

Stefan Quinders

Virtueller Prototyp zur Optimierung und Absicherung der Konfiguration messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme



Virtueller Prototyp zur Optimierung und Absicherung
der Konfiguration messtechnisch gestützter und
roboterbasierter Montagesysteme

Virtual Prototype for the Optimization and Validation
of the Configuration for Metrology Assisted and
Robot Based Assembly Systems

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stefan Quinders

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Moormann

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juli 2017

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Stefan Quinders

Virtueller Prototyp zur Optimierung und
Absicherung der Konfiguration messtechnisch
gestützter und roboterbasierter Montagesysteme

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. F. Klocke

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 37/2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Stefan Quinders:

Virtueller Prototyp zur Optimierung und Absicherung der Konfiguration messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2017
Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen
Steinbachstr. 25, 52074 Aachen
Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Printed in Germany

ISBN 978-3-86359-579-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement des Werkzeugmaschinenlabors WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Heinrich Schmitt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL, für die inhaltliche Betreuung der Arbeit sowie die Begleitung durch mein Promotionsverfahren.

Weiterhin danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Moormann, Leiter des Instituts und Lehrstuhls für Flugsystemdynamik, für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Univ.-Prof. Dr. h. c. Burkhard Corves, Leiter des Instituts für Getriebe-technik und Maschinendynamik, für die Übernahme des Beisitzes während meiner mündlichen Prüfung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Müller, Wissenschaftlicher Geschäftsführer des Zentrums für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH, der mich im Jahr 2010 an dem damaligen Lehrstuhl für Montagetechnik des Werkzeugmaschinenlabors WZL eingestellt, mir die Technologien der Montagesystemtechnik verdeutlicht sowie die Grundlagen dieser wissenschaftlichen Arbeit gelegt hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Oberingenieuren Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Martin Esser, Dr.-Ing. Philip Jatzkowski, Dr.-Ing. Rheinhard „Freudi“ Freudenberg sowie Dr.-Ing. Walter Kimmelman bedanken. Sie sind für mich Vorbilder und ich habe von ihrer Expertise und Erfahrung viel für mein zukünftiges Berufsleben gelernt.

Ein herzlicher Dank gilt den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen vom Werkzeugmaschinenlabor WZL und dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT für die ausgezeichnete Zusammenarbeit in einer freundlichen und offenen Arbeitsatmosphäre.

Bei den langjährigen Wegbegleitern Dr.-Ing. Jan Eilers, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christian Janßen, Dr.-Ing. Markus Janßen, Matthias Vette-Steinkamp, Guido Hüttemann, Felix Bertelsmeier, Christoph Storm, Christoph Voigtmann, Markus Ohlenforst, Judith Bredemann, Philipp Kosse, Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Tobias Fürtjes und Johannes Brand möchte ich mich für die kameradschaftliche Zeit bedanken. Herausragend war die Zeit im Büro 106 mit Martin Peterek.

Stellvertretend für alle festangestellten Mitarbeiter möchte ich mich bei Elke Behrend, Marita Kox sowie dem einmaligen Thomas „Tofi“ Fischer bedanken.

Henry Bröcker, Andreas Röhser, Anika Sharma und Deniz Keskin möchte ich für ihre thematisch unterstützenden studentischen Abschlussarbeiten danken. Sebastian Fürst und Viola Becker danke ich für ihre Unterstützung als studentische Hilfskraft, sowie Robin Zimmermann und Simon Wieloch, welche mich in Doppelfunktion beim Gelingen der Arbeit maßgeblich unterstützt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich, stellvertretend für alle meine Aachener Freunde, insbesondere bei Simon Jansen, Dr. Maarten van Kouwen und der Lindt-Clique bedanken. Ihr habt die Zeit zu einer ganz besonderen gemacht.

Den Dire Straits danke ich für die Inspiration und die musikalische Begleitung während unzähliger Stunden Arbeit an diesem Werk.

Bei Gregor Peters bedanke ich mich für die zahlreichen reflektierenden Gespräche, seine objektiven Ratschläge und nicht zuletzt für das Korrekturlesen meiner Arbeiten.

