

# Kalibrierung von Fahrerlosen Transportsystemen und Flotten – Stand der Technik und Herausforderungen

## Calibration of Automated Guided Vehicles and Fleets – State of the Art and Challenges

*Jahn Hoffmann  
Johannes Hinckeldeyn  
Niklas Mattschull  
Rodrigo Arias  
Jochen Kreuzfeld*

<sup>1</sup> E&K Automation GmbH  
<sup>2</sup> Institut für Technische Logistik  
Technische Universität Hamburg

**F**ahrerlose Transportfahrzeuge nehmen durch ihre Effizienz in der Industrie einen immer größeren Stellenwert ein. Hieraus resultiert eine erhöhte Nachfrage bei den Produzenten. Um diese zu bedienen, ist es notwendig die Fertigungsprozesse zu optimieren. Eine Möglichkeit bietet hierbei die Kalibrierung, da heutzutage jedes Fahrzeug weitgehend einzeln und manuell eingestellt werden muss. Eine Optimierung dieses Prozessschritts würde durch die Skaleneffekte einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung beitragen. Dieser Artikel analysiert daher mithilfe einer Literaturrecherche die verschiedenen Arten von Kalibrierung und inwieweit diese automatisiert werden können. Ergänzend dazu wird untersucht, ob nicht nur Einzelfahrzeuge kalibriert werden können, sondern dies gleichzeitig für eine gesamte Flotte durchgeführt werden kann.

*[Schlüsselwörter: Fahrerlose Transportfahrzeuge, Kalibrierung, Fahrzeugparameter, Flottenmanagement]*

**A**utomated Guided Vehicles are becoming more and more important in the industry due to their efficiency. This results in an increased demand on the producers' side. In order to serve this demand it is necessary to optimise the production processes. One possibility is calibration, since nowadays each vehicle must be adjusted individually. An optimisation of this process step would make a considerable contribution to increase the efficiency through economies of scale. This article therefore analyses the different types of calibration and the extent to which they can be automated. In addition it is researched whether it is not only possible to calibrate single vehicles, but to do this simultaneously for an entire fleet.

*[Keywords: Automated Guided Vehicles, Calibration, vehicle parameters, fleet management]*

### 1 EINLEITUNG

Der Trend der Automatisierung in der Logistik ist ungebrochen. Viele der Grundfunktionen der Logistik, wie Lagern, Sortieren, Kommissionieren, Verpacken, Vereinzeln und Konsolidieren, werden zunehmend automatisiert, um die Effizienz weiter zu steigern. Dies gilt auch für die Funktion des Förderns. Dort können zur Automatisierung Stetigförderer eingesetzt werden, z. B. Förderbänder oder Rollenförderer. Dabei handelt es sich allerdings um stationäre Fördertechnik, welche in der Regel hohe Investitionen erfordert und im Vergleich zu Unstetigförderern bei Änderungen wiederum einen höheren Aufwand aufweist. Um das Fördern flexibel zu automatisieren, bieten sich vor allem Fahrerlose Transportsysteme an. Bisher konnten sich diese jedoch wegen der hohen Investitionskosten und der Komplexität des Systems nicht am Markt durchsetzen. Ein Grund für die Komplexität von Fahrerlosen Transportsystemen ist das wiederholgenaue Positionieren bei der Lastübergabe. Die Zusammenarbeit von Sensoren und dem Fahrzeug ist komplex und anfällig für Fehler. Diese Fehler sollen durch das Kalibrieren des Fahrzeugs minimiert werden, damit die Messdaten nicht von der realen Position abweichen.

Bei der Kalibrierung handelt es sich nach der DIN 1319-1 [DEU95] um einen Messprozess, welcher den Zusammenhang zwischen dem Messwert der Ausgangsgröße und dem realen Wert des Zustandes des Systems unter bekannten Bedingungen wiedergibt. Hierdurch soll im nächsten Schritt durch das Einstellen einzelner Parameter am System die gemessene Abweichung der beiden Werte reduziert werden.

Für die Inbetriebnahme eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs muss eine initiale Kalibrierung durchgeführt werden. Jedoch ist dieser Prozessschritt fehleranfällig und zeitintensiv, da dieser in der Regel manuell durchgeführt werden muss. Ein Mitarbeiter kann nur ein Fahrzeug zur Zeit kalibrieren, sodass bei einer gesamten Flotte ein signifikanter Zeitaufwand auftritt. Weiterhin tritt bei der manuellen Durchführung immer eine vom Menschen verursachte Ungenauigkeit auf, die sich auf die Zuverlässigkeit des Fahrzeugs auswirkt. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn eine gesamte Flotte kalibriert wird. Um die aufgeführten Probleme in der Kalibrierung zu lösen, befasst sich dieser Artikel mit den folgenden Forschungsfragen:

- Welche Arten der Kalibrierung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen gibt es?
- Kann die Kalibrierung automatisiert werden?
- Welchen Nutzen bringt eine automatische Kalibrierung?
- Wie kann eine Flotte von Fahrerlosen Transportfahrzeugen kalibriert werden?

## 2 METHODE

Zur Beantwortung der aufgeführten Forschungsfragen wurde eine Literaturanalyse durchgeführt. Die Betrachtung von Kalibrierung einzelner Sensoren wurde als Ausschlusskriterium für die Publikationen gewählt. Weiterhin wurden Publikationen, welche die Lokalisation von Fahrzeugen zum Gegenstand haben, ebenfalls nicht berücksichtigt. Um die Aktualität und Tiefe des Forschungsgebiets darzustellen, wurden verschiedene Suchstrategien angewandt. Sofern eine Publikation als relevant eingestuft wurde, wurde ausgehend hiervon sowohl vorwärts als auch rückwärts gesucht. Dies bedeutet, dass die referenzierten Quellen in der Veröffentlichung, als auch Publikationen, die diesen Beitrag zitieren, ebenfalls analysiert wurden. Bei dieser Strategie wurden insgesamt 188 Publikationen ausgewertet, die zwischen 1989 und

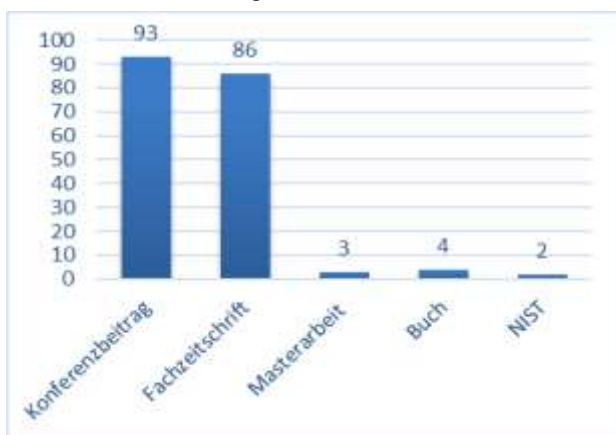


Abbildung 1 Auswertung der Veröffentlichungen

2020 veröffentlicht wurden. Abbildung 1 zeigt die Auswertung der Literaturrecherche nach der Art der Veröffentlichung.

