



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Maschinenwesen · Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen

LEHRE · FORSCHUNG · PRAXIS

Methodik zur Modellierung von photogrammetrischen Messungen
zur Charakterisierung der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen

Dissertation von Mirko Riedel

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung
und adaptive Steuerungen



Lehre • Forschung • Praxis

Schriftenreihe der Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung
und adaptive Steuerungen

Mirko Riedel

**Methodik zur Modellierung von
photogrammetrischen Messungen zur
Charakterisierung der
Genauigkeit von Werkzeugmaschinen**

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt

Institut für Mechatronischen Maschinenbau

Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen
der Technischen Universität Dresden

Dresden, 2020

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen

Kutzbach-Bau, Helmholtzstraße 7a, 01069 Dresden
Telefon: +49 351 463-34358
Fax: +49 351 463-37073
Email: werkzeugmaschinen@tu-dresden.de
Internet: www.iwm.info

Mirko Riedel:

Methodik zur Modellierung von photogrammetrischen Messungen zur Charakterisierung
der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen

ISBN 978-3-86780-621-3

Originalausgabe, 1. Auflage 2020

© Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen

Eigenverlag, Dresden 2020

Methodik zur Modellierung von photogrammetrischen Messungen zur Charakterisierung der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen

An der Fakultät Maschinenwesen der
Technischen Universität Dresden zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

von

Dipl.-Ing. Mirko Riedel

geb. am 21.11.1977 in Burgstädt, Deutschland

Tag der Einreichung: 14.12.2018

Tag der Verteidigung: 02.10.2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt

Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel

Geleitwort des Herausgebers

Die Beherrschung der komplexen Wechselwirkungen von Forderungen nach steigender Produktivität, höherer Genauigkeit und verbesserter Energieeffizienz unter den Randbedingungen einer volatilen Auslastung und des thermo-mechanischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen stellt ein hochaktuelles produktionstechnisches Forschungsthema dar. Die Erforschung einer systemischen Lösung des Zielkonflikts von Energieeinsatz, Genauigkeit und Produktivität bei der spanenden Fertigung steht im Fokus des DFG-Sonderforschungsbereich/Transregio 96 „Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen“, in dessen Rahmen die vorliegende Dissertationsschrift entstand.

Die Forderung nach höchster Genauigkeit bei großer Produktivität und geringstem Energieeinsatz stellt die Entwicklung von Werkzeugmaschinen vor neue Herausforderungen. Durch reine gestalterische bzw. mechanische Optimierungen sind keine wesentlichen Verbesserungen der Maschinengenauigkeit zu erwarten, so dass hier zunehmend das bestmöglich aufeinander abgestimmte Zusammenwirken von Mechanik, Aktorik, Mess- und Steuerungstechnik an Bedeutung gewinnt. Der Ermittlung des prozessaktuellen kinematischen Verhaltens kommt dabei eine wesentliche Rolle zu. Dieses muss zusätzlich zur initialen Kalibrierung auch während des Gebrauchs einer Werkzeugmaschine wiederholt angewandt werden. Mit den unter dem Überbegriff Industrie 4.0 für die Werkzeugmaschinen gestellten Forderungen nach Adaptivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit kommt der Kalibrierung von Maschinen eine besondere Bedeutung zu. Flexibel austauschbare Komponenten von Werkzeugmaschinen oder die Anbindung von Zusatzmodulen an Maschinen sind hier zu nennende potentielle Anwendungsfälle.

Die Durchführung der Kalibrierung muss unter diesen Randbedingungen häufiger und unter Produktivitätsaspekten damit schneller durchführbar werden.

Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Fragestellung mit dem Ansatz, photogrammetrische Methoden zur Erfassung von Fehlern an Werkzeugmaschinen anwendungsspezifisch für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen weiterzuentwickeln.

Zur Charakterisierung des Maschinenzustandes bieten photogrammetrische Ansätze gegenüber den bekannten taktilen und optischen Messsystemen eine Reihe erheblicher Vorteile. Zudem basieren sie auf vergleichsweise preiswerten Kamerasensoren und versprechen daher kostengünstige Lösungen.

Einleitend wird in der Arbeit ein umfassender Stand der Technik bezüglich des Aufbaus, Verhaltens und der Korrektur von Werkzeugmaschinen sowie photogrammetrischer Me-

thoden vorgestellt. Nach einer daraus abgeleiteten Konkretisierung der Zielstellung wird die hier adressierte Lösung, unterteilt nach Modellierungskonzept, Realisierung und Test bzw. experimentelle Verifikation, dargestellt. Eine Zusammenfassung und der Ausblick schließen die Dissertation ab.

Die Grundidee der Dissertation besteht in der kreativen Idee, in der Geodäsie etablierte Verfahren der Photogrammetrie für die Genauigkeitsbewertung und Beschreibung der Kinematik von Werkzeugmaschinen anwendbar zu machen. Neben der vollständigen Posemessung an Werkzeugmaschinen kommt der Deformationsmessung von Maschinenbaukomponenten eine besondere Bedeutung zu.

Die Modellierung und Optimierung der Messanordnung wird ebenso wie die zugrundeliegende Ausgleichsrechnung detailliert betrachtet.

Die Übertragung der Methodik auf den Bereich der Werkzeugmaschinen erfolgt ausgehend von einer Aufstellung der potentiell genauigkeitsbestimmenden Einflussfaktoren. Daran schließt sich eine exemplarisch und experimentell geprägte Analyse der Signifikanz der Einflussgrößen an. Hieraus werden hilfreiche Aussagen zur praktischen Anwendung zur Erstellung eines Messmodells abgeleitet.

Dieses mathematisch hochkomplexe Messmodell wird – methodisch sinnvoll unterteilt und logisch aufgebaut – in seinen Grundbestandteilen vorgestellt und zu einer besseren Verständlichkeit exemplarisch anhand einer aktuellen Werkzeugmaschine veranschaulicht.

Bei der Realisierung und Testung der Modellumgebung werden neben den programmtechnischen Gesichtspunkten spezielle Aspekte der methodischen Umsetzung beschrieben, welche sich im Rahmen der Entwicklung der Modellumgebung ergeben. Wertvolle Teilaspekte sind dort die Realisierung eines vergleichsweise einfach umsetzbaren Ellipsenoperators und die Empfehlung des Gran-Operators, welche auch unter ungünstigen Beleuchtungsbedingungen gute Ergebnisse liefert.

Die Verifikation der Funktionsweise des Vorgehens wird an sieben Beispielen durchgeführt, wobei diese methodisch in drei Kategorien eingeordnet sind. Damit wird das große Potential der Photogrammetrie gezeigt, sowohl exemplarisch als Werkzeug zur Komponenten- und Fehleranalyse zu dienen als auch Korrekturmodelle für begrenzt genaue Maschinenstrukturen abzuleiten. Die Simulation möglicher Messkonfigurationen kann als extrem hilfreiches Tool angesehen werden, um sich der Thematik, photogrammetrische Messungen an Werkzeugmaschinen, zu nähern und die Vorteile des Ansatzes möglichst vollumfänglich nutzen zu können. Diese gezeigte Breite der Anwendbarkeit ist als eine große Stärke der

in der Arbeit herausgearbeiteten Methodik und Softwareunterstützung zu betrachten. Die exemplarisch erreichten Messunsicherheiten von lediglich 5 µm zeigen eindrucksvoll das Potential dieses Vorgehens.

Mit seiner Dissertation liefert Herr Riedel wesentliche, über den Stand der Forschung hinausgehende Erkenntnisse zur Anwendung photogrammetrischer Methoden zur Genauigkeitsbestimmung von Werkzeugmaschinen. Die Komplexität der erarbeiteten Lösungen variiert von eher einfachen experimentellen Untersuchungen und naheliegenden Analysen und Aussagen bis zur Aufstellung und programmtechnischen Umsetzung mathematisch anspruchsvoller Lösungen. Neben dem Alleinstellungsmerkmal des Potentialnachweises photogrammetrischer Methoden im Umfeld von Werkzeugmaschinen sind punktuell wesentliche Erweiterungen gegenüber kommerzieller Software geschaffen worden.

Dresden, den 12.05.2020

Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt

Vorwort und Danksagung

Meist werden die von Messsystem- und Maschinenherstellern angegebene Genauigkeit und Präzision als allgemeingültig und direkt auf die jeweilige Mess- bzw. Bearbeitungsaufgabe übertragbar angesehen. Dabei ist es eine verbreitete Einstellung und Praxis, diesen Messgrößen, ohne zu hinterfragen, auf welche Weise und unter welchen Bedingungen sie ermittelt wurden, zu vertrauen. Ein Anliegen dieser Arbeit ist es, die Wahrnehmung für den Einfluss von Messanordnung und Umgebungsbedingungen auf die Genauigkeit, Güte und Zuverlässigkeit der Messergebnisse zu verbessern. Praktiker sollte es dabei nicht verwundern, dass die Diskrepanz zwischen real ermittelten und den angegebenen Größen im Regelfall nicht zu vernachlässigen ist. Weiterhin möchte ich mit dieser Arbeit zeigen, dass durch eine physikalisch und statistisch basierte Abbildung von Messsystem, Messanordnung und Umgebungsbedingungen in einem Messmodell eine Abschätzung und Beurteilung der erreichbaren Messgenauigkeit ermöglicht wird. Diese Modellierung ermöglicht auch eine Optimierung von Messanordnung und Messbahn hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit. Beispielhaft werden in dieser Arbeit handelsübliche und teilweise sehr einfache digitale Bildsensoren verwendet, um mit Hilfe dieser Methodik valide und hochgenaue Messungen zur Charakterisierung und teilweise auch zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen durchzuführen.

Die vorliegende Dissertation begann während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen der Technischen Universität Dresden und wurde in der Hauptabteilung für Cyber-physische Produktionssysteme (CPPS) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU fertiggestellt. Besonders möchte ich mich für die großzügige Unterstützung und umfassende Betreuung der Arbeit aus Sicht der Werkzeugmaschinenentwicklung an beiden Einrichtungen sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt bedanken. Weiterhin möchte ich an Herrn Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas für die Betreuung der Arbeit aus dem Blickwinkel der Photogrammetrie einen besonderen Dank richten. Der Maschinenbauer in mir empfand den kleinen Einblick in die mathematischen Methoden der Photogrammetrie anfangs als ein wenig fremd, dann allerdings als ungemein bereichernd und schließlich als Schlüssel zu dieser Arbeit. Dieser Lernprozess erforderte von allen Beteiligten ein hohes Maß an Flexibilität und Motivation zum Eindringen in andere Fachdomänen und unterschiedlich geprägte Begrifflichkeiten und unbekannte Herangehensweisen. Ich bin der festen Überzeugung, dass durch den

Blick über den Tellerrand des Maschinenbauers hinaus, durch Übertragung und Anpassung bestehender Methoden und Herangehensweisen, auch noch eine Vielzahl weiterer neuer Lösungen für existierende Probleme gefunden werden können.

Ihren Anteil zum Erfolg dieser Dissertation haben nahezu alle Mitarbeiter der Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen, der Fraunhofer-CPPS-Hauptabteilung sowie des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung beigetragen. Ihnen allen möchte ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, die anregenden und manchmal auch anstrengenden Diskussionen sowie den vielen guten Ideen zum Thema danken. Leider oder auch zum Glück seid ihr viel zu viele, um euer aller Namen zu nennen. So soll es mir verziehen werden, wenn ich keinen bevorzuge. Weiterhin möchte ich explizit auch unserem Werkstattpersonal danken. Leider befasst sich die Theorie nur selten mit dem Charme und der Eleganz pragmatischer Lösungen an realen Objekten aus Stahl und Eisen, obwohl sie doch die physische Basis sind.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie für die umfangreiche Unterstützung, nicht nur in der Zeit der Erstellung der Dissertation, danken. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Abstract

At machine tools, control-integrated geometric-kinematic correction models, such as the VCS, as well as laser interferometers and laser trackers for estimating correction parameters can be considered as state of the art. Deficits currently exist in the characterization of the accuracy relevant machine condition by determining deformations as well as the spatial pose measurement of moving machine assemblies in the entire working space. Photogrammetric methods are in principle capable of realizing this, but they actually don't achieve the necessary accuracy and can't be adapted to the spatial conditions of a machine tool with regard to the number of cameras and the field of view.

The aim of this work is the development of a photogrammetric method for the characterization of the machine condition with the corresponding high accuracy. The basis is a measuring model which combines the kinematic structure and the measuring arrangement. Furthermore, all recorded object states are combined in the model in order to achieve the highest possible information content and to make it accessible for statistical evaluation.

To verify the methodology, a measurement task for the analysis of machine components and machines as well as for the simulation of measurement configurations is presented. Thereby the kinematic axis arrangement in the measurement model is taken into account, which enables the construction of extended measurement configurations as well as the determination of parameters of the correction models. For the determination of thermo-elastic displacements at a hexapod, an extended 6DoF measurement configuration consisting of stationary cameras and cameras that move with the machine is created. This allows measurement uncertainties of less than $10\ \mu\text{m}$ or $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ to be experimentally verified in a measurement volume of $600\ \text{mm} \times 600\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$.

The focus of this work is the development of a modelling concept for photogrammetric measurements on machine tools. Exemplary measurements are used to show that this extended modelling can significantly increase the achievable measuring accuracy. The main point for this is the combination of the models of machine and measuring system as well as the measuring cycle in a closed measuring model. In view of the developments in the area of Industry 4.0, this is, in the author's view, the area with the greatest application potential. There is an increasing need to configure and calibrate machines. At the same time, the performance, availability and accessibility of machine-specific models are also improving. The combination of machine-specific models with models of the measuring systems by using the developed methodology enables a significant increase in measuring accuracy.

Kurzfassung

An Werkzeugmaschinen können steuerungsintegrierte geometrisch-kinematische Korrekturmodelle, wie z.B. das VCS, sowie Laserinterferometer und Lasertracker zur Bestimmung von Korrekturparametern als Stand der Technik angesehen werden. Defizite bestehen derzeit in der Charakterisierung des genauigkeitsrelevanten Maschinenzustandes durch Bestimmung von Verformungen sowie der räumlichen Lagevermessung bewegter Maschinenbaugruppen im gesamten Arbeitsraum. Photogrammetrische Verfahren sind zwar prinzipiell in der Lage, dies zu realisieren, erreichen aber nicht die notwendige Genauigkeit und können hinsichtlich der Anzahl der Kameras und des Sichtfeldes nicht an die räumlichen Gegebenheiten einer Werkzeugmaschine angepasst werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines photogrammetrischen Verfahrens zur Charakterisierung des Maschinenzustandes mit hoher Genauigkeit. Grundlage ist ein Messmodell, in dem die kinematische Struktur und die Messanordnung zusammengeführt wird. Weiterhin werden alle Objektzustände zusammengeführt, um einen möglichst hohen Informationsgehalt zu erreichen und diesen für statistische Auswertungen zugänglich zu machen.

Zur Verifizierung werden Analysen von Komponenten und Maschinen sowie die Simulation von Messungen vorgestellt. Dabei wird die kinematische Achsanordnung im Messmodell berücksichtigt, was sowohl die Erstellung optimierter Messkonfigurationen als auch die direkte Parameterermittlung von Korrekturmodellen ermöglicht. Für die Bestimmung thermo-elastischer Verlagerungen an einem Hexapod wird eine erweiterte 6DoF-Messkonfiguration, bestehend aus stationären und mit der Maschine bewegten Kameras, vorgestellt. Damit können Messunsicherheiten von weniger als $10\ \mu\text{m}$ bzw. $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ in einem Messvolumen von $600\ \text{mm} \times 600\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ experimentell verifiziert werden.

Im Mittelpunkt steht dabei die Entwicklung eines Modellierungskonzepts für photogrammetrische Messungen. Anhand von Beispielmessungen wird gezeigt, dass dadurch die erzielbare Messgenauigkeit deutlich erhöht werden kann. Im Vordergrund steht dabei die Kombination der Modelle von Maschine und Messsystem sowie des Messzyklus in einem geschlossenen Messmodell. Durch die Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0 besteht ein zunehmender Bedarf, Maschinen zu konfigurieren und zu kalibrieren. Gleichzeitig verbessern sich Leistung, Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von maschinenspezifischen Modellen. Die Kombination von maschinenspezifischen Modellen mit Modellen der Messsysteme unter Verwendung der entwickelten Methodik ermöglicht eine deutliche Erhöhung der Messgenauigkeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Bedeutung und Genauigkeit von Werkzeugmaschinen	2
1.2	Erfassung der Genauigkeit	4
1.3	Anforderungen der Industrie 4.0 an WZM	5
1.4	Inhalt und Aufbau dieser Arbeit	6
2	Aufbau, Verhalten und Korrektur von WZM	9
2.1	Kinematischer Aufbau von WZM	10
2.2	Fertigungs- und Maschinengenauigkeit	11
2.3	Genauigkeitsbestimmende Verhaltensbereiche	13
2.4	Steuerungsintegrierte Korrektur	18
2.5	Methoden zur Erfassung von Abweichungen	20
2.6	Typische Messmittel an WZM	21
2.7	Defizite	29
3	Photogrammetrische Methoden	33
3.1	Bildentstehung	34
3.2	Bildverarbeitung	38
3.3	Objektrekonstruktion	41
3.4	Genauigkeitskenngrößen	50
3.5	Auswertemethoden	53
3.6	Potenziale und Defizite	59

4	Konkretisierung der Zielstellung	61
4.1	Bedarf	62
4.2	Zielstellung	63
4.3	Methodik	63
5	Entwicklung eines Modellierungskonzeptes für WZM	65
5.1	Struktur und Parameter der Modelle	66
5.2	Genauigkeitsrelevante Einflussgrößen	70
5.3	Modellierungskonzept	78
5.4	Beispielhafte Modellierung: DMU80	90
6	Realisierung und Test der Modellumgebung	95
6.1	Hard- und Softwarekonzept	96
6.2	Softwarekomponenten	97
6.3	Bildaufnahme und Bildspeicher	98
6.4	Realisierung und Test der Bildmessung	99
6.5	Implementierung der Modellkomponenten	107
6.6	Realisierung und Test der Ausgleichungskomponente	109
6.7	Verifikation der 3D-Koordinatenbestimmung	111
6.8	Zwischenfazit	112
7	Experimentelle Verifikation	113
7.1	Komponentenanalyse	115
7.2	Analyse von Maschinen	131
7.3	Simulation von Messkonfigurationen	144
8	Zusammenfassung und Ausblick	151

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

1.1 Bedeutung und Genauigkeit von Werkzeugmaschinen

Werkzeugmaschinen (WZM) werden als „mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtungen, die durch relative Bewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück eine vorgegebene Form oder Veränderung am Werkstück erzeugen“ bezeichnet [DIN81, GF08, WB05]. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit nehmen WZM aus technologischer Sicht eine Schlüsselrolle im Maschinen- und Anlagenbau ein. Auch aus wirtschaftlicher Sicht hat die Werkzeugmaschinenproduktion in Deutschland einen hohen Stellenwert, was sich beispielsweise an ca. 72 Tausend Beschäftigten mit einem Jahresumsatz von ca. 16 Mrd € im Jahr 2017 zeigt [Ver17]. Den größten Anteil bilden mit ca. 55 % die spanenden WZM [Ver17]. Dabei handelt es sich in der Regel um hoch spezialisierte Fräs- und Drehzentren sowie Polier- und Schleifmaschinen. Aufgrund der veränderten Marktanforderungen zeigen sich in dem mit diesen Maschinen realisierbaren Werkstückspektrum (Abbildung 1.1) bei sinkenden Losgrößen und wachsenden Genauigkeitsanforderungen gleichzeitig steigende Bauteilabmessungen sowie eine deutlich zunehmende Bauteilkomplexität [Neu12].

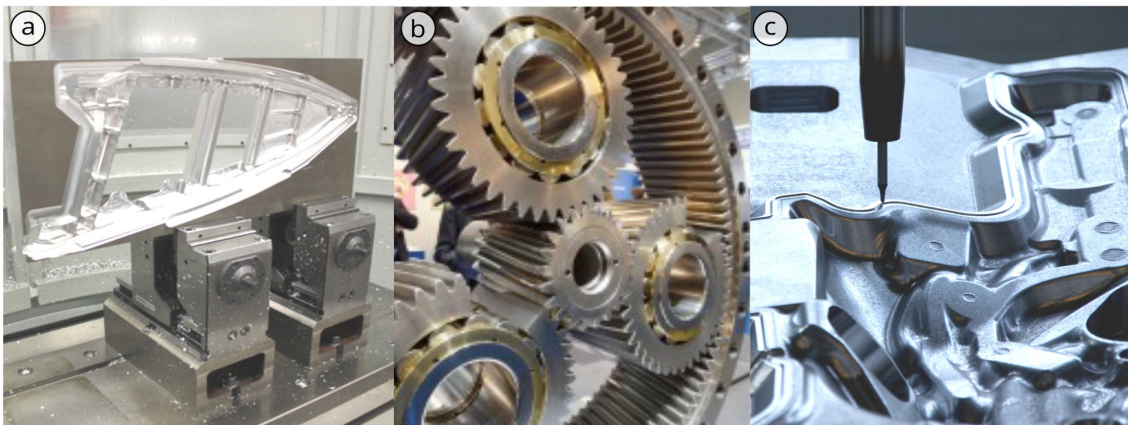


Abbildung 1.1: Durch WZM hergestelltes Werkstückspektrum: (a) dünnwandiges Integralbauteil für Luftfahrtanwendungen [Gre15], (b) Getriebe für Windkraftanlagen [Pre15] sowie (c) Tiefziehwerkzeug aus dem Automobilbau [Dor18]

Dabei muss die Werkstückqualität auch bei einer Losgröße 1 gewährleistet werden, wodurch ein bisher übliches Einfahren der Produktion nicht mehr möglich ist. Dies stellt stetig steigende Anforderungen an die WZM hinsichtlich Werkstückqualität und Produktivität sowie Kosten [Bü01, Con15, Hir12, Neu12]. Gleichzeitig ist es aufgrund der steigenden Produktivität der Maschinen schwieriger, die geforderte Werkstückqualität zu erreichen und sicherstellen zu können.