Meinen Eltern Käthe und Johannes Quinders danke ich von ganzem Herzen, dass sie mir ein so einzigartiges Fundament für ein wundervolles Leben gelegt haben. Dass sie gleichzeitig loslassen und meine persönliche Entwicklung fördern, sowie jederzeit sicherer Hafen und Ankerpunkt für mich sind. Danke für den Zusammenhalt in jedem Moment unseres Lebens.

Meiner Freundin Linda danke ich für ihr Verständnis, den Rückhalt sowie ihre Liebe, welche mir die notwendige Motivation, Kraft und Durchhaltevermögen zum Gelingen der Arbeit gegeben haben.

Sonsbeck im November 2017

Stefan Quinders

Zusammenfassung

Technologische Lösungen für messtechnisch gestützte und roboterbasierte Montagesysteme im Kontext von Industrie 4.0 liefern eine Antwort auf die Herausforderungen und Fragestellungen zukünftiger Produktionstechnologien.

Als letzter Schritt im Produktionsprozess unterliegt die Montage den Auswirkungen aller Fehler vorgelagerter Produktionsschritte und ist dem Spannungsfeld globalisierter und volatiler Märkte sowie den gesteigerten Produkt- und Produktionsanforderungen in einem besonderen Maße ausgeliefert. Messtechnisch gestützte und roboterbasierte Montagesysteme zeichnen sich durch den Einsatz geeigneter Messsysteme zur Digitalisierung von realen Bauteilen sowie Prozesszuständen aus und ermöglichen durch modellbasierte Algorithmen die Regelung der Prozesse sowie der Robotik. Diese Technologien ermöglichen flexible, adaptive, wandlungsfähige, wiederverwendbare sowie frei verkettete und skalierbare Produktionssysteme, welche über den Produktlebenszyklus hinaus und zur parallelen Produktion verschiedener Produkte eingesetzt werden können.

Zur Planung, Optimierung und Absicherung messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme wird ein virtueller Prototyp benötigt, anhand dessen der technologische Reifegrad innerhalb einer Simulation optimiert und eine effiziente Inbetriebnahme und Rekonfiguration ermöglicht wird. Dazu wird die Prozessfähigkeit des Gesamtsystems unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der verwendeten Sensorik sowie der komplexen Wirkzusammenhänge zwischen den Komponenten des Montagesystems zu einer frühen Planungsphase bestimmt.

Etablierte Simulationstools für roboterbasierte Montagesysteme finden während der Planung und Zellenauslegung sowie der Bahnplanung, Offline-Programmierung, Kollisionsüberwachung und der Berechnung von Taktzeiten zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit Anwendung. Diese genügen aber nicht den Anforderungen zur Planung messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme und ermöglichen keine zeit- und kosteneffiziente Inbetriebnahme und Rekonfiguration, weil nicht alle Randbedingungen und Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit der Messsysteme sowie keine Abschätzung der Prozessfähigkeit während der Simulation berücksichtigt werden.

Innerhalb dieser Arbeit wird die Fragestellung beantwortet, wie ein etabliertes Simulationstool um einen virtuellen Prototypen zur Planung messtechnisch gestützter und roboterbasierter Montagesysteme weiterentwickelt werden muss.

Basierend auf einer dynamisierten Toleranzkettenanalyse wird die Prozessfähigkeit des Montagesystems entsprechend den Prozessanforderungen und den Unsicherheitsbeiträgen jeder Komponente des Montagesystems ermittelt. Die Simulation roboterbasierter Montagesysteme wird um die Sichtverbindungen eines optischen Messsystems am Beispiel des indoor Global Positioning System (iGPS) der Firma Nikon erweitert und die Signalstabilität qualitativ bewertet. Darauf aufbauend wird die Konfiguration des Messsystems zur Durchführung des individuellen Montageprozesses

anhand einer Heuristik optimiert. Für die quantitative Bewertung der individuellen Konfiguration des verteilten Messsystems wird dessen Messunsicherheit in Abhängigkeit der Konfiguration experimentell bestimmt und in einem Modell hinterlegt.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist die Erweiterung eines etablierten Simulationstools zur Offline-Programmierung von Robotern um einen virtuellen Prototypen zur Beschreibung eines messtechnisch gestützten und roboterbasierten Montagesystems. Dies ermöglicht die Auslegung und Optimierung des Montageprozesses und -systems unter Berücksichtigung der Messunsicherheit für den dynamisierten Prozessablauf. Die Konfiguration des Messsystems innerhalb des Prozessablaufs wird anhand eines Modells zur Beschreibung der Messunsicherheit des iGPS qualitativ bewertet, optimiert und abgesichert.