Von den 188 Veröffentlichungen wurden 93 auf wissenschaftlichen Konferenzen veröffentlicht. Die zweitgrößte Gruppe von 86 Veröffentlichungen stammt aus Fachzeitschriften. Des Weiteren wurden drei Masterarbeiten, vier Bücher und zwei Veröffentlichungen des National Institute of Standard and Technology (NIST) ausgewertet. Von den 188 ausgewerteten Veröffentlichungen sind 38 relevant und wurden im Rahmen dieser Arbeit näher betrachtet.

## 3 ARTEN DER KALIBRIERUNG

In diesem Kapitel werden die in der Literaturanalyse identifizierten Kalibrierungsverfahren erläutert. Damit die Vor- und Nachteile der bisherigen Kalibrierungsmethoden verständlich werden, ist zwischen grundlegenden Fehlerarten zu unterscheiden. Diese werden in drei Kategorien unterteilt [IKP07]:

- Systematische Fehler
- Nicht-systematische Fehler
- Numerische Abweichung

Die systematischen Fehler entstehen durch Unkenntnis der genauen kinematischen Parameter des mobilen Roboters. Diese Fehler können durch Fertigungstoleranzen der einzelnen Komponenten entstehen, welche einen Einfluss auf die Sensoren haben. Ungleiche Raddurchmesser führen zu einer unterschiedlich gemessenen Strecke im Fahrzeug und dadurch zu einem Fehler im internen System [BF96]. Nicht-systematische Fehler sind zufällig generiert, weshalb diese schwierig herauszufiltern sind. Ein Beispiel für das Generieren eines solchen Fehlers ist das Fahren über unebenen Fußboden, welches zu Messfehlern führt. Die Numerische Abweichung ist die Limitation der Auflösung der Sensoren. Die Sensoren können nur diskrete Signale erfassen und bearbeiten, dies kann zu Abtastfehlern und Rundungsfehlern führen. Eine ausführliche Betrachtung dieser Fehlerquellen wurde von Kelly [KEL01] zusammengefasst.

Kalibrierung kann in zwei Arten der Anwendbarkeit eingeteilt werden, Online- oder Offline-Kalibrierung. Bei der Online-Kalibrierung ändern sich die Kalibrierungsparameter des Fahrzeugs während der Fahrt. Bei der Offline-Kalibrierung wird vor der ersten Fahrt ein bestimmter Kurs abgefahren, damit sich das Fahrzeug richtig kalibrieren kann. Dieser Kurs ist abhängig von der gewählten Kalibrierungsart. Die Kalibrierung wird in regelmäßigen Abständen erneuert, in der Zwischenzeit bleiben diese Parameter jedoch unverändert. Die Sensoren, welche bei diesen Fahrzeugen verbaut werden, lassen sich

in zwei Kategorien unterteilen, intern und extern. Bei internen Sensoren handelt es sich um Sensoren, welche eine Veränderung der Messwerte registrieren. Diese Veränderung ist relativ, da es keinen Bezug zur Umgebung gibt. Beispiele für diese Kategorie sind Encoder, Beschleunigungssensoren, Gyroskop oder Magnetfeldsensoren. Vor allem die Odometriesensoren sind relevant für die Bewegung des Fahrzeugs. Bei der Aufgabe dieser Sensoren handelt es sich um die Schätzung der Wegmessung. Sie bestehen aus einem Gesamtsystem aus Encoder, Getriebe und Rad, welches abhängig von der Kinematik des Fahrzeugs ist. Externe Sensoren bestimmen die absolute Position durch externe Marker oder Sensoren. Dies können Laserscanner mit künstlichen oder natürlichen Messpunkten, optische oder induktive Leitspursensoren sowie Funkpeilungen sein. Die Genauigkeit dieser Sensoren ist abhängig von der Anzahl der Marker, die sich in dem Messfeld befinden. Bei einer zu geringen Dichte von Markern sinkt die Lokalisationsgenauigkeit oder kann verloren gehen. Für eine exakte Positionierung des Fahrzeugs ist diese mit unterschiedlichen Sensorsystemen ausgestattet. Aufgrund der Koppelung der verschiedenen Sensoren werden diese ebenfalls kalibriert.

### 3.1 MANUELLE KALIBRIERUNG

Bei der manuellen Kalibrierung werden ausschließlich Einzelfahrzeuge kalibriert. Diese Methode ist einfach und kann bei jedem Fahrzeug angewandt werden. Die benötigten Hilfsmittel sind ein Laser-Entfernungsmesser, Papier, Stift und ein Maßband [LBH17]. Eine geschulte Fachkraft führt diese durch. Jeder Hersteller für Fahrerlose Transportsysteme hat ein Verfahren, wie die eigenen Fahrzeuge einzustellen sind. Des Weiteren gibt es auch vom „Institute of Standards and Technology“ zum Thema manuelle Kalibrierung [LBH17] eine Veröffentlichung. Diese Anleitung betrachtet Ackermann-, Dreirad- und flächenbewegliche Kinematik. Folgende Fahrzeugeinstellungen müssen bei der manuellen Kalibrierung eingestellt werden:

- Lenk-Encoder-Offsets,
- Spureinstellung,
- Geradeauslauf,
- richtiges Crabbing (Querfahrt bei gleichbleibender Fahrzeugorientierung),
- Einstellung des seitlichen Fehlers,
- Fahr-Encoder-Skalierung, und
- Stopp-Toleranz.