Die realisierbare Werkstückqualität wird, neben technologischen Größen, maßgeblich durch die Arbeits- bzw. Maschinengenauigkeit der WZM bestimmt [VDI77a, VDI77b, WB06b]. All-

gemein charakterisiert der Begriff Genauigkeit eine „qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung“ zwischen Ermittlungsergebnis und Bezugswert [DIN87]. An WZM ist der Bezugswert die vorgegebene Position und Neigung (auch als Pose bezeichnet [DIN96]) an der Wirkstelle des Zerspanprozesses, d.h. zwischen Werkzeug (Wz) und Werkstück (Wst). Quantitativ wird die Genauigkeit durch die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position ausgedrückt. Unter idealen Bedingungen liegt diese Abweichung bei modernen Universal-Fräsmaschinen im unteren zweistelligen sowie bei Feinbearbeitungsmaschinen im unteren einstelligen Mikrometerbereich (Abbildung 1.2). Dieses Genauigkeitsniveau wurde durch eine stetige Verbesserung und Optimierung der Konstruktion, direkte Messsysteme für Vorschubachsen sowie die Verwendung steuerungsintegrierter Fehlerkorrekturen, beispielsweise „Volumetric Compensation System“ (VCS [Sie09b]), erreicht. Gegenstand aktueller Entwicklungen sind die stetige Erweiterung und Verbesserung steuerungsintegrierter Fehlermodelle zur Korrektur eines hohen Anteils des systematischen Maschinenverhaltens [WWM16].

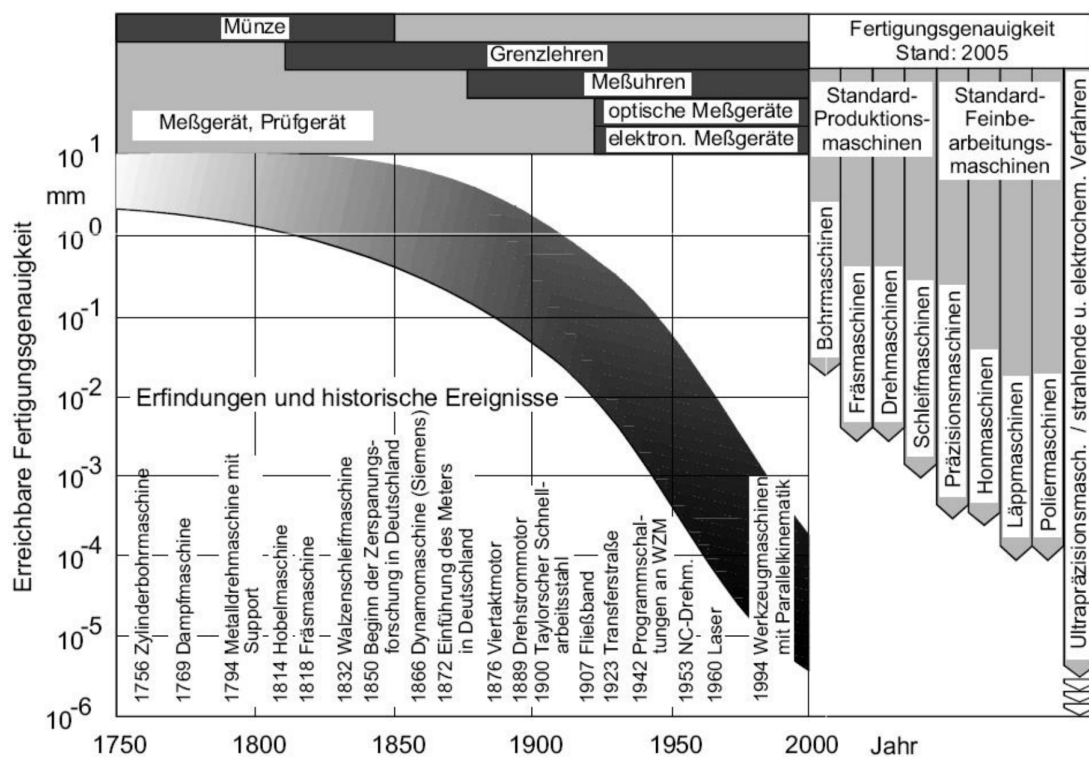


Abbildung 1.2: Entwicklung der erreichbaren Maschinengenauigkeiten [WB06b] (vgl. [Tan83])

Eine entscheidende Grundlage für Korrekturmechanismen und mittlerweile ein fester Bestandteil im Lebenszyklus einer WZM ist die messtechnische Erfassung von genauigkeitsrelevanten Maschineneigenschaften. Bei der Entwicklung und Konstruktion wird zur Verbes-

serung und Optimierung von Komponenten und des Maschinenverhaltens eine Vielzahl an Kenngrößen benötigt. Fester Bestandteil der Inbetriebnahme ist eine Maschinenkalibrierung, bei der die exemplarisch streuenden geometrisch-kinematischen Abweichungen erfasst und als Korrekturtabelle in der Maschinensteuerung hinterlegt werden. Weiterhin wird zur Maschinenabnahme der Maschinenzustand bei der Übergabe an den Kunden dokumentiert. Die Maschinenkalibrierung wird im Lebenszyklus der Maschine mehrfach, beispielsweise im Rahmen der Maschinenwartung oder zur Fertigung von Werkstücken mit erhöhtem Anspruch, wiederholt. Damit haben Messsysteme zur Maschinenkalibrierung, beispielsweise Laserinterferometer, eine zentrale Bedeutung zur Herstellung der Maschinengenauigkeit [BBDW14]. Jedoch stoßen die derzeit verfügbaren Messsysteme aufgrund der steigenden Genauigkeitsanforderungen und der Anzahl an durchzuführenden Messungen zunehmend an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit.

1.2 Erfassung der Genauigkeit

Standardsysteme zur Charakterisierung der Genauigkeit von WZM sind Quickset, Double-Ball-Bar (DBB) und R-Test bzw. zur Kalibrierung Interferometer, Tracking-Interferometer und Laser-Tracer. Interferometer können Strecken bzw. 3D-Koordinaten im Raum hochgenau erfassen und damit innerhalb einiger Stunden den geometrisch-kinematischen Verlagerungszustand des Tool Center Point (TCP) in allen 6 Fehlerfreiheitsgraden im gesamten Arbeitsraum durch die Messung der Fehler aller Vorschubachsen und ihrer Anordnung aus mehreren zeitlich nacheinander aufgenommenen Teilmessungen rekonstruieren. Eine vollständige Posemessung des TCP an beliebigen Positionen des Arbeitsraumes ist derzeit nicht möglich. Instationäre Änderungen des Maschinenzustandes, beispielsweise thermoelastische Verlagerungen des TCP, lassen sich damit nur bedingt oder nicht erfassen. Weiterhin sind diese Messsysteme aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen, ihrer ausgeprägten Spezialisierung und der geringen hergestellten Stückzahlen sehr kostenintensiv. Prinzipbedingt können photogrammetrische Messverfahren (Abbildung 1.3) eine vollständige Posemessung sowie eine Deformationsmessung an einer hohen Messpunktdichte realisieren. Die Systeme basieren in der Regel auf digitalen bildgebenden Sensoren aus dem Konsumerbereich, die in sehr großen Stückzahlen hergestellt werden und entsprechend preiswert sind. Zur Kalibrierung von Industrierobotern werden spezielle Stereokamerasysteme erfolgreich eingesetzt, die eine 3D-Punktgenauigkeit in einem Messvolumen von 1 m³ Messunsicherheiten von unter 20 µm erreichen [AIC12]. Mobile Koordinatenmess-

geräte erreichen unter idealen Bedingungen eine größenabhängige (S [m]) Längenmessabweichung von $3\ \mu\text{m} + S * 7\ \mu\text{m}/\text{m}$ [AIC10]. Jedoch werden diese Systeme in der Praxis an WZM aufgrund der hohen Messdauer nur in Ausnahmefällen eingesetzt. Auch sind nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen zur prinzipiellen Eignung photogrammetrischer Methoden bzw. zu Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes an WZM bekannt.



Abbildung 1.3: Photogrammetrische Messsysteme zur Roboterkalibrierung (a und b: Fa. Nikon, Optotrack, [Luh10a, Nik11]) sowie zur 3D-Koordinatenmessung (c: Fa. Aicon, DPA [AIC10] und d: Move-Inspect [AIC12])

1.3 Anforderungen der Industrie 4.0 an WZM

Industrie 4.0 verspricht eine effiziente Fertigung individueller Produkte auch bei kleinen Losgrößen, was auch vom Markt nachgefragt wird (Abbildung 1.1). Dies stellt wachsende Anforderungen hinsichtlich Adaptivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit an die WZM. Aufgrund der stark wachsenden Individualisierung der zu fertigenden Werkstücke bis hin zur Losgröße 1 (Abbildung 1.1) wird von der an sich sehr langlebigen Maschine ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit an veränderliche Bearbeitungsprozesse oder Umgebungsbedingungen gefordert (Abbildung 1.4). Die Herausforderung für die WZM ist dabei, durch eine steuerungsseitige Anpassung kurzfristig, durch eine Anpassung der Hardware mittelfristig sowie durch eine modulare Austauschbarkeit von Maschinenkomponenten langfristig einen situativ optimalen Bearbeitungsprozess sicherstellen zu können. Das Kernstück zur Realisierung der Anpassungsfähigkeit ist dabei der „digitale Zwilling“, eine virtuelle Repräsentation der Maschine in der Steuerung oder dem Leitrechner. Er spiegelt den aktuellen Zustand der Maschine wider und muss entsprechend bei Änderungen oder Anpassungen der Maschine gleichzeitig aktualisiert werden.

Auch zum Aufbau bzw. zur Aktualisierung eines digitalen Zwillings spielt die Messtechnik eine zentrale Rolle. Grundlage ist das Monitoring von prozess- und genauigkeitsrelevanten Kenngrößen zur Charakterisierung des Maschinenzustandes. Aktuell eingesetzte Mittel zur kurzfristigen Steigerung der Genauigkeit sind beispielsweise die werkstückspezifische Maschinenkalibrierung oder die Nachführung des thermischen Verlagerungszustandes in Bearbeitungspausen. Maßnahmen zur Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit benötigen zusätzlich eine mechanische Anpassung der Maschine und ihrer Struktur. Dies erfordert wiederum eine Aktualisierung des digitalen Zwillings durch eine Messung der exemplarischen Kenngrößen sowie eine erneute Maschinenkalibrierung. Damit wächst der Bedarf für eine schnelle und effektive Charakterisierung und Kalibrierung der WZM stetig an. Aufgrund der zunehmenden Anzahl der benötigten Messungen steigen auch die Anforderungen an die Messsysteme hinsichtlich Genauigkeit, Messvolumen, Messdauer und Kosten sowie die Anbindung an den digitalen Zwilling der Maschine.

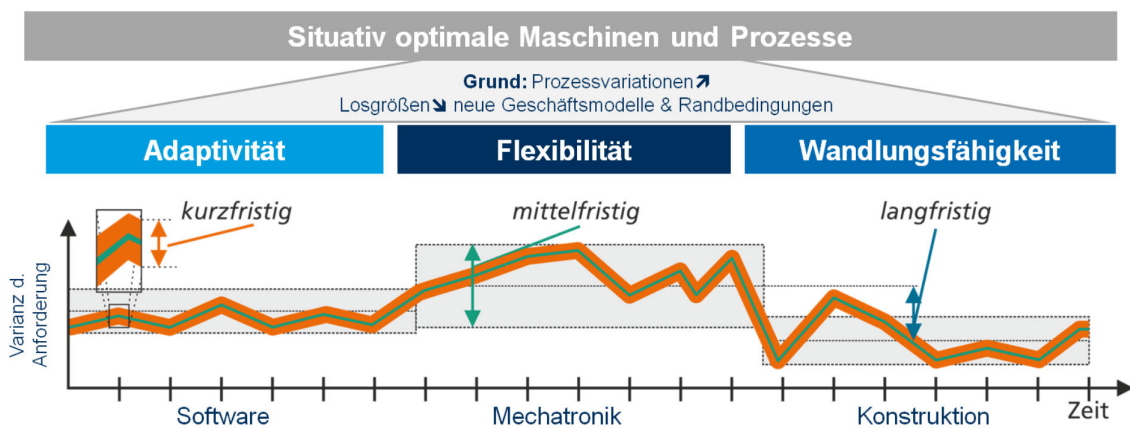


Abbildung 1.4: Situativ optimale Maschinen und Prozesse [Ihl18]

Aufgrund der Fähigkeit zur vollständigen Posemessung besitzen photogrammetrische Messsysteme ein hohes Potenzial, eine schnelle Identifikation und ggf. Kalibrierung des genauigkeitsrelevanten Maschinenzustandes zu ermöglichen. Weiterhin sind Kameras und Marken im Vergleich zu laserbasierten Messsystemen sehr kostengünstig und einfach zu handhaben, was für einen Einsatz an WZM spricht.

1.4 Inhalt und Aufbau dieser Arbeit

Kernpunkt dieser Arbeit ist die Entwicklung von photogrammetrischen Methoden zur Erfassung von Fehlern an WZM sowie zur Parameterbestimmung von steuerungsintegrierten

Korrekturmodellen bzw. des digitalen Zwillings. Dazu ist die vorliegende Arbeit in folgende Abschnitte gegliedert:

- Darlegung des Standes von Technik und Forschung hinsichtlich **Aufbau, Verhalten und Korrektur von WZM** (Kapitel 2) sowie **photogrammetrischer Methoden** (Kapitel 3).
- Konkretisierung der **Zielstellung und Vorgehensweise** (Kapitel 4) auf Basis des aktuellen Standes von Technik und Forschung von WZM und Photogrammetrie.
- Entwicklung eines Konzeptes zur **Modellierung von Messungen an WZM** (Kapitel 5). Kernpunkt ist dabei die gemeinsame Abbildung von Messsystem, Maschinenstruktur und steuerungintegrierten Korrekturmodellen in einem übergreifenden Messmodell.
- **Realisierung einer Testumgebung** (Kapitel 6) zur Abbildung eines möglichst breiten Spektrums an Messszenarien an WZM.
- Beispielhafte **experimentelle Verifizierung** (Kapitel 7) von Testumgebung und Modellierungskonzept anhand des Vergleichs mit konventionellen Auswertungsmethoden sowie neuartiger, bisher nicht realisierbarer Messkonfigurationen.
- Abschließend folgen **Zusammenfassung und Ausblick**.

Die besondere Relevanz dieser Arbeit liegt in der Verbindung zweier in ihrer Vorgehensweise und Methodik durchaus sehr verschiedener Fachbereiche: Photogrammetrie und Maschinenbau. Um das Verständnis für Leser aus den jeweiligen Interessen- und Fachbereichen sicherzustellen, werden die jeweiligen Grundlagen teils recht detailliert angegeben.

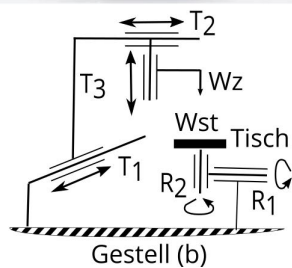
Kapitel 2

Aufbau, Verhalten und Korrektur von WZM

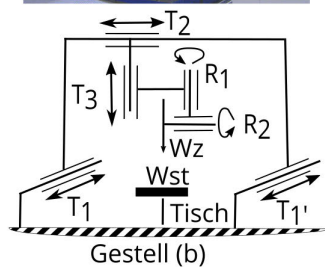
2.1 Kinematischer Aufbau von WZM

WZM zur spanenden Bearbeitung sind in der Regel als serielle Kinematik aufgebaut. Parallel- bzw. Hybridkinematiken sind weniger verbreitet und eher als kostengünstige 6-Achs-Sondermaschinen anzutreffen [Kau06, Sza07, UZA⁺13]. Sie unterscheiden sich hinsichtlich Aufbau (Anzahl und Anordnung der Vorschubachsen), Bewegungsfreiheitsgraden, Arbeitsraumgröße und erreichbarer Genauigkeit. In Abbildung 2.1 sind beispielhaft der kinematische Aufbau zweier serieller 5-Achs-Bearbeitungszentren sowie einer 6-Achs-Parallelkinematik, eines Hexapoden gegenübergestellt. Die Maschinen bestehen aus Grundgestell (baseframe b) und translatorischen (T) bzw. rotatorischen (R) Vorschubachsen, die durch Gestellbaugruppen verbunden sind und eine Relativbewegung zwischen W_z und W_{st} erzeugen. Während bei Parallelkinematiken die Vorschubachsen parallel am Endeffektor angreifen, sind sie bei seriellen Kinematiken als Reihenschaltung verkettet.

Fahrständerbauweise mit Dreh-
Schwenktisch (RRbTTT)



Portalbauweise mit Gabel-
kopf (bTTTTR)



Hexapod
(bTTTTTT)

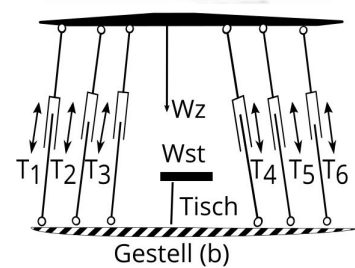


Abbildung 2.1: Aufbau paralleler und serieller Kinematiken: links DMG-Mori DMU 80 [DMG14b], mittig Mikromat 20V [Mik17] sowie rechts PI Hexapod H840 [Phy18]

Durch den kinematischen Aufbau einer Maschine wird maßgeblich die Größe und Form sowie Ausprägung der Gestellbauteile definiert. Dabei bestimmen die im Kraftfluss liegenden Komponenten, sowohl die Vorschubachsen als auch die Gestellbauteile, die erreichbare Genauigkeit der WZM. Einer der wesentlichen Preistreiber an WZM ist die hochgenaue mechanische Fertigung der Gestellbauteile. Da diese bei Parallelkinematiken meist kleiner und kompakter gestaltet werden können, entsteht hier ein Preisvorteil, der jedoch meist durch eine aufwendigere Maschinensteuerung und die Notwendigkeit zur exemplarischen Kali-

brierung erkaufte wird. Beispielsweise kann an Hexapoden durch eine konsequente steuerungs-basierte Fehlerkorrektur die erreichbare Genauigkeit trotz einfacher mechanischer Gestaltung sichergestellt werden [Kau06, Sza07].

2.2 Fertigungs- und Maschinengenauigkeit

Für Anwender von WZM ist vor allem die Fertigungsgenauigkeit an für sie repräsentativen Werkstücken unter deren spezifischen Fertigungsbedingungen relevant (Abbildung 2.2 links). Die Fertigungsgenauigkeit wird indirekt durch die Fertigung von repräsentativen Prüfwerkstücken ermittelt und dient vor allem zur Beurteilung von Maschine und Prozess. Dabei existieren eine Vielzahl an genormten Prüfwerkstücken, jeweils spezifisch für unterschiedliche Maschinen ([Aer12, DIN01a, VDI86a, VDI83, VDI86b]), Fertigungsstrategien (3-Achs-HSC: [DIN01a, NC 00, VDI86a], 5-Achs-HSC: [NC 05, VDI83]) und Werkstücke (Mikrobearbeitung: [VDI86b]). Gezielte Rückschlüsse auf Fehlerursachen sind durch die Überlagerung der Einflüsse von Zerspanprozess, Werkstück und Werkzeug im Bearbeitungsergebnis nur bedingt möglich.

	Anwender	Hersteller
Methoden	indirekte messtechnische Erfassung	direkte messtechnische Erfassung
Ziele	anschaulicher, allgemeiner Funktionstest durch Beobachtung der Maschinenoperation während der Bearbeitung der Probewerkstücke (häufig als Ergänzung) Bewertung einzelner, jedoch meist einer Gruppe von Maschineneigenschaften anhand der Maß-, bzw. Formabweichungen und Oberflächengüte der gefertigten Werkstücke Abnahmekriterien: Zufriedenstellender Funktionsablauf der Maschine sowie Einhaltung der Maß-, bzw. Formtoleranzen und Oberflächengüte der gefertigten Werkstücke, Sichtprüfung der Oberfläche	Messtechnische Erfassung der Maschinenkenngrößen hinsichtlich einzelner Kriterien wie Rundlauf-, Winkligkeits-, Positionsabweichung, u.a. Bewertung der Maschineneigenschaften in Hinblick auf fertigungsbezogene und lastbedingte Abweichungen vom idealen, fehlerfreien Verhalten der Maschine Abnahmekriterien: Feststellung, ob die gemessenen Abweichungen in erlaubten Toleranzbändern liegen, bzw. die Grenzwerte überschritten werden.
Konsequenz	bei Nichterfüllung der Abnahmekriterien ist oft eine direkte messtechnische Untersuchung notwendig	Nachbesserung der Maschine bzw. konstruktive Verbesserungsmaßnahmen, wenn die Abnahmekriterien nicht erfüllt sind

Abbildung 2.2: Methoden und Ziele der Eigenschaftsbestimmung an WZM (nach [WB06b])

Zur Bewertung, Maschinenabnahme und Kalibrierung der WZM wird deshalb die direkte messtechnische Erfassung der Maschineneigenschaften am TCP angewendet (Abbildung 2.2 rechts). Damit können die Eigenschaften der WZM unabhängig vom Prozess erfasst werden, was eine Identifikation und Beseitigung von Ursachen ermöglicht. Dies erfolgt in der Regel durch den Maschinenhersteller, ggf. auch durch einen Messdienstleister,

und hat meist eine Kalibrierung der Maschine, d.h. die Parametrierung der steuerungsin-
tegrierten Korrektur, zum Ziel.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen beim Maschinenhersteller auch als Auslegungs-
grundlage in die Konstruktion nachfolgender Maschinen ein. Da er bei der Konstruktion
und Entwicklung sowie bei der Inbetriebnahme der WZM den Fertigungsprozess beim An-
wender nur bedingt nachbilden kann, werden Anforderungen hinsichtlich geometrischer
Genauigkeit, Verhalten unter Prozesskräften und Temperaturänderungen definiert, die
dann im Rahmen der Maschinenabnahme nachzuweisen sind. Die Ergebnisse des Nach-
weises sowie die Erfahrungen des Kunden fließen wiederum in die Konstruktion ein.

