

# 1 Hochpräzise Positionsdaten zur Befähigung einer flexiblen Großbauteilmontage

Spätestens seit der Entwicklung des GPS im Jahr 1985 ist die Bedeutung von terrestrischen Positionsdaten für öffentliche Navigations- und Ortungsdienste allgegenwärtig. Auch bei der Entwicklung flexibler automatisierter Montagesysteme wird der Service, zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem beliebigen Ort Positionsdaten von einem Objekt bereitzustellen, zunehmend relevant. Neue Begriffe zur Nutzung von Positionsdaten innerhalb von Montagesystemen wie „Coordinates as a Service“ belegen diesen Trend [MONT21, S. 4–7]. Die Positionsdaten werden innerhalb der Montage dazu genutzt, um Lagetoleranzen nach dem Fügeprozess eines Produktes zu prüfen oder diesen zu regeln. Zusätzlich lässt sich ein weiterer Trend erkennen: Moderne Montagesysteme verfügen über eine zunehmende Anzahl an mobilen Ressourcen (z.B. fahrerlose Transportfahrzeuge oder mobile Roboter), deren Positionen kontinuierlich überwacht werden müssen, um Prozesse in den Dimensionen Raum und Zeit zu synchronisieren. [KÜHN18, KUKA22, MEIß20, S. 481f., STIL20, S. 248f.]

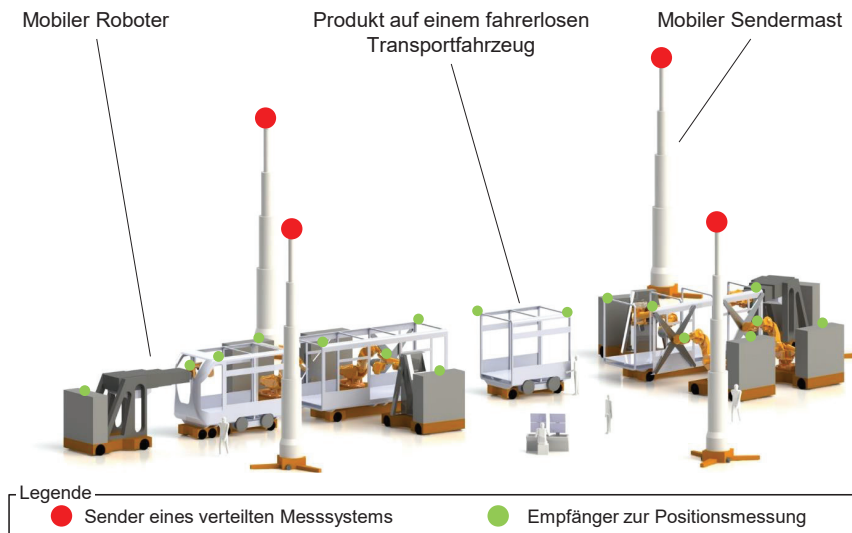
Auslöser für diese Entwicklung ist die geforderte Steigerung der Flexibilität von Produktionssystemen, um auf globale Megatrends zu reagieren [WIEN07, S. 783]. Hierzu zählen die zunehmende Produktvariantenvielfalt, kürzer werdende Produktlebenszyklen bei schwankenden Absatzzahlen und internationale Lieferengpässe als Resultat von pandemischen Lagen. Da die industrielle Montage bis zu 70% der Gesamtproduktionskosten verursacht, wurden zahlreiche Ansätze entwickelt, um wandlungsfähige und flexiblere Montageorganisationen für eine höhere Wirtschaftlichkeit umzusetzen [ELMA09, S. 127, HUET16, S. 112]: Rekonfigurierbare Montagesysteme (RMS) können physische Anpassungen wie das Hinzufügen oder Entfernen einzelner Montagestationen bis hin zum Ersatz ganzer Montagelinien durchführen [ELMA09, S. 4, KORE10, S. 139]. Frei verkettete Montagesysteme setzen eine Mobilität des Produktes voraus, um eine dynamische Routenführung entlang definierter Montagestationen zu ermöglichen und so auf aktuelle Anforderungen reagieren zu können. [HÜTT17, GRUN19, S. 23–33].