Beim Lenk-Encoder-Offset wird der Geradeauslauf grob kalibriert, indem die Lenkräder auf  $0^\circ$  eingestellt werden. Bei mehreren Lenkrädern muss als nächster Schritt die Spureinstellung überprüft werden, damit alle Räder in die gleiche Richtung laufen. Beim Geradeauslauf fährt das

Fahrzeug entlang einer geraden Linie. Dabei soll festgestellt werden, ob das Fahrzeug dieser Linie folgt. Bei Abweichungen muss der Lenk-Encoder-Offset erneut angepasst werden. Am Ende des Verfahrens sollte das Fahrzeug eine Strecke von 10 Metern fahren, ohne die Spur zu verlieren. Das Crabbing ist eine Fahrzeugbewegung auf der Fläche, bei der sich das Fahrzeug quer zur Hauptrichtung bewegt, diese kann ausschließlich von flächenbeweglichen Fahrzeugen durchgeführt werden. Dabei bewegt sich das Fahrzeug, ohne die Orientierung zu ändern. Es ist darauf zu achten, dass alle Räder zueinander richtig ausgerichtet sind. Die Einstellung des seitlichen Fehlers kann sich bei den verschiedenen Sensoren unterscheiden. Die Fahr-Encoder-Skalierung wird benötigt, um die korrekte gefahrene Distanz zu messen. Als letzter Fahrparameter wird die Stopp-Toleranz eingestellt, welche das Fahrzeug am richtigen Punkt stoppen lässt. Wie vorher beschrieben, ist es einerseits ein Vorteil der manuellen Kalibrierung, dass sie geringe technische Mittel benötigt und von einer geschulten Person, ohne spezifisches fachliches Wissen, durchgeführt werden kann. Auf der anderen Seite hängt die Kalibrierung sehr stark von einer akkuraten Arbeit der Person ab. Wenn die Person mehrere Fahrzeuge kalibrieren soll, kann das Ergebnis der Kalibrierung pro Fahrzeug unterschiedlich ausfallen.

### 3.2 AUTOMATISCHE KALIBRIERUNG VON EINZELFAHRZEUGEN

Die Kalibrierung könnte automatisiert werden, um sie effizienter und genauer durchzuführen. Bei dieser Kalibrierung würde das Fahrzeug selbst die Fahrparameter finden und einstellen. Das erste Konzept für automatisches Kalibrieren wurde im Jahre 1989 veröffentlicht [BAN89]. Es sieht einen Kalman Filter vor. In den darauffolgenden Jahren wurde dieses Konzept mehr und mehr weiterentwickelt. In diesem Kapitel wird auf die bisher veröffentlichten Verfahren eingegangen.

#### 3.2.1 KALMAN FILTER

Der Kalman Filter ist ein Verfahren zur iterativen Schätzung der Position und Kalibrierungsparameter. Es handelt sich um ein Online Verfahren [SJ11], welches während der Fahrt die Kalibrierungsparameter ändert. Sämtliche verfügbaren Daten werden genutzt, um daraus die Position zu berechnen und die Parameter nach der letzten Bewegung zu schätzen. Der Vorteil ist, dass keine bestimmte Strecke abgefahren und die Kalibrierung nicht erneuert werden muss. Eine Voraussetzung hierfür ist, dass ein Fahrzeug externe Sensoren besitzen muss, um sich genau zu lokalisieren [JLV99]. Bei dem Kalman Filter gibt es verschiedene Arten: Linearisiertes Kalman Filter, Erweitertes Kalman Filter, Sigma-Punkt-Kalman-Filter und Kalman Filter 2. Ordnung, welche in [WEN09] zusammengefasst sind. Das Linearisierte Kalman Filter schätzt indirekt den vermuteten Systemzustand ab. Im Vergleich hierzu wird der Systemzustand beim erweiterten

Kalman Filter direkt geschätzt. Beim Sigma-Punkt-Kalman-Filter wird mithilfe eines normalverteilten Zufallsvektors der Systemzustand geschätzt. Dabei werden nichtlineare Werte genauer geschätzt als beim Erweiterten Kalman Filter. Die bisherigen Kalman Filter nutzen jedoch nur das erste Glied der Taylorreihenentwicklung. Beim Kalman Filter der 2. Ordnung wird diese Taylorreihenentwicklung nach dem quadratischen Glied abgebrochen, weshalb man diesen als Kalman Filter der 2. Ordnung bezeichnet. Welcher Kalman Filter bei der Kalibrierung eingesetzt wird, ist abhängig von den zu erreichenden Anforderungen des Fahrzeugs.

### 3.2.2 UMBMARK (UMB)

Die Methode UMBmark (University of Michigan Benchmark) wurde an der University of Michigan entwickelt [BF95A]. Dieses Verfahren wurde im Jahr 1995 veröffentlicht und seitdem mehrmals weiterentwickelt. Im ursprünglichen Verfahren fährt das Fahrzeug automatisch ein Rechteck. An den jeweiligen Ecken dreht sich das Fahrzeug um 90°. Am Ende erreicht das Fahrzeug wieder den Startpunkt und berechnet die Abweichungen der Fahrt. Dieses Verfahren wurde zu einer Zeit entwickelt, als das Fahrzeug nur begrenzte Sensorik für die Positionsfindung besaß. Das Fahrzeug war ausschließlich mit Ultraschallsensoren ausgestattet, welche zur Positionsbestimmung dienen. Des Weiteren ist dieses Verfahren nicht voll automatisch, da das Fahrzeug von einem Operator auf eine bestimmte Position gestellt werden muss. Erst anschließend kann das Fahrzeug automatisch den vordefinierten Kurs nachfahren. Dieses Verfahren wurde jedoch stetig weiterentwickelt, sodass folgende unterschiedliche Methoden daraus entstanden sind: BCPT Methode [AAA06], Bostanis' Methode [BVD08], Lee's Methode [KCW11] und Jung's Methode [JC12]. In diesen neuen Verfahren sind der Fahrkurs oder die Berechnung der Kalibrierung verändert worden. Die Fehlerparameter konnten somit sukzessive genauer bestimmt und minimiert werden.

### 3.2.3 ITERATIV LERNENDE REGLUNG (ITR)

Dieses Verfahren ist ein zyklischer Prozess, bei dem die Fehlerparameter des Fahrzeugmodells bestimmt werden [MYC10]. Wie beim Kalman Filter handelt es sich um ein Online Verfahren, bei dem kein bestimmter Fahrkurs abgefahren werden muss. Dieses Verfahren ist ein regelungstechnischer Ansatz und versucht mithilfe des Algorithmus die Fehlerparameter zu bestimmen und diese zu minimieren. Diese Methode wurde nur einmal im Jahr

2010 präsentiert. Als Nachteil dieses Verfahrens ist zu nennen, dass es keine nicht-systematischen Fehler korrigieren kann.

### 3.2.4 SCHÄTZVERFAHREN

Schätzverfahren hingegen schätzen die Kalibrierungsparameter auf Basis statischer Methoden ab. Dabei werden die Messdaten als Grundlage verwendet. In den Veröffentlichungen gibt es zwei Arten von Kalibrierungsschätzverfahren. Beim ersten verwendeten Schätzverfahren handelt es sich um das Maximum-Likelihood Verfahren [RT99]. Das Zweite ist die Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) [ACF05]. Beide Verfahren werden Offline durchgeführt und unterscheiden nur in ihrem Kriterium der statistischen Auswertung.

