ausrichtung angebracht (vgl. Abbildung 7-2). Sie können an Deckenquerträgern auf einer Höhe von $h = 10\text{ m}$ angebracht werden, sodass sie in einer Achse in einem Abstand von $d = 7,4\text{ m}$ zueinander hängen (vgl. Abbildung 7-2). Der zugehörige Lokalisierungsbe-
reich umfasst $X \approx 150\text{ m}^2$ (vgl. Abbildung 7-1).

²² Für Bildverarbeitungsaufgaben wurde lediglich ein Prozessor verwendet

Für die Sensorfunktion Hubhöhen-Erkennung werden zwei Marker gewählt. Ein Marker, der am Gabelträger befestigt wird und somit in der Höhe mit dem Gabelhub verfahrbar ist, hat die Abmessungen von $6,5 \times 6,5 \text{ cm}$ (inkl. Außenrahmen). Ein weiterer Marker, der als Referenz für die Bestimmung der Hubmastneigung dient, wird statisch an der Front der Fahrerzelle befestigt (vgl. Abbildung 7-4). Seine Abmessungen betragen $2,5 \times 2,5 \text{ cm}$ (inkl. Außenrahmen).

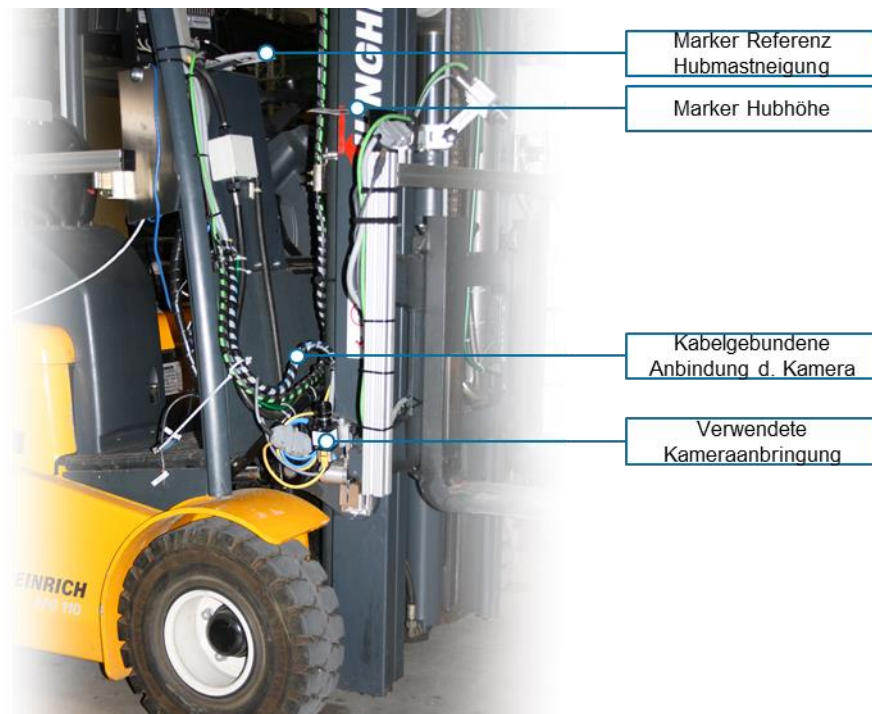


Abbildung 7-4: Anbringung der Marker für die Hubhöhen- und Hubmastneigungsbestimmung

Tabelle 7-4: Daten zu verwendeten Tags bzw. Markern

ID	Abmessungen Marker (inkl. Rahmen) [cm]	Anbringungs- höhe [cm]	Koordinaten x_n, y_n [cm]	Ausricht- ung [°]	Sensorfunktion
#861	50 x 50	1.000	732,35 1.376,05	90	Lokalisierung
#735	50 x 50	1.000	1.460,15 1.378,55	90	Lokalisierung
#551	50 x 50	1.000	2.183,95 1.374,4	90	Lokalisierung
#1008	2,5 x 2,5	k.A.	k.A.	90	Gabelhub/ Rotation
#1002	6,5 x 6,5	k.A.	k.A.	k.A.	Gabelhub/ Hubhöhe

7.1.2 Location Sensor

Unter der Berücksichtigung der im Systementwurf festgelegten Parameter erfolgte eine Marktrecherche mit dem Ziel ein Kamerasystem für die Umsetzung zu bestimmen. Hierbei wurden Experten aus der Bildverarbeitung einbezogen um eine hohe Verarbeitungsqualität der zu wählenden Komponenten zu gewährleisten. Die Entscheidung fiel auf den *Smartek® GC 1392C* Kamera-Body und das *Tamron® 219HB* Objektiv. Technische Daten zum Kamerasystem sind der Tabelle 7-5 und Tabelle 7-6 zu entnehmen.

Tabelle 7-5: Technische Daten des Objektivs Tamron® 219HB

Öffnungswinkel vertikal x horizontal	Schärfebereich	Blendenzahl k_{BZ}	Brennweite f [mm]	Objektivbajonett
59,3 x 45,2	0,26 m bis ∞	1,4 bis 16	8	C-Mount

Tabelle 7-6: Technische Daten des Kamera-Body Smartek® GC1392C

Sensortyp Sensormodell	Sensorgroße ["] Pixelgröße s_{px} [μm]	Bildrate f_B [1/s]	Auflösung [Pixel]	Bildtyp	Schnittstelle/ Interface
CCD Sony® ICX285	2/3 6,45	max. 30	1.392 x 1.040 (1,4 MP)	Colour	IEEE 802.3 Clause 40 / GigE Vision

Mit der Wahl eines Kamerasystems, das lediglich ein Seitenverhältnis der Fotosensorfläche von 2:3 aufweist, weicht dieses vom Ideal im Systementwurf ab. Da auf dem Markt kein alternatives Kamerasystem entsprechend der aufgestellten Anforderung ermittelt werden kann, ist nunmehr in der Wahl des Abstandes zwischen den Tags darauf zu achten, dass dieser anhand der kürzeren Seite der Sensorfläche erfolgt. Somit lautet für die gewählte Konfiguration der maximale Markerabstand $d_{max} = 7,79 \text{ m}$, welcher mit dem in Abschnitt 7.1.1 gewählten Markerabstand $d = 7,4 \text{ m}$ konform ist.

Eine Bewertung diverser Anbringungsmöglichkeiten und -punkte am Versuchsgabelstapler hat ergeben, dass die Montage des Kamerasystems im unteren Bereich des Hubmastes auf einer Höhe von $z_n = 65 \text{ cm}$ zu erfolgen hat (vgl. [GÜN-2014]). Hier ist eine geschützte Anbringung mit ausreichend Platz bei optimaler Sichtachse auf den Gabelträger und die Hallendecke möglich. Hierbei wird die Gefahr der Funktionsbeeinträchtigung durch Verschmutzung vorerst in Kauf genommen. Für eine zukünftige Integration des Systems in einer Produktivanzwendung sind deshalb weitere Optimierungsmaßnahmen, z. B. durch Einhausungen, Reinigungsanweisungen oder

eine softwarebasierte Selbstdiagnose, zu ergreifen. Damit ergeben sich für die Bilderfassung folgende Parameter aus der Anbringungsgeometrie (vgl. Abbildung 6-5):

Tabelle 7-7: Parameter der Bilderfassung abhängig vom gewählten Kamerasystem

	Lokalisierung	Gabelhub/ Hubhöhe	Gabelhub/ Rotation
Marker-ID	#861, #735, #551	#1002	#1008
Anbringungshöhe h^n [cm]	1.000	77 bis 377	132
Gegenstand G_{gesamt} [cm]	50 x 50	6,5 x 6,5	2,5 x 2,5
Gegenstand $G_{Element}$ [cm]	7,143 x 7,143	0,929 x 0,929	0,357 x 0,357
Gegenstandsweite g [cm]	935	0 bis 245	67
Nyquistfaktor k_{NY}	6,9	$\geq 4,7$	6,6

In Tabelle 7-7 ist zu erkennen, dass die aus dem Systementwurf bekannte Forderung nach einer Maximierung des Nyquistfaktors für die Lokalisierungsmarker mit $k_{NY\ lok} = 6,9$ realisiert werden kann. Allerdings wird aufgrund von Platzeinschränkungen am Hubmast bei maximalem Hub für den Hubhöhenmarker lediglich eine Überabtastung mit $k_{NY\ hub} = 4,7$ erreicht. Entsprechend den weiteren Abwägungen in Anhang F wird für den Rotationsmarker ein höherer Nyquistfaktor mit $k_{NY\ rot} = 6,5$ gewählt.

7.1.3 Location Engine

Im IGF-Forschungsprojekt ‚Das Staplerauge‘, das diese Arbeit thematisch begleitet, wurde ein Software-Framework entwickelt [GÜN-2014]. Es stellt eine funktionsorientierte Zusammenführung von softwarebasierten Bildverarbeitungsbibliotheken in einer C++-Implementierung dar, welche u.a. die Open Source Softwarebibliotheken *OpenCV* und *Aruco* umfasst. Unter der Anwendung eines pipe-and-filter Konzeptes wird es ermöglicht, einen kamerabasierten Sensor für vielfältige, parallele Bildanalysen zu verwenden (für Details siehe [JUN-2013]). Unter der Nutzung dieses Software-Frameworks wird entsprechend des Systementwurfs aus Abschnitt 6.6 eine Umsetzung der Location Engine für diese Arbeit realisiert. Im Folgenden werden die relevanten Bildverarbeitungsschritte bzw. deren Filter genauer erläutert. Abbildung

7-5 gibt einen schematischen Überblick über die Filterkette der Bildverarbeitung zur Lokalisierung und Hubhöhenbestimmung.

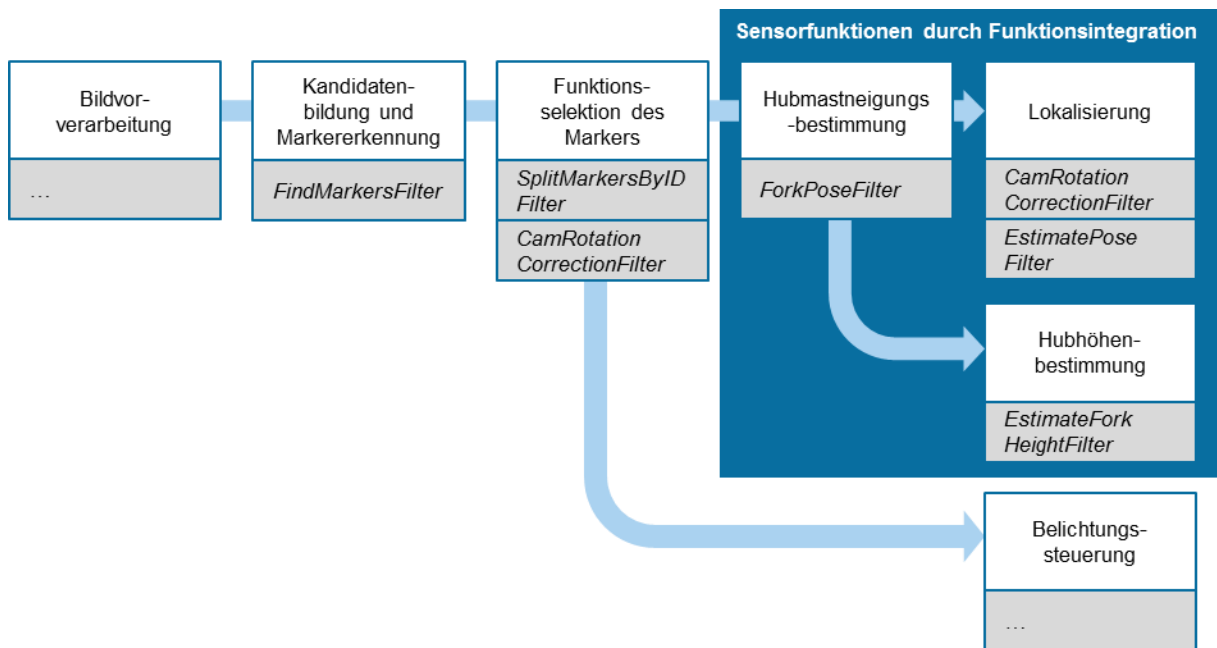


Abbildung 7-5: Implementierte Filterkette zur funktionsintegrierten Posen- und Hubhöhenbestimmung

Kandidatenbildung und Markerererkennung

Der Filter *FindMarkersFilter*() dient dazu mittels Kantenerkennung und schwellwertbasierten Überprüfung des Markerumfangs relevante Markerkandidaten zu bilden. Durch die Nutzung der Homographie werden Markerkandidaten hinsichtlich der Perspektive bereinigt. Markermodelle werden mit den Markerkandidaten durch die Auswertung des Hamming-Codes auf Übereinstimmung geprüft um die Identität der Marker im Bild zu bestimmen.

Funktionsselektion des Markers

In dem Filter *SplitMarkesByIDFilter*() werden Datenbanken geladen, die jeweils für die Lokalisierung, die Hubhöhen- und die Rotationsbestimmung die zugehörige Markeridentität, die Abmessungen und ggf. die Objektpunktkoordinaten beinhalten. Anschließend werden die erkannten Marker entsprechend ihrer ID den drei Markerkategorien zugeordnet und in einem für die Markerkategorie definierten Attributsvektor gespeichert.

Hubhöhen- und Hubmastneigungsbestimmung

Der Filter *CamRotationCorrectionFilter*() dient dazu, eine statische Korrektur der Kameraausrichtung vorzunehmen. Die Kamera ist aus der parallelen Ausrichtung zum Marker abweichend starr um die x_b -Achse geneigt angebracht. Durch diese starre Neigung der Kamera stellt der Hubmast im Sichtfeld nur eine geringe Sichteinschränkung auf die Hallendecke dar. Damit allerdings die Bedingung der Parallelität zwischen Fotosensor und Hubhöhen-Marker gewahrt wird, erfolgt in diesem Filter die Rotation des erfassten Markerbildes um diesen gegebenen Winkel. Im Ergebnis stehen manipulierte Markerbilder, die einer realen parallelen Ausrichtung des Markers zum Fotosensor entsprechen. Weitere Analysen zur Pose basieren auf diesen manipulierten Markerbildern. In dem Funktionsdemonstrator dieser Arbeit lautet der entsprechend berücksichtigte Winkel $\alpha^b = 10,9^\circ$.

In dem Filter *EstimateForkHeightFilter*() wird das Perimeter-Verfahren zur Hubhöhenbestimmung auf der Basis des abgebildeten Markerumfangs umgesetzt. An erster Stelle wird im Markerbild der abgebildete Umfang bestimmt und dieser auf der Basis einer Exponentialfunktion (vgl. Formel (6-24)) nach der Hubhöhe h^n aufgelöst. Die für den realisierten Aufbau experimentell bestimmten und in einer Konfigurationsdatei hinterlegten Faktoren lauten $a_1 = 27.208$ und $a_2 = -0,956$.

Der anschließende *ForkPoseFilter*() berechnet unter der Berücksichtigung der absoluten Anbringungsposition und -lage der Kamera sowie des Rotationsmarkers den zueinander relativen Rotationswinkel um die y-Achse β^b . Hierfür sind a priori Angaben aus einer Konfigurationsdatei einzubeziehen.

Lokalisierung

Für die Lokalisierung ist mit der Hilfe des *CamRotationCorrectionFilter*() die in der Hubhöhenbestimmung erfolgte Bestimmung der α^b –Rotation, um die zuvor als Hubmastneigung bestimmte β^b –Rotation zu ergänzen. Hierdurch wird erreicht, dass die Parallelität zwischen Fotosensor und Marker an der Hallendecke nach erfolgter Hubmastneigung, an der die Kamera körperfest angebracht ist, virtuell wieder hergestellt ist.

Der zentrale Filter *EstimatePoseFilter*() setzt die Posenschätzung unter der Berücksichtigung etwaiger Optimierungsstrategien um. In ihm gekapselt wird der *LocalizorMulti*, der die jeweilige Multimarkerstrategie umsetzt und den *Localizor* aufruft, in dem wiederum die Regulationsstrategien sowie der Funktionsaufruf des

anzuwendenden Posenschätzverfahrens realisiert werden. Für die Hubhöhenbestimmung kann er auch alternativ zum *EstimateForkHeightFilter*() verwendet werden, sofern die Bestimmung der Hubhöhe auf der Basis eines Posenschätzverfahrens aus Abschnitt 6.5.3 erfolgt.

In diesem Vorgehen verwendetes a priori Wissen, wie z. B. Objektpunkte, wird über eine Konfigurationsdatei für die Ausführung der oben skizzierten Filterkette eingeschlossen.

7.2 Eigenschaftsabsicherung und Evaluierung

Eine Evaluierung besteht aus einer fachlich und sachlich geeigneten Bewertung eines Objektes [DUD-2012]. Sie dient dazu, eine Bewertung dahin gehend auszuführen, ob das Objekt seinen vorgesehen Zweck erfüllt. Somit sind für die Evaluierung Kriterien erforderlich, die messbare und begründete Sollwerte umfassen. *Blessing* konkretisiert die Evaluierung anhand verschiedener Bewertungsphasen im Entwicklungsprozess [BLE-2009]. Da diese Evaluierung gleichzeitig das Ziel verfolgt, durch die Bestimmung des Erfüllungsgrades gesetzter Anforderungen eine Eigenschaftsabsicherung der für dieses Lokalisierungssystem postulierten Fähigkeiten zu sorgen, ist nach *Blessing* diese Evaluierung eine deskriptive Studie vom Typ 2 (DS-II) zur Erfolgskontrolle (Success Evaluation) [BLE-2009]. Demgegenüber wird keine Wirkungsanalyse (Application Evaluation) zwischen Systembestandteilen durchgeführt, die eine weitere Form der deskriptiven Studie vom Typ 2 (DS-II) darstellen würde.

Eine Evaluierung besteht aus den drei Schritten Datenerhebung, Datenvorverarbeitung und Datenanalyse [BOR-2005]. Um eine ausreichende Qualität dieser Bewertung zu sichern, ist es in allen Schritten erforderlich auf die Objektivität, Reliabilität und Validität der Datenerhebung zu achten [BOR-2005]. Unter der Objektivität wird verstanden, dass die Datenerhebung (Durchführungsobjektivität), die Datenvorverarbeitung und Datenanalyse (Auswertungs- und Interpretationsobjektivität) unabhängig vom ausführenden Organ sind. Die Reliabilität erfordert eine vollständige Reproduzierbarkeit der erfolgten Datenerhebung, die nur in von unkontrollierten Umgebungseinflüssen abgeschlossenen Labors erfolgen kann. In einem weiter gefassten Verständnis dieser Arbeit umfasst sie ebenso praxisnahe Tests, sofern die Messmethodik einheitlich, nachvollziehbar und dokumentiert ausgeführt wird. Umgebungseinflüsse sollen hier in ihrer grundsätzlichen Ausprägung erfasst werden können. Die Validität erfordert letztlich eine Messung der

richtigen Merkmale, die durch eine aufeinander abgestimmte Messmethodik und entsprechenden Versuchsaufbau erreicht werden kann.

Die Datenerhebung erfolgt in dieser Arbeit in Echtzeit im Experiment bzw. Versuch. Das Experiment ist hierbei eine definierte, methodisch begründete Untersuchung mit dem Ziel der Datenerzeugung. Erforderliche Daten werden im Experiment schließlich mittels Messung oder Zählung eines Merkmalwertes erhoben.

Die Datenvorverarbeitung und Datenanalyse wird nachgelagert und zeitlich unabhängig durchgeführt. In der Datenvorverarbeitung wird die Zielpopulation, d. h. der weiter zu analysierende Datensatz bestimmt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden Situationen, die insbesondere dem Anspruch der Reliabilität genügen, durch eine Datenmarkierung gekennzeichnet. Diese Daten sind als Zielpopulation zu wählen und in der Regel hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung darzustellen. Hierbei ist die grafische Darstellung in einem Histogramm ein geeignetes Hilfsmittel für weitere Tendenz- und Streuungsbetrachtungen im Rahmen der Datenanalyse. Im Histogramm wird der Datensatz auf der Abszisse abhängig vom ermittelten Merkmalswert in Klassen eingeteilt, wobei die Breite der Klassen für den Einzelfall zu definieren ist. Auf der Ordinate wird die relative Häufigkeit angetragen um auch eine eingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Populationen führen zu können.

Das Ziel der Datenanalyse ist es die erreichte Umsetzungsqualität hinsichtlich der gesetzten Anforderungen zu untersuchen und weitere wichtige Handlungsfelder zu identifizieren. Hierzu werden Kennzahlen der deskriptiven Statistik betrachtet, die sich auf eine Beschreibung der Ausprägungen und Häufigkeiten von Merkmalen beschränken. Da nicht der Anspruch besteht, über die betrachtete Datenerhebung hinaus Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit des betrachteten funktionsintegrierenden Lokalisierungssystems zu tätigen, wird von einer weiterführenden explorativen und induktiven Statistik abgesehen.

Die zentralen Kennzahlen der deskriptiven Statistik, die in der weiteren Auswertung der Evaluation Anwendung finden, sind (für Erläuterungen siehe [BOR-2005]):

- Kennzahlen zur zentralen Tendenz
 - Mittelwert (MW)
- Kennzahlen zur Streuung
 - Standardabweichung (σ)
 - Range
 - p-Quantil für eine Wahrscheinlichkeit p

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur im Fall einer Normalverteilung der betrachteten Population die Standardabweichung eine Aussage hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit ermöglicht. Nur in diesem Fall ist die Breite der Normalverteilung mit der Standardabweichung zu beschreiben [BOR-2005]. So entspricht die Teilmenge von $\pm 3\sigma$ um dem Mittelwert dem prozentualen Anteil $p_{pz} = 99,73\%$ aller Messwerte. Liegt die Normalverteilung nicht vor, ist auf die Betrachtung des p-Quantils für entsprechend relevante Wahrscheinlichkeiten p auszuweichen und die Häufigkeitsverteilung grafisch zu betrachten.