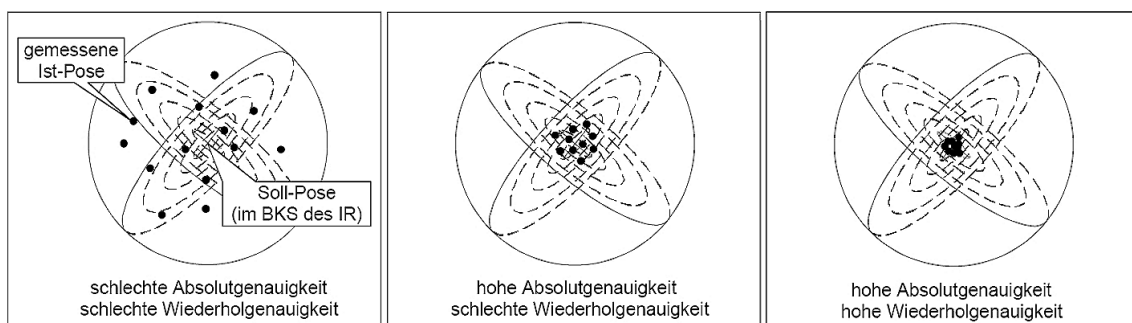


Abbildung 2.3: Fehlercharakteristik von Industrierobotern (IR) im Bezugskordinatensystem (BKS) [Gra99, BW02]

Allgemein zeigen die zu ermittelnden Kenngrößen der WZM eine Wiederholgenauigkeit, auch als Wiederholpräzision bezeichnet, sowie eine Absolutgenauigkeit (Abbildung 2.3). Die Präzision wird beispielsweise durch nichtlineares Verhalten von Fugen an Gestellbaugruppen oder von spielbehafteten Führungen verursacht und weist laut Definition kein systematisches Verhalten auf. Die Absolutgenauigkeit wird durch die Maßhaltigkeit der Maschinenkomponenten selbst sowie deren kinematische Anordnung bestimmt und ist systematisch reproduzierbar. Diese Fehleranteile sind, im Gegensatz zu den zufälligen Abweichungen, prinzipiell für eine Korrektur zugänglich.

Ein Hauptziel in der Maschinenentwicklung ist die Minimierung zufälliger Fehler, um ein systematisches und damit korrekturfähiges Maschinenverhalten zu erreichen. Die Steigerung der Absolutgenauigkeit wurde konventionell durch die Steigerung der Fertigungsgenauigkeit der Gestellbaugruppen erreicht, was teils enorme Herstellungskosten erzeugt. Um dies zu vermeiden, geht der Trend hin zur vermehrten Verwendung steuerungsbasierter Korrekturen. Die Grundlage dafür ist die stetig steigende Leistungsfähigkeit der Maschinensteuerungen, was den Einsatz komplexer Korrekturmodelle des genauigkeitsbestimmenden Verhaltens ermöglicht.

2.3 Genauigkeitsbestimmende Verhaltensbereiche

Einflussgrößen auf die Genauigkeit von WZM lassen sich anhand ihrer Verhaltensbereiche einteilen [Kau06, Spu96, WB06b]. Genauigkeitsrelevant sind das geometrisch-kinematische (geo), das elastische (ela), das thermo-elastische (thr) sowie das dynamische Verhalten (dyn). Das geometrisch-kinematische Verhalten wird durch Fertigungs- und Montagefehler sowie Steuerungs- und Bewegungsfehler bestimmt. Die entstehenden Abweichungen sind lastunabhängig und stationär. Elastische und thermisch bedingte Abweichungen treten aufgrund von instationären, mechanischen oder thermischen Lasten auf. Dynamische Abweichungen werden durch periodisch wechselnde Kräfte, beispielsweise wechselnde Prozesslasten, verursacht [WB06a, WB06b]. Am TCP überlagern sich alle Fehleranteile zu einer positions- und lastabhängigen sowie instationären Gesamtabweichung, die als Maßabweichung ins Werkstück eingepreßt wird. Prinzipiell sind alle vier Verhaltensbereiche voneinander unabhängig und können damit durch separate Verhaltensmodelle abgebildet werden. Das dynamische Verhalten wird maßgeblich durch Prozessgrößen bestimmt und deshalb in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.3.1 Geometrisch-kinematisches Verhalten

Das geometrisch-kinematische Verhalten wird durch Fertigungs- und Montagefehler hervorgerufen und bewirkt eine positionsabhängige Abweichung von der idealen Vorschubbewegung in 6 Fehlerfreiheitsgrade als Verlagerung und Neigung (Abbildung 2.4 oben).

Für serielle kinematische Strukturen treten zusätzlich Fehler durch die Anordnung auf, beispielsweise die Rechtwinkligkeit von translatorischen Vorschubachsen oder bei rotatorischen Achsen die Position der Achsen im Maschinenkoordinatensystem (Abbildung 2.4, unten). Die Einzelfehler werden als voneinander unabhängig betrachtet, was der Annahme einer Bewegung von in sich starren Körpern entspricht [RMP00a, WB06b]. Ein geometrisch-kinematisches Fehlermodell für eine serielle 3-Achs-Maschine enthält somit 18 positionsabhängige Parameter der Vorschubachsen sowie 3 positionsunabhängige Parameter der Rechtwinkligkeit der Achsen zueinander (Abbildung 2.5, links). Bei 5-Achs-Maschinen erweitert sich das Fehlermodell um die entsprechenden 12 Fehlerparameter der rotatorischen Einzelachsen und deren Anordnung zueinander.

wenige aussagefähige Informationen öffentlich verfügbar. Herstellerangaben sind nur in Ausnahmen, wie beispielsweise bei Fa. DMG-Mori [DMG16a, DMG16b, DMG16c], öffentlich zugänglich. Verfügbar sind jedoch Angaben eines Kalibrierdienstleisters (Fa. AfM [AfM10b, AfM10a, AfM11a, AfM11b, AfM13b, AfM13c, AfM12, AfM13a]) zur Kalibrierung von gebrauchten bzw. neu aufgebauten Maschinen.

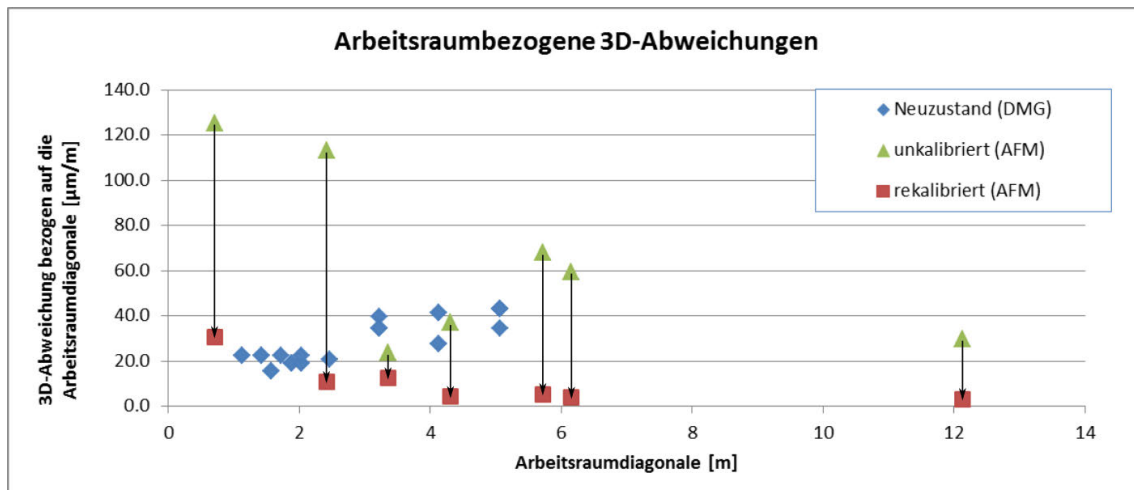


Abbildung 2.6: 3D-Abweichungen von WZM im Neuzustand sowie un- und rekaliert

In Abbildung 2.6 sind die gefundenen Abweichungen, bezogen auf die Arbeitsraumdiagonale, gegenübergestellt. Dabei zeigen sich mittlere 3D-Abweichungen von ca. $30 \mu\text{m}/\text{m}$ ohne bzw. $10 \mu\text{m}/\text{m}$ mit erfolgreicher Kalibrierung. Bei unkalibrierten Maschinen können die Abweichungen auch über $100 \mu\text{m}/\text{m}$ betragen, die jedoch wieder auf Ausgangsniveau reduziert werden können.

2.3.2 Elastisches Verhalten

Das elastische Maschinenverhalten wird durch veränderliche mechanische Lasten, beispielsweise Massenträgheitskräfte der Maschine oder wechselnde Eigengewichte der Werkstücke, beeinflusst. Die Änderung der mechanischen Kräfte bewirkt eine elastische Deformation aller im Kraftfluss liegenden Gestellbaugruppen, Antriebsselemente und Führungen. Kenngrößen zur Charakterisierung des elastischen Verhaltens sind die Nachgiebigkeit bzw. Steifigkeit in Zug- und Druckrichtung, die Neigungssteifigkeiten (Abbildung 2.7, vgl. [DIN90a, DIN90b, DIN90c]) sowie nichtlineare Effekte. Die Steifigkeit ist aufgrund der wechselnden Hebelverhältnisse im Arbeitsraum einer Maschine stark positionsabhängig.

Dabei zeigen die Gestellbauteile in der Regel ein linear-elastisches Verhalten. Die nichtlinearen Effekte werden beispielsweise durch Spiel in den Führungen, Fugen und durch

Reibung hervorgerufen und zeigen sich in einer Hysterese als Differenz zwischen Be- und Entlastung. Betrachtet man die Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverlagerung, zeigt sich, dass vor allem die Führungen einen hohen Anteil besitzen [WB06b].

Damit kann für die Korrektur elastischer Abweichungen im ersten Schritt von einem Starrkörpermodell mit elastischen Koppelsteifigkeiten und ggf. Spiel ausgegangen werden [WB06b]. Im zweiten Schritt werden darauf aufbauend elastische Deformationen der Gestellbaugruppen und innere Verspannungen berücksichtigt.

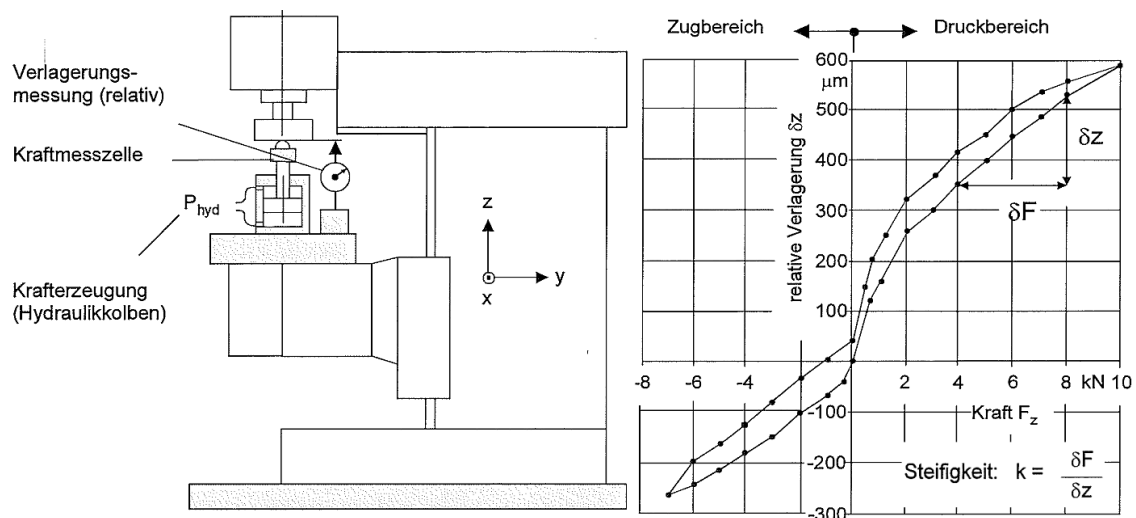


Abbildung 2.7: Messaufbau zur Ermittlung der quasistatischen Verlagerung links sowie beispielhaft ein typischer Verlagerungsverlauf rechts [DIN90a, DIN90b, DIN90c, WB06b]

Zur Ermittlung der Nachgiebigkeit wird in DIN V 8602 eine quasistatische, hydraulische Lasteinleitung jeweils in X-, Y- und Z-Richtung (Abbildung 2.7 links) vorgeschlagen (vgl. [DIN90a, DIN90b, DIN90c]). Gemessen wird dabei die lastabhängige Verlagerung, meist nur in Belastungsrichtung. Jedoch ist auch die Neigungssteifigkeit von Bedeutung [DIN90a], die zweckmäßig durch die Messung der Verlagerung in allen 6 Fehlerfreiheitsgraden erfasst werden kann.

Die zu erwartenden Verlagerungen liegen bei Lasten von bis zu mehreren kN, in einer Größenordnung von wenigen $10 \mu m$ bis hin zu einigen $100 \mu m$. In [DT03] werden Größenordnungen der Steifigkeit von konventionellen Drehmaschinen mit ca. $200 N/\mu m$, von einer Fräsmaschine mit Kreuztisch mit $160 N/\mu m$ sowie in [WB06b] für eine konventionelle Fräsmaschine eine Anlagesteifigkeit von ca. $50 N/\mu m$ und ein Spiel von ca. $100 \mu m$ genannt.

2.3.3 Thermo-elastisches Verhalten

Das thermo-elastische Verhalten wird durch instationäre Änderungen des thermischen Zustandes und der daraus resultierenden thermo-elastischen Deformation der Maschinenkomponenten bestimmt [RMP00b]. Thermische Lasten sind beispielsweise Konvektion und Strahlung der Umgebung, interne Verlustleistungsquellen wie etwa Antriebe und Führungen sowie Prozesswärme oder auch der Kühlschmierstoff. Charakteristisch für das thermo-elastische Verhalten sind hohe Zeitkonstanten, d.h. ein zeitverzögertes Nacheilen der Deformation bis zu einem stationäreren Beharrungszustand.

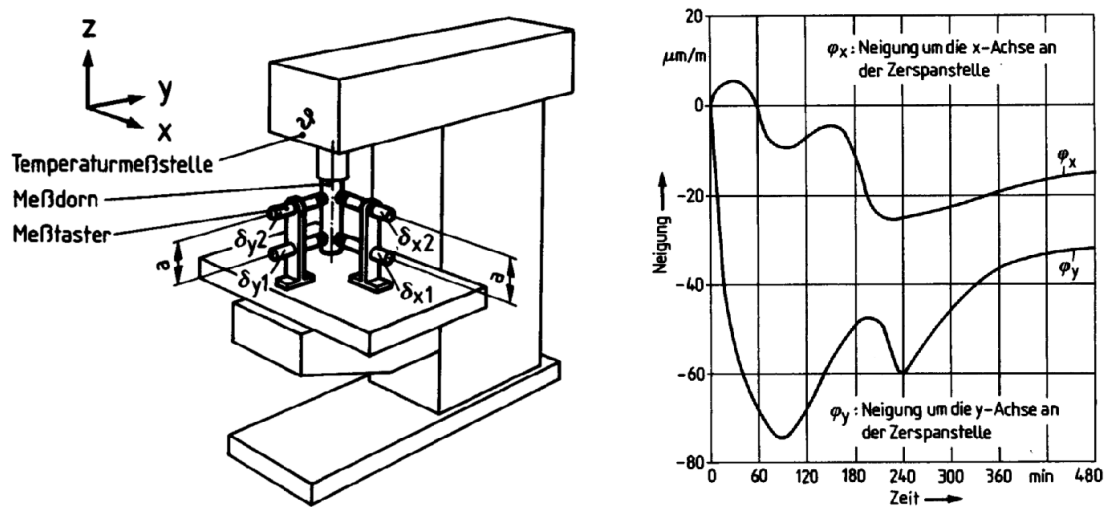


Abbildung 2.8: Methode zur Erfassung thermisch bedingter Neigungsfehler [DIN90b]

Der Anteil thermisch bedingter Fehler am Gesamtfehler bei kalibrierten WZM wird in [Gro12] mit 50...80 % bzw. in [Nes06] mit 25...75 % charakterisiert. Angaben zur Größenordnung der Verlagerung am TCP reichen von 25 μm [SP15] bei kleinen Maschinen bis zu 250 μm [TML⁺14] bei großen Fräsportalen. Aktuell befasst sich der Sonderforschungsbereich TR 96 [SFB15] mit der thermo-energetischen Gestaltung von WZM sowie das Schwerpunktprogramm 1180 [DFG15] mit dem thermo-elastischen Verhalten von Werkstücken.

Methoden zur Erfassung thermisch bedingter Verlagerungen am TCP mithilfe eines Messwinkels, Messtastern und eines Messdorns werden in [DIN90b, DIN07, WB06b] beschrieben (vgl. Abbildung 2.8). Eine alternative Methode mit dem R-Test ist in [MGM⁺14] vorgestellt. Weitere Methoden zur Parametrierung von Korrekturmodellen mit dem R-Test sind in [Vyr12, May09] sowie [Ess12, Geb14, MJU⁺12, Nes06] dargestellt. In [BWF14, BFW15] ist eine Methode zur Charakterisierung des thermo-elastischen Verhaltens mit einem Laser-Tracer sowie ein Korrekturmodell, basierend auf zeitlich veränderlichen Starrkörpern, beschrieben [BFW16].

2.4 Steuerungsintegrierte Korrektur

Da die Verhaltensbereiche prinzipbedingt voneinander unabhängig sind und stark unterschiedliche zeitliche Anforderungen an die Berechnung von Korrekturwerten stellen, ist die Verwendung separater Verhaltensmodelle zur steuerungsintegrierten Korrektur zweckmäßig. Eine Kopplung von elastischen und thermo-elastischen Modellen ist zwar prinzipiell möglich, jedoch aufgrund des stark unterschiedlichen zeitlichen Verhaltens der Lastgrößen problematisch. Der schematische Datenfluss zur steuerungsintegrierten Korrektur ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Eingangsgrößen sind dabei neben der Soll-Position aktuelle äußere und innere Lastgrößen, die gemessen (beispielsweise Umgebungstemperatur oder Prozesskräfte) oder berechnet (Massenträgheitskräfte) werden müssen.

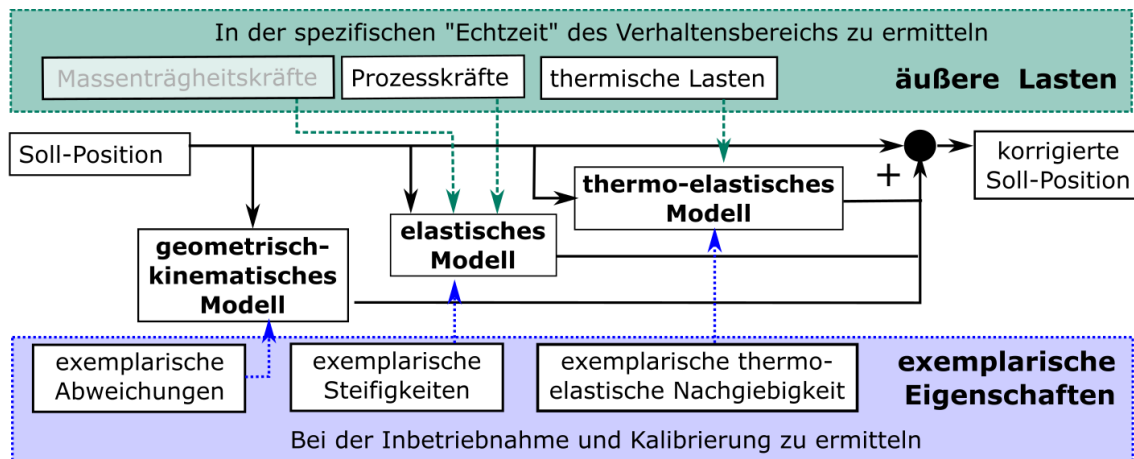


Abbildung 2.9: Datenfluss steuerungsintegrierter Korrekturen (vgl. [Kau06, Sza07])

Zur Parametrierung der Verhaltensmodelle ist die messtechnische Erfassung exemplarischer Eigenschaften, beispielsweise im Rahmen der Inbetriebnahme bzw. Maschinenkalibrierung, notwendig. Die geometrisch-kinematischen Eigenschaften werden bei der Maschinenkalibrierung in regelmäßigen Abständen erfasst. Die Eigenschaften sind in der Regel über einen längeren Zeitraum hinweg gültig, werden jedoch teilweise durch Verschleiß und extreme mechanische Belastungen (beispielsweise Kollision) beeinflusst.

Geometrisch-kinematische Korrekturmodelle sind in nahezu allen verfügbaren Steuerungen implementiert wie beispielsweise der Fa. Fanuc (3D Error Compensation [Kli10]), Heidenhain (KinematicsOpt [?]) oder Siemens (VCS [Sie09b]). Insgesamt ist ihr Funktionsumfang bei seriellen Kinematiken vergleichbar. Sie berechnen aus den exemplarisch erfassten Fehlern und der Anordnung der Einzelachsen ein räumliches interpolierbares Verlagerungsfeld für den gesamten Arbeitsraum, aus dem die positionsabhängigen Korrekturwer-

te bestimmt werden (Abbildung 2.9). Dagegen sind Modelle für parallele Kinematiken aufgrund ihrer geringeren Verbreitung in kommerziellen Steuerungen meist nicht vorhanden. Jedoch ist eine eigene Implementierung auf PC-basierten, offenen Steuerungen, beispielsweise der Fa. Beckhoff, prinzipiell möglich.

Elastische Korrekturmodelle werden derzeit nur bedingt in Maschinensteuerungen unterstützt. Lediglich einzelne Anteile, beispielsweise Durchhangkompensation bei Portalmaschinen oder die Gestellbiegung bei Fahrständermaschinen, sind verfügbar. Für Korrekturmodelle von Parallelkinematiken werden wiederum offene PC-basierte Steuerungen aufgrund der Zugänglichkeit des Steuerungskerns bevorzugt. Dabei werden meist Modelle mit reduzierten Eigenschaften (Knotenpunktmodelle, Abbildung 2.10 mittig) oder analytische Modelle verwendet. Die Basis dieser Modelle bildet die Erfassung der exemplarischen Nachgiebigkeit der Maschinenkomponenten. Die Modelle berechnen aus den aktuellen Beschleunigungen und Massen der Maschinenkomponenten sowie ggf. den gemessenen Prozesskräften den aktuellen Verformungszustand und damit die Korrekturwerte (Abbildung 2.10 oben mittig).