## 4 EVALUATION

Im folgenden Kapitel werden die Forschungsfragen „Welche Arten der Kalibrierung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen gibt es?“ und „Kann die Kalibrierung automatisiert werden?“ auf Grundlage der Literaturrecherche beantwortet.

### 4.1 ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER VERFAHREN

Die Tabelle 1 zeigt die Entwicklung der Kalibrierungsverfahren nach Jahren sortiert. Die erste Veröffentlichung stammt aus dem Jahr 1989 und beschreibt das Konzept der Kalibrierung mithilfe eines Kalman Filters [BAN89]. In den nächsten zwei Jahrzehnten wurden die Kalman Filter und UMB-Methode stetig weiterentwickelt. Bei dem Verfahren mit den meisten Publikationen handelt es sich um die UMB-Methode, welche im Jahr 1995 von Borenstein veröffentlicht wurde [BF95a]. Auf Basis dieser Veröffentlichung wurden verschiedene Weiterentwicklungen erforscht, die die Lokalisationsgenauigkeit verbessern konnten. In den Publikationen wird aufgezeigt, dass zu Beginn der Kalibrierung vor allem Odometrie-, Ultraschall- oder Gyroskop-Sensoren verwendet wurden. Erst Ende der 2000er wurden exakte Lokalisationssensoren entwickelt, welche neue Kalibrierungsverfahren ermöglichten. Ende der 2010er wurde überwiegend an der Methode der MKQ geforscht. Es konnte sich jedoch kein Kalibrierungsverfahren über die Zeit als allgemeingültiger Standard durchsetzen, da die Verfahren zu unterschiedliche Ansätze verfolgen und sich der Anwendungsfall zu stark unterscheidet.

Titel	Referenz	Jahr	Verfahren
A Self-Tuning Navigation Algorithm for a Robotic Vehicle	[BAN89]	1989	Kalman Filter
Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots	[BF95b]	1995	UMB
UMBmark: a benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots	[BF95a]	1996	UMB
Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots	[BF96]	1996	UMB
Location Estimation for an Autonomously Guided Vehicle using an Augmented Kalman Filter to Autocalibrate the Odometry	[LBA98]	1998	Kalman Filter
Experimental results from internal odometry error correction with the OmniMate mobile robot	[BOR98]	1998	UMB
Online Self-Calibration for Mobile Robots	[RT99]	1999	Likelihood
Development and Experimental Validation of an Adaptive Extended Kalman Filter for the Localization of Mobile Robots	[JLV99]	1999	Kalman Filter
Collective localization: a distributed Kalman filter approach to localization of groups of mobile robots	[RB00]	2000	Kalman Filter
Self-calibration of AGV inertial-odometric navigation using absolute-reference measurements	[CEC02]	2002	Kalman Filter
Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot during Navigation	[MS03]	2003	Kalman Filter
Simultaneous localization and odometry calibration for mobile robot	[MTT03]	2003	Kalman Filter
A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation	[ACF05]	2005	MKQ
Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors Caused by Kinematics Imperfections in Mobile Robots	[AAA06]	2006	UMB
Linear estimation of the physical odometric parameters for differential-drive mobile robots	[AC07]	2007	MKQ
SIMPLE OFF-LINE ODOMETRY CALIBRATION OF DIFFERENTIAL DRIVE MOBILE ROBOTS	[IKP07]	2007	UMB
Simultaneous maximum-likelihood calibration of odometry and sensor parameters	[CMO08]	2008	Likelihood
Calibration of Kinematic Parameters of a Car-Like Mobile Robot to Improve Odometry Accuracy	[LC08]	2008	UMB
A Novel Method to Measure and Correct the Odometry Errors in Mobile Robots	[BVD08]	2008	UMB
Kinematic parameter calibration of a car-like mobile robot to improve odometry accuracy	[KWK10]	2010	UMB
The sources of position errors of omni-directional mobile robot with Mecanum wheel	[HKL10]	2010	MKQ
Augmented EKF based SLAM method for Improving the Accuracy of the Feature Map	[JWS10]	2010	Kalman Filter
Terminal Iterative Learning Control for Calibrating Systematic Odometry Errors in Mobile Robots	[MYC10]	2010	ITR
Kalman Filter based On-line Calibration of Laser Scanner for Vehicle Navigation	[SJ11]	2011	Kalman Filter
Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm	[GMJ11]	2011	UMB
Accurate calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots	[KCW11]	2011	UMB
Calibration of wheeled mobile robots with differential drive mechanisms: An experimental approach	[MSM12]	2012	UMB
Accurate Calibration of Two Wheel Differential Mobile Robots by Using Experimental Heading Errors	[JC12]	2012	UMB
Calibration of omnidirectional wheeled mobile robots: method and experiments	[MMS13]	2013	UMB
Simultaneous Calibration of Odometry and Sensor Parameters for Mobile Robots	[CFM13]	2013	Likelihood
Accurate calibration of systematic errors for car-like mobile robots using experimental orientation errors	[JSM16]	2016	UMB
Auto-Calibration Methods of Kinematic Parameters and Magnetometer Offset for the Localization of a Tracked Mobile Robot	[CLM16]	2016	Kalman Filter
A Novel Calibration Method for Industrial AGVs	[KRO17]	2017	MKQ
Rotational Odometry Calibration for Differential Robot Platforms	[TT17]	2017	UMB
Weighted online calibration for odometry of mobile robots	[GH17]	2017	MKQ
Guideline for automatic guided vehicle calibration	[LBH17]	2017	Manuel
Calibration for Odometry of Omnidirectional Mobile Robots Based on Kinematic Correction	[LLY19]	2019	MKQ
Efficient calibration of four wheel industrial AGVs	[GRO19]	2019	MKQ

Tabelle 1. Entwicklung der Kalibrierungsarten nach Jahren

#### 4.2 EINTEILUNG DER VERÖFFENTLICHUNGEN IN ENTWICKLUNGSSTAND VS. KALIBRIERUNGSART

Die aufgeführten Publikationen werden in der Tabelle 2 nach dem jeweiligen Entwicklungsstand und der verwendeten Kinematik eingeteilt. Die vertikale Achse teilt die Veröffentlichungen in die drei Entwicklungsstadien Konzept, Prototyp und industrielle Einsetzbarkeit ein. Beim Konzept werden nur Veröffentlichungen aufgeführt, welche als erste einen neuen Ansatz beschreiben und dieses mithilfe von Simulationen belegen. In der Kategorie

Prototyp befinden sich Veröffentlichungen, welche das Konzept erstmals praktisch validiert haben. Bei der Validierung werden ein oder mehrere prototypische Fahrzeuge, welche nicht für die industrielle Umgebung einsetzbar sind, auf Basis des Verfahrens getestet. Die letzte Kategorie bildet die industrielle Einsetzbarkeit der Verfahren. Hierbei werden die automatischen Kalibrierungen an Industriefahrzeugen angewandt. Die Fahrzeuge werden im Dauerbetrieb und auf längeren Entfernungen in einer industriellen Umgebung eingesetzt. Die Fahrzeuge werden somit stärker beansprucht.