7.2.1 Versuchsmethodik

Experimentelle Studien dieser Evaluation beschränken sich auf praxisnahe Versuche am Funktionsdemonstrator (vgl. Abschnitt 7.1), während der Systementwurf bereits mittels synthetischer Untersuchungen fundiert werden konnte (vgl. hierzu [GÜN-2011a]). In Praxisversuchen wird die Zielumgebung des zu testenden Funktionsdemonstrators, hier die Versuchshalle des *Lehrstuhls fml* (vgl. Abschnitt 7.1), genutzt. Aufgrund nicht konstanter, genormter Umgebungsbedingungen ist eine vollständige Versuchsdokumentation erschwert, wie auch die Repetierbarkeit eingeschränkt ist. Dafür herrschen reale Umgebungsbedingungen vor, unter denen das System für den Praxiseinsatz unter relevanten Rahmenbedingungen evaluiert werden kann. Entsprechende variierende Parameter dieser Versuchsdurchführung, die insbesondere nicht vollständig dokumentiert werden können, sind:

- Lichtquelle (künstliches/ natürliches Licht) und Lichtintensität in Abhängigkeit des Ortes (A/ B/ C), der Tageszeit (Tag/ Abend) und weiteren Wetterbedingungen.
- Fahrbewegungsgeschwindigkeit in einem Toleranzbereich von $\Delta v = \pm 2 \frac{km}{h}$.
- Hubmastneigung im Toleranzbereich von $\Delta \beta_N = \pm 6^\circ$, sofern nicht anders angegeben
- Fahrweg in einem seitlichen Toleranzbereich von $\Delta s_{xy} = \pm 0,5 m$ von der vorgegebenen Wegstrecke

Der im dynamischen Versuch zurückgelegte Fahrweg (vgl. Abbildung 7-2), der durch eine am Boden aufgetragene Ideallinie gekennzeichnet ist, erfährt aufgrund der variierenden Ausführungsqualität des Fahrers eine Varianz, die in der Bildung des Soll-Wertes für die Datenanalyse zu berücksichtigen ist. Da der Fahrweg in allen Fällen der Richtung der Ideallinie entspricht (zentrale Vorgabe für die Versuchsausführung), allerdings ein seitlicher Versatz möglich ist, wird für jede Messreihe

bestehend aus einer Fahrt der jeweilige Soll-Fahrweg durch eine lineare Regressionsanalyse bestimmt. Unter der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit (zentrale Vorgabe für die Versuchsausführung) wird damit für jeden Messzeitpunkt der zugehörige Soll-Wert eines Ist-Messwertes bestimmt. In statischen Versuchen, in denen das betrachtete Objekt, der zu lokalisierende Gabelstapler, keine Bewegung (d.h. Ortsveränderung in der xy -Ebene) erfährt, wird der Soll-Wert für die Position, Lage und Hubhöhe jeweils durch die Bildung des Mittelwertes basierend auf den Messdaten bestimmt.

Dieses Vorgehen zur Soll-Wertbestimmung bei dynamischen und statischen Versuchen schwächt die grundsätzliche Aussagekraft der hier erfolgenden Bewertung. Allerdings wird der in der manuellen Versuchsausführung begründeten unzureichenden Reproduzierbarkeit und auch der Ermangelung eines ausreichend genauen und präzisen Referenzlokalisierungssystems in der Auswertung Rechnung getragen.

7.2.2 Versuchsauswertung Lokalisierung

In der Versuchsauswertung findet eine Fokussierung auf die Überprüfung der grundlegenden Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1) statt. Hinsichtlich der Lokalisierungsfunktion ist somit eine Auswertung der zwei translatorischen (x^n, y^n) und des einen rotatorischen Freiheitsgrades (γ^n) erforderlich, wie auch eine kontinuierliche Bestimmung der Pose nachzuweisen ist. Zum Nachweis der Lokisierungsleistung ist nachzuprüfen, ob die Positionsgenauigkeit in der xy^n -Ebene bei einer Präzision von $p_{pz} = 99,73\%$ den gesetzten Anforderungen entspricht. Hierbei wird ein maximaler Fehlerradius von $r_{xy}^n(p_{pz}) \leq |40 \text{ cm}|$ gefordert. Ebenso ist nachzuweisen, dass die Bestimmung der Orientierung des Fahrzeuges nur maximal die Abweichung $\gamma^n(p_{pz}) \leq |45^\circ|$ bei einer Wahrscheinlichkeit von $p_{pz} = 99,73\%$ erfährt.

Des Weiteren ist durch Analysen der Prozesszeit der Bildverarbeitung in der Location Engine darzustellen, dass in der Posenbestimmung nur eine maximale Latenz von $t_{LT} \leq 0,5 \text{ s}$ erreicht wird. Ferner ist darzustellen, dass eine optische Auflösung von $d_{AL} \leq 1 \text{ dm}$ erreicht wird.

Abschließend ist eine Betrachtung der Funktionsintegration zu tätigen, indem die umgesetzte Funktion der Hubhöhen-Bestimmung hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit analysiert wird.

Lokalisierungsgenauigkeit und Präzision

Die folgende Auswertung der Lokalisierungsgenauigkeit und Präzision für die Bewegung in der xy^n –Ebene ist der Tabelle 7-8 und Abbildung 7-6 detailliert zu entnehmen. Sie basiert auf Fahrversuchen, deren Versuchsbeschreibung sich im Anhang E findet.

Die favorisierten Verfahren zur Posenbestimmung, ePosit-RU-GIL²³ als bestes iteratives Verfahren und PPP-keine-GIL²⁴ als bestes direktes Verfahren, setzen sich von den weiteren betrachteten Verfahrenskombinationen zur Posenbestimmung RPP-RU-AM und PPP-keine-AM beim Mittelwert und der Standardabweichung der ermittelten Lokalisierungsgenauigkeit positiv ab – gleiches gilt für die Präzision. Allerdings erreicht ihr Niveau, vor allem bei der Betrachtung des Perzentil $p_{pz} = 99,73\%$, nicht um die gesetzte Anforderung einer Lokalisierungsleistung von $r_{xy}^n(p_{pz}) \leq |40\text{ cm}|$ zu erreichen (vgl. Tabelle 7-8).

Tabelle 7-8: Auswertung Fahrversuche zur Positionsbestimmung hinsichtlich der Positionsabweichung r_{xy}^n

	PPP-keine-GIL	ePosit-RU-GIL	PPP-keine-AM	RPP-RU-AM	PPP-keine-GIL (gefiltert)	ePosit-RU-GIL (gefiltert)	PPP-keine-AM (gefiltert)	RPP-RU-AM (gefiltert)
Anzahl Messungen	963	968	1.824	904	942	946	1.776	869
Mittelwert [cm]	10,80	8,99	11,15	10,77	9,26	7,30	8,86	7,71
Standardabweichung [cm]	15,44	14,00	17,87	20,88	8,73	5,71	7,27	6,49
Perzentil p=99,73 % [cm]	141,26	143,33	175,20	242,38	83,14	38,14	43,34	43,38
Maximalabweichung [cm]	242,41	190,73	233,48	293,80	96,10	55,02	49,25	49,49

Grundsätzlich besteht das Problem, dass es einige Ausreißer in der Positionsabweichung in allen betrachteten Verfahren gibt. Diese sind selbst für das im Verhältnis am besten abschneidende Verfahren ePosit-RU-GIL mit $r_{xy}^n_{max.} = 190,73\text{ cm}$ im Kontext der bekannten Anforderungen nicht akzeptabel. Abbildung 7-7 bestärkt durch den

²³ Iterative Posenbestimmung mittels ePosit-Verfahren bei Rotationsunterdrückung (RU); Multimarker-Auswertung durch Gewichtung der lokalen Lage (GIL) des Markers im Bild

²⁴ Direkte Posenbestimmung mittels PPP-Verfahren ohne zusätzlicher Rotationsunterdrückung (RU), da sie bereits Bestandteil des PPP-Verfahrens ist; Multimarker-Auswertung durch Gewichtung der lokalen Lage (GIL) des Markers im Bild

sehr steilgipfligen Verlauf der Verteilung gegenüber der Normalverteilung die Vermutung, dass die insgesamt unzureichende Lokalisierungsleistung durch wenige extreme Ausreißer verursacht wird. Damit belegt diese Versuchsreihe die Erwartung, dass eine Filterung der Posenbestimmung auf der Basis einer Bewegungsmodellierung (vgl. Abschnitt 6.5.4) in der Praxis Anwendung finden sollte. Hierzu wird zur exemplarischen Verdeutlichung der Machbarkeit einer entsprechenden Optimierung die maximale Fahrgeschwindigkeit des Gabelstaplers, in diesem Fall $v_{max} = 12,5 \text{ km/h}$, und die bekannte Zeitdifferenz zur vorherigen Positionsbestimmung $\Delta t = t_t - t_{t-1}$ zur Bestimmung einer maximal möglichen Positionsänderung $d_{max} = v_{max} \cdot \Delta t$ verwendet (vgl. Anhang C). Durch den Abgleich der gemessenen Positionsänderung mit der maximal möglichen Positionsänderung können somit extreme, nicht plausible Positionsänderungen gefiltert werden.

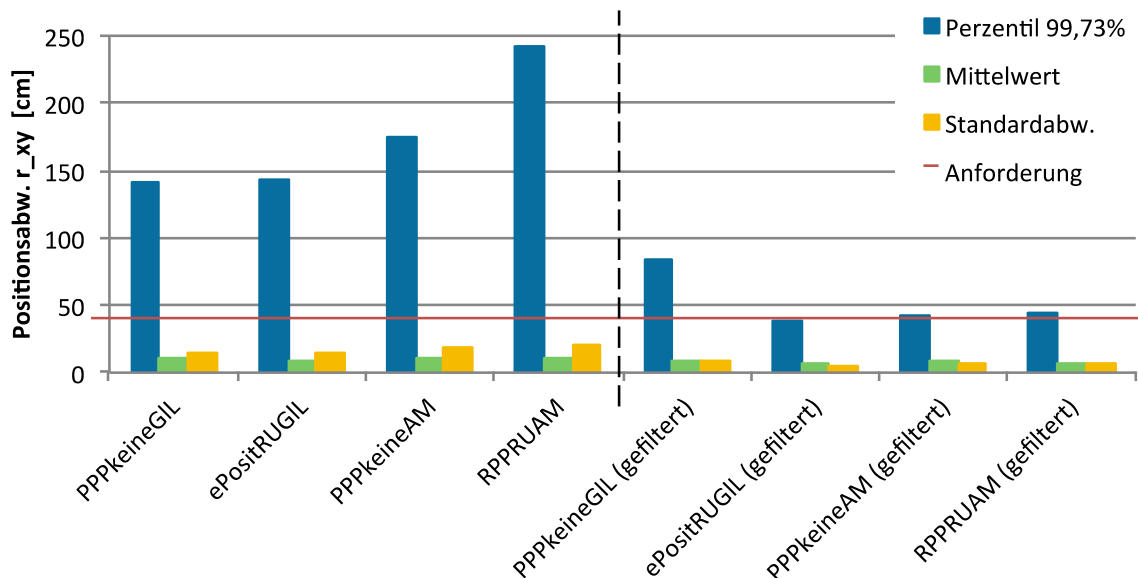


Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der statistischen Kennwerte zur Positionsbestimmung

Der in dieser Arbeit exemplarisch umgesetzte, einfache Ansatz hat bereits eine große Wirkung, indem für das favorisierte, iterative Verfahren ePosit-RU-GIL die Positionsabweichung nunmehr bei $r_{xy}^n(p_{pz})' \leq 38,17 \text{ cm}$ liegt. Damit wird die geforderte Lokalisierungsleistung hinsichtlich der Genauigkeit und Präzision erreicht. Die Filterung hat seine Wirkung insbesondere durch die Senkung der Standardabweichung z. B. von $\sigma_{xy}^n = 14,0 \text{ cm}$ auf fast ein Drittel im Betrag von $\sigma_{xy}^n' = 5,71 \text{ cm}$ für das Verfahren ePosit-RU-GIL bestätigt. Hierbei konnten $p = 91 \%$ aller kritischen Positionsabweichungen mit $r_{xy}^n > |40 \text{ cm}|$ erfolgreich gefiltert werden (vgl. Abbildung 7-8).

Das direkte Verfahren PPP-keine-GIL erfährt durch die Filterung auch eine Halbierung der Standardabweichung. Allerdings zeigt sich eine verbleibende Positionsabweichung $r_{xy}^n(p_{pz})' = 83,14 \text{ cm}$, die nicht den gesetzten Anforderungen entspricht. Sofern bei der Multimarker-Auswertung auf eine arithmetische Mittelung (AM) der bestimmten Posen statt einer Gewichtung der lokalen Lage (GIL) der Marker im Bild gesetzt wird, ist eine Verbesserung dieses Perzentils $p_{pz} = 99,73 \%$ auf $r_{xy}^n(p_{pz})' = 43,34 \text{ cm}$ zu erkennen.

Bereits in der Gegenüberstellung iterativer und direkter Verfahren im Abschnitt 6.5.2 wurde erkannt, dass das Genauigkeitsniveau im Falle von größeren Abbildungsfehlern bei direkten Verfahren zur Posenbestimmung geringer ist. In den synthetischen Versuchen des Systementwurfs wurde dieser Fehler modelliert und führte allerdings zu keiner signifikanten Differenzierung. Voraussichtlich wurde er zu gering angesetzt, wie jetzt die Praxisversuche zeigen: Grundsätzlich führt die Eigenbewegung der Kamera bei der Bilderfassung dieser Fahrversuche zu höheren Ungenauigkeiten, als sie in synthetischen Versuchen bereits zu erkennen waren (vgl. Abschnitt 6.5.4). Insgesamt liefert das direkte Verfahren PPP hierbei höhere Positionsabweichungen, sowie einen höheren Mittelwert und eine höhere Standardabweichung der Positionsabweichung gegenüber dem iterativen Verfahren ePosit. Damit sind grundsätzlich iterative Verfahren zu favorisieren und eine Fokussierung auf ePosit-Verfahren ist in der weiteren Analyse sinnvoll.

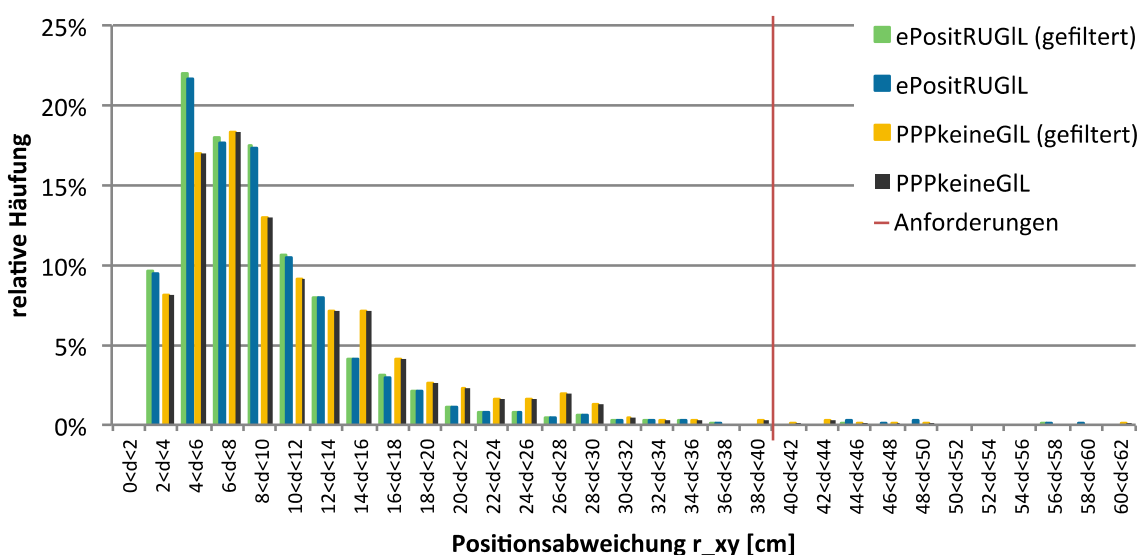


Abbildung 7-7: Darstellung der Verteilung der Positionsabweichungen r_{xy}^n vor- und nach Filterung, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL

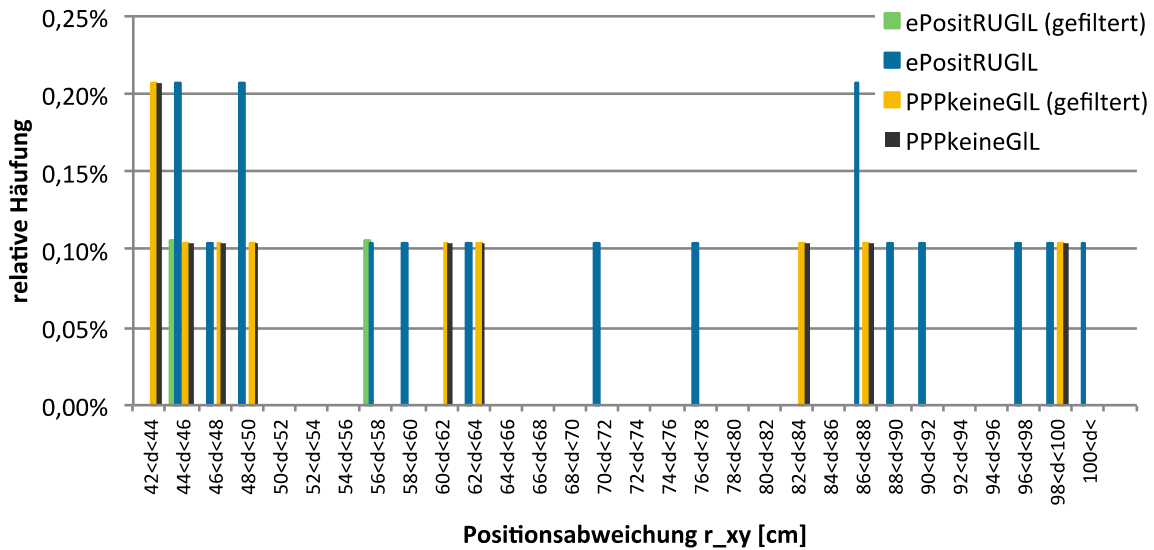


Abbildung 7-8: Darstellung der Wirkung der Filterung auf extreme Positionsabweichungen r_{xy}^n (Ergänzung zu Abbildung 7-5), ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL

Eine Betrachtung der Fahrversuche hinsichtlich der Orientierung zeigt, dass der Mittelwert beider Verfahren (iterative Verfahren ePosit-RU-GIL, direktes Verfahren PPP-keine-GIL) bei $\bar{\gamma} \approx 0^\circ$ liegt. Sie unterscheiden sich nur in der Standardabweichung grundsätzlich. Hierbei zeigt das iterative Verfahren ePosit-RU-GIL eine deutlich geringere Streuung auf. Allerdings liegt für beide Verfahren, wie zuvor bei der Auswertung der Positionsbestimmung, ebenso keine Normalverteilung vor. Deshalb beinhaltet das Perzentil $p_{pz} = 99,73\%$ für das ePosit-RU-GIL-Verfahren eine noch gerade zu akzeptierende Abweichung von $\omega_{\gamma}^n(p_{pz}) = 39,65^\circ$, während das PPP-keine-GIL-Verfahren die Anforderungen mit einer Abweichung von $\omega_{\gamma}^n(p_{pz}) = 132,79^\circ$ deutlich verfehlt.

Tabelle 7-9: Auswertung Fahrversuche, Bestimmung der Orientierung γ^n

	PPP-keine-GIL	ePosit-RU-GIL
Anzahl Messungen	963	968
Mittelwert [°]	0,4979	-0,0020
Standardabweichung [°]	13,11	4,08
Perzentil p=99,73 % [°]	132,79	39,65
Maximalabweichung [°]	278,28	78,20

Die in Abbildung 7-9 dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Orientierungsabweichung beider Verfahren lässt erkennen, dass das ePosit-RU-GIL-Verfahren bereits mit deutlichem Abstand zur Anforderungsgrenze von $\omega_{\gamma}^n(p_{pz}) \leq |45^\circ|$ einen steilen

Abfall der Häufigkeitsverteilung aufzeigt. Somit ist das ePosit-RU-GIL-Verfahren als sehr stabil für die Bestimmung der Orientierung zu bewerten. Es treten hier im Verhältnis zu alternativen Verfahren nur wenige extreme Abweichungen auf.

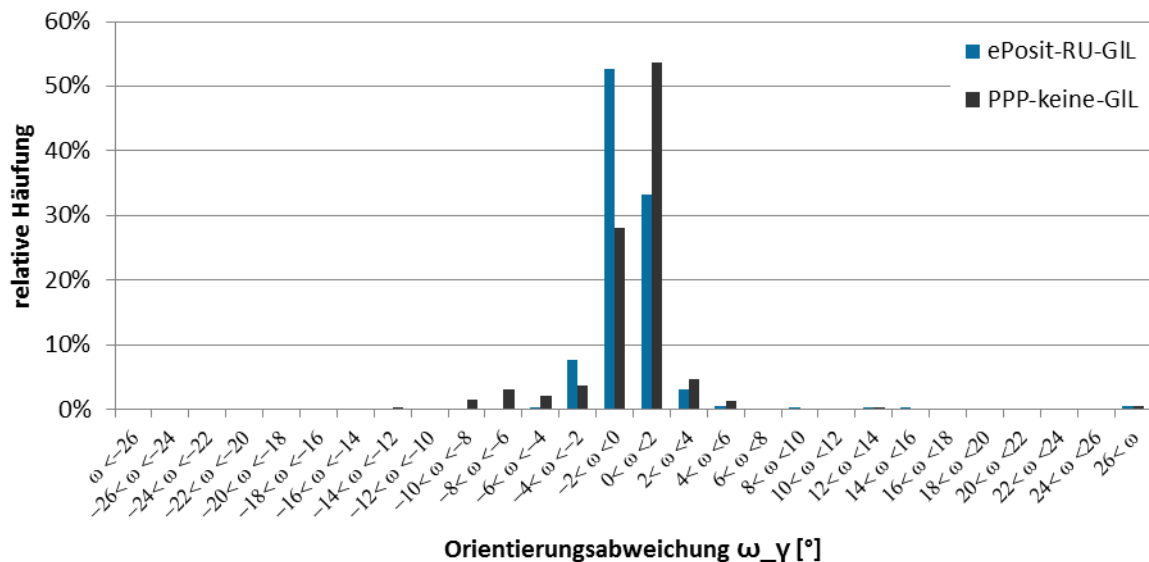


Abbildung 7-9: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Abweichungen der Orientierung, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL

Insgesamt bestätigt sich somit für die Bestimmung der Orientierung und Position hinsichtlich der Lokalisierungsgenauigkeit und der Präzision die Vorteilhaftigkeit des iterativen Verfahrens ePosit-RU-GIL. Jedoch ist eine zusätzliche Filterung auf Basis einer Bewegungsmodellierung erforderlich. Aufgrund dieser eindeutigen Vorteilhaftigkeit des ePosit-RU-GIL Verfahrens wird im weiteren Verlauf der Auswertung vornehmlich auf Versuchsergebnisse zu diesem Ansatz eingegangen.