In der Umsetzung der genannten Montageorganisationsformen besteht eine besondere Herausforderung bei der Montage von Großbauteilen, z. B. in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Schiffsbau sowie im Bau von Windkraftanlagen [CORV11, S. 1016]. Aufgrund der großen Bauteildimensionen (> 15 m) werden die Montagesysteme nahe technischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Grenzen ausgelegt [BEHR14, S. 153–164, SCHM16, S. 643–665]. Das Konzept der linienlosen mobilen Montagesysteme (engl. Line-less Mobile Assembly Systems) adressiert diese Herausforderung und ermöglicht eine flexible Anpassung einer Montagestation an das Produkt. Mobile Montageressourcen ordnen sich hierbei abhängig vom geforderten Prozess innerhalb der Montagestation um das Produkt an, sodass Handhabungsaufgaben für anschließende Fügeprozesse durchgeführt werden können. [HÜTT19, S. 724–729] Zur Anordnung mobiler Montageressourcen um große Bauteile sind hochpräzise Positionsdaten erforderlich, um die Ressourcen im Submillimeterbereich zu lokalisieren und zu navigieren. Demnach ist die Bereitstellung von Positionsdaten im gesamten

Montagebereich ein zentrales Infrastrukturelement zur Flexibilisierung der Großbauteilmontage. [MONT17, S. 1]

## 1.1 Herausforderungen bei der Positionsmessung mobiler Objekte

Aufgrund der Vielzahl an mobilen Montageressourcen innerhalb linienloser mobiler Montagesysteme (LMAS) unterliegt die Umgebung einer Positionsmessung dynamischen Einflüssen. Abbildung 1.1 zeigt den skizzenhaften Aufbau eines LMAS-Prozesses am Beispiel einer Schienenfahrzeugmontage: Einzelne Produktteile (Wagons) werden über die Nutzung fahrerloser Transportfahrzeuge (FTF) mobilisiert und in die jeweiligen Montagepositionen überführt. Mobile Roboter bearbeiten mit ihren Werkzeugen das Produkt und führen den Fügeprozess (z.B. mittels Nieten oder Schrauben) aus. Durch das Auflösen räumlicher Fixpunkte, wie beispielsweise ortsfester Vorrichtungen zur Ausrichtung der Bauteile, können sich die Montageressourcen frei anordnen. Zur Kompensation der Vorrichtungen werden Messsysteme eingesetzt, die eine räumliche und zeitliche Synchronisation der Montagressourcen ermöglichen. Zu messende Prüfmerkmale sind bspw. Positionen und Orientierungen (sog. Posen) von Produkten, FTF oder robotergeführten Werkzeugen. Die hierbei geltenden Montagetoleranzen, die bei Großbauteilen im Submillimeterbereich liegen können, stellen eine besondere Herausforderung für die Eignung eines Messsystems dar.



**Abbildung 1.1: Sender und Empfänger eines verteilten Messsystems zur Positionsmessung innerhalb der linienlosen mobilen Montage (in Anlehnung an [SCHM17a, S. 339–368])**

Verteilte großvolumige Messsysteme aus der Klasse der Large-Scale Metrology (LSM) eignen sich für diesen Einsatz, da sie über große Messdistanzen geringe Messunsicherheiten induzieren [SCHM16, S. 644]. Verteilte LSM-Systeme können aus einer Vielzahl an Sendern und Empfängern bestehen, die über optische Signale (i.d.R. mittels Laserstrahlen) verbunden

werden. Die Empfänger werden den genannten Prüfmerkmalen zur Erhebung der relevanten Positionsdaten zugeordnet. Positionsdaten (ausgedrückt über das kartesische Koordinatensystem mit Positionen in x-, y- und z-Richtung) werden in diesem Kontext als relevante Messgrößen betrachtet. Dies ist für einen Montageprozess ausreichend, da anhand mehrerer Positionsmessungen an einem Bauteil die Bauteilorientierung und somit die Bauteilpose erfasst werden kann. Über die Bauteilpose kann ein Bauteil eindeutig räumlich referenziert werden, was für die Durchführung der Montage und Prüfung der Toleranzen gefordert ist.

Die Platzierung der Sender kann im Gegensatz zu den Empfängern frei innerhalb der Montagestation erfolgen und wird in dieser Arbeit als Konfiguration bezeichnet. Abbildung 1.1 zeigt eine mögliche Konfiguration der Sender im beschriebenen LMAS-Prozess. Die Unsicherheit einer Positionsmessung, die eine Eignung für eine Toleranzprüfung bzw. das Messen eines Prüfmerkmals bedingt, hängt bei dieser Klasse von Messsystemen von Umgebungseinflüssen ab [QUIN17, S. 144–153]. Neben erforderlichen Sichtverbindungen beeinflussen die Arbeitsbereiche, wie z.B. Messdistanzen oder Winkel zwischen Sendern und Empfängern, die Messunsicherheit maßgeblich [FLYN21, S. 22]. Aufgrund der Dynamik der Montageressourcen innerhalb der Montagestation ändern sich diese Einflüsse kontinuierlich, woraus eine Schwankung der Messunsicherheit und der damit verbundenen Prozessfähigkeit im Hinblick auf eine Toleranzprüfung resultiert.