Summary

Technological solutions for metrology assisted and robot based assembly systems in context of Industry 4.0 are providing a response for the challenges and issues of future technologies in production engineering.

As the last step in the production the assembly suffers from all errors of upstream processes and is exposed especially to conflicting priorities of globalized and volatile markets as well as increasing product and process requirements. Metrology assisted and robot based assembly systems are characterized by the use of suitable metrology systems for the digitalization of real components as well as process conditions and enable model based algorithms for the control of processes and robotics. These technologies empower flexible, adaptive, versatile, reusable as well as freely linked and scalable production systems that can be used beyond the product lifecycle for the parallel production of various products.

For planning, optimization and securing of metrology assisted and robot based assembly systems a virtual prototype is essential. Based on this virtual prototype an optimization of the technological readiness level will be performed inside of a simulation, which yields to an efficient commissioning and reconfiguration of the system. Therefore, the process capability of the overall system is determined by considering the measurement uncertainty of the utilized sensor technology. These complex influencing effects between all components of the assembly systems will be determined during an early planning phase.

Established simulation tools for robot based assembly systems are indispensable for the evaluation of economic and reliable applications providing system design, path planning, offline-programming, collision detection and calculation of process times. Nevertheless, they do not satisfy the needs for the planning of metrology assisted and robot based assembly systems, because they do not consider all boundary conditions and influencing factors on the measurement uncertainty of the metrology systems by the simulation. Therefore, a cost efficient commissioning and reconfiguration is not guaranteed.

This thesis answers the question, how to extend established simulation tools by a virtual prototype for the design of metrology assisted and robot based assembly systems.

Based on a dynamic tolerance chain analysis, the process capability of the assembly system is determined according to the process requirements and the uncertainty contributions of each component of the assembly system. The simulation of robot based assembly systems is extended by a simulation of the line of sight for an optical metrology system using the example of Nikon's indoor Global Positioning System (iGPS). This leads to a qualitative assessment of the signal stability. On this basis the configuration of the measuring system for an individual assembly process will be optimized with the help of a heuristic strategy. To evaluate the individual configuration of the distributed measuring system quantitatively, the measurement uncertainty is determined experimentally depending on the configuration and described by a digital model.

The result of the thesis is the extension of an established simulation tool for the offline programming of robots by a virtual prototype, which describes a metrological assisted robot based assembly system. This virtual prototype enables the design and optimization of the assembly process and system, by considering the measurement uncertainty for the dynamic process. A virtual prototype describes the measurement uncertainty and enables the qualitative evaluation, optimization and securing of the configuration for the metrological system inside the robotic assembly application.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung in die Thematik	1
1.1 Problemstellung	3
1.2 Ziele und Forschungsbedarf.....	6
1.3 Forschungsdesign und Aufbau der Arbeit	12
2 Messtechnisch gestützte und roboterbasierte Montagesysteme.....	15
2.1 Roboterbasierte Montagesysteme	16
2.1.1 Montage im industriellen Umfeld	16
2.1.2 Rekonfigurierbare und selbstoptimierende Montagesysteme	19
2.1.3 Anwendung der Robotik in der Montage	20
2.1.4 Programmierung von Robotern	21
2.1.5 Steigerung der Leistungsfähigkeit und effiziente Inbetriebnahme	22
2.1.6 Zusammenfassung und Ausblick	24
2.2 Toleranzketten zur Montagesystembeschreibung als virtueller Prototyp	25
2.2.1 Toleranzproblematik im Montageprozess	28
2.2.2 Methodik für eine ganzheitliche Systembeschreibung	31
2.2.3 Berücksichtigung der Unsicherheitsbeiträge einer Toleranzkette.....	34
2.2.4 Optimierungsstrategien für Toleranzketten	35
2.2.5 Zusammenfassung und Ausblick	37
2.3 Messtechnik für die großvolumige und roboterbasierte Montage.....	39
2.3.1 iGPS, ein verteiltes und modulares Messsystem	40
2.3.2 Untersuchung der Messunsicherheit des iGPS.....	46
2.3.3 Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit des iGPS	50
2.3.4 Zusammenfassung und Ausblick	55
2.4 Fazit	55
3 Zwischenergebnis und Forschungsbedarf	57
3.1 Abgrenzung und Weiterentwicklung bestehender Ansätze	57
3.2 Beschreibung der Fallbeispiele und Darstellung des Forschungsbedarfs	62
4 Konzept einer dynamisierten Toleranzkette als virtueller Prototyp	67
4.1 Anforderungen einer dynamischen Toleranzkette	69
4.2 Beschreibungsmodell für den Montageprozess	72
4.3 Berücksichtigung zeitlich abhängiger Unsicherheitsbeiträge.....	75
4.4 Darstellung der Toleranzkette für kooperierende Roboter.....	79
4.5 Mehrwert einer dynamisierten Toleranzkettenanalyse	83