Kontinuität und Auflösung

Einen Eindruck hinsichtlich der Fähigkeit zur kontinuierlichen Lokalisierung gibt Abbildung 7-10. Mit der Wahl einer durch die Lokalisierungsfläche diagonal führenden Fahrstrecke erfolgt für jede neue Messung eine Positionsänderung sowohl auf der x- als auch auf der y-Achse (vgl. Abbildung 7-1). Sie zeigt die gemessenen Positionen für die beste und schlechteste Messfahrt im Rahmen der Posenbestimmung mittels des ePosit-RU-GIL Verfahrens. Größere Abstände in den einzelnen Positionsmessungen der schlechtesten Messfahrt entstehen durch eine $\Delta v \approx +1 \frac{km}{h}$ höhere Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} gegenüber der besten Messfahrt. Dennoch ist in beiden Fällen eine grundsätzlich kontinuierliche Lokalisierungsfunktionalität zu

beobachten, wie sie in Abschnitt 5.1.1 gefordert wird. Dies gilt für die Bestimmung der vollständigen Pose, da mit jeder Positionsbestimmung auch die Bestimmung der Orientierung erfolgt.

Die relative Häufigkeitsverteilung für ermittelte Positionsänderungen über alle Messfahrten des ePosit-RU-GIL Verfahrens in den Fahrversuchen stellt Abbildung 7-11 dar. Sie ist ein Indiz für die Auflösung der Lokalisierung. In den Messreihen zeigt sich eine exzessive Häufung um den Mittelwert der ermittelten Positionsänderung, die insgesamt in der ähnlichen Fahrgeschwindigkeit v über alle Messreihen begründet ist. Allerdings ist ansonsten eine breite Verteilung mit einer Intervalllänge von $d_{xy}^n = 194,04 \text{ cm}$ erkennbar, die die bisherige Beobachtung einer kontinuierlichen, d. h. nicht diskreten, Lokalisierung unterstützt. Ebenso ist anhand der im Histogramm gewählten Klassenbreite $d = 0,5 \text{ dm}$ sowohl für das ePosit-RU-GIL als auch das PPP-keine-GIL Verfahren die Fähigkeit zu erkennen, den Lokalisierungsbereich in Positionen mit einer räumlichen Auflösung von $d_{AL} \leq 1 \text{ dm}$ aufzulösen.

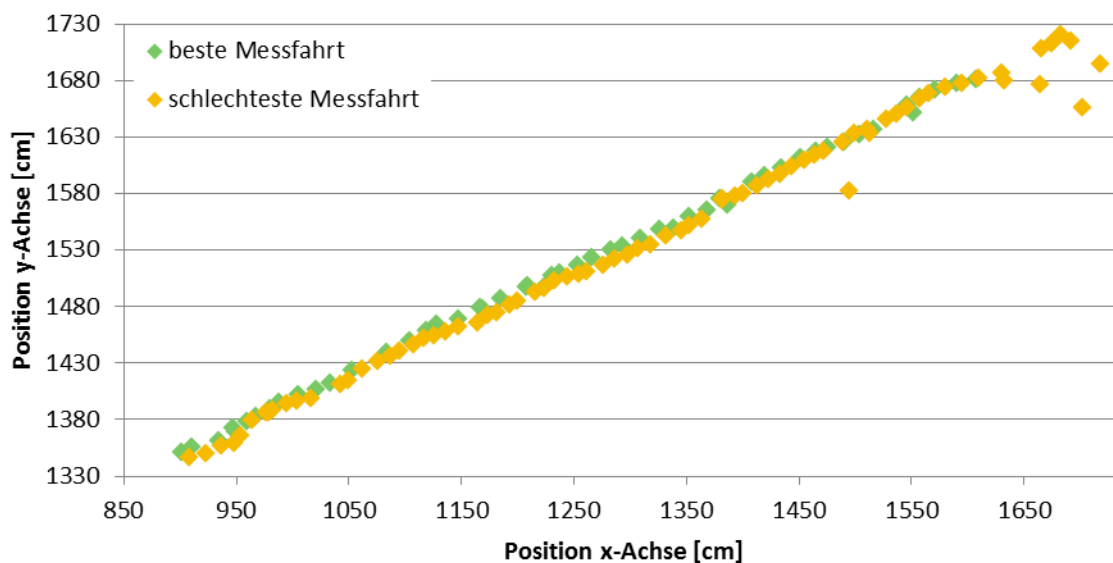


Abbildung 7-10: Vergleich der besten und schlechtesten Messfahrten, ePosit-RU-GIL (kein Filter)

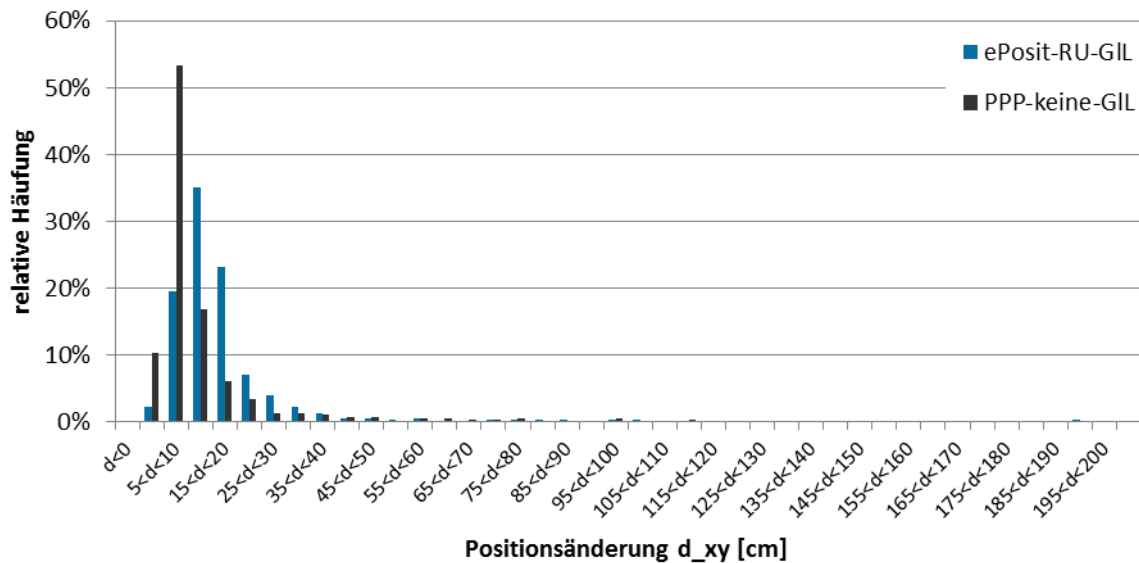


Abbildung 7-11: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Positionsänderungen, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL

Demnach erfüllt die realisierte Lokalisierung des Funktionsdemonstrators die Anforderungen hinsichtlich der Kontinuität und Auflösung.

Echtzeitfähigkeit

In der Tabelle 7-10 findet sich eine Auswertung der Laufzeit der realisierten Filterkette zur funktionsintegrierenden Lokalisierung (vgl. Abbildung 6-19). Mit einer Laufzeit im Mittel von $\overline{t_{LT}} = 0,074 \text{ s}$ und maximal von $t_{LT \text{ max}} = 0,343 \text{ s}$ wird die Anforderung einer Laufzeit $t_{LT} \leq 0,5 \text{ s}$ erfolgreich umgesetzt.

Wie durch Abbildung 7-12 unterstützt zu erkennen ist, zeichnen sich die einzelnen Bildverarbeitungsschritte durch einen voneinander stark abweichenden Anteil an der Gesamtlaufzeit aus. Die Funktionen der Bilderfassung und Bildvorverarbeitung beanspruchen 15% der Prozesszeit, während die Belichtungszeitanpassung mit 10%, die Kandidatenbildung und Markererkennung mit insgesamt 50% sowie die Visualisierung und Dokumentation mit 21% zu der Gesamtlaufzeit beitragen. Auffallend ist, dass die eigentliche Ausführung der Sensorfunktionen Lokalisierung, Hubhöhen- und Neigungsbestimmung insgesamt nur 1% der Prozesszeit beanspruchen. Hierbei fällt die Prozesszeit der Hubhöhen- und Neigungsbestimmung höher als die der Lokalisierung aus, da eine höhere Anzahl Marker mit einer geringeren Abbildungsqualität bzw. geringerem Nyquistfaktor in der Hubhöhenbestimmung auszuwerten sind. Ferner ist die Belichtungszeit für die Darstellung des Rotations-

markers nicht optimal (vgl. Anhang F), so dass auch hier eine Ursache für die erhöhte Laufzeit zu vermuten ist.

Tabelle 7-10: Auswertung der Laufzeit in den Fahrversuchen zur Lokalisierung und Hubhöhenbestimmung, ePosit-RU-GIL und Perimeter-Verfahren

	Anzahl Messungen	Mittelwert [ms]	Standardabweichung [ms]	Perzentil p=99,73% [ms]	Maximalabweichung [ms]
Gesamtzeit	3364	73,91 100%	28,021	309,00	343
Bilderfassung	3364	2,28 3%	1,274	14,00	24
Bildvorverarbeitung	3364	8,69 12%	4,244	61,91	79
Kandidatenbildung u. Markererkennung	3364	37,54 50%	4,830	53,00	62
Belichtungszeitanpassung	3364	7,74 10%	23,482	165,91	190
Hubhöhen- u. Hubmastneigungsbestimmung	3364	0,65 1%	2,543	35,00	66
Lokalisierung	3364	0,15 0%	0,452	2,00	16
Visualisierung u. Dokumentation	3364	15,25 21%	4,193	57,57	115

Demgegenüber ist der Laufzeitanteil der Kandidatenbildung und Markererkennung sehr hoch. Durch eine Reduktion der optischen Auflösung der Kamera ist die Laufzeit zu reduzieren. Allerdings ist dies durch den Engpass der Markerabmessungen für die Hubhöhe und Hubmastneigung in diesem Funktionsdemonstrator nicht realisierbar (vgl. Abschnitt 7.1.1). Vielmehr gibt es die Erwartung eines Optimierungspotenzials in den Algorithmen zur Kandidatenbildung und Markererkennung. Hinweise hierauf finden sich im weiteren Stand der Forschung in Form von weiteren alternativen, leistungsfähigeren Ansätzen (siehe hierzu z. B. [LIN-2011]). Die für diese Teilaufgabe der Bildverarbeitung verwendete *Aruco*-Bibliothek (vgl. Abschnitt 6.5.1) ist vornehmlich für Anwendungen der Augmented Reality und deren spezifischen Echtzeitanforderungen ausgelegt. Grundsätzlich ist aber zu erkennen, dass aufgrund der Funktionsintegration dieser Schritt der Kandidatenbildung einmalig für das Bild durchlaufen wird und dabei gleichzeitig für alle Sensorfunktionen erfolgt. Bei der Verwendung einzelner Sensorsysteme, z. B. einzelner Kameras zur Lokalisierung, Hubhöhen- und Hubmastneigungsbestimmung, müsste dieser Prozess einzeln je Sensorsystem bzw. Sensorfunktion durchlaufen werden. In Anbetracht des hohen Anteils der Kandidatenbildung an der Prozesslaufzeit (50%) ist somit die Synergie der Funktionsintegration in diesem Beispiel signifikant.

Die Belichtungszeitanpassung ermöglicht die hohe Anpassungsfähigkeit an sich über die Fahrstrecke verändernde Lichtbedingungen und ist somit der Grundstein für die Flexibilität des Systems. Sie erfährt in dieser Auswertung eine im Verhältnis sehr

hohe Standardabweichung. Diese liegt in der zyklischen Anpassung der optimierten Belichtungszeit, die ggf. jedes fünfte Bild angepasst wird. Eine detailliertere Auswertung der Messdaten bildet diesen Zyklus mit einer Übereinstimmung von 68% ab. Im Falle einer Belichtungszeitanpassung tritt eine deutlich erhöhte Laufzeit auf, da in der Kamera treiberbedingt ein Bildpuffer über 5 Bilder verworfen wird. Anschließend wartet die Software auf die Erfassung eines neuen Bildes mit angepasster Belichtungszeit und begründet damit die erhöhte Prozesszeit.

Die Visualisierung und Dokumentation ist für die Versuchsdokumentation dieser Fahrversuche erforderlich und im Falle einer Serienanwendung zu eliminieren bzw. auszulagern. Dadurch lässt sich die Laufzeit um ihren Anteil reduzieren, sodass mit einer Laufzeit von im Mittel $\overline{t_{LT}} = 0,057 \text{ s}$ zu rechnen ist. Dies führt dazu, dass auch die vorgesehene Bildrate $f_B \geq 15 \frac{1}{\text{s}}$ erreicht werden kann (vgl. Abschnitt 6.4.2), die aktuell mit einer mittleren reale Bildrate $\overline{f_B} = 13,5 \frac{1}{\text{s}}$ nur knapp verfehlt wird.

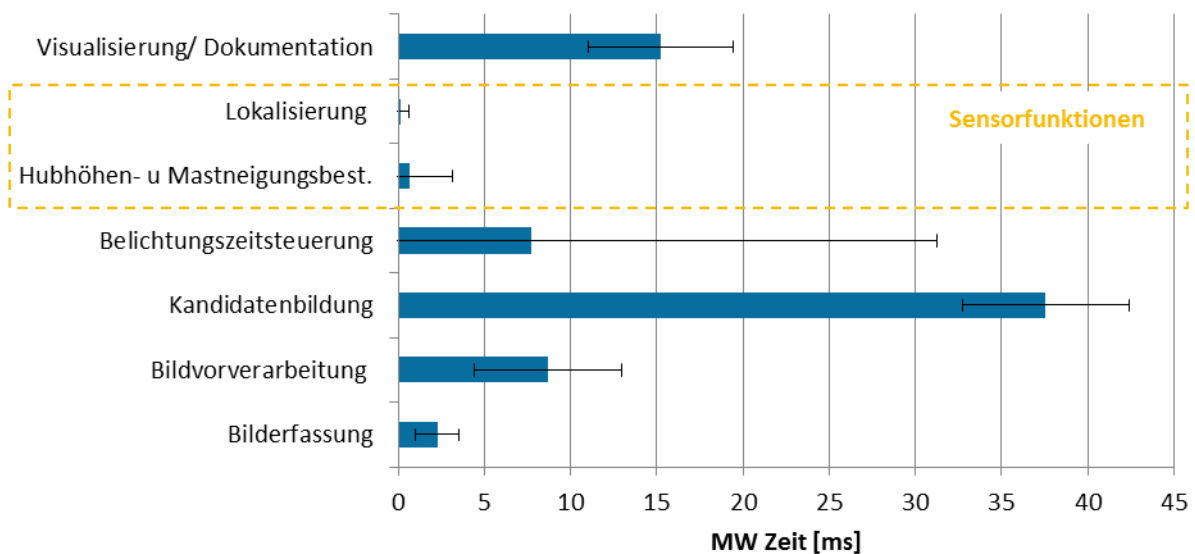


Abbildung 7-12: Laufzeitbetrachtung der Bildverarbeitungskette

Insgesamt ist der Funktionsdemonstrator unter den gesetzten Anforderungen und unter dem Echtzeitverständnis dieser Arbeit echtzeitfähig, wobei im Bildverarbeitungsschritt der Kandidatenbildung und Markererkennung Potenzial zur weiteren Optimierung der Laufzeit erkannt wird.

Ferner ist aus den praktischen Fahrversuchen erkennbar, dass unter der Nutzung des Verfahrens ePosit-RU-GIL eine Posenbestimmung entsprechend den Anforderungen zur Lokalisierungsleistung und -funktion möglich ist. Allerdings ist auf eine

weitere Optimierung zu setzen, die eine Plausibilitätsprüfung der bestimmten Position basierend auf einer Modellierung des Bewegungsprofils durchführt. Die hier gewählte Form einer statischen Filterung bildet nur das grundsätzliche Prinzip ab, bestätigt allerdings die Effektivität des Ansatzes.

7.2.3 Versuchsauswertung Hubhöhe

Zur Beurteilung der Sensorfunktion Hubhöhen-Bestimmung wurden Fahr- und Standversuche (vgl. Anhang E) durchgeführt. Letztere beinhalten das wiederholte Anfahren von vorbestimmten Regalfachhöhen bei Stillstand des Fahrzeuges. Die zugehörige Auswertung findet sich im Detail in Tabelle 7-11 und stellt sich insgesamt wie folgt dar:

Abhängig von der Hubhöhe findet eine Verschiebung des Mittelwertes statt, um den die gemessenen Hubhöhen mit steigender Soll-Hubhöhe geringfügig stärker streuen. Auffallend in den Messungen ist, dass in den Fahrversuchen aufgrund der bewegten Szene keine negative Wirkung auf die Erfassungsgenauigkeit auszumachen ist.

Tabelle 7-11: Auswertung Fahr- und Standversuche, Bestimmung der Hubhöhe

	Fahrversuche		Standversuche	
	50	100	159	300,7
Soll-Hubhöhe [cm]	50	100	159	300,7
Anzahl Messungen	928	723	1798	1703
Mittelwert [cm]	0,87	2,39	7,12	-8,08
Standardabweichung [cm]	0,23	0,69	1,68	1,32
Perzentil p=99,73 % [cm]	1,42	3,95	12,57	-3,72
Maximalabweichung [cm]	1,45	3,95	14,21	-3,72

Die absolut betrachtet geringe Standardabweichung im Bereich von $0,23 \text{ cm} \leq \sigma_h^n \leq 1,68 \text{ cm}$ ermöglicht somit eine sehr genaue Hubhöhen-Bestimmung. Durch eine Hubhöhen-abhängige Korrektur um die mittlere Abweichung kann sie darüber hinaus noch weiter verbessert werden. Alternativ ist zu erwägen, die für die perimeterbasierte Hubhöhenbestimmung ermittelten Faktoren a_1, a_2 (vgl. Abschnitt 7.1.3), durch umfangreichere Experimente exakter zu bestimmen. Es wird dadurch erwartet, dass die mittlere Abweichung sich über die Hubhöhe angleicht.

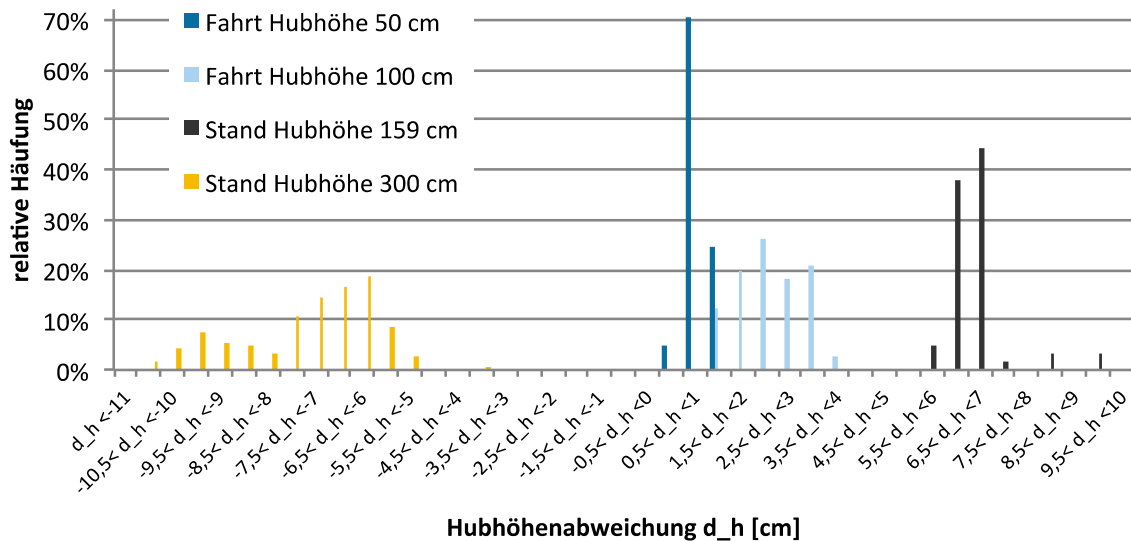


Abbildung 7-13: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Abweichungen der Hubhöhe für Hubhöhen in der Fahrt und im Stand, Perimeter-Verfahren

In der Ausführung der Regalversuche ist eine ebenso genaue Hubhöhenbestimmung, aber auch instabile Markererkennung zu beobachten. Abbildung 7-14 zeigt hierzu zwei Messreihen für die Anfahrt der Regalfachhöhen $h = 159 \text{ cm}$ und $h = 300 \text{ cm}$. Bei der Anfahrt des oberen Regalfaches ist eine geringere Dichte der Messpunkte zu erkennen, wobei die Hubgeschwindigkeit für alle Bewegungen konstant anzunehmen ist. Zu begründen ist dieses Verhalten mit dem Erreichen der Grenzabtastung. Für die Hubhöhe von $h^n = 300 \text{ cm}$ entspricht die für die Umsetzung getätigte Wahl der Hubhöhenmarkerabmessung einem Nyquistfaktor von $k_{NY \text{ hub}} = 4,7$. Das hiermit eine Grenzabtastung erreicht wird schlägt sich auch in einem gegen den Trend negativen Mittelwert für die Hubhöhe $h^n = 300 \text{ cm}$ nieder. Hierbei ist nicht separat zu erkennen, inwiefern auch ein mit der Hubhöhe zunehmender Einfluss von Pixelabweichungen in der Markererkennung auf das Ergebnis eintritt (vgl. Abschnitt 6.6.1). Für eine stabilere Hubhöhen-Bestimmung ist grundsätzlich zu erwarten, dass ein höherer Nyquistfaktors $k_{NY \text{ hub}}$ erforderlich ist. Dieser wird im Allgemeinen durch eine höhere Auflösung des Fotosensors oder größere physische Markerabmessung realisiert. Im Funktionsdemonstrator wirkt hier allerdings der verfügbare Raum zur Markeranbringung am Gabelrücken und am Hubmast sowie die maximale optische Auflösung der gewählten Kamera einschränkend (vgl. Abschnitt 6.6.3).