Eine zentrale Herausforderung stellt daher die Konfiguration von Sendern eines verteilten LSM-Systems innerhalb von LMAS dar, um Schwankungen der Messunsicherheit über die Prozessdauer zu beherrschen und zulässige Maximalwerte nicht zu überschreiten. Zu konservative Konfigurationen würden hierbei den Kostenaufwand bei den hohen Anschaffungskosten verteilter LSM-Systeme erheblich erhöhen und somit die Gesamteffizienz des Montagesystems reduzieren.

Für die Rekonfiguration, Neugestaltung und Inbetriebnahme von Montagesystemen existieren eine Vielzahl von softwarebasierten Werkzeugen zur Abbildung der realen Welt innerhalb digitaler Modelle (wie z.B. folgende Programme [ABB22, KUKA22, SIEM22, SIMP22, VISU20]). Diese Programme legen ihren Fokus auf Materialflussanalysen und die Offline-Programmierung von Industrierobotern. Messsysteme werden funktional nicht explizit berücksichtigt, was ihrer Bedeutung als Infrastrukturelement zur Bereitstellung von Positionsdaten in fixpunktlosen, rekonfigurierbaren Montageumgebungen nicht gerecht wird. Für die Berücksichtigung von Messsystemen während der Planungsphase stehen spezielle Simulationsprogramme zur Verfügung (wie z.B. [NEW22, DUWE22]). Eine ganzheitliche Beschreibung eines neu zu entwickelnden Montagesystems geht mit einer hohen Komplexität für die Modellierung einher. Daher wird diese Komplexität gekapselt und innerhalb spezialisierter Programme durchgeführt. Folglich muss eine Vielzahl von Schnittstellen zwischen den einzelnen Simulationsumgebungen geschaffen werden, um Messsysteme innerhalb eines Montagesystems in der Planungsphase zu berücksichtigen.

Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Planungswerkzeugs, das die bedarfsgerechte Konfiguration eines verteilten LSM-Systems im Hinblick auf die Einflüsse

eines Montageprozesses auf die Messunsicherheit optimiert, um messtechnisch-gestützte Montageprozesse durch Abgleich mit der geforderten Toleranz a-priori absichern zu können. Im Rahmen der Arbeit wird hierbei die Montageorganisationsform LMAS betrachtet, da sie industrielle Relevanz für die Anwendung von LSM-Systemen (im Folgenden vereinfacht als verteilte Messsysteme bezeichnet) besitzt und auf rekonfigurierbare Montageprozesse mit geringeren dynamischen Einflüssen anwendbar ist [HÜTT19, BUCK19b].

## 1.2 Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit

Die Motivation der vorliegenden Arbeit basiert auf Problemen in der industriellen Praxis und dem industriellen Bedarf neuer Lösungen zur messunsicherheitsoptimierten Inbetriebnahme metrologischer Infrastruktur für die rekonfigurierbare Montage von Großbauteilen. Daher orientiert sich der Forschungsprozess an dem explorativen, empirischen Forschungsansatz nach KUBICEK [KUBI77, S. 12–17]. Übergeordnetes Ziel ist es, Wissen in Bezug auf das zugrundeliegende Problem zu gewinnen und die Problemlösung in der Praxis zu unterstützen. Das Verwenden von Forschungsfragen unterstützt hierbei, das Problem zu strukturieren und den Erkenntnisgewinn kritisch zu prüfen. Hierfür werden Forschungsfragen nach einer Evaluierung des Standes der Technik in Kapitel 3 aufgestellt. Auf Basis der beschriebenen Forschungsmethodik wird diese Arbeit nach der „Strategie angewandter Forschung“ von ULRICH, wie in Abbildung 1.2 dargestellt, gegliedert [ULRI81, S. 19–21].