Digitale Blocksimulation

Betrachtung der Schnittreaktion:

- geringe Detaillierung
- geringe Parameteranzahl

Knotenpunktmodelle

Unterteilung in wenigen Knoten:

- mittlere Detaillierung
- mittlere Parameteranzahl

FE-Modelle

Feinmaschige Unterteilung:

- hohe Detaillierung
- hohe Parameteranzahl

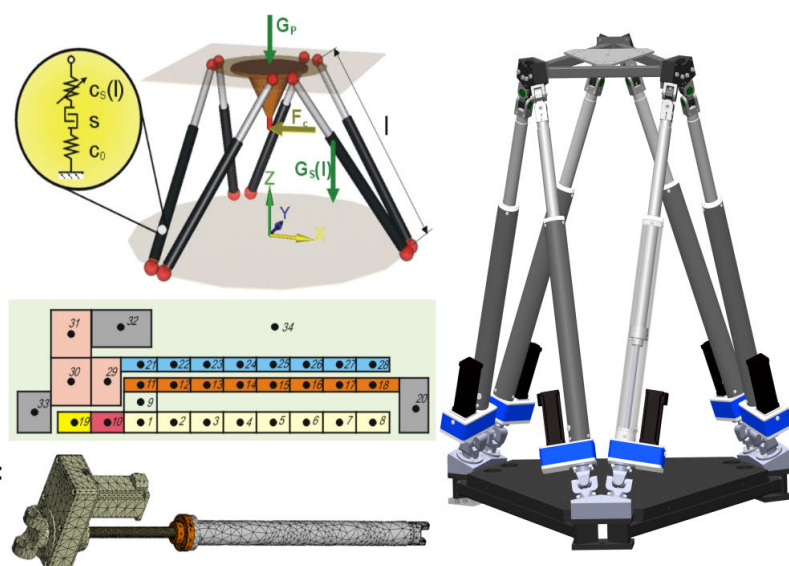


Abbildung 2.10: Elastisches Modell eines Hexapoden (oben) [Kau06] sowie thermoelastische Stabachsmodele als Knotenpunkt- [Kau06] und FE-Modell [ITN⁺16] (unten)

In kommerziellen Maschinensteuerungen sind derzeit nur stark vereinfachte thermoelastische Korrekturmodelle implementiert. Dies sind beispielsweise lineare Ausdehnungsmodelle von Vorschubachsen [Sie11]. Korrekturmodelle von Gestellbaugruppen unter den typischerweise komplexen thermischen Lastbedingungen sind in kommerziell erhältlichen Maschinensteuerungen derzeit nicht vorhanden. Zur Korrektur thermisch bedingter Ab-

weichungen existieren in der Forschung eine Vielzahl möglicher Ansätze, die jedoch nicht in kommerziell verfügbaren Steuerungen enthalten sind, sondern anwender- und maschinenspezifisch entwickelt und implementiert werden müssen. Gegenstand der Forschung sind unter anderem Korrekturmodelle auf Basis von Kennfeldern, Modelle mit konzentrierten Eigenschaften oder FE-Modelle (Abbildung 2.10 unten).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf kommerziellen Maschinensteuerungen nur geometrisch-kinematische Korrekturen in einem ausreichenden Umfang implementiert sind. Elastische und thermo-elastische Korrekturmodelle sind derzeit kaum verbreitet und nur auf offenen PC-basierten Steuerungen vollständig implementierbar. Aktuelle Entwicklungen, wie beispielsweise im Rahmen von Industrie 4.0, fördern jedoch mindestens die Entwicklung von Schnittstellen, die eine Verbesserung der Zugänglichkeit von Maschinensteuerungen erlauben.

2.5 Methoden zur Erfassung von Abweichungen

Aus Eigenschaften der Verhaltensbereiche können Szenarien zur Erfassung des aktuellen Maschinenzustandes abgeleitet werden (Tabelle 2.1). Szenario 1 dient der schnellen und effizienten Charakterisierung des Maschinenzustandes. Das Ziel ist, Fehler und Verlagerungen zu detektieren, nicht zu analysieren oder zu beheben. Typische Messmittel sind dabei Double-Ball-Bar oder Quickset. Dabei wird nur ein kleiner Teil des Arbeitsraumes überprüft. Eine Unterscheidung der Fehlerursachen hinsichtlich des Verhaltensbereiches erfolgt in der Regel nicht, wäre jedoch möglich.

Tabelle 2.1: Messszenarien und deren Anforderungen

Zielstellung	typ. Messvolumen	benötigte Freiheitsgrade	maximale Fehlerspanne	benötigte Auflösung
1 TCP-Verlagerung Charakterisierung	dm ³	1 – 6	500 µm bzw. 50 µm/m	1 µm bzw. 1 µm/m
2 TCP-Verlagerung Kalibrierung	m ³	6	500 µm bzw. 50 µm/m	
3 Bauteilanalyse Deformationsmessung	m ³	3	100 µm	
4 Koppelstellen Verlagerungsmessung	dm ³	6	100 µm bzw. 50 µm/m	

Beim Szenario 2, der Kalibrierung durch eine positionsabhängige Erfassung der Verlagerung am TCP im gesamten Arbeitsraum, werden die Auswirkungen geometrischer Fehler

sowie elastischer und thermo-elastischer Verlagerungen direkt an der Wirkstelle erfasst. Die Messmethoden orientieren sich dabei an dem kinematischen Aufbau der Maschine und versuchen, die Fehler der Einzelachsen und ihrer Anordnung im Raum separat zu erfassen. Die Messungen sind in der Regel mit einem hohen Zeitbedarf und einer hohen Qualifikation des Bedieners verbunden. Die Szenarien 3 und 4 dienen zur Parametrierung von Korrekturmodellen oder auch zur Überprüfung von erwarteten bzw. vorgegebenen Kenngrößen der WZM. Dabei kann die globale Deformation ganzer Bauteile und Baugruppen unter mechanischer oder thermischer Last erfasst werden (Szenario 3) oder lokal die Verlagerung an Koppelstellen bzw. auch am TCP.

Die Größenordnung der Fehlerspannen ist mit $500\ \mu\text{m}$ bzw. $50\ \mu\text{m}/\text{m}$ bei allen Szenarien gleich, jedoch unterscheiden sich Anzahl der Messstellen, Messvolumen und Freiheitsgrade (De-gres of Freedom, DoF) deutlich (Tabelle 2.1). Dabei fordern Szenario 2 und 4 eine vollständige Posemessung, Szenario 2 und 3 eine Messung in einem großen Messvolumen. Weiterhin erfordert Szenario 3 eine simultane Verlagerungsmessung an einer großen Messstellenanzahl. Jedoch sind die gewünschten Messauflösungen von $1\ \mu\text{m}$ bzw. $1\ \mu\text{m}/\text{m}$ bezogen auf das Messvolumen aller vier Szenarien hoch.

2.6 Typische Messmittel an WZM

Zur Ermittlung von Fehlern an WZM sind Richtlinien zur Ermittlung und Trennung zufälliger und systematischer Fehler vorhanden, die sich stark an der Verfügbarkeit von Messmitteln orientieren. Da die Normung in der Regel der technischen Entwicklung nacheilt, ist eine Betrachtung der verfügbaren Messmittel zweckmäßig. Kriterien zur Charakterisierung der Eigenschaften sind erreichbare Messgenauigkeit, gleichzeitig erfassbare Fehlerfreiheitsgrade, Messvolumen sowie benötigte Messdauer und Kosten.

2.6.1 Messtaster und Maßverkörperung

Schaltende Messtaster (Abbildung 2.11, oben links) gehören zur Standardausrüstung an WZM. Messende Taster besitzen zwar eine höhere Genauigkeit, werden jedoch aufgrund ihrer deutlich höheren Anschaffungskosten meist nur an Koordinatenmessmaschinen eingesetzt [WEPM04]. Sie werden zum Referenzieren von Werkstücken, zur Maßprüfung von Werkstücken sowie zum Prüfen und Nachführen von Verlagerungen (QuickSet [DMG14a]) eingesetzt. Dazu wird eine Messkugel aus einer Vielzahl von Richtungen angetastet und

die Position über die Wegmesssysteme der Maschine bestimmt. Da die Antastunsicherheit der Messtaster mit ca. $1\ \mu\text{m}$ sehr gering ist (Tabelle 2.2), wird die erreichbare Messgenauigkeit durch die Messsysteme der Maschine begrenzt. Auch Kosten und Messdauer werden durch die Größe und Anzahl der Messstellen der Normale bestimmt.

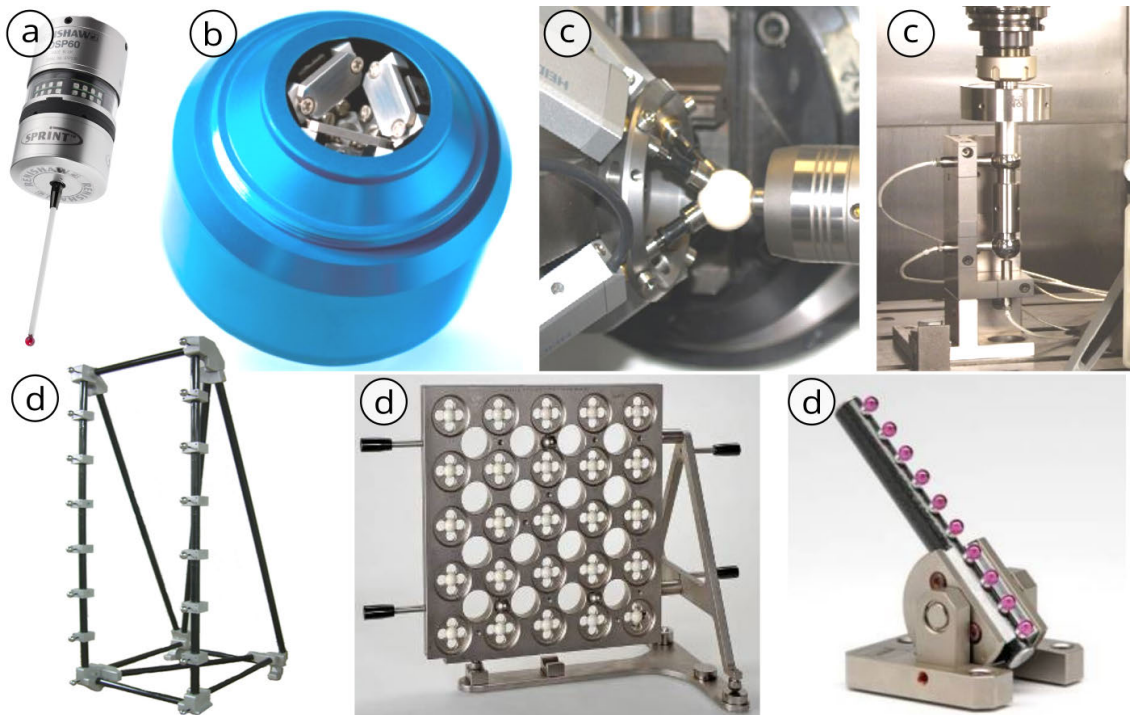


Abbildung 2.11: Schaltender Messtaster (a [Dr.05]), R-Test (b [IBS13]) und Spindel-Prüfvorrichtung (c [API15, IBS13]) sowie unten linien- und flächenhafte Anordnungen von Kugelnormalen (d [BK09, GAOC13, WM14])

Zur räumlichen Erfassung von Verlagerungen werden Wegsensoren in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen eingesetzt (Abbildung 2.11, oben mittig und rechts). Beispiele dafür sind der R-Test bzw. Cap-Ball [ZM09]. Beide bestehen aus drei jeweils im rechten Winkel zueinander angeordneten Wegmesssystemen und können die Verlagerung des Messkopfes relativ zur Messkugel in drei Freiheitsgraden gleichzeitig erfassen, wodurch die Messunsicherheit und die Messdauer gesenkt werden. Eine weitere Bauform ist der Spindel-Analyser zur Bestimmung von Fehlern an Dreh- und Schwenkachsen in 5 Freiheitsgraden (Abbildung 2.11 oben rechts, vgl. [DIN07, DIN14]).

Angetastet werden meist kalibrierte Normale in Form von Kugeln, Kugelleisten oder Kugelplatten (Abbildung 2.11 unten, vgl. [BK05, DIN99, LBK09]). Da die Genauigkeit der Wegsensoren unter $1\ \mu\text{m}$ (Tabelle 2.3) liegen, wird vor allem bei der Verwendung von größeren Normalen die erreichbare Messgenauigkeit durch die Kalibriergröße der Normale bestimmt [WB06b].

Tabelle 2.2: Freiheitsgrade und Messunsicherheit schaltender Messtaster

Hersteller	Modell	Freiheitsgrade	Antastunsicherheit
Renishaw [Ren14a]	RMP60	1	$\pm 1.00 \mu m$
	MP250	1	$\pm 0.25 \mu m$
Heidenhain [Dr.05]	TS440	1	$\pm 2.00 \mu m$
IBS [IBS13]	R-Test	3	$\leq 0.60 \mu m$

Der R-Test wird weiterhin zur geometrisch-kinematischen Kalibrierung von Robotern [Bey06, Bey04, WL01, BW02] und kleinen WZM [BK09, Bri07, BW06, FS12, HIM11, HIO12, Wei04] eingesetzt. Weiterhin eignen sich Spindel-Analyser und R-Test [GSKW13, GEW⁺13, GMF⁺14, GSC⁺13, GSW⁺14] zur Erfassung thermisch bedingter Verlagerungen an WZM. Der Informationsgehalt einer Messung mit einem schaltenden Messtaster an einer Kugel ist zu gering, um eine Maschine kalibrieren zu können, jedoch ausreichend, um den Kalibrierzustand nachzuführen [DMG14a].

Tabelle 2.3: Messbereich und Messunsicherheit von Feinzeigern

Hersteller	Modell	Messbereich [mm]	Unsicherheit [μm], Messwert L [mm]
Tesa	GT21HP [TES17a]	2	$0.7 + 0.4 \cdot L$
	GT21 [TES17b]	10	$1 + 4 \cdot L(0.6 + 0.8 \cdot L)$
HBM	WI [HBM17]	2	$\pm 0,2$

2.6.2 Double-Ball-Bar (DBB)

Der Double-Ball-Bar (Abbildung 2.12) ist ein Standardgerät zur Prüfung von Verlagerungen am TCP [DIN01b]. Mit dem DBB wird die Radiusänderung der gefahrenen Kreisbahn gemessen. Der eigentliche Messbereich ist dabei unabhängig von dem gewählten Messradius auf max. 10 mm begrenzt (Tabelle 2.4). Zu den Vorteilen des DBB gehören die hohe Robustheit, schnelle Datenaufnahme, geringe Anschaffungskosten und die hohe Messgenauigkeit.

Tabelle 2.4: Messbereich und Genauigkeit typischer DBB

Hersteller	Modell	Messbereich [mm]	Genauigkeit [μm]
Renishaw [Ren14b]	QC 10/20	2	$1.5 (l = 300mm)$
Heidenhain [Dr.14]	DBB_110	10	1.0
API [API15]	BallBar	4	0.5

Begrenzend sind der prinzipbedingt halbkugelförmige Messbereich sowie die limitierte Gesamtlänge. Durch den eher geringen erreichbaren Informationsgehalt in der Messung eignet sich der DBB vor allem zur Kontrolle des Maschinenzustandes. Rückschlüsse auf Fehlerursachen sind nur möglich, wenn entsprechende Fehlermodelle und maschinenspezifisch optimierte Messbahnen vorhanden sind [Kau06, Sza07].

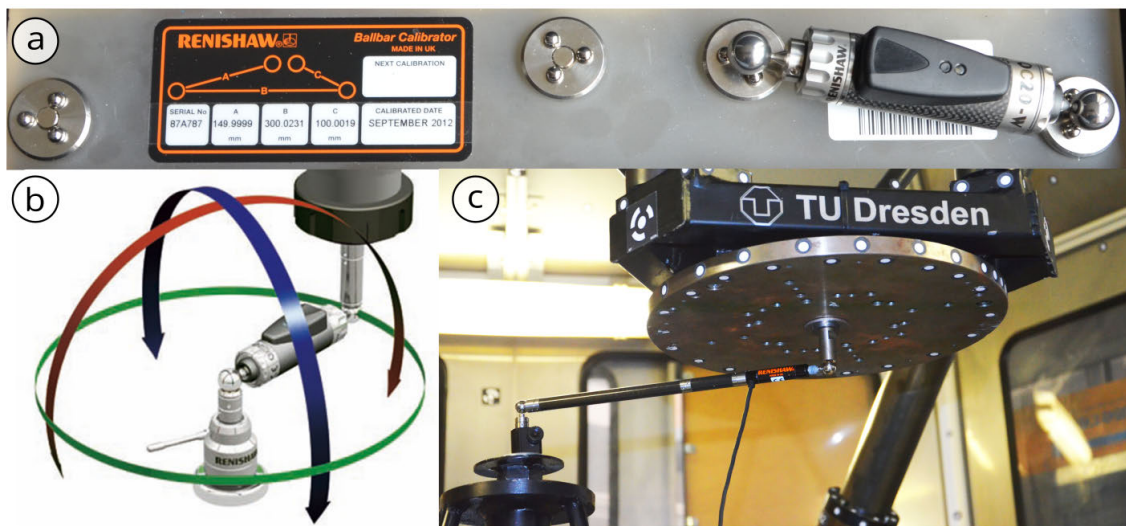


Abbildung 2.12: (a) Double-Ball-Bar [Ren14b], (b) Messbahnen zur Kreisformprüfung nach DIN 230-4 [DIN01b] sowie (c) Kreisformprüfung am Hexapod

2.6.3 Kreuzgittermessgerät (KGM)

Bei diesem Messgerät handelt es sich um einen zweidimensionalen optischen Maßstab, der mit einem Lesekopf abgetastet wird (Abbildung 2.13). Das Kreuzgittermessgerät wird nur von der Fa. Heidenhain hergestellt und in zwei Größen mit einer Genauigkeit von $2\ \mu\text{m}$ vertrieben (Tabelle 2.5).

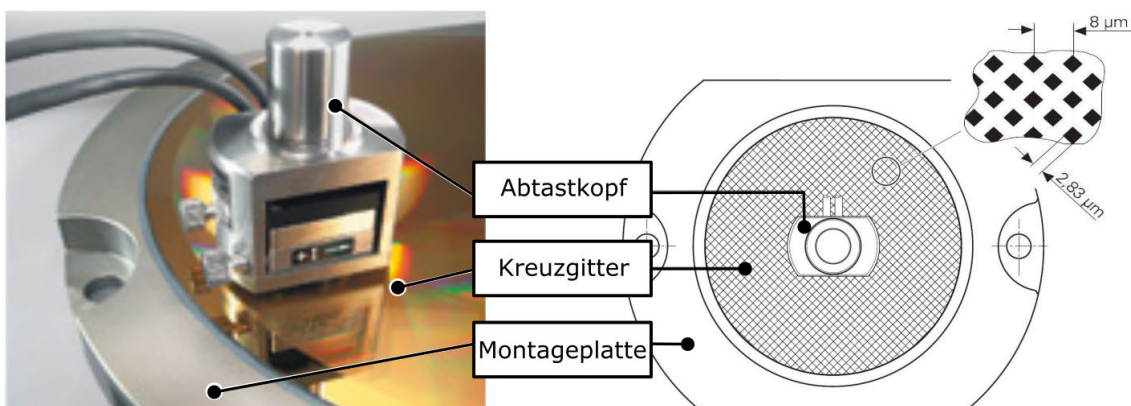


Abbildung 2.13: Aufbau und Bestandteile des Kreuzgittermessgeräts [Dr.14]

Vorteile sind, wie auch beim DBB, eine schnelle Datenaufnahme und hohe Messgenauigkeit auf beliebigen ebenen Bahnen. Als problematisch stellt sich vor allem der ebenen, örtlich begrenzte Messbereich heraus, der nur eine geringe Abdeckung des Arbeitsraumes der WZM ermöglicht. Das Messgerät eignet sich sehr gut zur schnellen, einfachen Prüfung der Maschinengenauigkeit in einem begrenzten Messbereich.

Tabelle 2.5: Messbereich und -genauigkeit des Kreuzgittermessgerätes

Hersteller	Modell	Messbereich [mm]	Genauigkeit [μm]
Heidenhain [Dr.14]	KMG 181	$\varnothing 140$	± 2
	KMG 182	$\varnothing 230$	± 2

2.6.4 Laserinterferometer

Laserinterferometer können aufgrund ihrer hohen Messgenauigkeit (Tabelle 2.6) und der gleichzeitigen Erfassung von bis zu 6 Freiheitsgraden als Standardgerät zur Erfassung von Abweichungen an translatorischen Vorschubachsen bezeichnet werden (Abbildung 2.14). Damit sind sie sehr gut zur Kalibrierung von großen 3-Achs-WZM geeignet, erfordern jedoch zur Messung von Rechtwinkligkeitsfehlern einen enormen Einrichtungsaufwand.