	Manuelle Kalibrierung	Automatische Kalibrierung einzelner FTS				FTS Flotten
		Differential Drive	Dreirad Fahrzeug	Ackermann	Flächenbeweglich	
<b>Konzept</b>		Kalman Filter [MS03] {2003}	Kalman Filter [BAN89] {1989}		Kalman Filter [MS03] {2003}	
<b>Prototyp</b>		UMB [BF95a] {1995}	Kalman Filter [CEC02] {2002}	UMB [LC08] {2008}	UMB [BOR98] {1998}	Kalman Filter [RB00] {2000}
		UMB [BF95b] {1995}		UMB/Kalman Filter [KWK10] {2010}	MKQ [HKL10] {2010}	UMB [GMJ11] {2011}
		UMB [BF96] {1996}		Kalman Filter [JLV99] {2011}	UMB [MMS13] {2013}	
		Kalman Filter [LBA98] {1998}		UMB [JSM16] {2016}	MKQ [LLY19] {2019}	
		Likelihood [RT99] {1999}				
		Kalman Filter [JLV99] {1999}				
		Kalman Filter [MTT03] {2003}				
		MKQ [AAA06] {2005}				
		UMB [AAA06] {2006}				
		UMB [IKP07] {2007}				
		MKQ [AC07] {2007}				
		Likelihood [CMO08] {2008}				
		UMB [BVD08] {2008}				
		Kalman Filter [JWS10] {2010}				
		ILR [MYC10] {2010}				
		UMB [KCW11] {2011}				
		UMB [MSM12] {2012}				
		UMB [JC12] {2012}				
		Likelihood [CFM13] {2013}				
		Kalman Filter [CLM16] {2016}				
	UMB [TT17] {2017}					
	MKQ [GH17] {2017}					
<b>Industrielle Einsetzbarkeit</b>	Manuelle Kalibrierung [LBH17] {2017}		MKQ [KRO17] {2017}	MKQ [GRO19] {2019}		

Tabelle 2. Einteilung der Veröffentlichungen in Entwicklungsstand und der untersuchten Kinematik

Auf der horizontalen Achse werden die Veröffentlichungen in manuelle sowie automatische Kalibrierung von Einzelfahrzeugen und von Flotten unterteilt. Die automatische Kalibrierung von Einzelfahrzeugen lässt sich anhand der Kinematik der Fahrzeuge differenzieren. Als gängige Kinematik sind Differential-, Dreirad-, Ackermann- und die flächenbewegliche Kinematik zu nennen. Bei einem

Differential-Fahrzeug handelt es sich um ein Fahrzeug, welches zwei Antriebe auf einer Achse besitzt. Diese beiden Antriebe können sich unabhängig voneinander bewegen. Bei einer Kurvenfahrt bewegen sich die Antriebe unterschiedlich schnell, wodurch sich die Richtung des Fahrzeugs verändert. Zu den zwei Antrieben gibt es stets Stützrollen, welche die Kippstabilität des Fahrzeugs sicherstellt. Ein Dreirad-Fahrzeug steht auf drei

Punkten. Im hinteren Teil des Fahrzeugs sind zwei Stützrollen und im vorderen Teil ein Radnabenantrieb. Dieser Radnabenantrieb ist ein Fahr- und Lenkantrieb in einem. Die Ackermann-Kinematik besitzt zwei Achsen. Die hintere Achse besteht aus zwei Stützrollen, welche hinterherlaufen. Die vordere Achse hat zwei Antriebsräder, die über die Achse angetrieben werden. Diese Achse wird gelenkt, um die Fahrtrichtung zu ändern. Die letzte Kategorie bildet die flächenbewegliche Kinematik. Diese lässt das Fahrzeug sich in alle Richtungen bewegen, ohne dass sich die Fahrzeugausrichtung ändert. Es gibt verschiedene Ansätze, wie diese Kinematik umgesetzt werden kann. Die Tabelle 2, zeigt, dass es für das manuelle Kalibrieren eine Veröffentlichung gibt [LBH17], welche den Stand der industriellen Einsetzbarkeit aufweist.

Als Weiterentwicklung der manuellen Kalibrierung kann die automatische Kalibrierung von Einzelfahrzeugen betrachtet werden. Die meisten Publikationen können dieser Kategorie zugeordnet werden. Am häufigsten wurden Verfahren für die Differential-Fahrzeug-Kinematik entwickelt. In dieser Kategorie sind alle genannten Kalibrierungsverfahren angewandt worden. Die industrielle Einsetzbarkeit wurde für diese Art der Kinematik jedoch noch nicht erreicht. Bei der Dreirad- und Ackermann-Kinematik gibt es erheblich weniger Veröffentlichungen. Die verwendeten Verfahren sind UMB und Kalman Filter. Für beide Arten der Kinematik gilt, dass diese Verfahren durch den industriellen Einsatz von Fahrzeugen der Firma Elettric80 nachgewiesen wurden [KRO17]; [GRO19]. Bei der letzten Kinematik, der flächenbeweglichen, wurden drei Verfahren veröffentlicht. Es wurden der Kalman Filter, UMB und die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Wie auch bei der Differential-Kinematik, ist bei der flächenbeweglichen Kinematik keine industrielle Einsetzbarkeit nachgewiesen. Die Tabelle 2 verdeutlicht, dass die Veröffentlichungen hauptsächlich zum Entwicklungsstand Prototyp gezählt werden können. Die Anzahl der Veröffentlichungen ist allerdings zu gering, um die automatische Kalibrierung als Standard bezeichnen zu können.

Als letzte Kategorie wurde die Kalibrierung von gesamten Flotten betrachtet. Hierzu wurden zwei Veröffentlichungen gefunden, die einen eigenen Ansatz beschreiben. Einer davon ist, dass jedes Fahrzeug mit einer Methode für Einzelfahrzeuge kalibriert wird [GMJ11]. Dieser Ansatz ist einfach und abhängig von der gewählten Methode. Jedes Fahrzeug einzeln zu kalibrieren ist jedoch zeitaufwändig. Das Wissen der Flotte wird in diesem Fall nicht betrachtet. Ein zweiter Ansatz, welcher den Einfluss der Flotte betrachtet, nutzt einen Kalman Filter. Dieser Kalman Filter unterscheidet sich allerdings zu dem bei Einzelfahrzeugen eingesetzten. In diesem Fall wird ein einzelner Kalman Filter für alle Fahrzeuge verwendet [RB00]. Diese beiden Veröffentlichungen sind die ersten Ideen für die Kalibrierung von Flotten. Die Fragestellung

der Flottenkalibrierung wurde somit bisher noch wenig erforscht und sollte zukünftig eine wichtige Rolle spielen, da die Anzahl der genutzten Fahrerlosen Transportfahrzeuge steigt und dies zu mehr Aufwand bei der Kalibrierung führt.