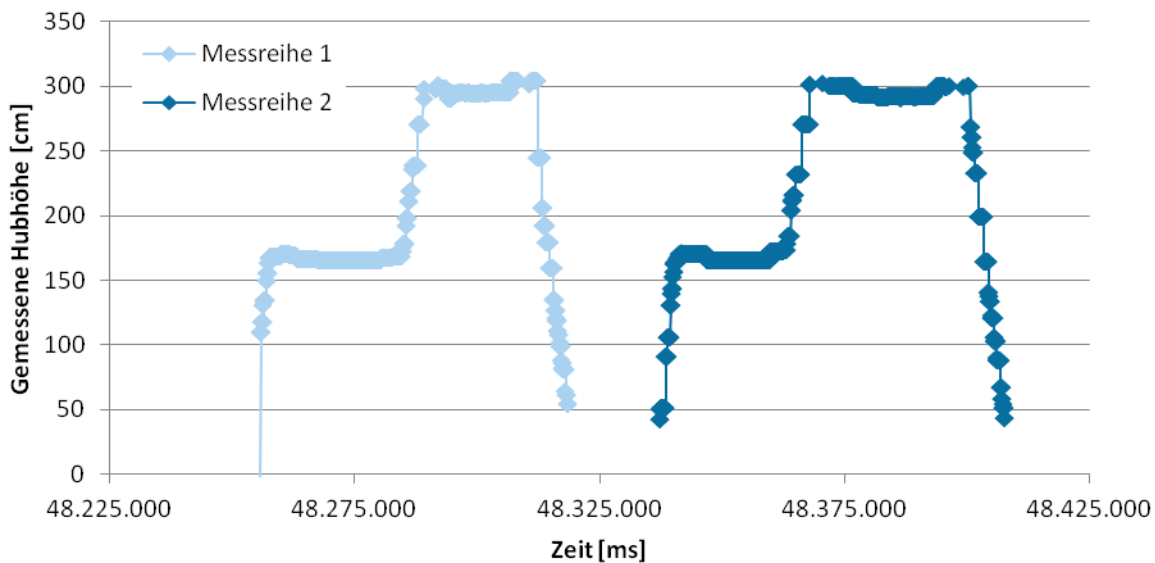


Abbildung 7-14: Exemplarische Darstellung der kontinuierlichen Hubhöhenbestimmung für zwei Messreihen, Perimeter-Verfahren

Insgesamt bietet die Hubhöhenbestimmung auf der Basis des Perimeter-Verfahrens eine sehr präzise und genaue Hubhöhenbestimmung. Bei höheren Anforderungen lässt sich diese vermutlich durch eine exaktere Bestimmung der Parameter der Perimeterfunktion weiter steigern. Vorauszusetzen ist allerdings die Wahl eines ausreichend hohen Nyquistfaktors $k_{NY\ hub}$ für die Abstimmung der Bildauflösung mit den Markerabmessungen. Darüber hinaus ist mit diesem Funktionsdemonstrator praktisch nachvollziehbar, dass das Prinzip eines funktionsintegrierenden Sensors mittels Kamera und Bildverarbeitung umgesetzt werden kann. Es wird mit diesem Funktionsdemonstrator ein für die Praxis relevantes Leistungsniveau erreicht und durch praxisnahe Versuche nachgewiesen.

7.3 Kritik

Die mit dem Ziel des Nachweises der technischen Machbarkeit durchgeführten praxisnahen Versuche können für den umgesetzten Funktionsdemonstrator die Erreichung der gesetzten Anforderungen vermitteln. Allerdings leidet die Fundierung der Nachweisführung unter dem Fehlen eines Referenzsystems, dessen Lokalisierungsleistung höher als die des zu testenden Systems ist. Die hier getroffene Lösung einer linearen Regressionsanalyse zur Bestimmung der Soll-Pose auf der Basis der gemessenen Werte (vgl. Anhang E) ermöglicht lediglich fundierte Tendenzaussagen.

Ebenso werden die praxisnahen Versuche manuell ausgeführt, sodass in der wiederholten Versuchsausführung von geringfügigen Abweichungen untereinander auszugehen ist. Für eine vollständig abgesicherte und allgemeingültige Aussage zum Leistungsvermögen des getesteten Funktionsdemonstrators ist eine automatisierte Versuchsdurchführung, die in realer Einsatzumgebung am realen Lokalisierungsobjekt durchgeführt wird, erforderlich.

Im Rahmen der Evaluierung findet keine dezidierte Fehleranalyse statt, da die praxisnahe Versuchsdurchführung in realer Umgebung keine Möglichkeit zur vollständigen und exakten Dokumentation bietet. Diesem trägt die Auswertung mittels deskriptiver Statistik Rechnung, wie sie auch mit dem Ziel der Versuchsdurchführung konform ist. Auf eine weiterführende Auswertung mittels Methoden der Interferenzstatistik wird darum verzichtet. Deshalb kann keine abgesicherte Darstellung der Ursachen einzelner beobachteter Phänomene erfolgen. Entsprechende Interpretationen dieser Arbeit stützen sich lediglich auf allgemein bekannte und erwiesene Zusammenhänge.

Die Stärke dieser durchgeführten Eigenschaftsabsicherung liegt in der praktischen Relevanz der Versuchsdurchführung und der Umgebungsbedingungen. Es wird somit ein realitätsnaher Nachweis zur technischen Machbarkeit getätigt. Ein dezidierter Nachweis der über die grundsätzlichen Anforderungen (vgl. Abschnitt 5.1) hinausgehenden Anforderungen ist nicht Bestandteil dieser Analyse. Entsprechende Kriterien (vgl. Abschnitt 5.2) sind bereits analytisch im Systementwurf berücksichtigt worden und stellen dort entscheidende Kriterien für die Wahl von Lösungsalternativen im Systementwurf dar.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Eingangs wurde in dieser Arbeit erläutert, dass die Intralogistik in zunehmend weltweit verzweigten Wertschöpfungsketten an Bedeutung gewinnt. Dies führt dazu, dass sie gleichermaßen hohen Effizienzanforderungen unterliegt, wie sie heute verstärkt auch an die gesamte Wertschöpfungskette gestellt werden. Nach Experteneinschätzung bietet die Intralogistik zugehörige Effizienzpotenziale. Jedoch sind zur Realisierung dieser Potenziale neue Lösungen, sowohl organisatorischer als auch technischer Art, erforderlich.

Transparenz für die echtzeitbasierte Prozesssteuerung

Unter diesen Rahmenbedingungen entstehen vielfältige, neuartige Lösungen in der Intralogistik, die gewissen Trends mit dem Ziel der Effizienzsteigerung folgen. Ein wichtiger Trend ist die Erzeugung von Transparenz innerhalb der logistischen Vorgänge, um mit einer echtzeitbasierten Prozesssteuerung heute integrierte, parallelisierte Prozesse zu beherrschen. Die Grundlage hierzu ist die sensorbasierte und automatisierte Erfassung von Prozesszuständen. Diese werden in die Maschinen- und Anlagentechnik integriert um eine Zustandserfassung im Leistungsprozess zu realisieren. In der Folge übernimmt im innerbetrieblichen Transportprozess das Fördermittel und im Besonderen der Gabelstapler eine neue Rolle. Er fungiert zunehmend als Schnittstelle zwischen dem Leistungsprozess und dem Informationsprozess. Im Informationsprozess nutzen IT-Systeme von der Steuerungs- bis zur Unternehmensebene entsprechende Prozesszustandsinformationen des Leistungsprozesses zur Entscheidungsfindung.

Logistische Assistenzsysteme

Ein weiterer Trend in diesem Kontext ist die Entwicklung logistischer Assistenzsysteme, welche z. B. zur operativen Steuerung des Fördermittels dienen. Sie unterstützen oder übernehmen die Prozessausführung, indem sie z. B. auf Fehl Ausführungen (präventiv) hinweisen oder diese sogar direkt verhindern. Der Gabelstapler ist insbesondere für die Anwendung logistischer Assistenzsysteme prädestiniert, da seine Bedienung hochgradig manuell erfolgt und somit grundsätzlich

fehleranfällig ist. Zwar zeichnet sich der Gabelstapler durch seine Flexibilität in der Prozessausführung aus, jedoch wird er zunehmend aufgrund des hohen Anteils manueller Tätigkeiten als ineffizient angesehen. Entsprechende Fahrerassistenzsysteme am Gabelstapler orientieren sich häufig an Assistenzsystemen im Automobil, die in den letzten Jahren in der Serie zur Komfort- und Sicherheitssteigerung einen breiten und wachsenden Einsatz finden.

Notwendigkeit geeigneter Sensorik

Beide Trends erfordern geeignete Sensoren, die der Erfassungsaufgabe auch hinsichtlich der Umgebungsbedingungen gerecht werden. Hier lässt eine Analyse am Beispiel der Lokalisierungssysteme für Gabelstapler Handlungsbedarf in der Wahl der Sensorik als auch in der technischen Gestaltung erkennen. Zwar wird die Zustandserfassung, z. B. in Form einer Lokalisierung, vom Anwender aufgrund seiner theoretischen Vorteile begrüßt, jedoch findet sie gegenwärtig nur eine geringe Verbreitung. Mangelnde Kenntnisse zur Gestaltung und Funktion der Zustandserfassung bzw. Lokalisierung können hier als Ursache ausgemacht werden, weswegen bestehende Anwendungen in ihrer Wirkung häufig nur unzureichend sind. Ebenso gehen bestehende, technische Lösungen nicht immer ausreichend auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Transportanwendung ein, weswegen diverse Einzellösungen existieren. Es ist eine technische Lösung erforderlich, die für die Gabelstaplerlokalisierung eine breite Eignung zeigt sowie auf Anforderungen der Wandlungsfähigkeit eingeht. Umfassend wird diese Problematik in der Problemstellung dieser Arbeit erläutert.

Umfang dieser Arbeit

Aus dieser Motivation heraus gibt diese Arbeit nicht nur einen Überblick zum Stand der Technik und Forschung auf dem Gebiet der Gabelstaplerlokalisierung und weiteren Zustandserfassung. Sie bietet darüber hinaus ein Konzept zur funktionalen Strukturierung eines Lokalisierungssystems. Dieses Konzept löst sich von Details einzelner Lokalisierungstechnologien und schafft einen breiten Überblick über gemeinsame Ansätze der Lokalisierungssysteme. Hierdurch wird eine Hilfestellung geboten, die ein tieferes Verständnis der Funktion Positionsbestimmung ermöglicht.

In einem weiteren Schritt entwickelt diese Arbeit einen Anforderungskatalog für die funktionsintegrierende Gabelstaplerlokalisierung, die dem Anwender einen Überblick über relevante Kriterien und deren mögliche Ausprägungen bzw. Metriken bietet.

Damit dient der Anforderungskatalog dem Anwender dazu, seine eigene Anwendungen zu strukturieren und hinsichtlich der Anforderungen sowohl qualitativ als auch quantitativ zu beschreiben.

Anschließend nimmt diese Arbeit den Systementwurf für ein System zur funktionsintegrierenden Gabelstaplerlokalisierung vor, welches das Ziel einer wandlungsfähigen und effizienten Transportausführung verfolgt. Der Systementwurf baut auf der Forschungshypothese auf, dass ein entsprechendes System erfolgreich durch die Anwendung einer Kamera mit softwarebasierter Bildverarbeitung realisiert werden kann. Um die Forschungshypothese zu bestätigen, erfolgen zum Schluss dieser Arbeit die Umsetzung eines Funktionsdemonstrators und der Nachweis der technischen Machbarkeit anhand von Praxisversuchen.

Die Umsetzung erfolgt unter der Zuhilfenahme des Open Source Software-Frameworks des begleitenden IGF-Forschungsprojekts²⁵ ‚Das Staplerauge‘, welches durch einzelne Eigenentwicklungen ergänzt wird. Ferner liefern Analysen im Rahmen des Nachweises der technischen Machbarkeit fundierte Tendenzaussagen zum erreichten Leistungsniveau der Lokalisierung und Hubhöhenbestimmung. Die Lokalisierung mit integrierter Hubhöhenbestimmung dient damit als Beispiel für eine funktionsintegrierende Kamera-Sensorik, wie sie in der Forschungshypothese als technische Lösung postuliert wird.

²⁵ Das IGF-Vorhaben 17244 N/1 der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. - BVL, Schlachte 31, 28195 Bremen wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Ergebnis dieser Arbeit



Abbildung 8-1: Beispielszene des Funktionsdemonstrators für die Bilderfassung zur funktionsintegrierten Lokalisierung und Hubhöhen-Bestimmung

Im Ergebnis entsteht mit dieser Arbeit ein Funktionsdemonstrator, der die geforderte Lokalisierungsfunktion und -leistung erreicht (vgl. Abbildung 8-1). Zudem liefert er das Potenzial für die Umsetzung weiterer Sensorfunktionen, wie die integrierte Hubhöhenbestimmung und weitere Beispiele im begleitenden IGF-Forschungsprojekt ‚Das Staplerauge‘ bestätigen. Der Funktionsdemonstrator ermöglicht eine Palettenplatz-genaue, kontinuierliche Lokalisierung sowie das stufenlose, vertikale Anfahren von verschiedenen Lagerebenen mit der Gabelzinke. Damit erreicht er ein praxisrelevantes Leistungsniveau. Auszeichnend für diese Lösung ist hierbei:

- die Umsetzung mehrerer Sensorfunktionen mittels eines einzigen Sensors,
- der geringe Infrastruktur- und Integrationsaufwand in der Anwendungsumgebung sowie
- die grundsätzliche Wandlungsfähigkeit des Systems hinsichtlich weiterer Zustandserfassungsaufgaben bzw. Sensorfunktionen.

8.3 Ausblick

Entwicklung derameratechnik

Grundsätzlich basiert diese Arbeit auf einer kostengünstigen und doch qualitativ hochwertigen Industriekamera, die den Stand der Technik in der 2D-Bilderfassung darstellt. Jedoch ergeben sich auch Einschränkungen, die sich durch im Systementwurf aufgezeigte Zielkonflikte ergeben. Allerdings ist zu erwarten, dass sich diese durch die laufende Fortentwicklung derameratechnologie und der damit am Markt verfügbaren Produkte in Zukunft entschärfen. Ebenso kann mit sinkenden Komponentenpreisen für das Zielsystem gerechnet werden, wie es auch in der Vergangenheit für Kamerasysteme bereits zu beobachten war. So verspricht insbesondere die breitere Verfügbarkeit von High-Dynamic-Range (HDR) Kameras geringere Störwirkungen auf die Merkmalerkennung und -identifikation, wie sie bei überaus heterogenen Lichtbedingungen einer Szene bisher beobachtet werden können. Darüber hinaus wächst die Zahl am Markt verfügbarer Kameras mit USB 3.0-Schnittstelle, die eine höhere Datenübertragung nebst paralleler Spannungsversorgung ermöglicht. Sie senkt den Integrationsaufwand am Lokalisierungsobjekt weiter (Einsparung der separaten Spannungsversorgung) und ermöglicht für die Zustandserfassung eine verbesserte zeitliche und räumliche Auflösung (höhere Bildrate und/oder höhere Bildauflösung).

Weiteres Entwicklungspotenzial liegt in der Dezentralisierung und Miniaturisierung des Systems. Durch programmierfähige und kostengünstige Kamerasysteme, wie z. B. einem Raspberry PI Camera-Modul, lassen sich einzelne Bildverarbeitungsaufgaben auslagern. Dies führt u. a. zu einer Reduktion des Datenaufkommens im Kommunikationsbus. Hierfür ist besonders die Bildvorverarbeitung geeignet, da sie ohne zeitkritisches a priori-Wissen auskommt und geringe Ansprüche an den Speicherbedarf stellt. Bei Kamerasystemen mit entsprechend leistungsstarkem Prozessor ist darüber hinaus ggf. die Auslagerung der vollständigen bildverarbeitungs-basierten Zustandserfassung denkbar. Dadurch reduziert sich ebenso die Anforderung an die Datenübertragungskapazität in der Kommunikation mit weiteren Steuerungssystemen. Somit ist die Auslagerung von Bildverarbeitungsschritten auf programmierfähige Kamerasysteme als eine Alternative zur Erhöhung der Datenübertragungskapazität durch z. B. eine USB 3.0-Schnittstelle zu verstehen.

Die in dieser Arbeit aufgezeigte grundsätzliche Eignung der Funktionsintegration kann durch die Erweiterung der 2D-Bilderfassung um monokulare Ansätze zur 3D-Bilderfassung noch weiter ausgebaut werden. Gerade die Einführung des Microsoft Kinect RGB-D Kamerasystems liefert zahlreiche Beispiele für weitere Möglichkeiten der kamerabasierten Zustandserfassung. Gepaart mit einer grundsätzlich wachsenden Prozessorleistung verfügbarer Rechensysteme steckt ein Potenzial in der Verknüpfung der 2D- und 3D-Bildanalyse. Hierdurch wird eine Zusammenführung der beiden Stärken des 2D- (Analyse von Texturen bzw. Konturen) und des 3D-Bildes (Analyse von Distanzen) erreicht. In der Folge ergeben sich neue, weiterführende Möglichkeiten für bildbasierte Sensorfunktionen. Schließlich können Nachteile einer reinen 2D- oder 3D-Bilderfassung, wie sie in dieser Arbeit diskutiert wurden (vgl. Abschnitt 6.1) und sich im Funktionsdemonstrator wiederfinden, in Teilen überwunden werden.

Weiterentwicklung zur Produktreife

Der Funktionsdemonstrator dieser Arbeit dient dem Nachweis der technischen Machbarkeit der verfolgten Forschungshypothese. Für eine weiterführende Entwicklung des Systems zur Produktreife ist eine dezidiertere Analyse der Wechselwirkungen (Interferenzanalyse) zwischen dem System und der Einsatzumgebung erforderlich. Sie dient dazu, das Systemverhalten zu fundieren, welches mit den hier erfolgten Untersuchungen lediglich in der Tendenz beschrieben wird.

Vision der markerlosen Lokalisierung

Die hier dargestellte Entwicklung ist allerdings auch ein Beitrag zur allgemeinen Vision einer markerlosen Lokalisierung. Im Rahmen der Anforderungen dieser Arbeit findet sich der Anspruch einer infrastrukturarmen Lokalisierungslösung. Diese Anforderung erfuhr im Systementwurf den Kompromiss, dass im Funktionsdemonstrator auf Marker für die Lokalisierung nicht verzichtet werden kann, jedoch die Anzahl anzubringender Marker weitestgehend zu reduzieren ist. Vielversprechende Forschungsaktivitäten, insbesondere in der Robotik, unterstützen die Ernsthaftigkeit dieser Vision. So ist es denkbar in Zukunft die Teilfunktion der markerbasierten Merkmalerkennung dieser Arbeit durch eine markerlose Merkmalerkennung auszutauschen. Von dieser Weiterentwicklung bleiben die weiteren Verfahren zur Positions- und Hubhöhen-Bestimmung dieser Arbeit unberührt. Sie können ebenso auf die Teilfunktion der markerlosen Merkmalerkennung aufbauen.

Insgesamt bietet diese Arbeit eine Grundlage für die technische Weiterentwicklung der kamerabasierten und wandlungsfähigen Lokalisierung. Sie bietet neben der Strukturierung eines Lokalisierungssystems den Nachweis der technischen Machbarkeit einer funktionsintegrierenden Lokalisierung. Damit stellt sie für den Systementwickler und den Anwender eine Basis für zukünftige Systemgestaltungen und Implementierungsvorhaben dar.

Literaturverzeichnis

- [ACA-2012] o.V.: Menschen und Güter bewegen - Integrative Entwicklung von Mobilität und Logistik für mehr Lebensqualität und Wohlstand. Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.), München: 2012.
- [ACA-2013] o.V.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.), München: 2013.
- [AIM-2014] Hansen, W.-R.; et al.: RTLS - Real Time Locating Systems - Ein AIM-White Paper. AIM-D e.V., Lampertheim: 2014.
- [AKW-2010] o.V.: AKW: Per Funk navigiert. In: Logistik heute, Huss Medien, (2010) Nr. 6, S. 26–27.
- [ALT-2002] Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. Dissertation. Magdeburg: Universität Magdeburg. 2002.
- [AND-2013] o.V.: CCD Spatial Resolution. Andor Technology Plc. (Hrsg.): 2013.
- [ARN-2006] Arnold, D.: Intralogistik - Potenziale, Perspektiven, Prognosen. Springer Verlag, Berlin: 2006.
- [ARN-2008] Arnold, D.; et al.: Handbuch Logistik. Springer Verlag, Berlin u.a.: 2008.
- [ATT-2008] o.V.: AT&T Developer Program - Understanding Real-Time Asset Tracking Solutions. AT&T Knowledge Ventures (Hrsg.), San Antonio: 2008.
- [BAR-2008] Bartneck, N.; Klaas, V.; Schönherr, H.: Prozesse optimieren mit RFID und Auto-ID - Grundlagen, Problemlösungen und Anwendungsbeispiele. Publicis Corporate Publishing, Erlangen: 2008.