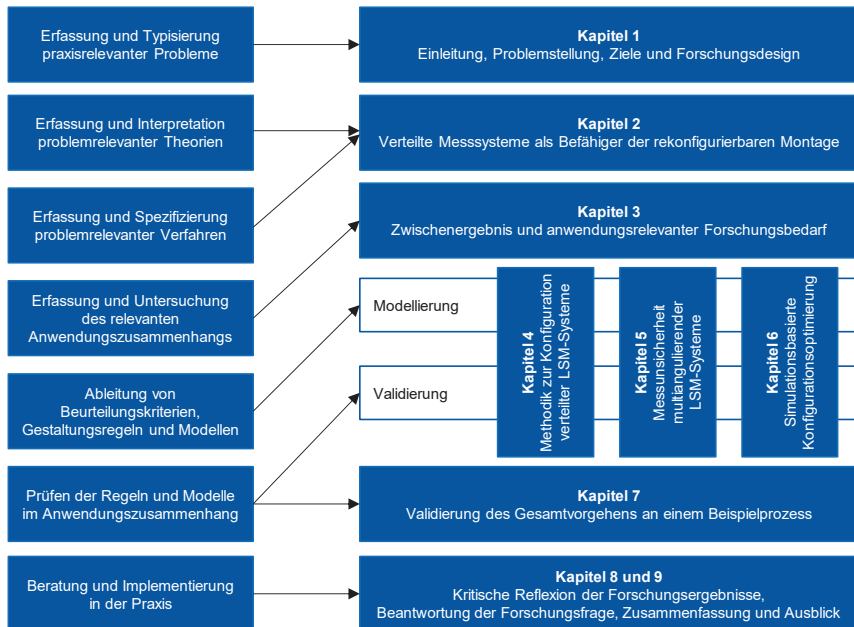


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit nach Ulrich

In Kapitel 1 wird die Thematik von verteilten Messsystemen als essenzielles Infrastrukturelement für rekonfigurierbare Montagesysteme von Großbauteilen, im Speziellen für LMAS, dargestellt.

Kapitel 2 beschreibt die industrielle Motivation in Anwendungsfällen und schafft ein Verständnis für den zentralen Begriff der Konfiguration verteilter Messsysteme. Hierbei werden aktuelle Ansätze zur Konfiguration erläutert und deren Defizite für eine Anwendung im industriellen Umfeld rekonfigurierbarer Montagesysteme herausgestellt.

Kapitel 3 resümiert die erkannten Defizite bestehender Ansätze zur Konfiguration verteilter LSM-Systeme, um den Forschungsbedarf und korrelierende Forschungsfragen dieser Arbeit abzuleiten. Im Detail wird hierbei beschrieben, wie die Inhalte zur Beantwortung der forschungsleitenden Fragen erarbeitet und bestehende Ansätze weiterentwickelt werden.

In Kapitel 4 wird zunächst ein Beschreibungsmodell entwickelt, das die Wirkzusammenhänge zwischen einem LMAS-Prozess und der Konfiguration verteilter LSM-Systeme wiedergibt. Das Modell wird hierbei aus industriellen Anwendungsfällen abgeleitet. Die erkannten Wirkzusammenhänge werden anschließend für den Entwurf einer Methodik zur Konfiguration verteilter LSM-Systeme genutzt, die sich an dem Ansatz der simulationsbasierten Optimierung orientiert.

In Kapitel 5 wird ein Messunsicherheitsmodell für das iGPS, stellvertretend für die Klasse der verteilten und multiangulierenden LSM-Systeme, in Abhängigkeit von der Konfiguration entwickelt. Ziel ist es, eine quantifizierte Aussage zur Messunsicherheit für Absolutwerte unter variabler Anordnung der iGPS-Sender zu treffen. Hierfür wird ein Modell der Messung erstellt, welches experimentell validiert und anschließend für eine Messunsicherheitsbestimmung verwendet wird.

Basierend auf einer Literaturrecherche wird in Kapitel 6 ein geeigneter globaler Optimierungsalgorithmus ausgewählt und weiterentwickelt, der die Randbedingungen für eine umsetzbare Konfiguration sowie das Messunsicherheitsmodell als Zielfunktion berücksichtigen kann. Zur Abbildung der dynamischen räumlichen Restriktionen und der Sichtverbindungen eines verteilten Messsystems wird eine Simulation entwickelt und in den Optimierungsalgorithmus integriert sowie simulativ am Beispiel des Einsatzes von iGPS und Lasertrackern verifiziert.

In Kapitel 7 wird anhand eines experimentellen Aufbaus die Validität und der Mehrwert des Gesamtverfahrens untersucht. Hierfür wird eine Konfiguration des iGPS innerhalb eines LMAS-Prozesses betrachtet.

In Kapitel 8 werden die Forschungsergebnisse kritisch reflektiert, um die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten. Abschließend wird in Kapitel 9 Auskunft über den praxisrelevanten Nutzen sowie zukünftige Forschungsthemen gegeben.