## 5 ANALYSE DER BISHERIGEN KALIBRIERUNGSVERFAHREN

Die Analyse der Literaturrecherche zeigt auf, dass die bisherigen Kalibrierungsmethoden sich auf einen speziellen Fahrzeugtyp beziehen, bei dem die Fahrzeugkomponenten fest definiert sind. Jedoch kann in der industriellen Anwendung die Situation auftreten, dass die bisher verbauten Komponenten nicht mehr lieferbar sind. Folglich werden äquivalente Komponenten eingesetzt. Ein weiterer Grund von Abweichungen der bisherigen Komponenten ist die Weiterentwicklung des Fahrzeugs, um bestehenden Schwächen des Fahrzeugs zu minimieren. Ein solcher Austausch kann allerdings dazu führen, dass die automatische Kalibrierung nicht mehr durchführbar ist. Jedoch ist es aufwändig, bei jeder Anpassung am Fahrzeug ein neues automatisches Kalibrierungsverfahren zu entwickeln, weshalb die Erforschung eines allgemeingültigen Ansatzes einen Forschungsschwerpunkt darstellen sollte. Dieser Ansatz sollte weiterhin die Möglichkeit bieten verschiedene Kinematikarten zu kalibrieren, um die in der Literaturrecherche aufgezeigte Vielfalt an Verfahren zu reduzieren.

Die Forschungsfrage „Wie kann eine Flotte von Fahrerlosen Transportfahrzeugen kalibriert werden?“ konnte nur zum Teil beantwortet. Der Nutzen der automatischen Kalibrierung, wie die Wirtschaftlichkeit, wurde nicht weiter untersucht. Des Weiteren wurden während der Literaturrecherche weiterführende Fragen aufgeworfen, die in zukünftigen Forschungen Beachtung finden sollten. Diese Fragen wurden in Abbildung 2 als Baumdiagramm zusammengetragen und in die Kategorien Einzelfahrzeuge und Flotten unterteilt. Es handelt sich hierbei um grundlegende Fragen, die nur einen Einblick in das Thema geben. Die Fragen werden zur besseren Orientierung in die Themenbereiche Vergleich, Methode, Voraussetzung und Aufwand unterteilt. Im Themenbereich Vergleich sind verschiedene Fragen zu den unterschiedlichen Kalibrierungsarten gestellt. Ein Beispiel hierfür ist „Welche Vergleichsmöglichkeiten gibt es für die Kalibrierungsverfahren?“, da es das Ziel ist, die optimale Kalibrierungsart zu finden und diese zu nutzen. Ausgehend von dieser Forschungsfrage können weitere abgeleitet werden, wie zum Beispiel „Welches Kriterium ist das Optimale für diese Anwendung?“. Im Bereich Methode werden Fragen zu der Art der Kalibrierung zusammengefasst, da nicht geklärt ist, wie genau die Kalibrierung durchgeführt werden soll oder wie die

Kalibrierungsart auf die eigenen Voraussetzungen angepasst werden kann.

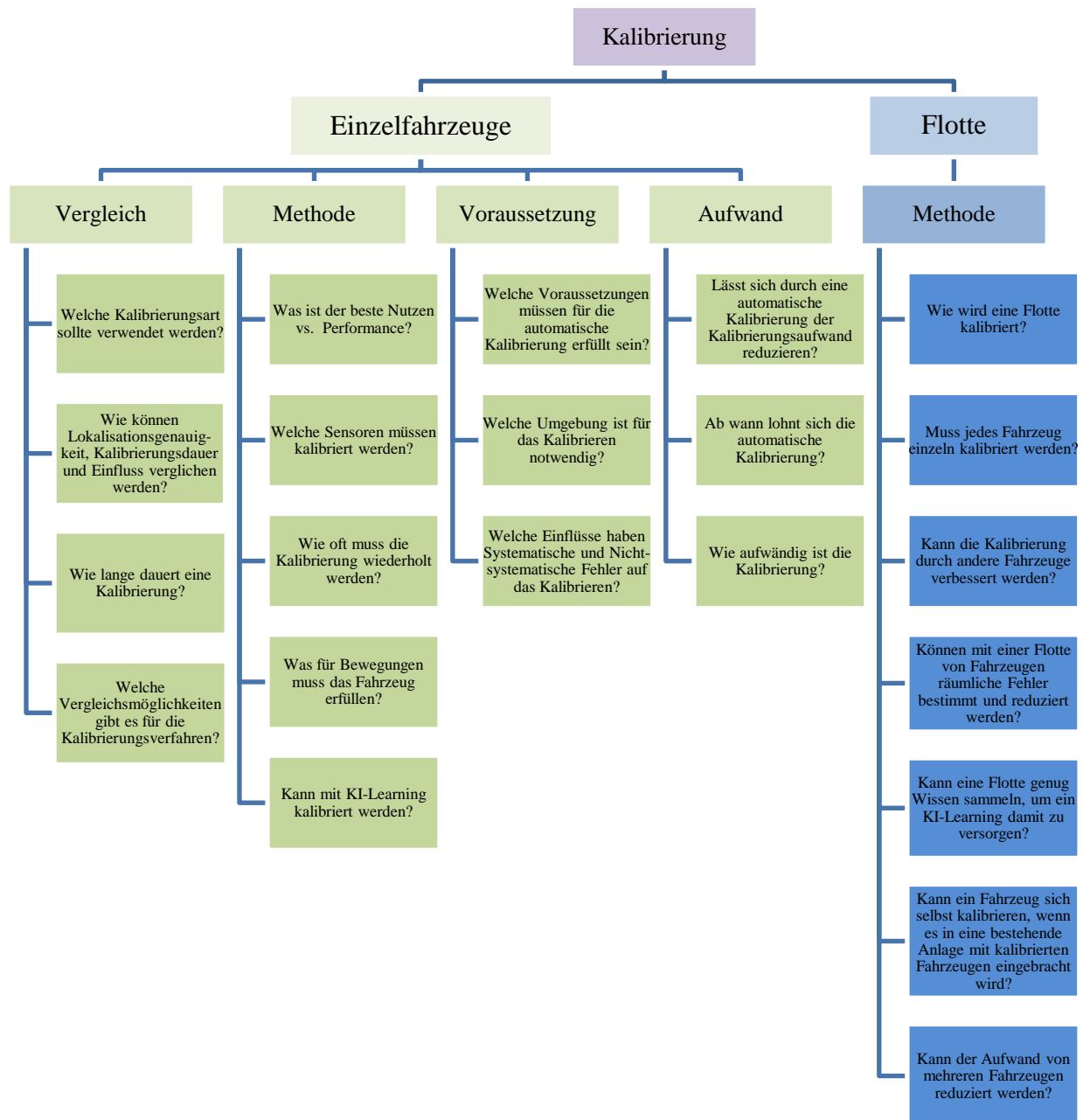


Abbildung 2. Forschungsrelevante Fragen im Bereich von Kalibrierung von Einzelfahrzeugen und Flotten