- [BEC-2010] Beckhaus, K.: Integration von Flurförderzeugen in die IT-Prozesssteuerung der Intralogistik. Dissertation. München: Technische Universität München. 2010
- [BEN-2008] Bensky, A.: Wireless Positioning - Technologies and Applications. Artech House, Norwood: 2008.
- [BLE-2009] Blessing, Lucienne T. M; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Springer Verlag, New York u.a.: 2009.
- [BOR-2002] Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation - Für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Verlag, Berlin u.a., 3. überarb. Auflage: 2002.
- [BOR-2005] Bortz, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Verlag, Heidelberg u.a.: 2005.
- [BOR-2011] Borstell, H.; Kirch, M.; Richter, K.: Echtzeitnahe Prozessfreigabe durch bildbasierte Gabelstaplerortung. In: Tagungsband 16. Flurförderzeugtagung. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2011.
- [BOS-2009] Bostelman, R.: Towards improved forklift safety - White Paper. In: Proceedings of the 9th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, Association for Computing Machinery, New York: 2009, S. 297–302.
- [BRA-2008] Bradski, G. R.; Kaehler, A.: Learning OpenCV - computer vision with the OpenCV library. O'Reilly Press, Farnham: 2008.
- [BRO-2009] o.V.: Brockhaus-Enzyklopädie digital. Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Mannheim: 2009.
- [BSI-2012] o.V.: Studie zur Messbarkeit von Sicherheit in SOA. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hrsg.), Berlin: 2012.
- [BUS-2014] Six Sigma - Teil 1 Entstehung und Hintergründe. Business Wissen Information Service, <http://www.business-wissen.de/handbuch/six-sigma/entstehung-und-hintergruende/>, Aufruf am 23.01.2014.

- [BUT-2008] Butz, S.; et al.: Unternehmer-Handbuch Gabelstapler. Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution (Hrsg.), Mannheim: 2008.
- [CHA-2011] Challa, S.: Fundamentals of object tracking. Cambridge University Press, New York: 2011.
- [CHI-2010] Chisu, R.: Kommunikations- und Steuerungsstrategien für das Internet der Dinge. Dissertation. München: Technische Universität München. 2010.
- [CUM-2007] Cummins, M.; Newman, P.: Probabilistic Appearance Based Navigation and Loop Closing. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 2007 International Conference on Robotics and Automation, Rom, 10.-14.04.2007
- [DEL-2010] Delfmann, W.; et al.: Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin. In: Strukturwandel in der Logistik - Wissenschaft und Praxis im Dialog, DVV Media Group, Hamburg: 2010, S. 3–10.
- [DEM-1992] DeMenthon, D.; Davis, L. S.: Exact and Approximate Solutions of the Perspective-Three-Point Problem. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence: 1992, S. 1100–1105.
- [DEM-1995] DeMenthon, D.; Davis, L. S.: Model-based object pose in 25 lines of code. In: Kluwer Academic Publishers (Hrsg): International Journal of Computer Vision. Kluwer Academic Publishers, Boston: 1995, S. 123–141.
- [DET-2009] Detlefsen, J.: Radio Navigation and Location. Vorlesungsskriptum; Technische Universität München, München: 2009.
- [DHF-2009] o.V.: Serienmäßig mit RFID - Die Firma Dambach hat ihren Schmalgangstapler weiterentwickelt. In: dhf Intralogistik, Jg. 54 (2009), S. 56.

- [DIN 15146-4] DIN 15146 Teil 4-2009-03:12:1991: Vierwege-Flachpaletten aus Holz 800mm x 600mm. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 5031-7] DIN 5031 Blatt 7:1984: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Benennung der Wellenlängenbereiche. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 53350-13] DIN 5350 Teil 13:1987: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN 8373] DIN ISO 8373:2011: Roboter und Robotikgeräte - Wörterbuch. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN EN ISO/IEC 19762-3] DIN EN ISO/IEC 19762 Teil 3:2012: Informationstechnik – Automatische Identifikation und Datenerfassungsverfahren (AIDC) – Harmonisiertes. International Standard (ISO) Berlin: Beuth Verlag.
- [DIN ISO 5053] DIN ISO 5053-8:1994: Kraftbetriebene Flurförderzeuge Begriffe. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [DOD-2010] Dodel, H.; Häupler, D.: Satellitennavigation. Springer Verlag, Heidelberg u.a., 2. Auflage: 2010.
- [DRO-2011] Drolshagen, P.: Intelligente Transportmittel schaffen Abhilfe - Wettbewerbsvorteile mit präziser Stapler- und Warenlokalisierung (RTLS). In: ident, ident Verlag und Service, Rödermark: 2011, Nr. 1, S. 56–57.
- [DUD-2012] Duden Online. <http://www.duden.de/woerterbuch>, Aufruf am 10.09.2013.
- [DÜR-2009] Dürr, T.; Beichl, W.: Basis für die Automatisierung - Autonome Navigation für FTS. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 49 (2009) Nr. 1-2, S. 24–25.
- [ECO-2002] o.V.: Accuracy is addictive - History of the Global Positioning System. In: The Economist, London: 16.03.2002.

- [ESS-2009] Essati, A.: Method and apparatus for capturing the position of a vehicle in a defined region. Patentschrift WO 2010/006352 A1, 2009.
- [EUR-1998] WGS 84 Implementation Manual. European Organization for the Safety of Air Navigation (Eurocontrol), Institute of Geodesy and Navigation (IfEN) (Hrsg.), Brüssel: 1998.
- [EVE-2005] Evers, L.; et al.: Wireless Sensor Networks and Beyond - A Case Study on Transport and Logistics. Technical Report. Centre for Telematics and Information Technology, University of Twente, Enschede: 2005.
- [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.
- [FIG-2010] Figueiras, J.; Frattasi, S.: Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques. John Wiley & Sons Ltd., Chichester: 2010.
- [FIN-2012] Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. Carl Hanser Verlag, München, 6 Auflage: 2012.
- [FIS-2009] Fischer, H.: MTM - Die Sprache zur Planung , Bewertung und Optimierung von Logistikprozessen. Vortrag, Garching, 14.10.2009.
- [FLE-2005] Fleisch, E.; Mattern, F.: Das Internet der Dinge. Springer Verlag, Berlin u.a.: 2005.
- [FML-2011a] o.V.: Entwicklung eines flexiblen und präzisen Lagerlogistiksystems für Flurförderzeuge basierend auf Kombination von Outdoor-Ortung mit GPS/GALILEO und Indoor-Ortung mit RFID. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Indyon GmbH, 2011.
- [FRA-2008] Franz, M.: Mustererkennung und Klassifikation. Vorlesungsskriptum. Hochschule Konstanz: 2008.

- [FRE-2004] Freymann, R.: Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenz- und Aktiven Sicherheitssystemen. In: Tagungsband der 1. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz. Technische Universität München, München: 2004.
- [FRI-1946] Friis, H. T.: A note on a simple transmission formula. In: Proceedings of the IRE, 1946, Vol. 46, S. 254–256.
- [FRI-1999] Friedman, M.; Kandel, A.: Introduction to Pattern Recognition, Statistical, Structural, Neural and Fuzzy Logic Approaches. In: Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, World Scientific Press, Volume 32 (1999).
- [FRO-2008] o.V.: Asia Pacific Real Time Location System (RTLS) Markets - An environment scan. Frost & Sullivan Inc. (Hrsg.), Mountain View: 2008.
- [FUH-2010] o.V.: Mehr als nur Funktionseinheit - Torsteuerung als Schlüssel zum Energie sparen und für ungehinderten Materialfluss. In: f+h Fördern und Heben, (2010) Nr. 5, S. 180–181.
- [FUJ-2011] o.V.: Datenblatt Fujitsu Lifebook E780 Notebook. Fujitsu Technology Solutions (Hrsg.): 2011.
- [GAB-2013] Gabler Wirtschaftslexikon. Springer Gabler Verlag (Hrsg.), <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/74934/funktionsintegration-v7.html>, Aufruf am 10.12.2013.
- [GAO-2003] Gao, X.-S.; et al.: Complete solution classification for the perspective-three-point problem. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence: 2003. S. 930–943.
- [GAR-1998] Garibotto, G.; et al.: Industrial exploitation of computer vision in logistic automation: autonomous control of an intelligent forklift truck. In: Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): 1998. S. 1459–1464.

- [GEN-2002] Genc, Y.; et al.: Markerless Tracking for AR: A Learning-Based Approach. In: International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Los Alamitos: 2002.
- [GER-2014] Gerstl, T.: Kamera-Boom. In: Automobil Produktion, Verlag Moderne Industrie, Landsberg. Juni 2014, S. 62–63.
- [GOR-2007] Gorltd, C.; et al.: Tracking and Tracing in Production Scenarios with passive RFID Transponders. In: Proceedings on 3rd European Workshop on RFID Systems and Technologies (RFID SysTech), Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hrsg.): 2007. S. 1–6.
- [GRA-2014] Studierstube Tracker. Technische Universität Graz, Handheld Augmented Reality Christian Doppler Laboratory, <http://handheldar.icg.tugraz.at/stbtracker.php>, Aufruf am 14.01.2014.
- [GÜN-2007] Günthner, W.: Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München: 2007.
- [GÜN-2010a] Günthner, W.; Hohenstein, F.; Fischer, R.: Forschungsprojekt zur integrierten Ortung von Flurförderzeugen. In: Logistik für Unternehmen, Springer Verlag, Berlin: (2010) Nr. 1-2, S. 60–63.
- [GÜN-2010b] Günthner, W.; Ten Hompel, M.: Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer Verlag, Berlin u.a.: 2010.
- [GÜN-2011a] Günthner, W.; et al.: RFID-MachLog - Methodik für UHF-RFID Machbarkeitsstudien. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011.
- [GÜN-2011b] Günthner, W.; Wölfle, M.: Papierlose Produktion und Logistik. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011.

- [GÜN-2012a] Günthner, W.; et al.: Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2012.
- [GÜN-2012b] Günthner, W.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskriptum. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2012.
- [GÜN-2014] Günthner, W.; Hohenstein, F.; Jung, M.: Das Staplerauge. Forschungsbericht: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2014.
- [HAN-2013] Hansard, M.; et al.: Time-of-flight cameras - Principles, methods and applications. Springer Verlag, London: 2013.
- [HAR-2010] Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, New York u.a.: 2010.
- [HEI-2006] Heinecker, M.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung wandelbarer Materialflusssysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2006.
- [HEI-2012] Heißmeyer, S.; Overmeyer, L.; Müller, A.: Indoor Positioning of Vehicles using an Active Optical Infrastructure. In: Proceedings on the 3rd International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 2012 (IPIN): Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 2012.
- [HES-2009] Hesse, S.; Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion - Ausführung - Anwendung. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden: 2009.
- [HOE-2009] Hoenow, G.; Meissner, T.: Konstruktionspraxis im Maschinenbau - Vom Einzelteil zum Maschinendesign. Carl Hanser Verlag, München, 2. aktualisierte Auflage: 2009.
- [HOF-2008] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E.: GNSS - Global Navigation Satellite Systems - GPS, GLONASS, Galileo and more. Springer Verlag, Wien u.a.: 2008.

- [HOH-2012a] Hohenstein, F.; Günthner, W.: Anforderungen und Fähigkeiten gegenwärtiger Stapler-Lokalisierung. In: Bruns, R. (Hrsg): Tagungsband zur Hamburger Staplertagung, Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität: 2012. S. 5–21.
- [HOH-2012b] Hohenstein, F.; Jung, M.; Günthner, W.: "Das Staplerauge" zur Integration von Sensorfunktionen. In: Hebezeuge Fördermittel, Huss Verlag, Jg. 52 (2012) Nr. 5, S. 256–258.
- [HOL-1998] Holst, G. C.: CCD Arrays, Cameras and Displays. JCD Publishing, Bellingham, 2. Auflage: 1998.
- [HON-2011] Ho, N.: OpenCV port of 'Robust Pose Estimation from a Planar Target'. <http://nghiaho.com/?p=447>, Aufruf am 03.01.2014.
- [HOR-2006] Hornberg, A.: Handbook of machine vision. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim: 2006.
- [IDT-2008] o.V.: Real Time Locating Systems Using Passive Tags. ID-TechEx Inc. (Hrsg.): 2008.
- [INS-2010] o.V.: Ortung in der Logistik - Tracking in logistics. In: Inside Positions: (2010) Nr. 1, S. 12–13.
- [ISO/IEC 19762-5] ISO/IEC 19762-5:15.06.2008: Information Technology - Automatic Identification and Data Capture (AIDC) Techniques - Harmonized Vocabulary, Part 5: Locating Systems. International Standard (ISO), Berlin: Beuth Verlag.
- [JÄH-2005] Jähne, B.: Digitale Bildverarbeitung. Springer Verlag, Heidelberg, 6. Auflage: 2005.
- [JÜN-1989] Jünemann, R.; et al.: Materialfluss und Logistik - Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer Verlag, Berlin: 1989.
- [JUN-2008] o.V.: Datenblatt Elektro-Dreirad-Gabelstapler EFG 110-115. Jungheinrich AG (Hrsg.), Hamburg: 2008.

- [JUN-2013] Jung, M.; Hohenstein, F.; Günthner, W.: Staplerauge - a framework for camera-based sensor functions on forklift trucks. In: Proceedings on the International Logistics Science Conference, Fraunhofer IML (Hrsg.), Dortmund: 2013.
- [KAN-2010] Kany, H.-P.: Unfallgeschehen und mögliche Präventionsmaßnahmen. In: Materialfluss, Verlag Moderne Industrie GmbH, Landsberg a.L.: 2010, S. 48–49.
- [KLE-2012] Klempert, O.: Weltweite Datennetze richten Logistikketten neu aus. In: VDI nachrichten, (2012) Nr. 45, S. 10.
- [KLU-2002] Kluge, F.; Seebold, E.: Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. De Gruyter Verlag, Berlin u.a.: 2002.
- [KÖH-2010] Köhler, J.; Pagani, A.; Stricker, D.: Detection and Identification Techniques for Markers Used in Computer Vision. In: Middel, A.; Scheler, I.; Hagen, H. (Hrsg): Proceedings on the IRTG Workshop Visualization of Large and Unstructured Data Sets. Dagstuhl Publishing, Waden: 2010, S. 36–44.
- [KUH-2005] Kuhlin, B.; Thielmann, H.: Real-Time Enterprise in der Praxis - Fakten und Ausblick. Springer Verlag, Berlin: 2005.
- [KUH-2008] Kuhn, A.; Hellingrath, B.; Hinrichs, H.: Logistische Assistenzsysteme. Huss-Verlag, München. 2008.
- [LAN-2010] Lange, J.: Warehouse Management mit SAP EWM. Galileo Press, Bonn: 2010.
- [LAN-2013] Lang, B.: Vorlesung Bildverarbeitung. Vorlesungsskriptum. Hochschule Osnabrück: 2013.
- [LAU-2009] Lau, S.-Y.; et al.: A measurement study of zigbee-based indoor localization systems under RF interference. In: Association for Computing Machinery (Hrsg): Proceedings on 4th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation & Characterization (WiNTECH): Association for Computing Machinery (Hrsg.): 2009, S. 35–42.

- [LEC-2008] Lecking, D.; Wulf, O.; Wagner, B.: Localization in a wide range of industrial environments using relative 3D ceiling features. In: Proceedings on the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.), Hamburg: 2008.
- [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. Springer Verlag, New York u.a.: 2009, S. 155–166.
- [LFU-2011] Transportsteuerung mit selbstlernendem Staplerleitsystem. In: Logistik für Unternehmen, Springer Verlag, Berlin: (2011) Nr. 3, S. 30–31.
- [LFU-2013] Intelligente Transportleitsysteme sind mehrheitlich gefragt. In: Logistik für Unternehmen, Springer Verlag, Berlin: (2013) Nr. 11/12, S. 49.
- [LIA-2012] Liard, M.: Understanding RTLS. VDC Research: 2012.
- [LIG-2009] Liggins, M. E.; Hall, D. L.; Llinas, J.: Handbook of multisensor data fusion - Theory and practice. CRC Press, Boca Raton, 2. Auflage: 2009.
- [LIN-2006] Linde, H.: On Aspects of Indoor Localization. Dissertation. Universität Dortmund. 2006.
- [LIN-2009] Lindl, R.: Tracking von Verkehrsteilnehmern im Kontext von Multisensorsystemen. Dissertation. Technische Universität München. 2009.
- [LIN-2011] Lin, Daw-Tung; Lin, Chin-Lin: Multi-symbology and Multiple 1D/2D Barcodes Extraction Framework. In: Proceedings on the 17th International Multimedia Modeling Conference (MMM), Kuo-Tien Lee (Hrsg.): Springer Verlag, Berlin, Vol. 6524, S. 401–410.

- [LIU-2007] Liu, H.; et al.: Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Jg. 37 (2007) Nr. 6, S. 1067–1080.
- [MAL-2009] Malik, A.: RTLS for dummies. Wiley Publishing Inc., Indianapolis: 2009.
- [MAN-2004] Mansfeld, W.: Satellitenortung und Navigation - Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2. Auflage: 2004.
- [MAN-2009] Mannel, A.: Manuelle Transporte in der Intralogistik - Lösungen für intelligente Objektverfolgung. In: RFID im Blick - Jahrbuch, Verlag Freie Medien, Amelinghausen: 2009.
- [MAN-2010] Mansfeld, W.: Satellitenortung und Navigation - Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage: 2010.
- [MAR-2009] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden: 2009.
- [MAU-2008] Mautz, R.: Combination of Indoor and Outdoor Positioning. In: Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control & Guidance, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Hrsg.): 2008, S. 1–9.
- [MIR-2013] Mirlach, M.; et al.: Auftragszuteilungsverfahren für Staplerleitsysteme. In: Tagungsband 17. Flurförderzeugtagung. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hrsg.), Düsseldorf: 2013, S. 67–78.
- [MTM-2008] o.V.: Handbuch MTM-Logistik. Deutsche MTM-Vereinigung e.V (Hrsg.), Deutsche MTM-Vereinigung e.V.. Zeuthen: 2008.
- [NE 124] NE 124:2010: Anforderungen an Wireless Automation. Interessensgemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, Leverkusen.

- [NOC-2006] Noche, B.; Koc, S.: Durch die Gänge der Fabriken läuft der Stundenzähler. In: Logistics Journal, WGTL (Hrsg.): 2006.
- [NÖL-2010] Nöll, T.; Pagani, A.; Stricker, D.: Markerless Camera Pose Estimation - An Overview. In: Middel, A.; Scheler, I.; Hagen, H. (Hrsg): Proceedings on the IRTG Workshop Visualization of Large and Unstructured Data Sets. Dagstuhl Publishing, Waden: 2010, S. 45–54.
- [OBE-2014] Oberkampf, D.; DeMenthon, D.: POSIT for Coplanar Points (C). http://www.cfar.umd.edu/~daniel/Site_2/Code.html, Aufruf am 26.02.2014.
- [OTS-1979] Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): Transactions on Systems, Man and Cybernetics: 1979, S. 62–66.
- [PFL-2004] Pflaum, A.; Grün, T. von der; Bernhard, J.: Verschmelzung von Lokalisierungs- und Identifikationstechnologien. University of St. Gallen, St. Gallen: 2004.
- [PIN-2011] Pink, O.: Bildbasierte Selbstlokalisierung von Straßenfahrzeugen. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie. 2011.
- [REH-1996] Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G.; Conrad, P. (Hrsg): Managementforschung 6: Wissensmanagement. De Gruyter, Berlin u.a.: 1996, S. 1–40.
- [RFI-2009] RFID Journal: Rush Tracking Systems adds optical positioning to RFID Forklift. <http://www.rfidjournal.com/articles/view?4854>, Aufruf am 26.05.2013.
- [RUS-2009] Rush, T.; Mahan, L.: Eliminate Operator Scanning and Optimize Warehouse Operations with Auto ID and Optical Positioning. Webinar. Rush Technologies Inc., 10.12.2009.
- [SCH-2005] Schreer, O.: Stereoanalyse und Bildsynthese. Springer Verlag, Berlin u.a.: 2005.

- [SCH-2006] Schweighofer, G.; Pinz, A.: Robust Pose Estimation from a Planar Target. In: Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): 2006, S. 2024–2030.
- [SCH-2007] Schröder, G.; Treiber, H.: Technische Optik - Grundlagen und Anwendungen. Vogel Business Media, Würzburg: 2007.
- [SCH-2011] Schäfer, R.: Kamerasysteme für die Datenerfassung machen Intralogistik produktiver. Vogel Business Media, http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/automatisierung/fertigungsautomatisierung_prozessautomatisierung/articles/313266/, Aufruf am 23.09.2013.
- [SEC-2012] Stapler Flottenmanagement durch Securifix Datenlogger. Securifix GmbH, <http://www.stapler-ruf.de/datenlogger.html>, Aufruf am 04.06.2012.
- [STR-2008] Strang, T.; et al.: Lokalisierungsverfahren. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.), Oberpfaffenhofen: 2008.
- [TEN-2007] Ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik. Springer Verlag, Berlin u.a., 3. Auflage: 2007.
- [TEN-2010] Ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen. Springer Verlag, Berlin u.a., 4. Auflage: 2010.
- [TÖD-2013] Tödter, J.; et al.: Anwendungsfeld Intralogistik. Vortrag zur Abschlusspräsentation im Forschungsprojekt Marion, Harsewinkel, 19.09.2013.
- [UCO-2014] University of Cordoba, Aplicaciones de la Vision Artificial: ArUco: a minimal library for Augmented Reality applications based on OpenCv. <http://www.uco.es/investiga/grupos/ava/node/26>, Aufruf am 14.01.2014.