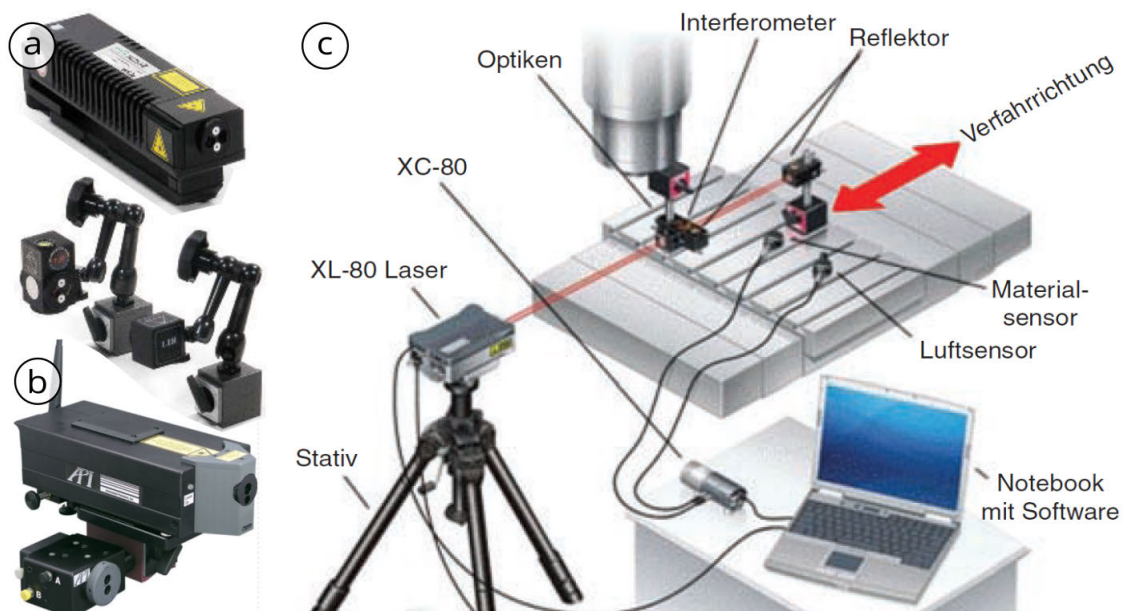


Abbildung 2.14: (a) konventionelles Interferometer [Sta12], (b) mit 5D-Reflektor [API15] sowie (c) Bestandteile eines typischen Messaufbaus [Ren14b]

Da Interferometer relativ messende Systeme sind, kommt es zum Strahlabbruch und zum Verlust des Maßbezuges. Dies führt in der Praxis zu einem nicht unerheblichen Aufbau-

und Einrichtungsaufwand. Eine Sonderform ist das Etalon-Multiline-System [ETA12a]. Dabei handelt es sich um ein absolut messendes Mehrkanal-Laserinterferometer, mit dem bis zu 100 Messstrecken gleichzeitig erfasst werden können. Damit ist es vor allem zur hochgenauen Deformationsmessung großer Strukturen [Lé17] sowie zur Kalibrierung geometrisch-kinematischer Verlagerungen an WZM geeignet [ETA18].

Tabelle 2.6: Messbereich und -genauigkeit von Laserinterferometern

Hersteller	Messbereich [m]		Genauigkeit [μm] Messwert M [m]
API XD-Laser [API12c, API15]	Position	40	$0.5\mu\text{m} + 0.1 * M * \mu\text{m}/\text{m}$
	Geradheit	25	$0.5\mu\text{m} + 0.1 * M * \mu\text{m}/\text{m}$
	Kippwinkel	24	$0.5'' + 0.05 * M * \mu\text{m}/\text{m}$
	Rollwinkel	24	$0.5''$
Renishaw ML10 [Ren16, Ren14a]	Position	80	$0.5\mu\text{m} * M * \mu\text{m}/\text{m}$
	Geradheit	4	$\pm 0.5\mu\text{m} + 0.15 * M^2 * \mu\text{m}/\text{m}$
		30	$\pm 5.0\mu\text{m} + 0.015 * M^2 * \mu\text{m}/\text{m}$
Kippwinkel	15	$\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m} + 0.1 * M^2 * \mu\text{m}/\text{m}$	
SatusPro [Sta12]	Position	30	$0.5 * M * \mu\text{m}/\text{m}$
Etalon[Lé17]	Position	30	$0.25 * M * \mu\text{m}/\text{m}$

In [BSRQ14] wird für eine hochgenaue WZM ein Ansatz eines mit der Spindel mitgeführten 1D-Interferometers vorgestellt. Dies minimiert den manuellen Aufwand und bietet die Möglichkeit zur Automatisierung. Jedoch ist diese Methode derzeit noch nicht in der Lage, vollständige geometrisch-kinematische Korrekturtabellen zu erzeugen, eine Nachführung des Maschinenzustandes ist jedoch möglich.

2.6.5 Laser-Tracer

Um auf Basis von Laserinterferometern die Verlagerung des TCP im gesamten Arbeitsraum erfassen zu können, wurden Laser-Tracer und Tracking-Interferometer entwickelt [ITY⁺11, IST14, IKY⁺15]. Die Besonderheit beim Laser-Tracer ist die Streckenmessung zwischen einer hochgenau gefertigten Referenzkugel und dem am TCP befestigten Reflektor (Abbildung 2.15), was eine hochgenaue Streckenmessung ermöglicht (Tabelle 2.7).

Zur Erfassung von 3D-Koordinaten kann eine gemeinsame Messung von vier Basisgeräten verwendet werden [HKK⁺04, HFKW11]. Vorteile des Laser-Tracers sind die hochgenaue Streckenmessung, eine schnelle Messwerterfassung, das große Messvolumen sowie die Möglichkeit, mit mehreren Geräten auch 3D-Koordinaten ermitteln zu können. Problema-

tisch sind Strahlunterbrechungen sowie hohe bzw. bei Multi-Trace sehr hohe Kosten. Der Laser-Tracer bietet über eine optional erhältliche Software (Trace-Cal) die Möglichkeit, geometrisch-kinematische Korrekturen für Standard-Kinematiken zu erstellen. Dabei werden vom Hersteller optimierte Messzyklen verwendet, um die Identifikation aller Fehlerparameter sicherstellen zu können.

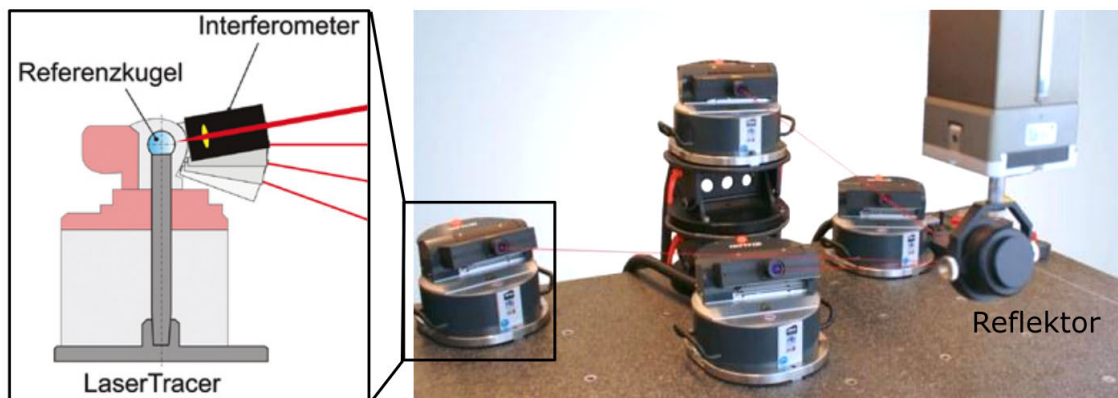


Abbildung 2.15: Laser-Tracer und Multi-Trace [Fra12]

In [LCJS⁺14, SJS09, SW11, SFH05, WFH12] sind Untersuchungen zum Aufbau und zur Messung an WZM mit Laser-Tracern beschrieben. Die Schwerpunkte dieser Veröffentlichungen liegen dabei neben Aufbau und Funktionsweise vor allem auf dem Kalibrierpotenzial für serielle 3-Achs-Maschinen und Koordinatenmessmaschinen. In [SSJW09, Jat11, WGZX12] werden Vorgehensweisen zur Kalibrierung von Dreh-Schwenk-Achsen vorgestellt. Ein Vergleich von Messungen mittels Laser-Tracer und R-Test ist in [MGHW09] beschrieben. Messungen thermisch bedingter Abweichungen sind in [IBS⁺16] veröffentlicht. Die Veröffentlichungslage zeigt sehr gute Ergebnisse zur geometrisch-kinematischen Kalibrierung an Standard-Kinematiken, Messungen an Sonder-Kinematiken, wie beispielsweise von Hexapoden, sind nicht bekannt.

Tabelle 2.7: Schwenk- und Messbereich sowie Genauigkeit von Laser-Tracern

Modell	Schwenkbereich [°]		Messbereich [m]	Genauigkeit [µm]
	vert.	horiz.		
Tracer [ETA12b]	-20... + 85	±200	0.2...15.0	±0.2 + 0.3 $\frac{\mu\text{m}}{m}$
Tracer MT [ETA12c]	-10... + 85	±360	0.3...1.0	±1

2.6.6 Laser-Tracker

Im Unterschied zum Laser-Tracer wird der Laserstrahl bei Laser-Trackern (Abbildung 2.16) mithilfe zweier motorisch angetriebener Spiegel bzw. zwei kardanischer Achsen aktiv nach-

geführt und deren Positionssignal zur Berechnung der 3D-Koordinaten verwendet. Die Entfernungsmessung erfolgt mittels absolute distance measurement (ADM) bzw. interferometrisch. Dies führt jedoch zu einem geringeren Genauigkeitsniveau gegenüber dem Laser-Tracer (Tabelle 2.8). Mit zusätzlichen „aktive Targets“ bzw. mit einer zusätzlichen Kamera am Laser-Tracker können 5 bzw. 6 DoF eines erweiterten Reflektors erfasst werden (vgl. Abbildung 2.16 sowie Tabelle 2.9).

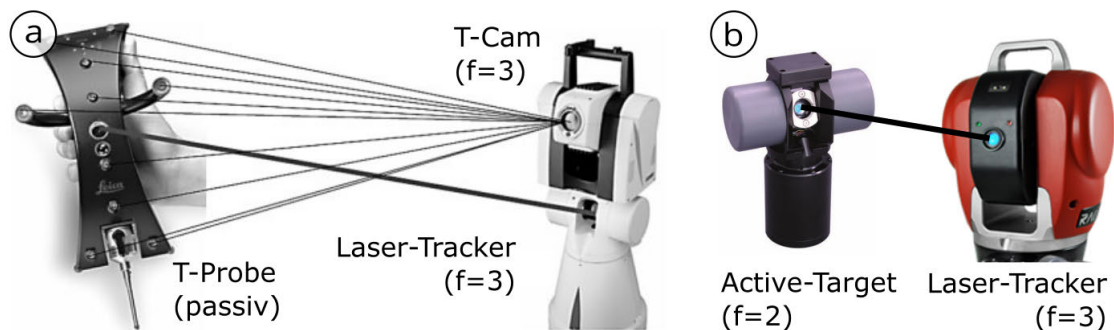


Abbildung 2.16: 6 bzw. 5DoF-Lasertracker: (a) Fa. Leica LTD800 [MWFH07, Lei10b] sowie (b) Fa. API Radian mit Active Target [API12d, API15]

Vorteile sind die hochgenaue Entfernungsmessung in einem sehr großen Entfernungsbereich, eine schnelle Messwerterfassung und Auswertung sowie die standardmäßige Erfassung von 3D-Koordinaten mit der Möglichkeit, auch vollständige Posen messen zu können. Problematisch sind die zur Kalibrierung von WZM nur bedingt ausreichende Messgenauigkeit, Probleme bei Strahlunterbrechung sowie sehr hohe Anschaffungskosten.

Tabelle 2.8: Schwenk- und Messbereich sowie Genauigkeit von Laser-Trackern

Modell	Schwenkbereich		Messbereich [m]	Genauigkeit ADM
	vert. [°]	horz. [°]		
API Omnitrac 2 [API12a]	-59...79	±320	200	< 25 μm
API Radian [API12b]	-59...79	±320	180	> 10 μm
Leica AT401 [Lei10a]	±145	±360	320	15 μm + 6.0 $\mu\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$
Faro Vantage [FAR12]	-52...78	±360	80	16 μm + 0.8 $\mu\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$

Untersuchungen zur Kalibrierung von WZM mit Laser-Trackern sind in [ASSA12b, ASSA13a, ASSA12a, ASSA13b, ASSA14] sowie in [JHSF08, LH05] oder [ZH13] beschrieben. Messungen an Koordinatenmessmaschinen sind in [SHWW01, WSW⁺01] vorgestellt. Untersuchungen zur Genauigkeit von Laser-Trackern sind in [ASSA14] sowie von Leica-6DoF in [KLC⁺04] vorgestellt. In [BPT06] werden ein API-XD-Laser und ein API Smart-Track zur Parameteridentifikation für Korrekturmodelle verwendet.

Tabelle 2.9: Messbereich und Genauigkeit von 5 bzw. 6DoF-Laser-Trackern

Hersteller	Lage		Winkel	
	Messbereich	Genauigkeit [μm]	Messbereich [$^\circ$] Roll, Gier, Nick	Genauigkeit [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Leica AT901 [Lei06]	18m	$\pm 15 + 0.8 \mu\text{m}/\text{m}$	360, ± 45 , ± 45	± 180
API Smart-Trac[API06]	40m	± 25	± 55 , ± 55 , ± 30	± 15

2.6.7 Weitere Messmittel

In der Literatur sind weitere Messmittel beschrieben (vgl. [Mau12]), von denen der erweiterte DBB, Mikro-GPS und iGPS ein Potenzial zur Erfassung des genauigkeitsbestimmenden Verhaltens an WZM besitzen.

Bei dem erweiterten DBB (vgl. [HS15, HSS12, IM09, IIM04]) handelt es sich um einen DBB, bei dem zusätzlich jeweils die Schwenkwinkel der beiden gelenkigen Anbindungen erfasst werden. Dadurch können zusätzlich die Winkelinformationen zur Bestimmung der Pose des TCP gegenüber der Aufspannung verwendet werden. Jedoch handelt es sich um Forschungsobjekte, die derzeit kommerziell nicht verfügbar sind.

Das Mikro-GPS basiert auf einem Weißlichtinterferometer mit stark aufgeweiteten Lichtkegel. Damit können die Abstände dreier Reflektoren gleichzeitig erfasst und daraus die 3D-Koordinaten des Reflektorträgers im Raum bestimmt werden [Plu02, Sch13, SSZ13, Sch07]. Ein Vorteil dieses Messverfahrens ist die geringe Messunsicherheit von $< 5 \mu\text{m}$. Dem entgegen steht eine geringe Messrate, ein prinzipbedingt eingeschränkter und nicht erweiterbarer Messraum von ca. 500 mm x 500 mm x 500 mm bei hohen Kosten von ca. 60'000 €. Kommerziell ist dieses Messsystem zwar erhältlich, wird jedoch kaum eingesetzt.

Von der Fa. Nikon wurde ein Indoor-GPS (iGPS) entwickelt, dessen Funktionsprinzip und Leistungsparameter jedoch den Anforderungen zur Maschinenkalibrierung nicht genügen [GKB⁺15, NSGS13]. Experimentelle Untersuchungen hierfür sind in [EPD12, NSGS13, SSD10, SKQ⁺16] veröffentlicht.

2.7 Defizite

In Tabelle 2.10 sind die Eigenschaften typischer Messsysteme zur Charakterisierung der Genauigkeit und zur Kalibrierung von WZM gegenübergestellt [IK12, PMH⁺09, WWM16]. Messtaster, R-Test, DBB und Kreuzgittermessgerät eignen sich zur Charakterisierung von

WZM. Aufgrund der geringen Abdeckung des Arbeitsraumes ist ihre Aussagefähigkeit jedoch begrenzt. Laser-Tracker werden aufgrund ihrer begrenzten Messgenauigkeit nur in Ausnahmefällen zur Maschinenkalibrierung eingesetzt. Interferometer eignen sich gut zur Charakterisierung und Kalibrierung von translatorischen Vorschubachsen, jedoch nur bedingt für rotatorische Achsen. Zur Charakterisierung und Kalibrierung translatorischer und rotatorischer Achsen von 5-Achs-Kinematiken bietet sich der Laser-Tracer an.

Tabelle 2.10: Eigenschaften konventioneller Messmittel (++, +, o, -, -)

	Messraum	DoF	Unsicherheit	Messdauer	Kosten
Messtaster	punktuell	1	+	-	+ bis -
R-Test	punktuell	3	+	-	-
DBB	halbkugelförmig	1	++	o	++
KGM	flächig	2	++	-	-
Interferometer	linienförmig	1 – 6	++	+	-
Laser-Tracer	räumlich	1 – 3	++	++	-
Laser-Tracker	räumlich	3 – 6	-	++	—

Die Eignung der Messsysteme zur Erfassung der genauigkeitsbestimmenden Verhaltensbereiche ist in Tabelle 2.11 gegenübergestellt. Ein relativ simpler Ansatz ist die punktuelle Erfassung und teilautomatisierte Nachführung des Verlagerungszustandes mit dem Quickset. Dafür sind vorgefertigte Messzyklen und eine einfache Korrekturfunktion in der Maschinensteuerung hinterlegt. Der Laser-Tracer kann durch eine sequenzielle Streckenmessung und kinematikspezifische optimierte Messbahnen alle Parameter geometrisch-kinematischer Korrekturmodelle bestimmen.

Die Vorteile des Laser-Tracers liegen neben der hohen Messgenauigkeit und dem großen Messvolumen vor allem in der Optimierung der Messbahnen für verbreitete Maschinentypen zur Bestimmung der Parameter von allgemeinen steuerungsintegrierten geometrisch-kinematischen Korrekturmodellen. Aufgrund der zunehmenden Verbreitung teils sehr spezifischer, steuerungsintegrierter elastischer und thermo-elastischer Korrekturmodelle (Abbildung 2.10) wächst auch der Bedarf zur Bestimmung der modell- und maschinenspezifischen Korrekturparameter. Die Ermittlung dieser spezifischen Korrekturparameter kann jedoch nur mit einer messsystemspezifischen Messanordnung und Messbahn erfolgen. Derzeit fehlen aber Methoden, um diese maschinen- und messsystemspezifisch zu modellieren und zu optimieren.

Tabelle 2.11: Eignung zur Erfassung des genauigkeitsbestimmenden Maschinenzustandes (+, o, -, *punktuell)

	geometrisch-kinematisch	elastisch	thermo-elastisch
Messtaster	-	+	(+)*
R-Test	-	+	(+)*
DBB	-	-	-
KGM	-	-	-
Interferometer	o	-	-
Laser-Tracer	+	-	-
Laser-Tracker	-	-	-

Zur Zeit werden für bestimmte Messaufgaben erfolgreiche Messmethoden und Messsysteme zugeordnet und in der Normung beschrieben. Durch die zunehmende Digitalisierung und den zunehmenden Einsatz des digitalen Zwillings werden Modelle, Methoden und Schnittstellen benötigt, um die Verbindung zwischen Messsystem, Maschine und Maschinensteuerung sowie Korrekturmodellen zu verbessern. Als ein erstes Beispiel zur erfolgreichen Verbindung kann die geometrisch-kinematische Maschinenkalibrierung mit Laser-Tracern angeführt werden. Parameter für benutzerspezifische Korrekturen, beispielsweise thermo-elastische Modelle, sind jedoch damit noch nicht bestimmbar.

Kapitel 3

Photogrammetrische Methoden

In [Luh10c] wird „Photogrammetrie“ wie folgt definiert: „**Unter Photogrammetrie versteht man allgemein Methoden, aus einem oder mehreren Bildern eines beliebigen Objektes indirekt dessen Form und Lage durch Bildmessungen sowie dessen inhaltliche Beschreibung durch Bildinterpretation zu gewinnen**“. Dies lässt sich als Objektrekonstruktion beschreiben (Abbildung 3.1), bei der, ausgehend von einem 3D-Objekt, mit einem bildgebenden Verfahren Abbildungen angefertigt und ausgewertet werden, um daraus ein digitales geometrisches Modell zu rekonstruieren (vgl. [Atk96, HZ08, Kra96, Kra04, Kra07, LRKB14, McG05, Rü87]).

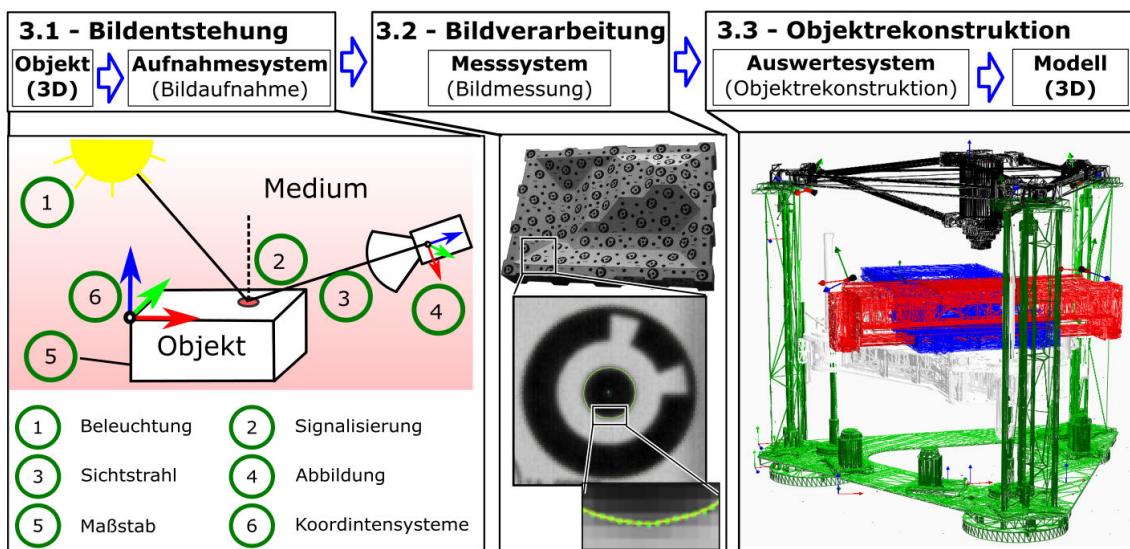


Abbildung 3.1: Schritte des photogrammetrischen Prozesses: von Bildentstehung (vgl. [Luh10c, Luh10a]) über Bildmessung zur Objektrekonstruktion

Ausgangspunkt sind die Bildentstehung sowie die 2D- bzw. 3D-Abbildungen, aus denen möglichst automatisiert Merkmale durch Bildverarbeitung für die 3D-Objektrekonstruktion extrahiert werden. Die Rekonstruktion erfolgt modellbasiert und ermöglicht statistische Aussagen über die Rekonstruktionsgüte. Für eine möglichst gute Rekonstruktion ist eine gute Abstimmung aller Schritte (Abbildung 3.1) entscheidend. D.h., wenn Merkmale im Bild beispielsweise aufgrund von schlechter Beleuchtung oder Verdeckungen nicht identifizierbar sind, können sie nicht rekonstruiert werden. Ebenso können gefundene Merkmale, für die es im Modell keine Entsprechung gibt, nicht berücksichtigt werden.