5 Simulation von Sichtverbindungen laserbasierter Messsysteme	85
5.1 Einflussfaktoren und Einschränkung des Lösungsraums	86
5.2 Modellierung der Sichtstrahlen am Beispiel des iGPS	88
5.3 Modellierung des messtechnisch gestützten Robotersystems	89
5.4 Programmierung der Simulationsumgebung	90
5.5 Simulation und Vorhersage der Signalstabilität des iGPS	94
5.6 Validierung der Simulation zur Analyse der Sichtverbindungen	95
5.7 Mehrwert der Simulation von Sichtverbindungen	103
6 Automatisierte Optimierung der Konfiguration der iGPS-Sender	105
6.1 Eingrenzung des Optimierungsproblems	106
6.2 Heuristik zur Optimierung der Konfiguration der iGPS-Sender	109
6.3 Identifikation einer Initialkonfiguration der iGPS-Sender	112
6.4 Optimierung der Anlagenkonfiguration für die bewegte Montage	115
6.5 Entwicklung von Bewertungskriterien für die Heuristik	117
6.6 Diskussion der Bewertungskriterien	121
6.7 Berücksichtigung relevanter Prozessschritte	122
6.8 Mehrwert der Optimierung der Konfiguration der Sender des iGPS	123
7 Messunsicherheit des iGPS bei variabler Systemkonfiguration	125
7.1 Beschreibung der Messaufgabe	126
7.2 Einflussfaktoren und Einschränkung des Parameterraums	128
7.3 Versuchsplanung und Beschreibung der variablen Einflussfaktoren	130
7.4 Modell der Messung	134
7.5 Messunsicherheit der Abstandsmessung unabhängig der Konfiguration ..	135
7.6 Messunsicherheit in Abhängigkeit der Konfiguration	143
7.6.1 Variable Standardunsicherheit aufgrund der Konfiguration	144
7.6.2 Variable Standardunsicherheit aufgrund der Streuung	145
7.6.3 Messunsicherheit in Abhängigkeit der Konfiguration des iGPS	150
7.7 Mehrwert der Messunsicherheit bei variabler Systemkonfiguration	154
8 Effektive Rekonfiguration durch virtuellen Prototypen	155
8.1 Kritische Reflexion der Forschungsfrage	155
8.2 Erkenntnisgewinn und Handlungsempfehlung	158
8.3 Zukünftiger Einsatz virtueller Prototypen für Montagesysteme	159
Literaturverzeichnis	163
Anhang	175
Liste der veröffentlichten Teilergebnisse	177
Zusätzliche Erklärung	179
Lebenslauf	181

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
ATE	Average Transmitter Error
A, B, C, S*	Punkte im Referenzkoordinatensystem
C, C++	Programmiersprache
CAD	Computer Aided Design
CPS	Cyber Physical Systems
CPPS	Cyber Physical Production Systems
DOF	Degree of Freedom
DoE	Design of Experiments
DIN	Deutsches Institut für Normung
EASY-ROB	EASY-ROB 3D Robot Simulation Tool
EN	Europäische Norm
ERPL	EASY-ROB-Programming-Language
ERCL	EASY-Rob-Command-Language
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
F3A	Free Float Flawless Assembly
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
GRS	Globales Referenzsystem
iGPS	indoor Global Positioning System
ISO	International Organization for Standardization
IP	Internet Protocol
KC	Key Characteristics
LSM	Large Scale Metrology
MAA	Metrology Assisted Assembly
MADA	Measurement Assisted Determinate Assembly
MFC	Microsoft Foundation Classes
MSw	Mean Squares within
MSb	Mean Squares between
MSA	Measurement System Analysis
MTGM	Messtechnisch gestützte Montage
NPL	National Physical Laboratory