Unter dem Themenbereich Voraussetzung werden Fragen gestellt, wie beispielsweise „Welche Voraussetzungen müssen für die automatische Kalibrierung erfüllt sein?“. Der letzte Themenbereich bei Einzelfahrzeugen ist der Aufwand. Es stellt sich die Frage, ob der Aufwand für die automatische Kalibrierung finanziell gerechtfertigt ist. Das Erstellen einer automatisierten Kalibrierung ist sowohl zeitaufwändig als auch kostspielig und eignet sich aufgrund der Komplexität in der Regel nicht für ein Einzelfahrzeug. Dieser betriebswirtschaftliche Standpunkt wurde in den

bisherigen Veröffentlichungen nicht in Betracht gezogen und analysiert. Auf der anderen Seite des Baumdiagramms befindet sich die Flotte. Bei dieser gibt es ausschließlich den Themenbereich Methode. Die grundlegenden Fragen sind „Welchen Unterschied gibt es von Einzelfahrzeugen zur Flotte?“ und „Gibt es Ansätze, um das Wissen einer Flotte mit zu betrachten?“. Für das Kalibrieren von Flotten gibt es zwei Ansätze, welche keine industrielle Lösung präsentieren. Eine Flotte von Fahrerlosen Transportfahrzeugen kann jedoch mehr Informationen als ein Einzelfahrzeug bereitstellen. Diese Information



könnten genutzt werden, um das Kalibrieren von Einzelfahrzeugen zu verbessern. Allerdings existiert bisher kein Konzept, welches dieses Prinzip umsetzt, da das Problem der Kalibrierung von Einzelfahrzeugen bisher nicht gelöst ist. Dies erschwert es, diese Erkenntnisse auf eine Flotte anzuwenden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Diese Veröffentlichung zeigt, dass es viele Entwicklungen zum Thema Kalibrierung von mobilen Robotern gibt. Die Kalibrierung wird seit mehr als 30 Jahren erforscht, wobei versucht wurde, die manuelle Kalibrierung zu automatisieren. Es ist aber festzustellen, dass es noch keine allgemeingültige Lösung für Einzelfahrzeuge mit den unterschiedlichen Kinematikarten gibt. Die Entwicklung einer automatischen Kalibrierung, welche für die industrielle Einsetzbarkeit geeignet ist, wurde bisher in zwei Quellen für eine spezielle Kinematik dargestellt. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Forschung erst im Anfangsstadium befindet. Der Mehrwert der automatischen gegenüber der manuellen Kalibrierung konnte aufgrund der fehlenden betriebswirtschaftlichen Abschätzung nicht umfänglich nachgewiesen werden. Weiterhin steht die Erforschung eines Kalibrierungsverfahrens für Fahrerlose Flotten am Anfang. Ebenfalls gibt es keine allgemeine Kalibrierungsart, welche sich auf verschiedene Fahrzeugtypen anwenden lässt. Die eingangs aufgestellten Forschungsfragen konnten dementsprechend nicht umfänglich beantwortet werden. Zeitgleich wurden während der Recherche weitere Fragen aufgeworfen. Es kann somit festgestellt werden, dass zum Thema Kalibrierung von Fahrerlosen Transportfahrzeugen ein erweiterter Forschungsbedarf besteht. Vor allem die Entwicklung eines allgemeingültigen Verfahrens, als auch die Betrachtung von betriebswirtschaftlichen Aspekten, sind hier zu nennen.

### LITERATUR

- [AAA06] Abbas T., Arif M. u. Ahmed W., Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors Caused by Kinematics Imperfections in Mobile Robots. 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. 2006, S. 2073–2078
- [AC07] Antonelli, G. u. Chiaverini, S., Linear estimation of the physical odometric parameters for differential-drive mobile robots. *Autonomous Robots* 23 (2007) 1, S. 59–68
- [ACF05] Antonelli G., Chiaverini S. u. Fusco G., A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation. *IEEE Transactions on Robotics* 21 (2005) 5, S. 994–1004
- [BAN89] Banta L. E., A Self-Tuning Navigation Algorithm for a Robotic Vehicle. 1989 American Control Conference. 1989, S. 503–506
- [BF95a] Borenstein, J. u. Feng, L. (Hrsg.), *UMBmark: a benchmark test for measuring odometry errors in mobile robots*, Bd. 2591. 1995
- [BF95b] Borenstein, J. u. Feng, L., Correction of systematic odometry errors in mobile robots. *Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, Bd. 3. 1995, 569–574 vol.3
- [BF96] Borenstein J. u. Feng Liqiang, Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12 (1996) 6, S. 869–880
- [BOR98] Borenstein, J., Experimental results from internal odometry error correction with the OmniMate mobile robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14 (1998) 6, S. 963–969
- [BVD08] Bostani A., Vakili A. u. Denidni T. A., A novel method to measure and correct the odometry errors in mobile robots. 2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2008, S. 897–900
- [CEC02] Cecco M. De, Self-calibration of AGV inertial-odometric navigation using absolute-reference measurements. *IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.00CH37276)*, Bd. 2. 2002, 1513–1518 vol.2
- [CFM13] Censi, A., Franchi, A., Marchionni, L. u. Oriolo, G., Simultaneous calibration of odometry and sensor parameters for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics* 29 (2013) 2, S. 475–492
- [CLM16] Cantelli, L., Ligama, S., Muscato, G. u. Spina, D., Auto-calibration methods of kinematic parameters and magnetometer offset for the localization of a tracked mobile robot. *Robotics* 5 (2016) 4, S. 23
- [CMO08] Censi A., Marchionni L. u. Oriolo G., Simultaneous maximum-likelihood calibration of odometry and sensor parameters. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008, S. 2098–2103
- [DEU95] DIN DIN 1319-1:1995-01:1995. *Grundlagen der Messtechnik Teil 1: Grundbegriffe*
- [GH17] Goronzy, G. u. Hellbrueck, H., Weighted online calibration for odometry of mobile robots. 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). 2017, S. 1036–1042
- [GMJ11] Guo H., Meng Y. u. Jin Y., Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011, S. 3205–3210
- [GRO19] Galasso, F., Rizzini, D. L., Oleari, F. u. Caselli, S., Efficient calibration of four wheel industrial AGVs. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 57 (2019), S. 116–128
- [HKL10] Han K., Kim H. u. Lee J. S., The sources of position errors of omni-directional mobile robot with Mecanum wheel. 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2010, S. 581–586
- [IKP07] Ivanjko, E., Komsic, I. u. Petrovic, I., Simple off-line odometry calibration of differential drive mobile robots. *Proceedings of 16th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region-RAAD*. 2007