3.1 Bildentstehung

Für die Bildentstehung (Abbildung 3.1 links) sind Beleuchtung, Reflexionsverhältnisse der Objektoberfläche, Strahlausbreitung sowie Bildaufnahme auf den Sensor relevant.

3.1.1 Beleuchtung und Textur

Meist wird mit einer zusätzlichen, auf die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Sensoren abgestimmten, Beleuchtung gearbeitet. Typische Kamerasensoren sind, begrenzt durch einen Infrarotfilter (IR-Filter), im Bereich des sichtbaren Lichts (400...700 nm) empfindlich. Infrarotkameras arbeiten meist im Bereich von 1.4...15 μm (Abbildung 3.2). Das Ziel ist dabei eine gleichmäßige und möglichst helle Ausleuchtung der Szene, wodurch ein ausreichend hohes Maß an Strahlung auf den Sensor trifft, um im Bild einen guten Kontrast zu erzeugen.

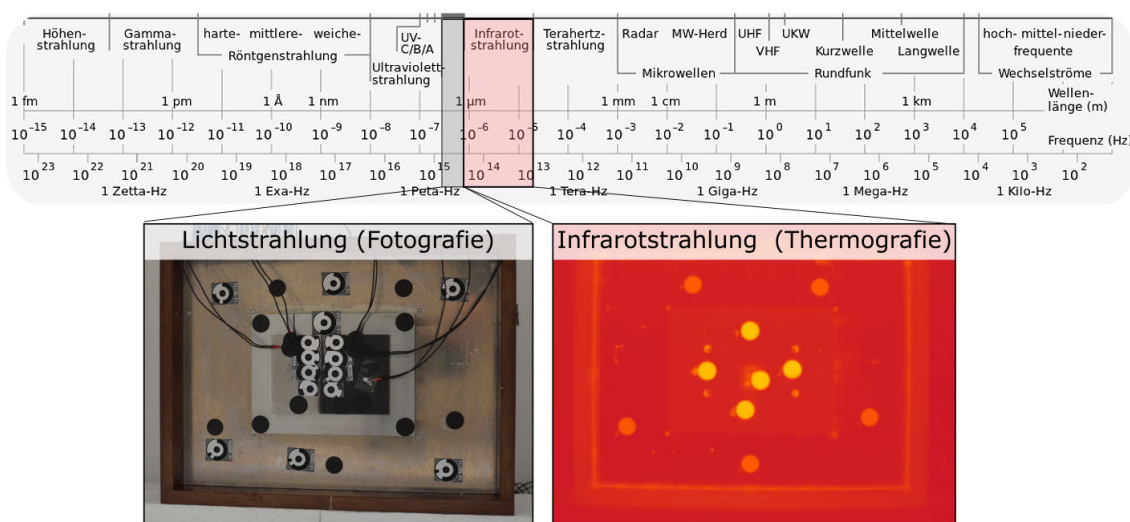


Abbildung 3.2: Oben Einordnung des sichtbaren Lichts in das elektromagnetische Spektrum [Wik14] sowie Abbildungen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen

Die auf den Sensor auftreffende Strahlung setzt sich aus Emission, Reflexion und Transmission des beobachteten Objektes zusammen (Abbildung 3.3 links). Bei der Aufnahme eines Objektes im sichtbaren Wellenlängenbereich wird meist die Reflexion von Umgebungslicht bzw. von Blitzlicht zur Beleuchtung des Objektes verwendet, weshalb Emission und Transmission vernachlässigbar sind. Bei der Messung im infraroten Wellenlängenbereich ist das Ziel meistens die vom Körper emittierte Strahlung zur Bestimmung der Objekttemperatur zu erfassen und die Reflexion der Umgebung sowie die Transmission zu unterbinden.

Die eintreffende Strahlung wird an der Objektoberfläche teils diffus und teils gerichtet reflektiert (Abbildung 3.3 rechts). Dies wird durch die Oberflächeneigenschaften der Materialien bestimmt und wird durch die bidirektionale Reflexionsverteilung (BRDF) charakterisiert [Jä12]. Diese beschreibt das Reflexionsverhalten (L) eines Materials, beispielsweise bedrucktes Papier, in Abhängigkeit des Beobachtungswinkels (γ). Die Material- und Winkel-

abhängigkeit der Reflexion kann unter bestimmten Bedingungen auch zur Umkehr des mit dem Auge sichtbaren Kontrastverhältnisses führen (Abbildung 3.3 rechts). Für eine hochgenaue Bildmessung sollte das verwendete Markenmaterial ein möglichst homogenes diffuses Reflexionsverhalten für beide Kontrastfarben aufweisen [Luh10a].

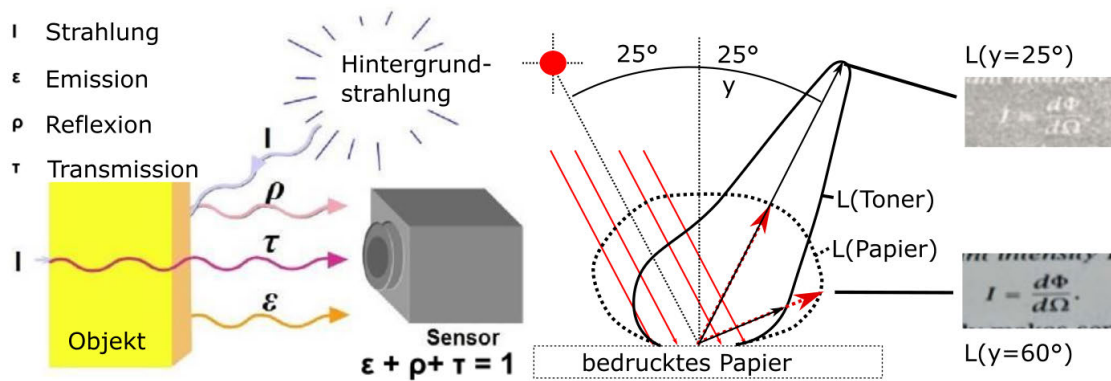


Abbildung 3.3: Anteile der auf den Sensor auftreffenden Strahlung [Opt18a] sowie Reflexion von gerichtetem Licht ([Jä12, LRKB14, Sze10])

3.1.2 Sichtstrahlausbreitung

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass sich ein Lichtstrahl in der Luft geradlinig mit konstanter Geschwindigkeit und Wellenlänge ausbreitet. Für hochgenaue Messungen bzw. bei Messungen über große Entfernungen gewinnen Effekte der Lichtbrechung (Refraktion) einen signifikanten Einfluss. Dabei ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht von dessen Brechungsindex und damit die Ausbreitung in Luft auch von der Umgebungstemperatur und dem Luftdruck abhängig. Bei interferometrischen Messungen bewirkt dies eine Änderung der Wellenlänge des Lasers und damit eine Verfälschung der gemessenen Strecke. Die Größenordnung dieses Effektes beträgt ca. $1 \mu\text{m}$ Längenänderung bei einer Messlänge von 1 m und einer Temperaturänderung von 1 K . Aus diesem Grund werden interferometrische Messsysteme mit einer Druck- und Temperaturkompensation ausgeliefert. Für photogrammetrische Messungen ist Ablenkung eines Sichtstrahls zwischen Objekt und Beobachter aufgrund von Temperatur- und Druckgradienten normal zur Ausbreitungsrichtung relevant. In [EPP02] wird die Größenordnung der Abweichung mit $4600 \mu\text{m}$ bei einer Strahllänge von 100 m und einem Temperaturgradienten normal zum Sichtstrahl von 1 K/m angegeben. In [Jat11, S.65] wird die zu erwartende Größenordnung der Ablenkung des Sichtstrahles bei einem Temperaturgradienten von 1 K/m und einer Entfernung von 5 m mit ca. $15 \mu\text{m}$ angegeben. Damit ist dieser Effekt deutlich größer als der Einfluss des Luftdruckes sowie der Erdkrümmung (Tabelle 3.1) und sollte bei größeren

Temperaturgradienten sowie bei große Messentfernungen berücksichtigt werden.

In [RMK⁺16, RMKS16] werden Simulationen zum Einfluss des Temperaturgradienten vorgestellt. Dabei wurde in einem Raum mit einer Grundfläche von 6 x 6 m und einer Höhe von 4.5 m ein Temperaturgradient von 1 K/m angenommen und die Verlagerungen der rekonstruierten Objektpunkte mit und ohne Temperaturgradienten berechnet. Die maximale simulierte Verlagerung im Objektraum betrug ca. 32 μm und kann damit als relevant für Messungen an der WZM betrachtet werden. Die simulierten Abweichungen weisen dabei die Charakteristik eines perspektivischen Fehlers auf und werden bei einer Bündelblockausgleichung wahrscheinlich als Verschiebung der Kamera im Raum fehlinterpretiert.

Tabelle 3.1: Quer- und Winkelabweichungen von Sichtstrahlen (nach [EPP02])

Entfernung (100m)	Querabweichung [μm]	Winkelabweichung [μrad]
Erdkrümmung	784	16
Druckgradient	160	3
Temperaturgradient (1 K/m)	4600	92

Insgesamt kann aus der Literatur kein klares Bild über den Einfluss der Refraktion auf Genauigkeit der Objektrekonstruktion entnommen werden. Die wenigen Veröffentlichungen (beispielsweise das Projekt LUMINAR [LUM16]) sind sehr aktuell und zeigen nur Simulationen des Effektes und wenige praxisrelevante Untersuchungen. Generell sollte jedoch der Temperaturgradient während einer Messung kleingehalten und charakterisiert sowie die Sichtstrahlänge, möglichst in einem Bereich von unter 5 m, gehalten werden.

3.1.3 Bildaufnahme

Die Abbildung des Objektes erfolgt bei digitalen Spiegelreflex- oder Industriekameras nach dem Prinzip der Zentralperspektive. Als Objektraum wird der abzubildende Raum bezeichnet. Der Bildraum ist die Kammer, in der das Bild auf den Sensor projiziert wird. Spiegelreflexkameras werden in großen Stückzahlen mit sehr hochauflösenden Sensoren gefertigt und sind, da es sich um Produkte aus dem Konsumerbereich mit entsprechenden Stückzahlen handelt, sehr preiswert. Jedoch sind die Aufnahmezeit und die Übertragungsgeschwindigkeit der Bilder zur Auswerteeinheit sowie die mechanische Stabilität begrenzt. Deshalb werden diese Kameras meist für zeitunkritische Messaufgaben eingesetzt und das Gehäuse mechanisch stabilisiert bzw. die Deformation des Gehäuses im Kameramodell berücksichtigt. Bei zeitkritischen Online-Messungen werden in der Regel Industriekameras

eingesetzt, die direkt, beispielsweise mittels Gigabit-Ethernet (GigE), Universal Serial Bus (USB) oder Camera Link (CamLink), am Auswerterechner angebunden sind und damit eine schnelle Datenübertragung und Auswertung sicherstellen können.

Tabelle 3.2: Sensorauflösungen und -größen von verfügbaren verwendeten Kameras

Kamera	Sensorgröße [mm]	Auflösung	Pixelgröße [μm]
Canon 5DsR	36.0 × 24.0	8688 × 5792	4.14
AVT Prosilica GX6600	36.0 × 24.0	6576 × 4384	5.50
AVT Prosilica GC 2450	8.4 × 7.1	2448 × 2050	3.45
AVT Manta G-125B	4.8 × 3.6	1292 × 964	3.75

In Tabelle 3.2 sind beispielhaft Sensorgrößen und Auflösungen einiger in dieser Arbeit verwendeten Kameras zusammengestellt. Dabei sind Spiegelreflexkameras mit einem Auflösungsvermögen von bis zu 50 MPixel sowie bei Industriekameras von bis zu 29 MPixel verfügbar. Jedoch sinkt mit zunehmender Bildgröße auch die erreichbare Bildrate und die benötigte Übertragungs- und Auswertedauer steigt deutlich an. Da die verfügbare Sensorgröße in der Regel auf Kleinbildformat (36.0 mm x 24.0 mm) begrenzt ist, sinkt bei steigender Auflösung die Pixelgröße, was wiederum eine negative Auswirkung auf die Lichtempfindlichkeit der Kamera hat. Aus diesen Gründen wird das zu verwendende Abbildungssystem anwendungsspezifisch ausgewählt und stellt einen Kompromiss zwischen Auflösungsvermögen, Lichtempfindlichkeit, Geschwindigkeit und Kosten dar.

3.2 Bildverarbeitung

Ziel der Bildverarbeitung ist eine automatisierte Erkennung vieler eindeutiger und hochgenau lokalisierbarer Merkmale im Bild. Zum Thema Bildverarbeitung ist eine Vielzahl an Veröffentlichungen unterschiedlichster Methoden aus diversen Fachrichtungen bekannt. Die vorliegende Arbeit stützt sich dabei vor allem auf folgende Lehrbücher und Veröffentlichungen zur kantenbasierten Bildverarbeitung und Merkmalerkennung [BB06, BB07, Erh08, GA08, Her05, Jä12, KR04, LRKB14, MKSS01, Neu05, Ste05, SN07, Sze10]. Methoden zur Ellipsenmessung ohne Kantenpunkte [OH07, OH09] wurden nicht betrachtet, da deren Genauigkeitspotenzial in der Praxis noch nicht verifiziert wurde.

3.2.1 Texturbasierte Bildmessung

Zur Objektrekonstruktion werden bei der Bildmessung signifikante Merkmale gesucht, die aus verschiedenen Blickrichtungen unter unterschiedlichen Beleuchtungssituationen und Abbildungsmaßstäben eindeutig identifizierbar sind und eine hohe Positionsgenauigkeit bieten (vgl. [Wil08]). Das sind entweder natürliche oder künstlich applizierte Texturen der Objektoberfläche bzw. spezielle Messmarken. Dabei zeigt sich, dass bei natürlichen Texturen meist weniger Marken als Texturmerkmale erfasst werden können, diese aber mit einer höheren Genauigkeit [SSM15] und schneller [HHS16, May07].

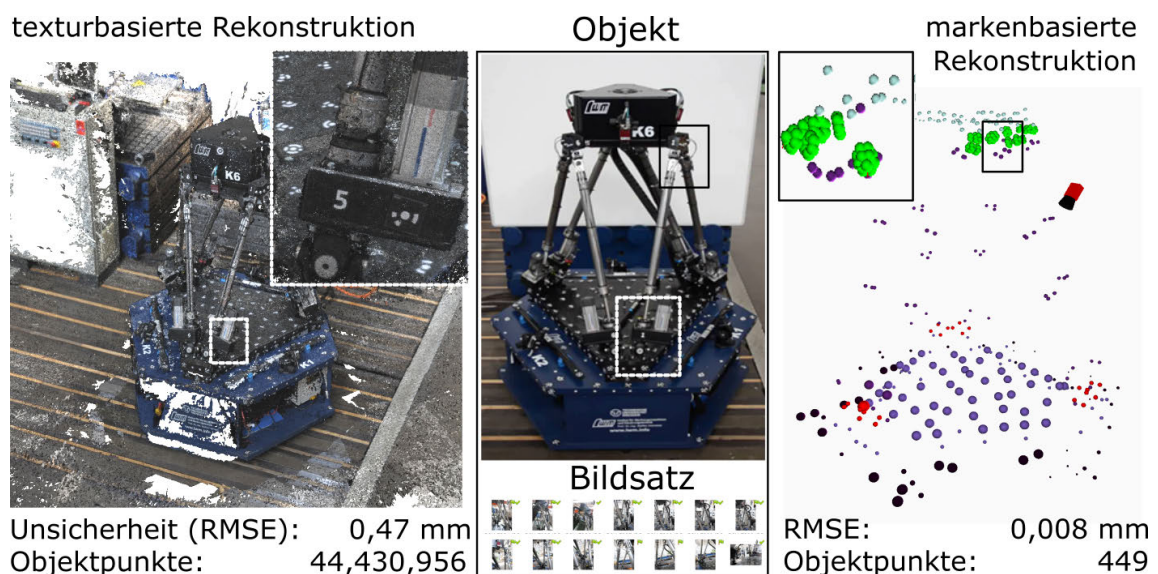


Abbildung 3.4: Qualitative und quantitative Unterschiede der textur- und markenbasierten Objektrekonstruktion

Beispielhaft dafür sind in Abbildung 3.4 die qualitativen und quantitativen Unterschiede der Signalisierungsmethoden gegenübergestellt. Bei der texturbasierten Objektrekonstruktion mithilfe der Software „Agisoft Photoscan“ konnte eine enorme Anzahl an Objektpunkten rekonstruiert werden, deren Unsicherheit jedoch mit 0.47 mm verhältnismäßig schlecht ausfällt (Abbildung 3.4 links). Die markenbasierte Rekonstruktion zeigte mit 449 signalisierten und erkannten Marken zwar eine deutlich geringere Diskretisierung der Oberfläche, jedoch mit einer Unsicherheit von 8 μm ein deutlich höheres Genauigkeitspotenzial (Abbildung 3.4 rechts).

3.2.2 Markenbasierte Bildmessung

Die markenbasierte Bildmessung erfolgt, basierend auf einer Startschätzung, in drei Teilschritten: Kantenerkennung im Subpixelbereich, Berechnung einer ausgleichenden Ellip-

se sowie des Markencodes. Dabei werden zur Kantenerkennung, ausgehend von einem Startpunkt, in der Regel radial Strahlen über die Markenkante gelegt und die Position des Helligkeitssprunges bestimmt. Typische Methoden zur Bestimmung der Kantenübergänge sind das Moment-Preservation-Verfahren oder Ableitungsfilter [Luh10c, TM84]. Weitere Methoden zur Kantenerkennung sind in [PP11] sowie in [YFP05] zusammengestellt. Prinzipbedingt benötigen die Operatoren einen ausreichend hohen Kontrast am Kantenübergang und, vor allem wenn ableitungsbasierte Kantenfilter verwendet werden, einen möglichst rauschfreien Helligkeitsverlauf. Auf eine Rauschunterdrückung im Bild, beispielsweise mittels Medianfilter, sollte wenn möglich verzichtet werden, da diese auch die Kantenposition beeinflusst. Um eine eindeutige Identifikation zu ermöglichen, werden codierte Marken (Abbildung 3.5, rechts) verwendet. Dazu wird um den Markenkern ein Codering gelegt, der in der Regel mit einem eindeutigen Binärcode, meist 14...20 Bit, versehen ist. Aspekte der Codegestaltung und Messung sind in [NM97] beschrieben.

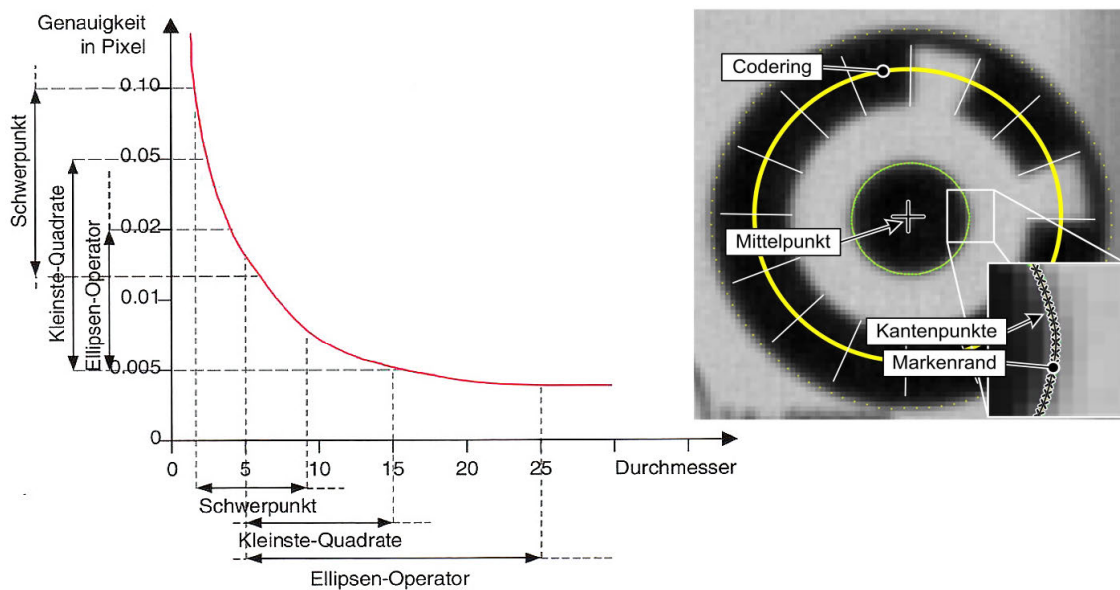


Abbildung 3.5: Rechts Marke mit Codering sowie links die theoretisch erreichbare Bildmessgenauigkeit [Luh10c]

Die erreichbare Messgenauigkeit im Bild ist, einen ausreichenden Kontrast im Bild vorausgesetzt, abhängig vom verwendeten Operator und dem Ellipsendurchmesser. In Abbildung 3.5 sind die theoretisch erreichbaren Messgenauigkeiten für ein Bild mit 8 Bit Farbtiefe, in Abhängigkeit des Ellipsendurchmessers, dargestellt. Dabei konvergiert bei einem Ellipsendurchmesser von über 20 Pixel die erreichbare Messgenauigkeit bei ca. 0,004 Pixel. Dies ist jedoch eine theoretische Grenze, die unter realen Bedingungen nur bedingt erreicht werden kann. Weiterhin ist diese Genauigkeitsangabe die Abweichung der gefun-

denen Marke im Bild von der Form einer idealen Ellipse. Zufällige Fehlereinflüsse, wie beispielsweise Schattenwurf, lassen sich nur bedingt identifizieren. Weiterhin wird angenommen, dass die auf dem Sensor abgebildeten mit den tatsächlichen Kanten der Marke im Objektraum übereinstimmen. Eine Berücksichtigung von richtungsabhängigen Reflexionseigenschaften (vgl. Abbildung 3.3) wird derzeit nicht vorgenommen. Einfluss des Bayer-Pattern auf die Genauigkeit sind in [SSHR05] untersucht worden.