R_2	Erklärungskraft
StdAbw	Standardabweichung
TCP	Tool Center Point / Transmission Control Protocol
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WZL	Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
X, Y, Z	kartesische Koordinaten
α -Fehler	Fehler 1. Art: Nullhypothese wird verworfen, obwohl sie wahr ist
β -Fehler	Fehler 2. Art: Nullhypothese wird angenommen, obwohl sie falsch ist
γ_i	Abbildung der Prozessrelevanz zum Zeitpunkt i

Formelverzeichnis

Cal_{ATE}		Average Transmitter Error aufgrund der Kalibrierung
Cal_n		Anzahl der Transmitter während der Kalibrierung
$D_{min,Zylinderbohrung}$	μm	Minimaler Durchmesser der Zylinderbohrung
$D_{max,Kolben}$	μm	Maximaler Durchmesser des Kolbens
d	m	Distanz zwischen dem iGPS-Empfänger und einem iGPS-Sender
\bar{d}	m	Gemittelte Distanz zwischen dem iGPS-Empfänger und allen iGPS-Sendern
F	N	Kraft
$F(i)$		Funktion in Abhängigkeit von i
$f_{i,j}(t)$		Funktion in Abhängigkeit der Zeit zwischen den Knoten i und j
$f_{Kettenglied}(t)$		Funktion in Abhängigkeit der Zeit eines Kettenglieds
$K_k^{(A+)}$		Gewichtete Summe der Sichtverbindungen zwischen dem iGPS-Sender k und allen Empfängern j zum Zeitpunkt i für Kriterium A+
k		Anzahl der Abweichungen für einen spezifischen iGPS Empfänger
M	Nm	Moment
m_U		Anzahl an Messungen
n		Anzahl
n_f		Anzahl der Faktoren
$n_{i,B}$		Anzahl der unterbrochenen Sichtverbindungen je iGPS-Empfänger i
n_l		Anzahl der Stufen
n_R		Anzahl der vorhandenen iGPS-Empfänger
$\bar{n}_{T,B}$		Durchschnittliche Anzahl unterbrochener Sichtverbindung des iGPS-Senders
n_X		Anzahl der iGPS-Empfänger
r	m	Radius

S^*		Position am FuÙe des iGPS-Empfãngers
$s_{i,j,k}$		Sichtverbindung zwischen iGPS-Sender k und Empfänger j bei Messung i
$\overline{\Delta S}$	mm	Mittelwert des Sensorabstands
ΔS_i	mm	Sensorabstand nach Kalibrierung i
T	s	Gesamtdauer der Simulation
$Temp$	°C	(Raum-)Temperatur
t	s	Zeit
$\hat{t}_{i,j,B,Anfang}$	s	Startzeitpunkt einer unterbrochenen Sichtverbindung zwischen Sender j und Empfänger i des iGPS
$\hat{t}_{i,j,B,Ende}$	s	Endzeitpunkt einer unterbrochenen Sichtverbindung zwischen Sender j und Empfänger i des iGPS
\hat{t}_m	s	Mittlerer Zeitabstand zwischen den Signalen der Laserfãcher des iGPS
TOL_{MIN}	mm	Minimal prüfbare Toleranz
\hat{t}_{ref}	s	Referenzzeitpunkt des iGPS Strobe-Signals
$u(i)$		Funktion der Positionierungsunsicherheit in Abhãngigkeit von i
u_{Bi}	mm	Standardunsicherheit systematischer Fehler (Bias)
u_{Cal}	mm	Standardunsicherheit Kalibrierung (Calibration)
$u_{Cal,ATE}$	mm	Standardunsicherheit durchschnittlicher Transmitterfehler durch Kalibrierung (Average Transmitter Error)
$u_{Cal,n}$	mm	Standardunsicherheit der Anzahl der Transmitter bei der Kalibrierung
u_{Conf}	mm	Standardunsicherheit Konfiguration (Configuration)
$u_{\bar{d}}$	mm	Standardunsicherheit durchschnittliche Distanz
u_{EV}	mm	Standardunsicherheit Prozessstreuung (Equipment Variation)
$u_{i,j}$	mm	Positionierungsunsicherheit zwischen den Knoten i und j
$u_{Kettenglied}$	mm	Unsicherheit eines Kettenglieds
u_{MS}	mm	Standardunsicherheit des Messsystems