- [JC12] Jung, C. u. Chung, W., Accurate calibration of two wheel differential mobile robots by using experimental heading errors. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2012, S. 4533–4538
- [JLV99] Jetto L., Longhi S. u. Venturini G., Development and experimental validation of an adaptive extended Kalman filter for the localization of mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation 15 (1999) 2, S. 219–229
- [JSM16] Jung, D., Seong, J., Moon, C.-b., Jin, J. u. Chung, W., Accurate calibration of systematic errors for car-like mobile robots using experimental orientation errors. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing 17 (2016) 9, S. 1113–1119
- [JWS10] J. Kang, W. Choi, S. An u. S. Oh, Augmented EKF based SLAM method for improving the accuracy of the feature map. 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010, S. 3725–3731
- [KCW11] Kooktae Lee, Changbae Jung u. Woojin Chung, Accurate calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots. Journal of mechanical science and technology 25 (2011) 6, S. 1603
- [KEL01] Kelly, A., General solution for linearized systematic error propagation in vehicle odometry. Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). 2001, S. 1938–1945
- [KRO17] Kallasi, F., Rizzini, D. L., Oleari, F., Magnani, M. u. Caselli, S., A novel calibration method for industrial agvs. Robotics and Autonomous Systems 94 (2017), S. 75–88
- [KWK10] Kooktae Lee, Woojin Chung u. Kwanghyun Yoo, Kinematic parameter calibration of a car-like mobile robot to improve odometry accuracy. Mechatronics 20 (2010) 5, S. 582–595
- [LBA98] Larsen, T. D., Bak, M., Andersen, N. A. u. Ravn, O., Location estimation for autonomously guided vehicle using an augmented Kalman filter to autocalibrate the odometry. FUSION98 Spie Conference. 1998
- [LBH17] Legowik, S., Bostelman, R. V., Hong, T. u. Messina, E. R. Guideline for Automatic Guided Vehicle Calibration. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology 2017
- [LC08] Lee K. u. Chung Woojin, Calibration of kinematic parameters of a Car-Like Mobile Robot to improve odometry accuracy. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2008, S. 2546–2551
- [LLY19] Lin, P., Liu, D., Yang, D., Zou, Q., Du, Y. u. Cong, M., Calibration for odometry of omnidirectional mobile robots based on kinematic correction. 2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). 2019, S. 139–144
- [MMS13] Maddahi, Y., Maddahi, A. u. Sepehri, N., Calibration of omnidirectional wheeled mobile robots: method and experiments. Robotica 31 (2013) 6, S. 969
- [MS03] Martinelli, A. u. Siegwart, R., Estimating the Odometry Error of a Mobile Robot during Navigation. 2003
- [MSM12] Maddahi, Y., Sepehri, N., Maddahi, A. u. Abdolmohammadi, M., Calibration of wheeled mobile robots with differential drive mechanisms: An experimental approach. Robotica 30 (2012) 6, S. 1029–1039
- [MTT03] Martinelli A., Tomatis N., Tapus A. u. Siegwart R. Simultaneous localization and odometry calibration for mobile robot. Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453), Bd. 2. 2003, 1499-1504 vol.2
- [MYC10] Mondal S., Yun Y. u. Chung W. K., Terminal iterative learning control for calibrating systematic odometry errors in mobile robots. 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2010, S. 311–316
- [RB00] Roumeliotis S. I. u. Bekey G. A., Collective localization: a distributed Kalman filter approach to localization of groups of mobile robots. Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), Bd. 3. 2000, 2958-2965 vol.3
- [RT99] Roy N. u. Thrun S., Online self-calibration for mobile robots. Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.99CH36288C), Bd. 3. 1999, 2292-2297 vol.3
- [SJ11] Song J. u. Jee G., Kalman filter based on-line calibration of laser scanner for vehicle navigation. 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems. 2011, S. 1437–1441
- [TT17] Tomasi, D. L. u. Todt, E., Rotational odometry calibration for differential robot platforms. 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR). 2017, S. 1–6
- [WEN09] Wendel, J., Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. Oldenbourg Verlag 2009

---

**Jahn Hoffmann, M.Sc.**, Mitarbeiter bei E&K Automation GmbH und Externer Doktorand am Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg. Jahn Hoffmann studierte bis 2017 Elektrotechnik an der Technischen Universität Hamburg.

**Dr. Johannes Hinckeldeyn**, Obergeringieur am Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg. Nach seiner Promotion in Großbritannien war Johannes Hinckeldeyn als Chief Operating Officer für einen Hersteller von Mess- und Labortechnik für die Batterieforschung tätig. Johannes Hinckeldeyn studierte Wirtschaftsingenieurwesen, Produktionstechnik und -management in Hamburg und Münster.

**Niclas Mattschull, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg. Niklas Mattschull studierte Logistik & Mobilität und Internationales Wirtschaftsingenieurwesen an der Technischen Universität Hamburg.

**Rodrigo Arias**, CTO bei E&K Automation GmbH. Nach seinem Maschinenbaustudium an der Technischen Universität Hamburg mit der Vertiefung Produktentwicklung war Rodrigo Arias in leitenden Positionen in den Bereichen Consumer Electronics und Automatisierung tätig.

**Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreuzfeldt**, Professor und Leiter des Instituts für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg. Nach seinem Maschinenbaustudium mit der Vertiefung Produktionstechnik war Jochen Kreuzfeldt in verschiedenen leitenden Positionen bei einem Unternehmen für Automobilsicherheitstechnik tätig. Anschließend übernahm Jochen Kreuzfeldt eine Professur für Logistik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und wurde Leiter des Instituts für Produkt- und Produktionsmanagement.

Adresse: Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg, Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg, Deutschland; E-Mail: j.hoffmann@tuhh.de