Tabelle 3.3: Theoretisch erreichbare Messauflösungen eines ebenen Objektes

Kamera	Auflösung	Pixelgröße [mm] (Objektgröße 1 m)	Messauflösung [μm] (1/100 Pixel)
Canon 5Ds R	8688 \times 5792	0.115	1.2
AVT Prosilica-GX6600	6576 \times 4384	0.152	1.5
AVT Prosilica-GC2450	2448 \times 2050	0.408	4.1
AVT Manta-G125B	1292 \times 964	0.774	7.7

Überträgt man die theoretisch erreichbare Genauigkeit der Bildmessung von ca. 0.01 Pixel auf ein Objekt mit einer Abmessung von beispielsweise 1 m, können in der Ebene Ortsauflösungen im einstelligen Mikrometerbereich realisiert werden (Tabelle 3.3). Dies würde beispielsweise für eine Verlagerungsmessung des TCP im Arbeitsraum einer kleinen WZM bedeuten, dass eine Messung im einstelligen Mikrometerbereich realisierbar wäre. Weiterhin wäre dies für eine Deformationsmessung großer Baugruppen ideal. Beides setzt jedoch eine fehlerfreie Transformation aus dem Bildraum in den Objektraum voraus.

3.3 Objektrekonstruktion

Ausgangspunkt für die Objektrekonstruktion sind die gemessenen Bildkoordinaten $BP_{1..n}$ der Marken (vgl. Abbildung 3.1). Mit einem parametrischen geometrischen Modell, das mindestens Objektpunkte $P_{1..n}$ und ein Abbildungsmodell der Kamera enthält, werden die Bildkoordinaten $BP'_{1..n}$ simuliert. Weiterhin werden die Modellparameter bei der Modellausgleichung optimiert, sodass die Differenz zwischen gemessenen und simulierten Bildpunkten minimal wird. Methoden und Vorgehensweise der Photogrammetrie sind in [Ben11, HKW⁺13, Nie08] beschrieben. Mathematische Aspekte der Ausgleichung sind in [BSMM05, Gra09, Kno10, Koc04, Nav06a, Nav06b, Str98] zusammengestellt.

3.3.1 Geometrisches Modell

Die Grundlage ist in der Regel das Modell der zentralperspektivischen Abbildung. Es beschreibt einen geschlossenen Vektorzug zwischen Bezugssystem $\{W\}$, Objektpunkt P , Kamera $\{K\}$, Sensor $\{S\}$ und Bildpunkt p' . Weiterhin sind alle Elemente, die den Strahlengang, das Objekt und die Kamera beeinflussen, enthalten, beispielsweise Verzerrungskorrektur, Abbildungsexzentrizität sowie Maßstab und Datum. Es stellt damit ein geometrisches Modell der Messkonfiguration dar (Abbildung 3.6).

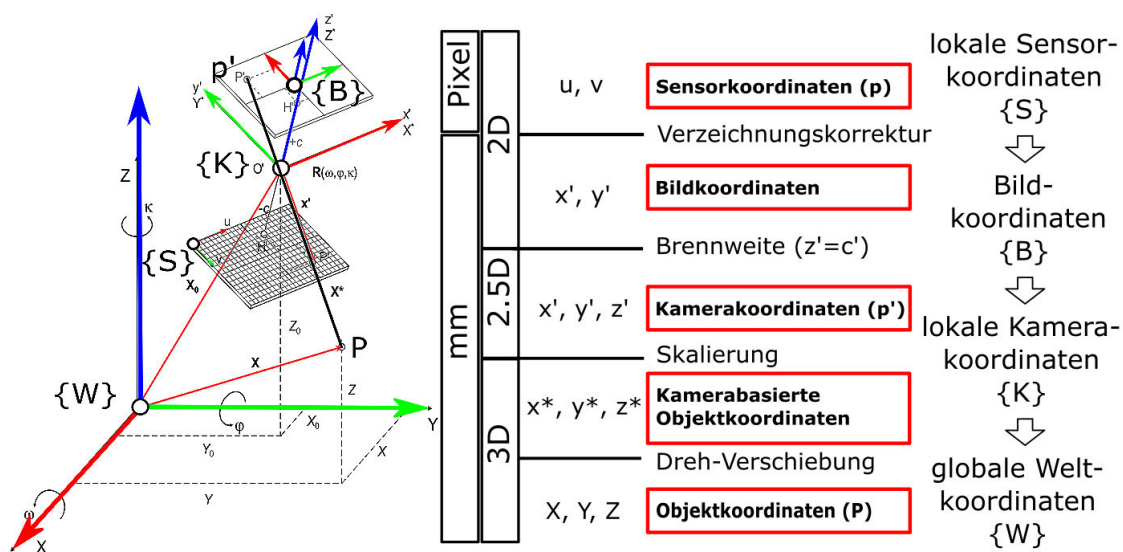


Abbildung 3.6: Transformationsreihenfolge im geometrischen Modell [Luh10b]

Dieser geschlossene Vektorzug zur Berechnung der Objektkoordinaten eines Punktes P im globalen Weltkoordinatensystem $\{W\}$ aus einem gemessenen Bildpunkt p' im Kamerakoordinatensystem $\{K\}$ ist in Gleichung 3.1 formuliert. Dabei ist m_b der Bildmaßstab, der das Verhältnis von Brennweite c zu Objektabstand $|P - K|$ darstellt [Luh10b].

$$P = K + m_b * R * p' \tag{3.1}$$

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_z \end{bmatrix} + m_b * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{bmatrix}$$

Stellt man die Gleichung 3.1 nach p'_x bzw. p'_y um und setzt $p'_z = c$, erhält man die Kollinearitätsgleichung (Gleichung 3.2, vgl. [Luh10c]). Die Lage und Orientierung der Kamera im globalen Koordinatensystem, beschrieben durch K (Lage) und R (Orientierung), wird als

äußere Orientierung einer Kamera bezeichnet.

$$\begin{aligned} p'_x &= c * \frac{r_{11} * (P_x - K_x) + r_{21} * (P_y - K_y) + r_{31} * (P_z - K_z)}{r_{13} * (P_x - K_x) + r_{23} * (P_y - K_y) + r_{33} * (P_z - K_z)} \\ p'_y &= c * \frac{r_{12} * (P_x - K_x) + r_{22} * (P_y - K_y) + r_{32} * (P_z - K_z)}{r_{13} * (P_x - K_x) + r_{23} * (P_y - K_y) + r_{33} * (P_z - K_z)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Mit diesem Zusammenhang können bei gegebener äußerer Orientierung der Kamera und den Objektkoordinaten im globalen Koordinatensystem die Bildpunkte in Bildkoordinaten berechnet werden.

3.3.2 Verzeichnungskorrekturen

Gleichung 3.2 stellt eine ideale zentralperspektivische Abbildung mit einem ideal geradlinigen Sichtstrahl dar. In der Realität treten jedoch in den verwendeten Objektiven immer Abbildungsfehler auf. Zur Korrektur dieser Abweichungen wird meist ein Ansatz nach [Bro71] verwendet. In diesem lassen sich die Abweichungen hinsichtlich ihrer Fehlerursache unterteilen [Luh10c]:

- radialsymmetrische Verzeichnung **A** (Einfallswinkel des Sichtstrahls (τ) \neq Ausfallswinkel (τ')),
- tangentiale Verzeichnungen **B** (Dezentrierung der Linsen),
- Affinität und Scherung **C** (Orthogonalität und Gleichmaßstäblichkeit der Bildkoordinatenachsen),
- entfernungsabhängige Korrekturen **D** (Berücksichtigung von großen Entfernungsänderungen im Objektraum bzw. großen Bildmaßstäben) sowie
- Abbildungsexzentrizität **e** (Versatz des Ellipsenmittelpunktes).

Die Fehler bewirken dabei eine geometrische Deformation des Bildes, auch „Verzerrung“ genannt. Zur Korrektur der Bildkoordinaten ($\Delta x'$ bzw. $\Delta y'$) werden alle Korrekturterme zusammengefasst (Gleichung 3.2).

$$\begin{aligned} \Delta x' &= \Delta x'_{rad} + \Delta x'_{tan} + \Delta x'_{aff} + \Delta x'_{entf} + e_x \\ \Delta y' &= \Delta y'_{rad} + \Delta y'_{tan} + \Delta y'_{aff} + \Delta y'_{entf} + e_y \end{aligned} \quad (3.3)$$

In der Regel wird davon ausgegangen, dass der gemessene Ellipsen- mit dem realen Markenmittelpunkt identisch ist, was streng genommen nur dann erfüllt ist, wenn Bild- und

Markenebene parallel sind. Sonst entsteht eine Abbildungsexzentrizität, die vor allem vom verwendeten Markendurchmesser und der Aufnahmerichtung abhängig ist (vgl. [Dol96, Dol97] sowie [Luh10c]). Die Abbildungsexzentrizität kann, bei bekannter Orientierung der Marke relativ zur Bildebene, bestimmt und wie andere Abbildungsfehler behandelt werden (Gleichung 3.4). Jedoch wird in [Luh10c] ausgeführt: „Der Einfluss der Exzentrizität kann in komplexen Mehrbildverbänden nach einer Bündeltriangulation kaum nachgewiesen werden. Es wird angenommen, dass die simultan mitbestimmten Parameter der inneren und äußeren Orientierung den Effekt zum großen Teil kompensieren.“

$$e = r_m - \frac{(r_1 - r_2)}{2} \text{ bzw.} \quad (3.4)$$

$$e = r_m - \frac{c}{2} * \left(\frac{R_m + \frac{d}{2} * \sin(90 - \alpha)}{Z_m - \frac{d}{2} * \cos(90 - \alpha)} + \frac{R_m - \frac{d}{2} * \sin(90 - \alpha)}{Z_m + \frac{d}{2} * \cos(90 - \alpha)} \right)$$

Dabei beziehen sich die meisten Korrekturen auf die optische Achse des Objektivs. In der Regel ist auch die Lage der optischen Achse relativ zum Bildsensor nicht zentrisch angeordnet. Weiterhin kann es bei modernen Spiegelreflexkameras auch zu einer Änderung des Sensors relativ zur optischen Achse aufgrund von Schwerkrafteinflüssen kommen. Aus diesem Grund wird erstens die Hauptpunktlage x'_0 und y'_0 mit als Korrekturterm berücksichtigt und zweitens bei handgeführten Kameras auch für jedes Bild separat bestimmt. Damit ergeben sich zur Bestimmung eines Bildpunktes folgender funktionaler Zusammenhang und folgende Abhängigkeiten:

$$p' = f(P, K, R, c, x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y') \quad (3.5)$$

Dabei wird in der Photogrammetrie $c, x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y'$ als innere Orientierung und K, R als äußere Orientierung der Kamera bezeichnet. In der Bildverarbeitung werden sie auch als intrinsische und extrinsische Parameter bezeichnet und meinen die inneren Korrekturen bzw. die Lage und Orientierung der Kamera im Raum.

Untersuchungen zur Größenordnung der Abbildungsfehler sind in hoher Anzahl verfügbar, hervorzuheben sind beispielsweise [RMK⁺16, RMKS16] oder [LFM16]. Weiterhin ist ein Ansatz zur Berücksichtigung der Sensorneigung in [HHW06] dargestellt. Ansätze zur alternativen FE-Modellierung der Sensorunebenheit sind in [LRKB14, TL01, TLH04] zu finden. Die Abbildungsexzentrizität lässt sich auch aus der Bildmessung heraus schätzen [HLP⁺13, YF14] sowie [MTBP16] oder auch bei der Modellausgleichung bestimmen [WW12]. Insgesamt zeigt sich, dass Abbildungsfehler in der Photogrammetrie sehr gut untersucht und durch gute Kameramodelle in einem sehr hohen Maße korrigierbar sind.

3.3.3 Funktionales Modell

Das funktionale Modell beschreibt dabei „... den Zusammenhang zwischen ‘wahren’ Werten der Beobachtungen L und den ‘wahren’ Werten der unbekanntes X .“ [Luh10c, Luh10b]. Dazu müssen mittels des geometrischen Modells die Bildkoordinaten in Abhängigkeit der Modellparameter berechenbar sein (Gleichung 3.6).

$$p'(X) \cong f(P, K, R, c, x'_0, y'_0, \Delta x', \Delta y') \quad (3.6)$$

Weiterhin werden dazu alle n Messgrößen der Bildmessung in einen Beobachtungsvektor L überführt. Der Vektor L hat damit $n * 2$ Elemente (Gleichung 3.7). Mithilfe des funktionalen Modells werden die Bildpunkte, in Abhängigkeit einer Startschätzung der unbekanntes Parameter X^0 , simuliert und im Vektor $L^0(X)$ zusammengefasst.

$$L := [p'_{1_x}, p'_{1_y}, p'_{2_x}, p'_{2_y}, \dots, p'_{n_x}, p'_{n_y}]^T \quad (3.7)$$

$$L^0(X) := [p'_{1_x}(X^0), p'_{1_y}(X^0), \dots, p'_{n_y}(X^0)]^T \quad (3.8)$$

Das Ziel ist es, die Abweichung zwischen den gemessenen (L) und den simulierten Bildkoordinaten $L^0(X)$ mittels einer Optimierung der Modellparameter X zu minimieren. Da immer ein differenziell kleiner Restfehler v zwischen Simulation und Messung vorhanden sein wird, kann folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$0 = (L + v) - L^0(\hat{X}) \quad (3.9)$$

Für einen Näherungswert X^0 der unbekanntes, optimalen Parameter \hat{X} und der Bedingung $\hat{X} = X^0 + \hat{x}$ können die Verbesserungsgleichung durch eine Reihenentwicklung an den Näherungswerten beschrieben werden (vgl. [Luh10c, S.80]):

$$L + v = L^0(X) + \left(\frac{\partial L^0(X)}{\partial X} \right)_0 * \hat{x} \quad (3.10)$$

$$A_{n,u} = \left(\frac{\partial L^0(X)}{\partial X} \right)_0 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial L^0_1(X)}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial L^0_1(X)}{\partial X_2} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial L^0_1(X)}{\partial X_u} \right)_0 \\ \left(\frac{\partial L^0_2(X)}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial L^0_2(X)}{\partial X_2} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial L^0_2(X)}{\partial X_u} \right)_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial L^0_n(X)}{\partial X_1} \right)_0 & \left(\frac{\partial L^0_n(X)}{\partial X_2} \right)_0 & \dots & \left(\frac{\partial L^0_n(X)}{\partial X_u} \right)_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

So kann das funktionale Modell an dieser Stelle linearisiert und eine Übertragungsmatrix bzw. Jacobimatrix (A) gebildet werden (Gleichung 3.11). Damit kann die Verbesserungsgleichung mit $l = L - L^0$ wie folgt angegeben werden:

$$\begin{aligned} {}_n l_1 &= {}_n l_1 + {}_n v_1 = {}_n A_1 * {}_n x_1 \\ l &= Ax \end{aligned} \quad (3.12)$$

Wie in Gleichung 3.12 leicht erkennbar, kann die Bestimmung der Modellparameter auf ein Standard-Problem der nichtlinearen Optimierung zurückgeführt und mit bekannten mathematischen Verfahren, beispielsweise gradientenbasierte Newton-Verfahren, gelöst werden.

3.3.4 Stochastisches Modell

Bei dem vorliegenden photogrammetrischen Ausgleichungsproblem kann angenommen werden, dass es stochastischen Regeln folgt. Damit kann die Kovarianzmatrix K der Beobachtungen L gebildet werden. Dabei sind σ_i die Standardabweichungen der Beobachtungen L_i bzw. ρ_{ij} die Korrelationskoeffizienten zwischen L_i und L_j [Luh10c, S.81]. In der Kovarianzmatrix sind die Genauigkeitsinformationen der Bildmessung (σ_i) und die Korrelationen der Bildmessungen untereinander (ρ_{ij}) enthalten.

$$K_{nn} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12} * \sigma_1 * \sigma_2 & \dots & \rho_{1n} * \sigma_1 * \sigma_n \\ \rho_{21} * \sigma_2 * \sigma_1 & \sigma_2^2 & \dots & \rho_{2n} * \sigma_2 * \sigma_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n1} * \sigma_n * \sigma_1 & \rho_{n2} * \sigma_n * \sigma_2 & \dots & \sigma_n^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Im Idealfall wären alle Messungen mit einer sehr geringen Unsicherheit nahe null erfasst und nicht miteinander korreliert. Da dieser Grenzwert in der Praxis nicht existiert, ist es zweckmäßig, die Beobachtungen entsprechend ihrer Vertrauenswürdigkeit zu gewichten. Dazu kann die Korrelationsmatrix mit der Konstanten σ_0^2 , auch als Sigma der Ausgleichung bezeichnet, zur Kofaktorenmatrix Q multipliziert werden.

$$Q_{ll} = \frac{1}{\sigma_0^2} * K_{ll} = P^{-1} \quad (3.14)$$

Aus der Kofaktorenmatrix Q kann die Gewichtsmatrix P zur Wichtung einzelner Beobachtungen gebildet werden. Dabei sind die Nebendiagonalelemente null, wenn die Beobach-

tungen voneinander unabhängig sind. In erster Näherung kann die Gewichtsmatrix P damit wie folgt aufgestellt werden:

$$P_{nn} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_0^2}{\sigma_1^2} & & & \\ & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_2^2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \frac{\sigma_0^2}{\sigma_n^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \sigma_n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Mit diesen Informationen aus dem funktionalen und stochastischen Modell können die gesuchten Parameter über eine Modellausgleichung bestimmt werden. Ein häufig verwendeter Ansatz ist eine Methode der kleinsten Quadrate (Gauß-Markov-Modell):

$$v^T * P * v \rightarrow \min! \quad (3.16)$$

Dabei entspricht die Ausgleichung einer Minimierung nach der L2-Norm. Durch das Gauß-Markov-Modell wird sichergestellt, dass die Parameter erwartungstreu (der Erwartungswert entspricht dem wahren Wert der zu schätzenden Größe) und mit minimaler Varianz (Streuung) geschätzt werden.

3.3.5 Modellausgleichung direkter Beobachtungen

Die Modellausgleichung erfolgt iterativ in mehreren Berechnungsdurchläufen durch Auflösen des Normalgleichungssystems (Gleichung 3.17) nach den Verbesserungen \hat{x} der unbekannt Parameter. Für die Gewichtsmatrix P wird im ersten Schritt der Ausgleichung eine Einheitsmatrix angenommen.

$$0 = \begin{matrix} N & * & \hat{x} & - & n \\ u,u & & u,1 & & u,1 \end{matrix}$$

$$\text{mit } \begin{matrix} N & = & A^T & * & P & * & A \\ u,u & & u,n & & n,n & & u,n \end{matrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{matrix} n & = & A^T & * & P & * & l \\ u,1 & & u,n & & n,n & & u,1 \end{matrix}$$

Die Verbesserungen der unbekannt Parameter \hat{x} ergeben sich entsprechend Gleichung 3.18. Die iterative Berechnung wird dann abgebrochen, wenn die Verbesserungen \hat{x}

unterhalb einer festzulegenden Schwelle liegen.

$$\hat{x}_{u,1} = \left(\begin{matrix} A^T & P & A \\ u,n & n,n & u,n \end{matrix} \right)^{-1} * \begin{matrix} A^T & P & l \\ u,n & n,n & u,1 \end{matrix} = N^{-1} * n = Q * n \quad (3.18)$$

$$\hat{X}_{u,1} = X_{u,1}^0 + \hat{x}_{u,1}$$

Aus den verbleibenden Residuen v der Ausgleichung können die Standardabweichung a posteriori \hat{s} , die Standardabweichung der unbekannt Parameter \hat{s}_i sowie die Varianz-Kovarianz-Matrix der Unbekannten bestimmt werden.

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{v^T * P * v}{n-u}}$$

$$\hat{s}_i = \hat{s}_0 * \sqrt{Q_{ii}} \quad (3.19)$$

$$K_{u,u} = \hat{s}_0^2 * Q$$

3.3.6 Modellausgleichung mit Nebenbedingungen

Zusätzlich zu den Beobachtungen werden meist eine Anzahl r von Nebenbedingungen, beispielsweise zur Maßstabs- und Datumsdefinition, berücksichtigt. Dazu werden Bedingungsgleichungen mithilfe des funktionalen Modells gebildet und linearisiert.

$$B_{r',u} = \left(\frac{\partial \psi(X)}{\partial X} \right)_0 \quad (3.20)$$

$$\psi(X) = [\psi_1(X), \psi_2(X), \psi_3(X), \dots, \psi_{r'}(X)]^T = 0$$

Da wiederum die unbekannt Parameter nicht exakt den Erwartungswerten entsprechen können, ergibt sich der Vektor der Widersprüche w der Nebenbedingungen. Daraus kann ein Gleichungssystem zur nichtlinearen Optimierung abgeleitet werden.

$$B * \hat{x} = -w \quad (3.21)$$

Im nächsten Schritt werden die Gleichungssysteme zur Ausgleichung direkter Beobachtungen und zur Ausgleichung mit Nebenbedingungen zu einem neuen Normalgleichungssystem zusammengeführt. Die numerischen Werte der Lagrange'schen Multiplikatoren k werden nicht weiter berücksichtigt.

$$\begin{bmatrix} A^T * P * A & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \hat{x} \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A^T * P * l \\ w \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Die Standardabweichung, unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen, ergibt sich zu:

$$\hat{s}_0 = \sqrt{\frac{\sum p + v^2}{n - u + r'}} \quad (3.23)$$

Neben der Standardabweichung s_0 existieren weitere Kenngrößen zur Beurteilung der inneren Genauigkeit. Die Gesamtredundanz r der Messungen (vgl. [Luh10c, S.92 ff.]) wird aus der Kofaktorenmatrix der Verbesserungen berechnet und ist ein Maß zur Beurteilung der Zuverlässigkeit. Wenn eine geringe Redundanz vorliegt, können Ausreißer oder Modellfehler nur bedingt identifiziert werden.

$$Q_{vv} = Q_{ll} - A * Q_{xx} * A^T$$

$$R = Q_{vv} * P = \begin{bmatrix} r_{00} & & & \\ & r_{11} & & \\ & & \dots & \\ & & & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$r = n - u = \text{spur}(Q_{vv} * P) = \sum r_i$$

Die Redundanzmatrix R wird aus der Kofaktorenmatrix der Beobachtungen Q_{ll} und der Unbekannten Q_{xx} gebildet. Dabei sind r_i die Redundanzanteile einer Beobachtung l_i an der Gesamtredundanz r . Bei $r_{ii} = 0$ lässt sich die Beobachtung nicht kontrollieren, dagegen bei $r_{ii} > 0.5$ sehr gut. Weiterhin können Ausreißer auf dieser Basis gut detektiert werden (vgl. [Sch08, S.30]).

$$B_{xx} = E - (\text{diag}N * \text{diag}Q_{xx})^{-1} \quad (3.25)$$

Ein Maß zur Beobachtbarkeit B von Parametern wird in [Sch08] beschrieben. Damit lassen sich Parameter identifizieren, die sich gut ($B \leq 0.8...0.9$) bzw. schlecht oder nicht ermitteln lassen ($B \geq 0.8...0.9$).