$U_{MS,min}$	mm	Minimale erweiterte Messunsicherheit
u_n	mm	Standardunsicherheit Anzahl Transmitter
u_{RE}	mm	Standardunsicherheit der Auflösung (Resolution)
u_{ref}	mm	Standardunsicherheit Referenzierung (Reference)
u_T	mm	Standardunsicherheit Temperatur (Temperatur)
$u_{\varphi,max}$	mm	Standardunsicherheit maximaler Öffnungswinkel
$u_{\bar{\theta}}$	mm	Standardunsicherheit des durchschnittlichen Betrages des Elevationswinkels
α, β	°	Winkelgrößen
θ	°	Elevationswinkel
$\bar{\theta}$	°	Durchschnittlicher Betrag der Elevationswinkel
σ	mm	Standardabweichung
$\Delta\sigma$	mm	Differenz der Standardabweichung
φ	°	Azimutwinkel
φ_{max}	°	Maximaler Öffnungswinkel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Planungslogik zur Entwicklung von Montagesystemen (Müller et al. 2009c)	3
Abbildung 1.2: Modellhafte Beschreibung der Glieder einer Toleranzkette für einen virtuellen Prototyp.....	5
Abbildung 1.3: Integration eines Modell des Messsystems in einen virtuellen Prototyp zur Anwendung innerhalb eines Planungstools	7
Abbildung 1.4: Evolution des Modells eines laserbasierten Messsystems in Abhängigkeit eines roboterbasierten Produktionssystems	10
Abbildung 1.5: Aufbau und Strategie der Arbeit nach Ulrich.....	13
Abbildung 2.1: Einordnung der Montage im Produktionsunternehmen (Petersen 2005, S. 15; Lindemann et al. 2006, S. 73; Schmidt 2011, S. 7)	17
Abbildung 2.2: Aufgaben innerhalb der Montage (VDI 2860; Lotter und Wiendahl 2013; Müller et al. 2013).....	18
Abbildung 2.3: Automatisierungsgrad innerhalb der Montage (Lotter und Wiendahl 2013, S. 3).....	18
Abbildung 2.4: Einengung der Füge-teiltoleranzen mit steigendem Automatisierungsgrad (Lotter und Wiendahl 2013, S. 30).....	26
Abbildung 2.5: Kostenverantwortung und -entstehung in Entwicklung und Produktion (Lotter und Wiendahl 2013; Konold und Reger 2003)	27
Abbildung 2.6: Montagevorranggraph am Beispiel eines Airbus A350 XWB (Müller et al. 2011b).....	28
Abbildung 2.7: Rückverfolgbarkeit von Key Characteristics für unterschiedliche Ausbaustufen innerhalb der Montage (nach Schwanzar 2010)	29
Abbildung 2.8: Methode des Key Characteristics Flowdown am Beispiel eines Beschriftungslasers von Müller (Whitney 2004; Thornton 2004)	30
Abbildung 2.9: Produkt- und Prozesseigenschaften bestimmen das Montagesystem am Beispiel der Flugzeugproduktion	32
Abbildung 2.10: Toleranzkettenanalyse am Beispiel der Sektionsmontage (Müller et al. 2012)	33
Abbildung 2.11: Optimierung von Toleranzketten (Müller et al. 2009a; Müller et al. 2009c)	35
Abbildung 2.12: Einsatz der messtechnisch gestützten Montage zur Verkürzung der Toleranzkette (Müller et al. 2010).....	37
Abbildung 2.13: Einordnung ausgewählter Messsysteme (Mautz 2009; Nikon Metrology Inc. 2016b).....	39
Abbildung 2.14: Minimal- (links) und Standardkonfiguration (rechts) des iGPS (Nikon Metrology Inc. 2016a).....	41
Abbildung 2.15: Beschreibung der Funktionsweise der Sendeeinheit des iGPS (Muelaner et al. 2009, S. 218)	42
Abbildung 2.16: Überblick über die iGPS-Empfänger (Nikon Metrology Inc. 2007; Demeester et al. 2005)	43
Abbildung 2.17: Winkelbestimmung anhand der Zeitverläufe (Franceschini 2011) ..	44