- [VDA-2012] Berking, J.; et. al.: FAST 2025 - Future Automotive Industry Structure. Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.), Berlin. 2012.
- [VDI 2185-1] VDI 21851 Blatt 1:2007: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2199] VDI 2199:2007: Empfehlung für bauliche Planungen beim Einsatz von Flurförderzeugen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2206] VDI 2206:2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2510] VDI 2510:2005: Fahrerlose Transportsysteme. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2510] VDI 2510:2005: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 2510-1] VDI 2510 Blatt 1:2009: Infrastruktur und periphere Einrichtungen für Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 4451-4] VDI 4451 Blatt 4:12010: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [VDI 4451-6] VDI 4451 Blatt 6:2002: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Sensorik für Navigation und Steuerung. Verein Deutscher Ingenieure e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- [WAG-2007] Wagner, D.; Schmalstieg, D.: ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices. In: Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop, Graz Technical University, Graz: 2007.
- [WEI-2010] Weichert, F.; et al.: Marker-based tracking in support of RFID controlled material flow systems. In: Logistics Research: 2010.
- [WEN-2007] Wendel, J.: Integrierte Navigationssysteme - Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. Oldenbourg Verlag, München: 2007.

- [WIL-2006] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2006.
- [WIL-2008] Williams, D. H.; Hartwig, G.: How will the convergence of location technologies such as RFID, GPS,RTLS, and LBS affect business? In: NBIZ Magazine, Katy. Summer 2008, S. 23–26.
- [ZHA-2000] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. In: Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg): 2000, S. 1330–1334.
- [ZHA-2002] Zhang, X.; Fronz, S.; Navab, N.: Visual Marker Detection and Decoding in AR Systems: A Comparative Study. In: Proceedings on the International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.), Los Almitos: 2002

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Zuge dieser Dissertation wurden zahlreiche Studienarbeiten unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors im Bereich der Lokalisierung und Bildverarbeitung erarbeitet, aus denen teilweise Inhalte für diese Arbeit entstanden sind. Besteht zu einer entsprechenden Studienarbeit ein direkter Bezug hinsichtlich der Inhalte, so wird in dieser Arbeit auf sie verwiesen.

Der Dank des Autors gilt den Studenten für ihre erbrachten Arbeiten, die im Folgenden aufgeführt sind:

- [FML-2010] Kurth, R.: Identifikation und Bewertung von Vor- und Nachteilen der Anwendung eines Real Time Location Systems in Abhängigkeit von der Lagercharakteristik. Diplomarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2010. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein
- [FML-2011b] Ulewicz, S.: Evaluierung eines optischen RTLS im Praxis-Test-Einsatz. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein
- [FML-2011c] Augustine, M.: Methoden zur Bilderkennung in der Technischen Logistik. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein und Dipl.-Inf. Matthias Jung
- [FML-2013a] Topchyan, A.: Machine learning based feature detection and matching in intra-logistics. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2013. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein und Dipl.-Inf. Matthias Jung

- [FML-2013b] Commes, M.: Bewertung von gängigen Technologien mit dem Ziel der Lokalisierungsfunktion. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2013. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein
- [FML-2013c] Bigontina, A.: Marker-based absolute 3D positioning with a computer vision system. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011. Betreut durch Dipl.-Ing. Frank Christian Hohenstein und Dipl.-Inf. Matthias Jung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Sensorsysteme als Kopplungsglied zwischen Informations- und Leistungsprozess (nach [ACA-2013])	2
Abbildung 1-2: Vorgehen in dieser Arbeit im Kontext des V-Modells (nach [VDI 2206])	13
Abbildung 2-1: Koordinatensysteme zur Fördermittellokalisierung	18
Abbildung 3-1: Bestandteile des Transportsystems [GÜN-2012b]	22
Abbildung 3-2: Übersicht zu Standard-LHM, gruppiert nach den Grundabmessungen	23
Abbildung 3-3: Begrifflichkeiten am Gabelstapler [DIN ISO 5053]	25
Abbildung 3-4: Ergebnisse der Helligkeitsuntersuchungen in der Versuchshalle des Lehrstuhl fml (nach [FML-2011c])	29
Abbildung 3-5: Typische Abmessungen für drei Europaletten-Stellplätze im Regal [FML-2011b]	30
Abbildung 3-6: Übersicht zu Anwendungen zur Flurförderzeuglokalisierung (nach [LIN-2009])	32
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung für die Integration zahlreicher Sensoren zur automatischen Lagerplatzidentifikation (nach [RUS-2009])	41
Abbildung 4-1: Funktionale Module eines Lokalisierungssystems	49
Abbildung 4-2: Funktionale Module eines Lokalisierungssystems am Beispiel GPS	50
Abbildung 4-3: Messung der Signalphase	54
Abbildung 4-4: Messprinzip Ankunftssignal (AoA)	55
Abbildung 4-5: Trilateration zur Positionsbestimmung	58
Abbildung 4-6: Hyperbelschnittverfahren zur Positionsbestimmung	59
Abbildung 4-7: Nachbarschaftsbeziehung zur Positionsbestimmung	59
Abbildung 4-8: Angulation für $n=2$ Richtungsbeziehungen zur Positionsbestimmung	60
Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Merkmalvektors im Merkmalraum [LAN-2013]	61
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung für eine Mustererkennung basierend auf einer Signalstärkenmessung	62
Abbildung 4-11: Übersicht zu den Lokalisierungsmethoden	63
Abbildung 5-1: Kriterienkatalog für die Auswahl eines Lokalisierungssystems	66
Abbildung 5-2: Relevante Abmessungen einer Europoolpalette (nach [DIN EN 13698-1])	71
	197

Abbildung 5-3: Zeitliche Betrachtung der Einzelvorgänge in der gabelstaplerbasierten Paletten-Einlagerung (nach [FIS-2009])	73
Abbildung 5-4: Metriken des Anforderungskatalogs mit der Auswahl für die Gabelstaplerlokalisierung	85
Abbildung 6-1: Konzept zur Gabelstaplerlokalisierung in Eigenortung	91
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des favorisierten Anbringungskonzeptes	92
Abbildung 6-3: Übersicht zu künstlichen Merkmalen in Form von Barcodes u. Referenzmarkern (nach [FIA-2010])	97
Abbildung 6-4: Komponenten und Gestaltungsgrößen des Kamerasystems (nach [HOL-1998])	98
Abbildung 6-5: Relevante Parameter zur Beschreibung der Bilderfassung	98
Abbildung 6-6: Sensorgröße im Kontext des Sensorverhaltens	103
Abbildung 6-7: Bildbasierte Teilaufgaben und ihre Methoden in der Location Engine	107
Abbildung 6-8: Grundprinzip einer Lochkamera	114
Abbildung 6-9: Schematische Darstellung der Näherungen einer Perspektive (nach [HAR-2010, SCH-2005])	115
Abbildung 6-10: Schematische Darstellung der Bild- und Kamerageometrie im Kontext erforderlicher Transformationen zur Posenschätzung (nach [SCH-2005])	116
Abbildung 6-11: Synthetischer Benchmark zu den Verfahren der Posenschätzung LMI, ePOSIT, RPP (nach [FML-2013])	127
Abbildung 6-12: Mittlere Positionsabweichung $rxyn$ zzgl. Standardabweichung σ_{xyn} für eine variierende Anzahl sichtbarer Marker	131
Abbildung 6-13: Maximale Positionsabweichung $rxymax.n$ für eine variierende Anzahl sichtbarer Marker	132
Abbildung 6-14: Mittlere Positionsabweichung $rxyn$ für die Veränderung der Fehlermodellierung	133
Abbildung 6-15: Mittlere Positionsabweichung $rxyn$ zzgl. Standardabweichung σ_{xyn} bei optimaler Parallelität	134
Abbildung 6-16: Mittlere Orientierungsabweichung $\omega\gamma n$ zzgl. Standardabweichung $\sigma\gamma n$ bei optimaler Parallelität	135
Abbildung 6-17: Schematische Darstellung zur Hubmastneigung und resultierenden Hubhöhenänderung	137
Abbildung 6-18: Schematische Darstellung des diskutierten Anbringungskonzeptes erweitert um die Hubhöhen-Bestimmung	140
Abbildung 6-19: Schematischer Überblick zu Teilfunktionen der implementierten Location Engine	142
Abbildung 7-1: Schematische Darstellung Versuchshalle fml	145

Abbildung 7-2: Räumliche Anordnung von Bezugspunkten und Referenzmarkern in der Versuchshalle	145
Abbildung 7-3: Vorbereitung des Versuchsstaplers für den Betrieb einer Kamera	146
Abbildung 7-4: Anbringung der Marker für die Hubhöhen- und Hubmastneigungsbestimmung	148
Abbildung 7-5: Implementierte Filterkette zur funktionsintegrierten Posen- und Hubhöhenbestimmung	151
Abbildung 7-6: Gegenüberstellung der statistischen Kennwerte zur Positionsbestimmung	158
Abbildung 7-7: Darstellung der Verteilung der Positionsabweichungen $rxyn$ vor- und nach Filterung, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL	159
Abbildung 7-8: Darstellung der Wirkung der Filterung auf extreme Positionsabweichungen $rxyn$ (Ergänzung zu Abbildung 7-5), ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL	160
Abbildung 7-9: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Abweichungen der Orientierung, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL	161
Abbildung 7-10: Vergleich der besten und schlechtesten Messfahrten, ePosit-RU-GIL (kein Filter)	162
Abbildung 7-11: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Positionsänderungen, ePosit-RU-GIL und PPP-keine-GIL	163
Abbildung 7-12: Laufzeitbetrachtung der Bildverarbeitungskette	165
Abbildung 7-13: Darstellung der Häufigkeitsverteilung ermittelter Abweichungen der Hubhöhe für Hubhöhen in der Fahrt und im Stand, Perimeter-Verfahren	167
Abbildung 7-14: Exemplarische Darstellung der kontinuierlichen Hubhöhenbestimmung für zwei Messreihen, Perimeter-Verfahren	168
Abbildung 8-1: Beispielszene des Funktionsdemonstrators für die Bilderfassung zur funktionsintegrierten Lokalisierung und Hubhöhen-Bestimmung	174
Abbildung 8-2: Literaturübersicht zu Lokalisierungsmethoden	213
Abbildung 8-3: Literaturübersicht zu einem Kriterienkatalog für Anforderungen an die Lokalisierung	215

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung wesentlicher Charakteristika eines Gabelstaplers und FTF	26
Tabelle 3-2: Übersicht zum Stand der Technik und Forschung	44
Tabelle 4-1: Architekturen eines Lokalisierungssystems	51
Tabelle 5-1: Anforderungsdefinition zur Lokalisierungsfunktion	68
Tabelle 5-2: Anforderungsdefinition zur Lokalisierungsleistung	71
Tabelle 5-3: Anforderungsdefinition zum Integrationsaufwand	77
Tabelle 5-4: Anforderungsdefinition zur Flexibilität	79
Tabelle 5-5: Anforderungsdefinition zur Skalierbarkeit	82
Tabelle 5-6: Anforderungsdefinition zur Wandlungsfähigkeit	84
Tabelle 6-1: Klassifizierung von Objektiven (nach [SCH-2007])	100
Tabelle 6-2: Aus Fahrgeschwindigkeit und Bildrate resultierende Fahrstrecke zwischen zwei Frames und deren Anteil an der geforderten Lokalisierungsgenauigkeit	105
Tabelle 6-3: Bewertung der Bibliotheken zur Kandidatenbildung u. Markererkennung	113
Tabelle 6-4: Übersicht zu Verfahren der Posenschätzung	126
Tabelle 6-5: Bewertung möglicher Merkmale zur Hubhöhen-Bestimmung	138
Tabelle 6-6: Bewertung von Zielkonflikten aufgrund der Funktionsintegration im Sensor Kamera	141
Tabelle 7-1: Beschreibung der Umgebungsbedingungen an Bezugsorten	144
Tabelle 7-2: Technische Daten des Versuchsgabelstaplers Jungheinrich EFG-110k [JUN-2008]	146
Tabelle 7-3: Technische Daten des Versuchsnotebooks Fujitsu Lifebook E780 [FUJ-2011]	147
Tabelle 7-4: Daten zu verwendeten Tags bzw. Markern	148
Tabelle 7-5: Technische Daten des Objektivs Tamron® 219HB	149
Tabelle 7-6: Technische Daten des Kamera-Body Smartek® GC1392C	149
Tabelle 7-7: Parameter der Bilderfassung abhängig vom gewählten Kamerasystem	150
Tabelle 7-8: Auswertung Fahrversuche zur Positionsbestimmung hinsichtlich der Positionsabweichung $rxyn$	157
Tabelle 7-9: Auswertung Fahrversuche, Bestimmung der Orientierung γn	160
	201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-10: Auswertung der Laufzeit in den Fahrversuchen zur Lokalisierung und Hubhöhenbestimmung, ePosit-RU-GIL und Perimeter-Verfahren	164
Tabelle 7-11: Auswertung Fahr- und Standversuche, Bestimmung der Hubhöhe	166
Tabelle 8-1: Versuchsplan synthetischer Benchmark zu Posenschätzverfahren	221
Tabelle 8-2: Ergebnistabelle des synthetischer Benchmarks zu Posenschätzverfahren (Ausschnitt, vgl. Abbildung 6-11)	222
Tabelle 8-3: Versuchsplan synthetischer Benchmark zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien	222
Tabelle 8-4: Ergebnistabelle des synthetischen Benchmarks zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien bei variierender sichtbarer Markeranzahl (vgl. Abbildung 6-12, Abbildung 6-13)	223
Tabelle 8-5: Ergebnistabelle des synthetischen Benchmarks zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien bei variierender Fehlermodellierung (vgl. Abbildung 6-14, Abbildung 6-15, Abbildung 6-16)	225
Tabelle 8-6: Versuchsplan praxisnaher Fahrversuche zur Lokalisierung	227
Tabelle 8-7: Versuchsplan praxisnaher Fahrversuche zur Hubhöhen-Bestimmung	228
Tabelle 8-8: Versuchsplan praxisnaher Standversuche zur Hubhöhen-Bestimmung	229
Tabelle 8-9: Lösung des Zielkonfliktes Fokussierung bei Anpassung der Belichtungssteuerung an ROI Hubhöhen-Marker	232

Verwendete Formelzeichen

Folgende Formelzeichen und Indizes finden in der vorliegenden Arbeit Anwendung.

Formelzeichen	Bedeutung
$[x, y, z]$	Position bezeichnende Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem
$[\alpha, \beta, \gamma]$	Orientierung bezeichnende Winkel im kartesischen Koordinatensystem
A	Intrinsische Matrix
B	Bild
D	Extrinsische Matrix
E_v	Lichtintensität
G	Gegenstand, Objektpunkt
K	Kameramatrix
L	Tragzahl
M	Objektpunkt
N	Markeranzahl
P	Allgemeine Projektionsmatrix, Pose, Leistung
P'	Perspektivische Projektionsmatrix
R	Rotationsmatrix
U	Ursprung des kartesischen Koordinatensystems, bzw. Referenzort
X	Fläche

Verwendete Formelzeichen

a	Faktor Perimeterverfahren
b	Bildweite
c	Lichtgeschwindigkeit
d	Distanz, Abstand, Range, Verschiebung
f	Frequenz, Rate, Brennweite
g	Gegenstandsweite, Objektabstand
$g(x)$	Graphverlauf einer Variable x
h	Höhe
i	Intensität des Signals
k	Kennzahl
l	Länge
m	Bildpunkt
p	Perzentil
r	Fehlerradius, bzw. Lokalisierungsgenauigkeit
s	Weg, Strecke, Skalierungsfaktor
t	Zeit, Translationsvektor
v	Geschwindigkeit
Φ	Phasengang
α	Konstante für Systemineffizienzen im Sender
β	Konstante für Freiraumdämpfung
δ	Öffnungswinkel
θ	Ankunfts-/Einfallwinkel

λ	Wellenlänge
μ	Bildwinkel
σ	Standardabweichung
τ	Glättungsfaktor
ω	Winkelverschiebung
ϕ	Phasenwinkel

Zusätzliche Indizes

Alle Formelzeichen können mit einem oder mehreren der aufgelisteten Indizes geführt werden.

Index	Bedeutung
'	Nach Filterung
–	Mittelwert
$[x, y, z]$	Koordinatenachse im kartesischen Koordinatensystem
$[\alpha, \beta, \gamma]$	Drehwinkel im kartesischen Koordinatensystem
AL	Auflösung
b	Bezugssystem körperfestes Koordinaten b-Frame
B	Bild, Bildpunkt
BZ	Blendenzahl
C	Kamerakoordinatensystem
D	Dopplersignal
E	Empfänger
EL	Eintrittslinse
FoV	Sichtfeld, Field of View
krit	Kritische Größe
LT	Latenz
lok	Lokalisierung
max	Maximalwert

Zusätzliche Indizes

min	Minimalwert
n	Bezugssystem ortsfestes Koordinatensystem n-Frame
N	Neigung
NY	Nyquistfaktor
P	Parallelität
px	Pixel
pz	Präzision
r	radial
rot	Rotation
S	Sender
u	x-Achse des Sensorkoordinatensystems
v	y-Achse des Sensorkoordinatensystems
W	Weltkoordinatensystem
xy	xy-Ebene
Z	Zentrum, Mittelpunkt

Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Arithmetisches Mittel
AoA	Angle of Arrival
AR	Augmented Reality
CASSC	Complete Analytical Solution with the assistance of Solution Classification
CCD	Charged-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CoO	Cell of Origin
DN	Dopplernavigation
DoA	Direction of Arrival
DoF	Degrees of Freedom
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EPnP	Efficient Perspective n-Point Pose Estimation
ePOSIT	Extended Pose from Orthography and Scaling with Iterations
ERP	Enterprise Resource Planning
FoV	Field of View
FPS	Frames pro Sekunde
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeuge
FTS	Fahrerloses Transportsystem

Verwendete Abkürzungen

GgL	Gewichtung globale Lage
GIL	Gewichtung lokale Lage
GPS	Global Positioning System
GZ	Gabelzinke
IR	Infrarot
LBS	Location Based Service
LF	Low Frequency
LHM	Ladehilfsmittel
LMI	Levenberg-Marquardt Iteration
LoS	Line of Sight
LVS	Lagerverwaltungssystem
MTM	Methods-of-Time-Measurement
MW	Mittelwert
nLoS	none Line-of-Sight
POSIT	Pose from Orthography and Scaling with Iterations
PPP	Pose from Planar Parallel Target
PRN	Pseudo Random Noise Code
RFID	Radio Frequency Identification
RMS	Root mean square, quadratischer Mittelwert
ROI	Region of Interest
RPP	Robust Pose Estimation from a Planar Target
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator

RTE	Real Time Enterprise
RTK	Real-Time Kinematic
RTLS	Real Time Location System
RTof	Round Trip of Flight
RTT	Round Trip Time
SLS	Staplerleitsystem
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
ToF	Time of Flight
UHF	Ultra High Frequency
UV	Ultraviolett
WMS	Warehouse Management System

Anhang A. Literaturübersicht Lokalisierungsmethoden

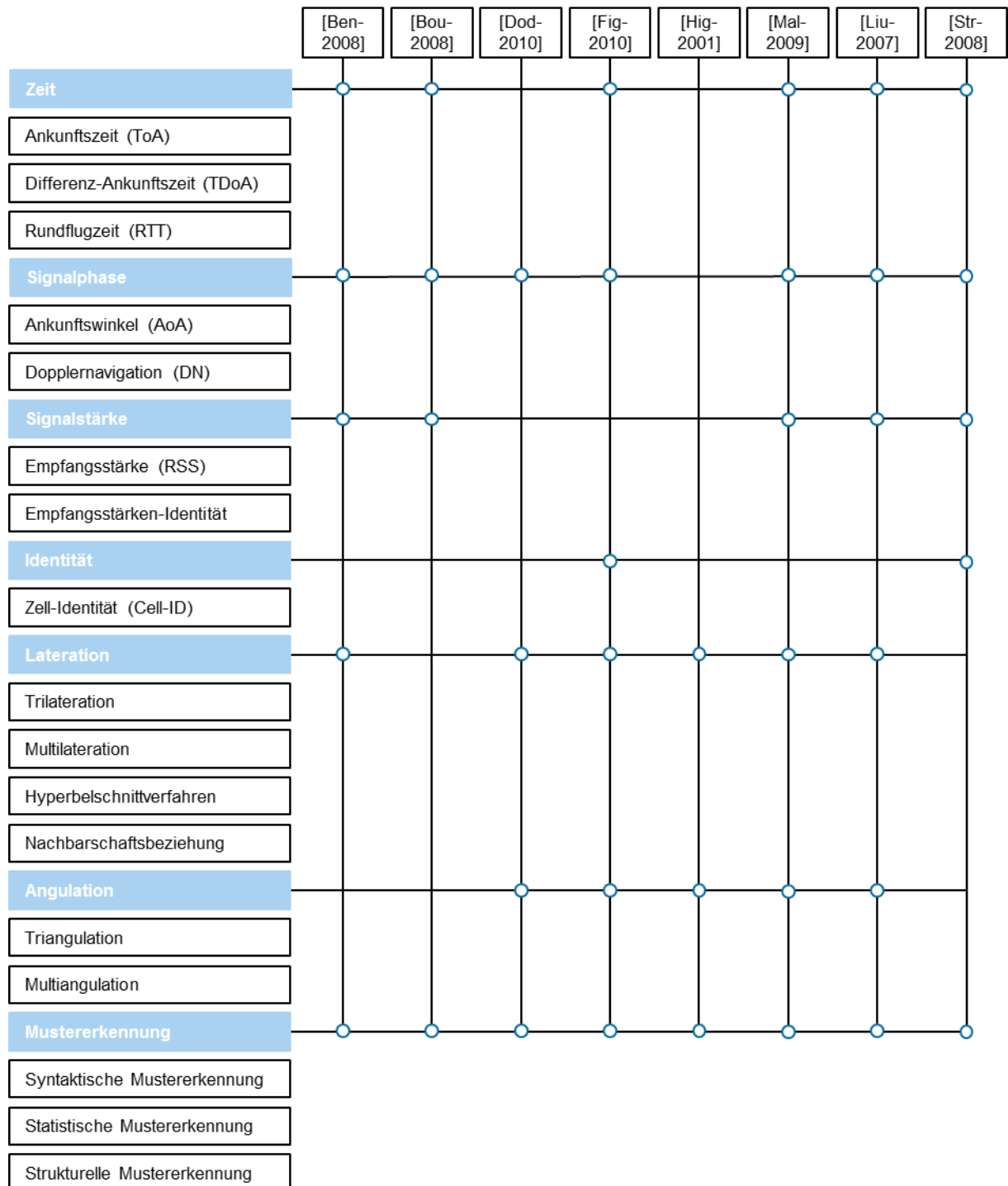


Abbildung 8-2: Literaturübersicht zu Lokalisierungsmethoden

Anhang B. Literaturübersicht Kriterienkatalog

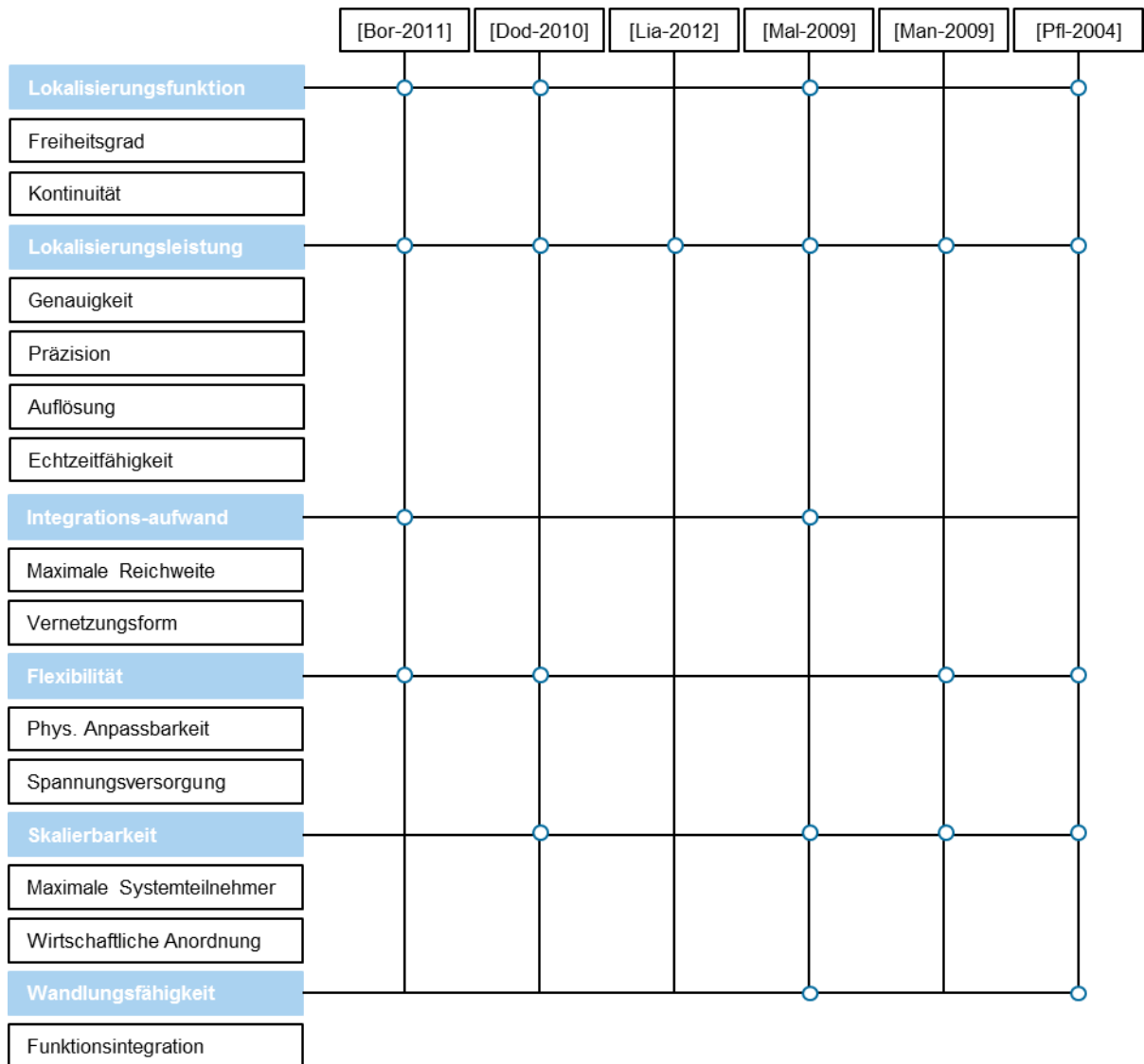


Abbildung 8-3: Literaturübersicht zu einem Kriterienkatalog für Anforderungen an die Lokalisierung

Anhang C. Optimierungsstrategien für die Posenbestimmung

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf Optimierungsstrategien zur Posenbestimmung zurückgegriffen, in diese hier näher eingeführt wird.

Multimarker-Auswertung

Durch eine Reduktion der Abstände der Marker (vgl. Abschnitt 6.3) zueinander kann erreicht werden, dass n Marker mit $n \geq 1$ für die Posenschätzung fortwährend zur Verfügung stehen. Es besteht die Möglichkeit jeweils für jeden einzelnen Marker eine Posenbestimmung der Kamera vorzunehmen. Somit werden n Posenlösungen P_i mit $i \in \{1, \dots, n\}$ erhalten, die es entsprechend einer Strategie zu einer Posenlösung P zusammenzuführen gilt. Dies wird in den Strategien ‚arithmetische Mittelung‘ und ‚Gewichtung lokale Lage‘ aufgegriffen und beschrieben. Alternativ können alle Objektpunkte der n sichtbaren Marker gemeinsam in die Posenbestimmung direkt einbezogen werden. Somit wird eine gemeinsame, globale Referenz gebildet, wie es in der Strategie ‚Gewichtung globale Lage‘ erfolgt. Im Folgenden werden diese Strategien detailliert, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich auf die Bestimmung der Position als Bestandteil der Pose eingegangen wird. Für die Bestimmung der Orientierung sind diese Strategien zu übertragen.

- Arithmetische Mittelung (AM)

Es wird das arithmetische Mittel \bar{P} der Positionen P_i ermittelt.

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (8-1)$$

- Gewichtung lokale Lage (GIL)

Aufgrund einer unzureichenden Kalibrierung sind insbesondere im Randbereich des FoV Verzerrungseffekte zu erwarten. Diese bedingen Ungenauigkeiten in den Bildpunkten der Marker, die sich vor allem im Randbereich des FoV befinden. Dementsprechend sind Punktkorrelationen und die aus ihnen abgeleitete Posen der Marker im Bildzentrum höher zu gewichten als Marker, deren Punktkorrelationen bzw. deren abgeleitete Posen am Bildrand liegen. Eine

Gewichtung erfolgt mittels des gemessenen Abstandes des Bildzentrums $P_Z = (c_u \ c_v)^T$ vom Mittelpunkt des i -ten abgebildeten Markers $P_{m_i} = (u \ v)^T$:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_{m_i}}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8-2)$$

$$\text{mit } d = \sqrt{(u - c_u)^2 + (v - c_v)^2}$$

$$\text{und } w_i = \begin{cases} m - d & \text{für } d < r_{krit} \\ 0 & \text{für } d \geq r_{krit} \end{cases}$$

$$\text{und } r_{krit} = \sqrt{(w/2)^2 + (h/2)^2}$$

Die Variablen h und w kennzeichnen die Höhe und Breite der Bildfläche in der Einheit Pixel. Um stark verzerrte Marker aus der Betrachtung auszuschließen, werden mit $w_i = 0$ alle Marker außerhalb des kritischen Radius r_{krit} , der hier der halben Bilddiagonalen entspricht, gewichtet.

- Gewichtung globale Lage (GgL)

Im bisherigen Vorgehen werden alle Punktkorrelation eines einzelnen Markers im Posenschätzverfahren ausgewertet (vgl. Abschnitt 6.5.2). In dieser Strategie lautet der Ansatz, alle Punktkorrelationen aller in einem Bild erkannten Marker gleichzeitig und gleichberechtigt dem Posenschätzverfahren als Input zu übergeben. Dies entspricht der Grundidee, dass alle Punktkorrelationen einzelner realer Marker eines Bildes in der Summe einen globalen, virtuellen Marker im Bild ergeben. Nunmehr ist es in der Aufgabe des jeweiligen Posenschätzverfahrens eine interne Gewichtung der vielen Punktkorrelationen durchzuführen.

Rotationsrestriktionen

Durch die horizontale Ausrichtung der Marker zur Fotosensorfläche kann eine Parallelität zwischen Marker und Kamera angenommen werden. Diese Bedingung ist lediglich bei der Überfahrt von Schwellen, bei dem Befahren von Rampen und grundsätzlich bei ungenau ausgerichteter Anbringung der Komponenten Marker und Kamera nicht gegeben. Bei der Nicht-Betrachtung dieser Sonderfälle ergibt sich folgende Annahme zur Rotationseinschränkung mittels Reduktion der Freiheitsgrade α^n, β^n .

- Rotationsunterdrückung (RU)

Aus der beschriebenen Annahme der horizontalen Anbringung des Markers

zur Fotosensorfläche folgt, dass Objekt- und Bildpunkte im Rahmen der projektiven Transformation keine Rotation um die x- und y-Achse des Navigationskoordinatensystems erfahren. Allerdings können aufgrund von Abbildungsfehlern in der Bilderfassung und anschließenden Transformation dennoch entsprechende Rotationen detektiert werden. Da sie nicht der Realität entsprechen, sieht diese Strategie vor im Rahmen des Posenschätzverfahrens sämtliche Rotationen um die x- und y-Achse zu ignorieren. In der Anwendung ist zu evaluieren, inwiefern diese Annahme zur Rotationsunterdrückung zweckmäßig ist.

Exponentielle Glättung

Die exponentielle Glättung stellt ein Verfahren zur Reduktion der Einflusswirkung von einzelnen, statistischen Ausreißern dar, dadurch dass eine Gewichtung basierend auf historischen Daten erfolgt. Im Rahmen dieser Optimierungsstrategie wird eine Gewichtung mit dem Faktor $\tau = 0,1$ vorgenommen:

$$\overline{P}_t = \tau P_t + (1 - \tau) \overline{P}_{t-1} \quad (8-3)$$

Bewegungsmodellierung

Aufgrund grundlegender Eigenschaften der Bewegung des betrachteten Lokalisierungsobjektes kann eine Prognose \overline{P}_t für die Pose P_t erfolgen, die zu einer Plausibilitätsprüfung der bestimmten Posenschätzung P_t dient. Die zu erfolgende Modellierung der Bewegung kann unter der Betrachtung des historischen und augenblicklichen Systemverhaltens (dynamische Bewegungsmodellierung) erfolgen. Alternativ kann die Plausibilitätsprüfung auch aufgrund vorgegebener Kennwerte für die Bewegung (statische Bewegungsmodellierung) erfolgen.

- Statische Bewegungsmodellierung

Die statische Bewegungsmodellierung nimmt keine Betrachtung des augenblicklichen Zustandes des Lokalisierungssystems vor, sondern bildet eine Modellpose auf der Basis statischer Annahmen.

In der in dieser Arbeit verwendeten Modellierung erfolgt die Bestimmung einer maximalen Positionsänderung Δd_{max} auf der Basis der Maximalfahrgeschwindigkeit v_{max} des Fahrzeuges. Um die historische Pose P_{t-1} wird mit Δd_{max} ein Radius gebildet, in dem maximal eine Fortbewegung Δd über den betrachteten Zeitraum $\Delta t = t_t - t_{t-1}$ erfolgen kann. Fällt die gemessene Pose P_t in diesen durch den Radius aufgespannten Bereich, so ist sie plausibel. Anderenfalls wird sie gefiltert und stellt keine Lösung für das Lokalisierungssystem dar.

$$d_{max} = (t_t - t_{t-1})v_{max} \quad (8-4)$$

$$\text{mit } \Delta d = P_t - P_{t-1} \text{ und } \bar{P}_t = \begin{cases} P_t, & \text{wenn } \Delta d \leq d_{max} \\ k. A., & \text{wenn } \Delta d > d_{max} \end{cases}$$

- Dynamische Bewegungsmodellierung

Durch die Modellierung des Lokalisierungssystems hinsichtlich seiner Ein- und Ausgangsgrößen bzw. dessen Beziehungen und Charakteristika untereinander, ergibt sich ein adaptives Modell für den Systemzustand. Das Modell beinhaltet eine Bewegungsgleichung, die sog. Zustandsgleichung, zur Modellierung der zeitvarianten Einflüsse auf das System. Eine weitere Ausgangsgleichung beschreibt die Verbindung des Ausgangssignals, hier des Messsignals, mit den Systemzuständen. Im Ergebnis steht eine Zustandsraumdarstellung, die mittels modellbasierter Schätzung ein statistisches Verhalten des Lokalisierungssystems hinsichtlich der Posenbestimmung abbildet. [LIG-2009]

Etablierte Verfahren, wie z. B. Kalman- und Partikelfilter, führen diese Schätzung mit der durch das Lokalisierungssystem direkt bestimmten Pose zusammen, wobei eine Filterung nach dem Grundprinzip der Plausibilitätsprüfung erfolgt [DOD-2010]. Im Ergebnis wird die Lokalisierungsleistung des Lokalisierungssystems durch entsprechende dynamische Verfahren der Bewegungsmodellierung stabilisiert und ggf. gesteigert. Entsprechende Verfahren werden sehr verbreitet in der satelliten- und inertialsensorbasierten Lokalisierung eingesetzt [PIN-2011]. [WEN-2007]

Anhang D. Darstellung synthetische Versuche

Synthetische Versuche zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter vollständigem Ausschluss der Umgebung stattfinden und auch kein reales Kamerasystem eingesetzt wird. Mittels virtuell erzeugter Versuchsaufbauten ist es möglich die Leistungsfähigkeit der weiteren Algorithmen zur Posenschätzung und Optimierung dieser zu untersuchen. Im Folgenden werden die wesentlichen fixen und variablen Parameter der Versuchsdurchführung tabellarisch dargestellt, wobei wesentliche Vorgaben für die Versuchsdurchführung ebenso vermerkt werden.

Posenschätzverfahren

In der Tabelle 8-1 findet sich der Versuchsplan für die Durchführung einer ersten Posenschätzung mittels LMI-, ePosit- und RPP-Verfahren (vgl. Abschnitt 6.5.3). Die entsprechenden Versuchsergebnisse sind ausschnittsweise in Tabelle 8-2 dargestellt.

Tabelle 8-1: Versuchsplan synthetischer Benchmark zu Posenschätzverfahren

Fixe Parameter	
Auflösung [Pixel]	768 x 576
Markerabmessungen [cm]	50 x 50
Brennweite f [mm]	9
Intrinsische Kameraparameter	$K = \begin{bmatrix} 900 & 0 & 384 \\ 0 & 900 & 288 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Räumliche Anordnung Kamera	Parallele Ausrichtung von Marker-Ebene zu Objektivoberfläche
Variable Parameter	
Objektabstand g [m]	2 bis 20
Messschritt Objektabstand g [m]	0,1
Sensorrauschen [Pixel]	0 +/- 1 (zufallsverteilt)
Posenschätzverfahren	LMI ePOSIT RPP
Versuchsdurchführung	
Anzahl Wiederholungen jeder Messung	1
Gemessene Größe	Positionsabweichung [cm]
Referenz gemessener Größe (Soll-Wert)	Versuchsparameter für Objektabstand und Markerabmessung

Tabelle 8-2: Ergebnistabelle des synthetischer Benchmarks zu Posenschätzverfahren (Ausschnitt, vgl. Abbildung 6-11)

Gegenstandsweite g [m]	LMI m.	ePosit m.	RPP m.	LMI	ePosit	RPP	Anforderung
	Rauschen	Rauschen	Rauschen				
2	0,107082	0,380286	0,110085	0	3,55E-15	0	0,4
3	0,370942	0,638332	0,34576	0	0,0105286	0	0,4
4	0,751577	0,90673	0,775422	3,95E-13	3,55E-15	0	0,4
5	1,14675	1,35936	1,26424	1,36E-14	3,98E-15	0	0,4
6	1,54768	1,77398	1,65215	0	0,0167847	0	0,4
7	1,9598	2,12273	2,04243	0,00021143	6,10E-05	0,00010572	0,4
8	2,38656	2,71523	2,72836	0	3,55E-15	0	0,4
9	2,82962	3,28443	3,15359	0	0,0217896	0	0,4
10	3,28963	3,80295	3,72703	0	3,98E-15	0	0,4
11	3,76679	4,09946	4,20888	0,00126859	0,00024414	0,00126859	0,4
12	4,26096	4,41146	4,71898	0	0,0343018	0	0,4
13	4,77187	5,80372	5,99871	0,00190289	0,0372314	0,00190289	0,4
14	5,29914	5,11885	4,81583	0,00190289	0,00012207	0,00211432	0,4
15	5,84242	6,02788	6,46	0	0,0385742	0,00021143	0,4
16	6,40124	6,80109	7,12863	0	3,55E-15	0	0,4
17	6,97523	7,64458	7,92489	0,00084573	0,0408936	0,0006343	0,4
18	7,56398	7,28175	8,1424	0	0,0012207	0	0,4
19	8,16707	9,00248	9,48798	0,00084573	0,0421143	0,00084573	0,4

Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien

Der Versuchsplan zur Untersuchung einer geeigneten Kombination aus Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien (vgl. Abschnitt 6.5.4) findet sich in Tabelle 8-3. Entsprechende Versuchsergebnisse werden in den Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 dargestellt.

Tabelle 8-3: Versuchsplan synthetischer Benchmark zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien

Fixe Parameter	
Auflösung [Pixel]	768 x 576
Markerabmessungen [cm]	9 x 9
Brennweite f [mm]	9
Intrinsische Kameraparameter	$K = \begin{bmatrix} 900 & 0 & 384 \\ 0 & 900 & 288 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Objektstand g [m]	3
Markerposition	$P_1 = (-50, 0, 400)$ $P_2 = (50, 0, 400)$ $P_3 = (0, 50, 400)$
Kameraposition	$P = (0, 0, 100)$
Marker- und Kameraorientierung	$R_1 = R_2 = R_3 = R(0, 0, 0)$
Räumliche Anordnung Kamera	Parallele Ausrichtung von Marker-Ebene zu Objektivoberfläche

Optimierungsstrategien	Exponentielle Glättung		
	Variable Parameter		
Anzahl sichtbarer Marker	1	2	3
Fehler Objektpunkte [cm]	0	+/- 5 (zufallsverteilt)	
Fehler Bildpunkte [Pixel]	0	+/- 2 (zufallsverteilt)	
Fehler Parallelität [°]	0	+/- 5 (zufallsverteilt)	
Posenschätzverfahren	LMI	ePOSIT	RPP PPP
Multimarker-Auswertung	GIL	GgL	AM
Rotationseinschränkung	RU	keine	
Bewegungsmodellierung	statisch/ gefiltert	keine	
	Versuchsdurchführung		
Anzahl Wiederholungen jeder Messung	1000		
Gemessene Größe	Positionsabweichung [cm]		Orientierungsabweichung [°]
Referenz gemessener Größe (Soll-Wert)	Versuchsparameter für Objektabstand, Markerpose und –rotation, Markerabmessung		

Tabelle 8-4: Ergebnistabelle des synthetischen Benchmarks zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien bei variierender sichtbarer Markeranzahl (vgl. Abbildung 6-12, Abbildung 6-13)

Verfahrens-kombination	Anzahl sichtbarer Marker	Positionsabweichung [cm]			Orientierungsabweichung [°]		
		Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert
ePOSIT-keine-AM	1	107,300315	29,2448674	205,908	-0,00334754	1,92950315	5,69891
ePOSIT-keine-GgL	1	107,852469	29,1819217	195,209	0,01711707	1,87853731	5,74638
ePOSIT-keine-GIL	1	107,592633	29,419821	241,391	-0,01031039	1,92258236	9,30385
LMI-keine-AM	1	201,647666	66,7181357	372,551	0,08316285	6,939135	25,1687
LMI-keine-GgL	1	199,483342	66,8101782	382,532	0,42730999	6,82307674	33,0954
LMI-keine-GIL	1	201,550027	64,1284871	395,707	-0,02411767	6,96055859	23,9454
RPP-keine-AM	1	123,09708	65,6519464	297,911	0,07930859	2,55561738	7,12651
RPP-keine-GgL	1	123,874642	66,2075468	299,9	-0,06225121	2,4815125	8,26733
RPP-keine-GIL	1	123,292346	65,499716	317,628	0,00993193	2,59548757	7,27406
PPP-keine-AM	1	17,6943569	7,51417933	40,7894	-0,04184185	1,7278373	5,18002
PPP-keine-GIL	1	17,9721487	7,36360884	39,4226	0,11265198	1,76045297	6,202
ePOSIT-RU-AM	1	17,7692392	7,74862942	43,7498	0,04055169	2,75101259	8,02753
ePOSIT-RU-GgL	1	18,2335791	7,69039619	42,5175	-0,0034924	2,70641576	8,45612
ePOSIT-RU-GIL	1	17,7218349	7,6295354	40,4174	0,0279999	2,70607862	14,6446
LMI-RU-AM	1	18,5659599	8,19095836	47,2953	-0,03582483	3,96598392	19,2504
LMI-RU-GgL	1	18,6426193	8,63215792	73,5189	0,1324096	4,13407737	21,2528
LMI-RU-GIL	1	18,9427293	8,12296779	42,5525	0,191525	3,82957055	16,8749
RPP-RU-AM	1	18,961243	8,29389402	56,1418	0,09935963	4,16366653	20,8339
RPP-RU-GgL	1	18,624501	8,02445274	45,9938	0,11410153	4,16519918	17,3105
RPP-RU-GIL	1	19,0199015	8,31610148	51,7426	-0,0066237	4,24348007	18,2279
ePOSIT-keine-AM	2	88,5582719	29,219483	172,443	-0,02726923	1,57885129	5,10252
ePOSIT-keine-GgL	2	101,900181	28,3066029	183,659	-0,00681251	1,70563444	7,23793

Anhang D

Verfahrens- kombination	Anzahl sichtbarer Marker	Positionsabweichung [cm]			Orientierungsabweichung [°]		
		Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert
ePOSIT-keine-GIL	2	90,8595486	28,522125	175,296	-0,01648483	1,50589395	4,91124
LMI-keine-AM	2	135,73669	64,7980007	316,934	-0,19264284	8,55859588	30,8516
LMI-keine-GgL	2	45,7063256	25,9837972	173,182	-0,11687436	1,97534941	6,51743
LMI-keine-GIL	2	132,335871	60,4876934	315,896	0,04226601	8,19818185	29,3731
RPP-keine-AM	2	88,3194041	44,5751132	238,474	-0,07903493	2,48455134	8,47303
RPP-keine-GgL	2	51,686566	32,1518101	205,017	-0,04608289	1,96983467	6,48543
RPP-keine-GIL	2	84,7978936	40,7744078	233,797	-0,01173658	2,29737614	10,1149
PPP-keine-AM	2	17,4843033	7,26258221	39,0042	0,04993278	1,25878475	5,29217
PPP-keine-GIL	2	17,5549065	7,16351764	39,1695	0,04638869	1,26526405	4,56644
ePOSIT-RU-AM	2	17,5207682	7,43107279	37,8558	-0,00031351	2,24326213	5,80813
ePOSIT-RU-GgL	2	17,2850709	7,22376667	38,9951	0,14692338	2,26869507	12,4214
ePOSIT-RU-GIL	2	17,1973163	7,13014114	36,9876	-0,0666234	2,23680806	6,92562
LMI-RU-AM	2	18,240613	7,42797697	37,7138	-0,02703725	3,10442351	12,9909
LMI-RU-GgL	2	17,9458169	6,89930854	42,2153	-0,06610701	1,96670333	7,65997
LMI-RU-GIL	2	18,0072114	7,14253186	50,3753	-0,03368372	2,94008692	10,8751
RPP-RU-AM	2	18,1897113	7,38159238	39,2261	0,00759698	3,43512599	11,851
RPP-RU-GgL	2	17,6624742	7,33928008	39,3287	-0,04805546	2,06892852	6,424
RPP-RU-GIL	2	17,8601135	7,40168597	39,6735	0,00700674	3,02301573	11,641
ePOSIT-keine-AM	3	82,9102347	24,1280094	150,706	0,0587784	1,45481257	7,0372
ePOSIT-keine-GgL	3	102,031885	29,8712598	237,128	-0,01484269	1,67200709	6,80487
ePOSIT-keine-GIL	3	84,3672117	24,426192	147,32	0,03708949	1,45135344	4,70991
LMI-keine-AM	3	108,898993	53,9385387	270,346	-0,4248138	8,57763422	34,8496
LMI-keine-GgL	3	60,395518	30,1116643	180,677	0,00672847	1,79087915	6,36224
LMI-keine-GIL	3	108,780758	52,7140149	269,11	0,02717548	8,15440305	30,2004
RPP-keine-AM	3	72,6652663	37,9426529	208,61	0,09188975	2,40952418	9,07575
RPP-keine-GgL	3	74,6919914	42,1634383	221,578	-0,11520762	1,95073413	8,18064
RPP-keine-GIL	3	68,8572292	32,1852835	167,021	0,00233059	2,3210798	10,419
PPP-keine-AM	3	18,0106707	7,04434938	39,8787	0,04586604	0,99021119	3,07756
PPP-keine-GIL	3	17,4572589	7,14569194	36,3751	-0,03204271	1,02471398	3,10105
ePOSIT-RU-AM	3	16,8983124	7,03979671	39,4589	-0,02592419	2,10051765	6,53992
ePOSIT-RU-GgL	3	17,1090841	6,65912386	36,3346	-0,0291078	2,25049788	6,58487
ePOSIT-RU-GIL	3	16,7525309	6,81805479	36,3899	-0,02619298	2,11576791	5,43056
LMI-RU-AM	3	17,8852743	7,42962636	39,6323	0,2481799	2,79725405	10,7167
LMI-RU-GgL	3	17,7573431	7,18707767	38,5006	-0,00022773	2,42873227	10,463
LMI-RU-GIL	3	17,6269212	7,5591639	40,8387	-0,00057463	2,73164279	10,143
RPP-RU-AM	3	18,1251312	7,32712278	36,9124	-0,09444609	2,99315935	9,82921
RPP-RU-GgL	3	16,9468115	7,30435561	37,665	-0,10354265	2,23380782	9,36858
RPP-RU-GIL	3	17,432855	7,2444109	39,982	-0,09314657	2,89583177	10,4178

Tabelle 8-5: Ergebnistabelle des synthetischen Benchmarks zu Posenschätzverfahren und Optimierungsstrategien bei variierender Fehlermodellierung (vgl. Abbildung 6-14, Abbildung 6-15, Abbildung 6-16)²⁶

Verfahrens- kombination	Fehler- modell	Positionsabweichung [cm]			Orientierungsabweichung [°]		
		Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert	Mittelwert	Standardabw.	Maximalwert
ePOSIT-RU-AM	opt. B.	17,3240799	6,65550984	39,7795	-0,00531977	0,32985265	1,08587
ePOSIT-RU-GgL	opt. B.	17,811045	6,79520193	39,5978	-0,03263794	2,18439107	6,69393
ePOSIT-RU-GIL	opt. B.	17,5087502	7,14333935	35,5899	0,0018831	0,29528867	1,09548
LMI-RU-AM	opt. B.	18,1360568	7,18240673	37,27	-0,00082093	0,0393321	0,123086
LMI-RU-GgL	opt. B.	17,9290905	7,1603491	36,1576	-0,09940008	2,29573984	11,6806
LMI-RU-GIL	opt. B.	17,548571	7,11940806	39,7111	-0,0011408	0,0389756	0,11441
PPP-keine-AM	opt. B.	17,5893713	6,87716886	37,7179	-0,00066955	0,17770497	0,603409
PPP-keine-GIL	opt. B.	17,2169924	7,0737851	35,2068	0,00496327	0,15000767	0,530896
RPP-RU-AM	opt. B.	17,4060208	6,97955008	35,3978	0,00115209	0,03982989	0,118134
RPP-RU-GgL	opt. B.	17,5678824	7,48091659	37,1244	0,00507927	2,46746097	12,3179
RPP-RU-GIL	opt. B.	17,4433255	6,880525	34,8196	0,00177968	0,03853056	0,104823
ePOSIT-RU-AM	opt. O.	16,94573	6,84155343	35,8225	-0,08746239	2,09819536	5,82426
ePOSIT-RU-GgL	opt. O.	17,4112035	6,69948031	35,0669	0,01744247	0,53596475	10,5172
ePOSIT-RU-GIL	opt. O.	17,4014157	6,72926317	37,454	0,09056451	2,11147799	5,9169
LMI-RU-AM	opt. O.	17,4129378	7,30914958	37,9139	0,06365849	2,91426438	11,931
LMI-RU-GgL	opt. O.	17,5975713	6,89720423	35,773	0,00896789	0,25256311	2,60435
LMI-RU-GIL	opt. O.	17,8885624	7,23240532	35,3512	-0,06044557	2,59747635	10,8306
PPP-keine-AM	opt. O.	17,1956201	6,80850588	36,3031	-0,00966029	0,98099462	3,14903
PPP-keine-GIL	opt. O.	17,4370994	7,07520977	38,9445	0,00629832	1,04038784	3,28907
RPP-RU-AM	opt. O.	17,2634434	7,03521661	37,1093	-0,16549271	3,12774442	13,01
RPP-RU-GgL	opt. O.	17,4934038	6,73247629	34,9007	-0,01186751	0,19104661	0,944548
RPP-RU-GIL	opt. O.	17,5227815	6,78239327	35,2906	0,10359451	2,8541233	10,3338
ePOSIT-RU-AM	opt. P.	3,24956843	1,74120632	11,9359	-0,09085443	2,06558447	7,86894
ePOSIT-RU-GgL	opt. P.	3,09197191	1,54591665	9,36508	-0,01906217	2,15449694	7,0659
ePOSIT-RU-GIL	opt. P.	3,0777742	1,54544657	9,91327	0,02782428	2,09041463	6,31921
LMI-RU-AM	opt. P.	3,93508766	2,3959921	17,6168	-0,07564733	2,73036142	9,38461
LMI-RU-GgL	opt. P.	3,45538601	1,95660183	13,6096	-0,03978096	2,22681301	10,5212
LMI-RU-GIL	opt. P.	3,46327637	2,04354666	15,1637	-0,10855781	2,60516644	7,7855
PPP-keine-AM	opt. P.	2,64373331	1,3147584	7,74597	-0,04764081	1,04370477	3,96103
PPP-keine-GIL	opt. P.	2,69254998	1,30148903	7,29224	0,02057813	1,00863567	3,45078
RPP-RU-AM	opt. P.	3,91827822	2,54338506	17,5205	0,12768161	3,08647613	11,6014
RPP-RU-GgL	opt. P.	3,42464226	1,90350122	17,5098	0,01607852	2,17832313	9,59691
RPP-RU-GIL	opt. P.	3,3848915	1,87812918	12,5558	-0,0831683	2,77106042	10,5604

²⁶ Legende: opt. B.= optimale Bildpunkte; opt. O. = optimale Objektpunkte; opt. P. = optimale Parallelität

Anhang E. Darstellung Praxisversuche

Fixe Parameter des Versuchsaufbaus aller folgenden Praxisversuche entsprechen der dargestellten Einsatzumgebung und dem weiteren domänenspezifischen Entwurf in Abschnitt 7.1. Darüber hinausgehende Angaben zu Versuchsparametern werden im Folgenden dargestellt.

Lokalisierung Fahrversuche

In den Fahrversuchen wird eine vorgegebene Teststrecke in regelmäßiger Wiederkehr unter variierenden Systemparametern abgefahren und die Fahrt hinsichtlich der Posen- und Bildsignalverarbeitungs-Laufzeit dokumentiert.

Tabelle 8-6: Versuchsplan praxisnaher Fahrversuche zur Lokalisierung

Fixe Parameter					
Auflösung [Pixel]	1392 x 1040				
Bildrate [1/s]	20				
Brennweite f [mm]	8				
Blendenzahl	2				
Intrinsische Kameraparameter	$k_u = 1319,5924430251309$ $k_v = 1316,7893528270108$ $u_0 = 690,96571081110699$ $v_0 = 512,14055748411795$ $s = 0$				
Objektabstand g [m]	9,35				
Hubmastneigung [°]	0 (d.h. senkrechte Stellung)				
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	3,5 (Toleranzbereich +/- 2 km/h)				
Räumliche Anordnung Kamera	Um x^b - und y^b -Achse geneigte Anbringung der Kamera				
Wetterbedingungen	Geringe Bewölkung, dadurch mittelmäßiger, diffuser Einfall natürlichen Lichtes über Hallendeckenfenster				
Hallenbeleuchtung	eingeschaltet				
Optimierungsstrategien	Exponentielle Glättung				
Variable Parameter					
Verfahrenskombinationen	<table border="1"> <tr> <td>PPP-keine-GIL</td> <td>ePosit-RU-GIL</td> <td>PPP-keine-AM</td> <td>RPP-RU-AM</td> </tr> </table>	PPP-keine-GIL	ePosit-RU-GIL	PPP-keine-AM	RPP-RU-AM
PPP-keine-GIL	ePosit-RU-GIL	PPP-keine-AM	RPP-RU-AM		
Bewegungsmodellierung	gefiltert (statisch) keine				
Fahrstrecke (vgl. Abbildung 7-2)	Ort A → Ort B → Ort C Ort C → Ort B → Ort A (zzgl. Toleranz in der Ausführung von +/- 0,5 m)				
Versuchsdurchführung					
Anzahl Wiederholungen jeder Messung	10				
Gemessene Größe	<table border="1"> <tr> <td>Positionsabweichung [cm]</td> <td>Orientierungsabweichung [°]</td> <td>Laufzeit Bildverarbeitungsfilter [ms]</td> </tr> </table>	Positionsabweichung [cm]	Orientierungsabweichung [°]	Laufzeit Bildverarbeitungsfilter [ms]	
Positionsabweichung [cm]	Orientierungsabweichung [°]	Laufzeit Bildverarbeitungsfilter [ms]			
Referenz gemessener Größe (Soll-Wert)	Trend durch lineare Regressionsanalyse der gemessenen Posen je Wiederholung einer Fahrt				

Eine Darstellung der Messergebnisse findet sich in Auszügen in Tabelle 7-8 und Tabelle 7-9.

Hubhöhe Fahrversuche

In den Fahrversuchen wird auf einer vorgegebenen Teststrecke die Hubhöhe variiert und das jeweilige Ergebnis der Hubhöhenbestimmung für vorgegebene, statische Hubhöhen dokumentiert.

Tabelle 8-7: Versuchsplan praxisnaher Fahrversuche zur Hubhöhen-Bestimmung

Fixe Parameter	
Auflösung [Pixel]	1392 x 1040
Bildrate [1/s]	20
Brennweite f [mm]	8
Blendenzahl	2
Intrinsische Kameraparameter	$k_u = 1319,5924430251309$ $k_v = 1316,7893528270108$ $u_0 = 690,96571081110699$ $v_0 = 512,14055748411795$ $s = 0$
Hubmastneigung [°]	0 (d.h. senkrechte Stellung)
Fahrgeschwindigkeit [km/h]	3,5 (Toleranzbereich +/- 2 km/h)
Gabelzinkenzustand	unbeladen
Räumliche Anordnung Kamera	Um x^b - und y^b -Achse geneigte Anbringung der Kamera
Wetterbedingungen	Geringe Bewölkung, dadurch mittelmäßiger, diffuser Einfall natürlichen Lichtes über Hallendeckenfenster
Hallenbeleuchtung	eingeschaltet
Optimierungsstrategien	Exponentielle Glättung
Variable Parameter	
Verfahrenskombinationen	PPP-keine-GIL ePosit-RU-GIL
Statische Hubhöhe [cm]	50 100
Fahrstrecke (vgl. Abbildung 7-2)	Ort A → Ort B → Ort C Ort C → Ort B → Ort A (zzgl. Toleranz in der Ausführung von +/- 0,5 m)
Versuchsdurchführung	
Anzahl Wiederholungen jeder Messung	10
Gemessene Größe	Hubhöhe [cm]
Referenz gemessener Größe (Soll-Wert)	Versuchsparameter für statische Hubhöhe

Eine Darstellung der Messergebnisse findet sich in Auszügen in Tabelle 7-11.

Hubhöhe Standversuche

In den Standversuchen wird im Stillstand vor einem Regal die Hubhöhe zwischen den jeweiligen Regalfachhöhen variiert und das jeweilige Ergebnis der Hubhöhenbestimmung für die angefahrne Regalfachhöhe dokumentiert.

Tabelle 8-8: Versuchsplan praxisnaher Standversuche zur Hubhöhen-Bestimmung

Fixe Parameter	
Auflösung [Pixel]	1392 x 1040
Bildrate [1/s]	20
Brennweite f [mm]	8
Blendenzahl	2
Intrinsische Kameraparameter	$k_u = 1319,5924430251309$ $k_v = 1316,7893528270108$ $u_0 = 690,96571081110699$ $v_0 = 512,14055748411795$ $s = 0$
Hubmastneigung [°]	0 (d.h. senkrechte Stellung)
Gabelzinkenzustand	unbeladen
Räumliche Anordnung Kamera	Um x^b - und y^b -Achse geneigte Anbringung der Kamera
Standort Versuchsausführung	Ort A, Regallager
Wetterbedingungen	Geringe Bewölkung, dadurch mittelmäßiger, diffuser Einfall natürlichen Lichtes über Hallendeckenfenster
Hallenbeleuchtung	eingeschaltet
Optimierungsstrategien	Exponentielle Glättung
Variable Parameter	
Verfahrenskombinationen	PPP-keine-GIL ePosit-RU-GIL
Regalfachhöhe, bzw. Hubhöhe [cm]	159 300
Versuchsdurchführung	
Anzahl Wiederholungen jeder Messung	10
Gemessene Größe	Hubhöhe [cm]
Referenz gemessener Größe (Soll-Wert)	Versuchsparameter für statische Hubhöhe

Eine Darstellung der Messergebnisse findet sich in Auszügen in Tabelle 7-11.

Anhang F. Lösung des Zielkonfliktes in der Fokussierung und Belichtungssteuerung

Wie in Abschnitt 6.6.3 dargestellt, existiert aufgrund der unterschiedlichen Lichtverhältnisse im Nah- und Fernbereich des Bildes ein Zielkonflikt. Dieser ist zum Teil in der statischen Fokussierung betrachteter Objekte begründet. Der Zielkonflikt betrifft insbesondere die Aufgaben der Fokussierung und der Belichtungssteuerung, die im weiteren Verlauf für die drei Szenarien ‚Fahrt‘, ‚hohe Einlagerung‘ und ‚tiefe Einlagerung‘ diskutiert werden. In dieser Diskussion wird die Eignung entsprechender Betriebsstrategien für die Fokussierung und Belichtungssteuerung überprüft. Hierzu erfolgt für das jeweilige Szenario zuerst eine Priorisierung der in dieser Arbeit betrachteten Zustandsinformationen ‚Pose Fahrzeug‘ (Lokalisierung), ‚Hubhöhe Gabelzinke (GZ)‘ und ‚Hubmastneigung‘. Im zweiten Schritt wird der jeweils erforderliche Fokusbereich zu der jeweiligen Zustandsinformation identifiziert.

Anschließend erfolgt eine Bewertung der beiden Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Zustandsinformation im jeweiligen Szenario. Folgende beiden Betriebsstrategien werden betrachtet:

- Statische Fokussierung auf den Fernbereich
- Belichtungssteuerung entsprechend der Lichtverhältnisse in der ROI Hubhöhen-Marker

Zwischen den einzelnen Zustandsinformationen eines Szenarios besteht in diesen beiden Aufgaben der Zielkonflikt, der durch abgeleitete Maßnahmen zu lösen oder zumindest zu reduzieren ist. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass mindestens eine der beiden Betriebsstrategien für die jeweilige Zustandsinformation zutreffend ist. Denn mit einem unscharfen oder einem schlecht belichteten Marker ist die Markerererkennung dennoch möglich, sofern auf entsprechende Identifikationsverfahren (vgl. Abschnitt 6.5.1) gesetzt wird.

Tabelle 8-9: Lösung des Zielkonfliktes Fokussierung bei Anpassung der Belichtungssteuerung an ROI Hubhöhen-Marker²⁷

Szenario	Priorität	Zustands-information	Fokus-bereich	Eignung Fokus Fernbereich	Eignung ROI Hubhöhen-Marker	Abzuleitende Maßnahme
Fahrt	1.	Pose Fzg.	F	X	-	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Überabtastung des Lokalisierungsmarkers durch entsprechend hohen Nyquistfaktor $k_{NY\ tok}$
	2.	Hubmastneigung	N	-	X	
	3.	Hubhöhe GZ	N	-	X	
	Erläuterung zur Priorisierung <ul style="list-style-type: none"> In Fahrt erfolgt keine Ein- und Auslagerung Die Hubmastneigung ist für die exakte Positionsbestimmung relevant, da sie eine genaue virtuelle Parallelität zwischen Lokalisierungsmarker und Kamera zu erzeugen ermöglicht (vgl. Abschnitt 6.6) Die Hubhöhe kann lediglich dazu dienen eine den Sicherheitsvorschriften gerechte Stellung der Gabelzinke zu überprüfen 					
Hohe Einlagerung	1.	Hubhöhe GZ	F	X	X	<ul style="list-style-type: none"> Für den Marker zur Bestimmung der Hubmastneigung, sog. Rotations-Marker, ist eine größerer Nyquistfaktor $k_{NY\ rot}$ vorzusehen, als für den Hubhöhen-Marker bei maximalem Hub: $k_{NY\ rot} > k_{NY\ max.Hub}$
	2.	Hubmastneigung	N	-	-	
	3.	Pose Fzg.	F	X	X	
	Erläuterung zur Priorisierung <ul style="list-style-type: none"> Die für die exakte Anfahrt relevante Hubhöhenänderung im erfolgt i.d.R. im Stillstand des Fahrzeuges vor dem Lagerplatz Positionsänderungen haben den Charakter einer Korrektur, jedoch ist der Ziellagerplatz bereits angefahren Es ist somit nur mit geringen Positionsänderungen zu rechnen 					
Tiefe Einlagerung	1.	Hubhöhe GZ	N	-	X	<ul style="list-style-type: none"> Wie für das Szenario ‚Fahrt‘ bereits vorgegeben, ist eine im Verhältnis hohe Überabtastung für den Lokalisierungsmarker zu wählen
	2.	Hubmastneigung	N	-	X	
	3.	Pose Fzg.	F	X	-	
	Erläuterung zur Priorisierung <ul style="list-style-type: none"> Priorisierung entspricht dem Szenario ‚hohe Einlagerung‘, da auch hier nicht mit großen Positionsänderungen aufgrund des überwiegenden Stillstandes des Fahrzeuges zu rechnen ist. 					

Insgesamt zeigt die Abwägung (vgl. Tabelle 8-9) der beiden betrachteten Betriebsstrategien für die Fokussierung und Belichtungszeitanpassung einzelne, mögliche Maßnahmen. Lediglich für das Szenario ‚hohe Einlagerung‘ ist für die Zustandsinformation keine ausreichende Eignung beider Betriebsstrategien feststellbar. Für die weitere Umsetzung ist hierauf zu achten. In der Abwägung bestimmte weitere Maßnahmen sind Bestandteil der Tabelle 6-6.

²⁷ Legende: F = Fernbereich; N = Nahbereich; X = hohe Eignung; - = nicht geeignet