Aspekte zur Umsetzung und Vorgehensweise bei der Implementierung der Bündelblockausgleichung sind in [TMHF99] zusammengestellt. Weiterführende Aspekte wie Varianzkomponentenschätzung sind in [SH00a, SH00b] oder in [TAS07] sowie die Auswirkungen in [ST01] beschrieben. Eine Möglichkeit ist die Nutzung der Modelle zur Simulation von Messkonfigurationen, wie beispielsweise in [BL12] zur Monte-Carlo-Simulation einer 6DoF-Messung vorgestellt. Auf die Monte-Carlo-Simulation photogrammetrischer Messungen wird in [HLT04] eingegangen.

3.3.7 Maßstab und Datum

Aufgrund der Abbildung des 3D-Objektraumes auf den 2D-Sensor und der damit verbundenen Informationsreduktion kommt es zu einem Maßstabsverlust. Dieser kann entweder durch Zusatzinformationen, beispielsweise bekannte Strecken im Objektraum, ausgeglichen oder die Ausgleichung ohne Maßstab durchgeführt werden. Da für die Messung der Abweichungen an WZM eine skalierte Messung notwendig ist, muss zwingend ein Maßstab vorhanden sein. In der Regel besteht dieser aus einem kalibrierten Messnormal mit mindestens zwei zueinander ausgemessenen Marken aus carbonfaserverstärktem Kunststoff. Für hochgenaue Messungen sollten mehrere Maßstäbe in allen Raumrichtungen gleichmäßig nahe am Messobjekt verteilt sein. Weiterhin muss für eine Messung ein übergeordnetes Koordinatensystem, auch Datum genannt, hergestellt werden. Dabei sollten die Datumpunkte einen möglichst großen Abstand zueinander aufweisen und in der Ausgleichung entsprechend festgesetzt werden. Eine alternative Vorgehensweise mit reinem höheren Genauigkeitspotenzial ist eine freie Netzausgleichung, bei der in das Gleichungssystem Nebenbedingungen eingeführt werden.

3.4 Genauigkeitskenngrößen

Allgemein ist die Charakterisierung von Genauigkeitskenngrößen aufgrund unterschiedlicher Begriffe und Maße problematisch [Hen07]. Grundsätzlich müssen Genauigkeit und Präzision der Messung bekannt sein, um aus einem gemessenen Wert auf den richtigen Wert schließen zu können (Abbildung 3.7 rechts).

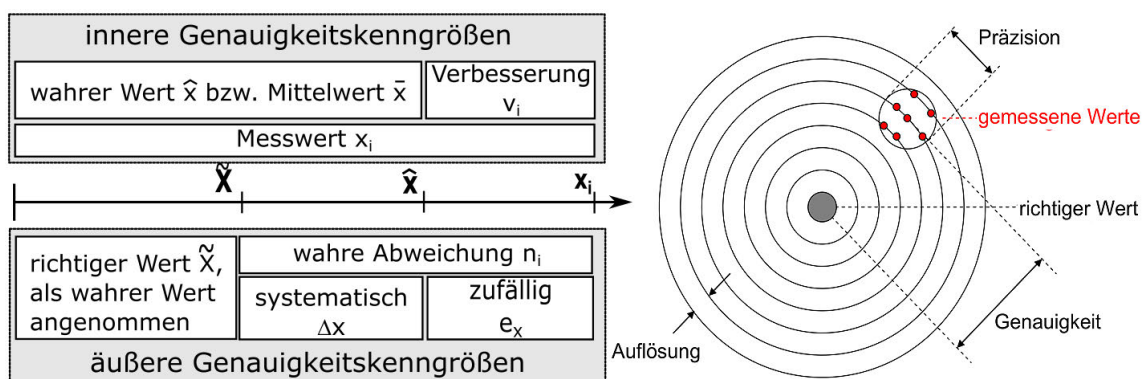


Abbildung 3.7: Wahre, zufällige und systematische Abweichungen und Verbesserungen [Luh10c, Luh10b] (vgl. [GF08, MHM⁺12])

Prinzipbedingt können durch die hohe Redundanz in photogrammetrischen Messungen

innere Streuungen des Mittelwertes der Parameter \hat{X} ermittelt werden, die ein Maß für die innere Genauigkeit darstellen (vgl. Gleichung 3.19). Dementsprechend stellen die Verbesserungen v_i ein Maß für die Präzision dar (Abbildung 3.7, links oben, Gleichung 3.12). Der wahre Wert der Ausgleichung, repräsentiert durch den Mittelwert, ist jedoch nicht der Wahre Wert \tilde{X} . Dementsprechend kann nur auf Basis innerer Größen die Genauigkeit einer Messung nicht beurteilt werden. Weiterhin ist zu beachten, dass diese Betrachtung nur gültig ist, wenn die Messwerte einem stochastischen Verhalten unterliegen und keine groben Modellfehler auftreten. Systematische Fehler können damit nur bedingt identifiziert oder charakterisiert werden.

Die äußere Genauigkeit gibt das Maß der Übereinstimmung des gemessenen Mittelwertes \hat{X} mit dem Wahren Wert \tilde{X} an (Abbildung 3.7 links rechts). Dieses Maß kann nicht durch innere Größen ermittelt werden. In der Regel werden Kontrollstrecken (als Wahrer Wert \tilde{X}) verwendet, die bei der Ausgleichung nicht als Maßstab verwendet werden dürfen. Dafür muss eine Messung auf Basis eines anderen physikalischen Prinzips oder eine Kontrollgröße verwendet werden, die eine Rückführbarkeit ermöglicht. Allgemeine Ansätze zur Identifikation von photogrammetrischen Genauigkeitskenngrößen sind beispielsweise in [Den05] beschrieben.

3.4.1 Innere Genauigkeitskenngrößen

Ein Maß zur Beurteilung der Güte der Objektrekonstruktion sind Größe und Verteilung der Differenzen zwischen der tatsächlichen Bildmessung und der simulierten Bildkoordinaten, auch Residuen genannt. Die Residuen entsprechen dabei dem Vektor der Verbesserungen v_i eines Bildpunktes (Gleichung 3.9).

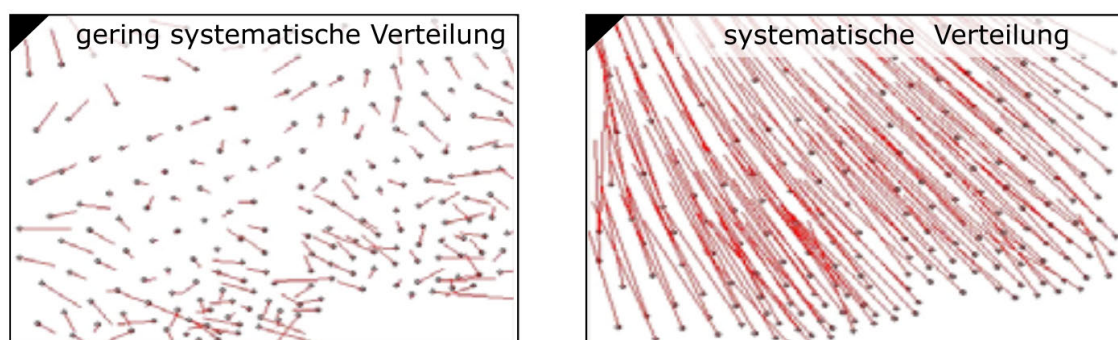


Abbildung 3.8: Oben Residuen sowie unten Verteilung im Bild bei unterschiedlichen Modellansätzen [Rie08]

Betrachtet man alle Bilder und alle Punkte, sollten Betrag und Richtung der Residuen einer

Normalverteilung entsprechen. Der Mittelwert sollte sich, wenn kein Modellfehler vorliegt, der Bildmessunsicherheit s_B annähern. In der Praxis verbleiben durchaus Restfehler bis zu einer Größe von ca. $s_0 \approx 2..5 * s_B$. Dies kann auch zur Filterung grober Ausreißer verwendet werden, beispielsweise können Bildmessungen mit einer Abweichung mit der 10fachen Standardabweichung ausgeschlossen werden, sofern die Residuen normalverteilt sind. In Abbildung 3.8 sind beispielhaft für unterschiedliche Ausgleichungen eines Bildsatzes mit unterschiedlichen Modellen die verbleibenden Residuen mit geringer und stark systematischer Verteilung dargestellt. Die Streuungen der ausgeglichenen Parameter σ_{xyz} sind auch ein Maß zur Beurteilung der inneren Genauigkeit. Sie können zum Vergleich der Unsicherheiten zwischen einzelnen Objektpunkten herangezogen werden. Das Ziel ist es dabei, eine möglichst homogene Verteilung über alle gemessenen Objektpunkte zu erreichen. Beeinflusst wird dies durch eine Vielzahl an Faktoren, beispielsweise Schwankung der Güte und Anzahl der Bildmessungen und auch Datumsfestlegung.

3.4.2 Äußere Genauigkeit

Zur Ermittlung der äußeren Genauigkeit werden meist Referenzkörper mit Kontrollstreifen verwendet. Die Abweichung dieser bestimmten Strecken von dem im Vorfeld bekannten Wahren Wert \tilde{X} gibt dann ein Maß für die äußere bzw. die absolute Genauigkeit an. Eine beispielhafte Übersicht von Referenzkörpern ist in [NRWE07] zusammengefasst. Referenzkörper unterscheiden sich stark hinsichtlich Form, Größe und Markenanzahl. Diese bestehen meist aus relativ robusten und verwindungssteifen sowie ausdehnungsneutralen CFK-Platten. Die signalisierten Marken sind dabei räumlich angeordnet und ihre 3D-Koordinaten werden im Vorfeld unter Laborbedingungen eingemessen. Prinzipiell kann mit diesen Tafeln ein System kalibriert werden oder auch die Unsicherheiten eines Systems überprüft werden. Die räumliche Verteilung der Strecken reicht jedoch nicht für eine allgemeingültige Verifizierung der Messung aus. Zur Beurteilung der Genauigkeit von bildgebenden Systemen ist in VDI 2634-Blatt 1 [VDI02] eine Methode beschrieben, mit der die Längenmessunsicherheit eines optisch antastenden Systems bestimmt werden kann. Dabei werden die Strecken kalibrierter Maßstäbe gemessen und deren Abweichung längenabhängig als Unsicherheitskenngröße angegeben. Dabei sind Anordnung und Anzahl der zu verwendenden Maßstäbe in der Norm festgelegt. Weitere Aspekte zur Abnahme von photogrammetrischen Systemen werden in [RW02] diskutiert. Ein Beitrag zum Systemdesign auf Basis der VDI-Richtlinie ist in [HLT05, HLT04] veröffentlicht. Diese können als Basis zur Beurteilung der Genauigkeit von Messungen an WZM herangezogen werden.

3.5 Auswertemethoden

In der Praxis haben sich drei Auswertemethoden herauskristallisiert, welche in kommerziell verfügbaren Messsystemen umgesetzt wurden:

- **6DoF-Auswertung** [Luh10c], Berechnung von Lage und Orientierung (Pose) eines Körpers, 6DoF-Berechnung (six degrees of freedom), basiert auf dem räumlichen Rückwärts- bzw. Vorwärtsschnitt,
- **Stererobildauswertung** [Luh10c], Berechnung von 3D-Koordinaten, basierend auf dem räumlichen Vorwärtsschnitt sowie
- **Bündelblockausgleichung**, basierend auf der Mehrbildauswertung („Verfahren zur rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Strahlenbündel) ...“ [Luh10c]).

Mit Blick auf den Einsatz an WZM müssen Auswertemethoden hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit von Kamera- und Markenanzahl an das Messobjekt, Dauer der Datenaufnahme und der Auswertung (Eignung als On- oder Offlinesystem), Art, Dauer und Anforderungen an die Messsystemkalibrierung (Langzeitstabilität, Gültigkeitsbereich) sowie erreichbare Messgenauigkeit und Kosten eingeordnet werden.

3.5.1 6DoF-Auswertung

Mit 6DoF-Messsystemen kann die Pose eines oder mehrerer signalisierter Objekte im Raum bzw. die Pose einer Kamera relativ zu einem Markenfeld bestimmt werden. Grundlage ist dabei eine bekannte Kalibrierung der Kamera (innere Orientierung) und 3D-Koordinaten der Marken auf dem Lokator bzw. dem Referenzobjekt. Zur Posemessung werden entweder die Äußere Orientierung einer bewegten Kamera innerhalb eines ortsfesten Markenfeldes (Abbildung 3.9 rechts) bzw. die Lage und Orientierung eines bewegten Markenfeldes relativ zu einem ortsfesten Kamerasystem bestimmt (Abbildung 3.9 links, vgl. [Luh09]).

Bei 6DoF-Messung werden aus einer oder mehreren kalibrierten Kameras synchron Bilder aufgenommen und die Bildkoordinaten bestimmt. Aus den Bildkoordinaten wird anschließend die Pose des kalibrierten Lokators bestimmt. Dafür ist ein Bildsatz mit mindestens drei voneinander unabhängigen Bildmessungen notwendig. Diese Systeme sind damit prinzipbedingt onlinefähig, jedoch können sie nur einen Objektzustand auswerten.

Die Anzahl der Marken auf dem Lokator ist jedoch durch seine Größe begrenzt und liegt auch bei einem großen Lokator deutlich unter 100 Marken (vgl. OptoPose bzw. CreaForm). Die Unsicherheit der Neigung wird jedoch durch die Fläche bestimmt, die der Lokator im Bild einnimmt. Diese ist beim Vorwärtsschnitt eher gering, beim Rückwärtsschnitt deckt das Referenzfeld nahezu das gesamte Blickfeld ab. Beim Rückwärtsschnitt können vor allem hohe Genauigkeiten der Neigungsmessung und eher geringe Genauigkeiten der Lage-messung (aufgrund der begrenzten Ortsauflösung) erreicht werden. Untersuchungen zur Genauigkeit eines Lokators und zur Anordnung der Marken des Lokators sind in [Luh09] bzw. [Luh10c] vorgestellt. Die Kalibrierung dieser Systeme erfolgt über eine vorgelagerte Systemkalibrierung vor der eigentlichen Messung oder durch eine Werkskalibrierung.

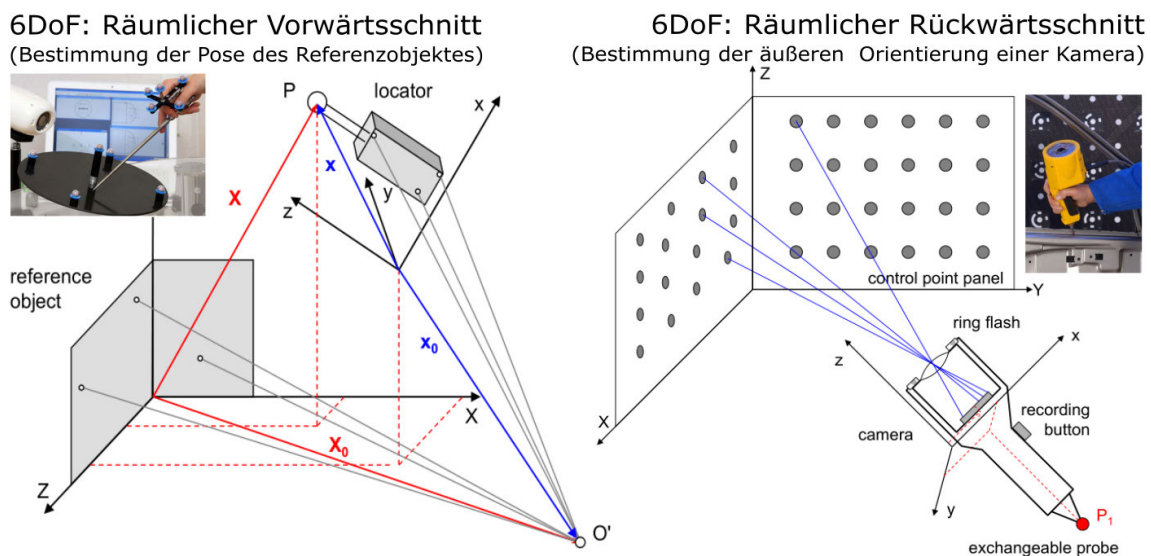


Abbildung 3.9: Funktionsprinzip 6DoF-Systeme [Luh10a]

In Tabelle 3.4 sind eine Auswahl der am Markt verfügbaren 6DoF-Messsysteme, deren Messbereiche und erreichbare Genauigkeiten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Systeme, bis auf Aicon ProCam und Wheel-Watch, ausschließlich zur Bestimmung von 3D-Koordinaten verwendet werden und somit auch keine Pose als Ergebnis ausgeben. Betrachtet man nur die Genauigkeit der 3D-Koordinaten, zeigt sich, dass diese für einen Einsatz an WZM nicht ausreichen.

In der Forschung wurden Untersuchungen zur Messung der Übertragbarkeit von DBB-Messungen und 6DoF-Messungen durchgeführt [BHF01, Hef02, Hef01, HB01]. Dabei wurde ein Kreisformtest mit einem Durchmesser von 300 mm sowohl mit einer 6DoF-Messung mit einer Kamera im Rückwärtsschnitt als auch mit einem DBB durchgeführt. Dabei konnte die Fehlercharakteristik gut abgebildet werden, eine Skalierungsabweichung war jedoch

noch zu erkennen. Im Forschungsprojekt „MultiGo“ [DGT⁺13, GTH⁺12, GTE⁺12, HGT⁺13a, HGT⁺13b] wurde eine mit dem Roboter bewegte Kameraplattform verwendet, deren Äußere Orientierung innerhalb eines mit Marken versehenen Messraums (Größe ca. 5m x 8 m x 3 m) bestimmt wurde. Mit diesem Messaufbau konnten Abweichungen gegenüber einer Messung mit einem Laser-Tracker von ca. 0.1 mm (Lage) erreicht werden. Dies entspricht im genannten Messvolumen einer relativen Genauigkeit von ca. 1 : 50000.

Tabelle 3.4: Messbereich und Genauigkeit verfügbarer 6DoF-Systeme

Hersteller		Messbereich	Genauigkeit [mm]
Axios3D [Axi18]	CamBar B1	0.15...0.35m	0.015 (3D-Punkt)
	CamBar B2	0.35...1.2m	0.250 (3D-Punkt)
Metronor [Met14]	Dou	1.5...15.0m	$\pm 0.025 + L/60000mm$
	Solo	$1.5 \times 1.5 \times 1.5m^3$	± 0.12
Aicon [AIC14]	DPS	mehrere m	< 0.10
	ProCam	mehrere m	$\pm 0.1 + 0.1mm/m$
	Wheel-Watch	0.5m	$\pm 0.m$ bzw. $\pm 0.26mm/m$

Frühere Ansätze zur Orientierung von Endeffektoren von Industrierobotern sind in [CW00, DZ13] sowie in [JK03] beschrieben. Diese konnten jedoch nicht die gleiche Genauigkeit erreichen. Im Forschungsprojekt „OptoPose“ [BSR⁺09, BSS⁺10, SRB⁺09, SBR⁺10] wurde die Pose eines mit Marken versehenen und durch einen Roboter bewegten Lokators mit bis zu 8 feststehenden Kameras getrackt. Mit diesem Aufbau konnte eine Messunsicherheit von ca. 0.1 mm bzw. 0.25 mrad in einem Messvolumen von 2 m x 2 m x 2 m erreicht werden. Dies entspricht einer relativen Unsicherheit der Lage von 1:20000. Dabei wurde festgestellt, dass die erreichbaren Unsicherheiten nicht direkt von der Kameraauflösung abhängig sind [BSS⁺10]. Insgesamt sind die erreichten Unsicherheiten jedoch größer als bei einer Messung im Rückwärtsschnitt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese in der Forschung untersuchten Systeme für den Vorwärts- und Rückwärtsschnitt für die Messung an WZM Ansätze liefern.

3.5.2 Stereobildauswertung

Kennzeichnend für die Stereobildauswertung sind die Verwendung von zwei bis drei zueinander fest angeordneten Kameras und die echtzeitfähige Ermittlung von 3D-Koordinaten signalisierter Objekte. Als Kamerasensoren kommen flächenhaft messende Sensoren (z.B. Aicon Moveinspect oder Creaform [AIC12, AME14]) und Zeilensensoren (z.B. Nikon [Nik11])

zum Einsatz. Dabei werden die 3D-Koordinaten mittels räumlichen Vorwärtsschnitts berechnet (Abbildung 3.10). Dazu ist es notwendig, dass für eine Marke mindestens zwei Bildmessungen bei Flächensensoren bzw. drei bei Zeilensensoren zur Verfügung stehen. Bei der Stereobildauswertung kann prinzipiell eine unbegrenzte Anzahl an Kameras zur Bestimmung einer Anzahl an Objektpunkten verwendet werden. Dies würde zu einer Erhöhung der Anzahl von Bildmessungen pro Marke führen und somit die Redundanz und auch die Genauigkeit steigern. Bei kommerziell verfügbaren Systemen können zwar mehrere Stereokamerasysteme in einem gemeinsamen Koordinatensystem messen, jedoch keine Bildmessungen des jeweils anderen Systems zur Zuordnung verwenden. Die Kalibrierung erfolgt genau wie bei den 6DoF-Systemen in einem vorgelagerten Kalibrierschritt bzw. in einer Werkskalibrierung. Damit sind die Kalibrierparameter nicht zeitaktuell, was durch den mechanisch robusten Aufbau der Kameraträger sowie der Kameras selbst ausgeglichen wird. Für die Messung an WZM ist dieses Vorgehen jedoch nachteilig, da die Anpassungsfähigkeit auf unterschiedliche Messvolumen dadurch stark begrenzt ist.

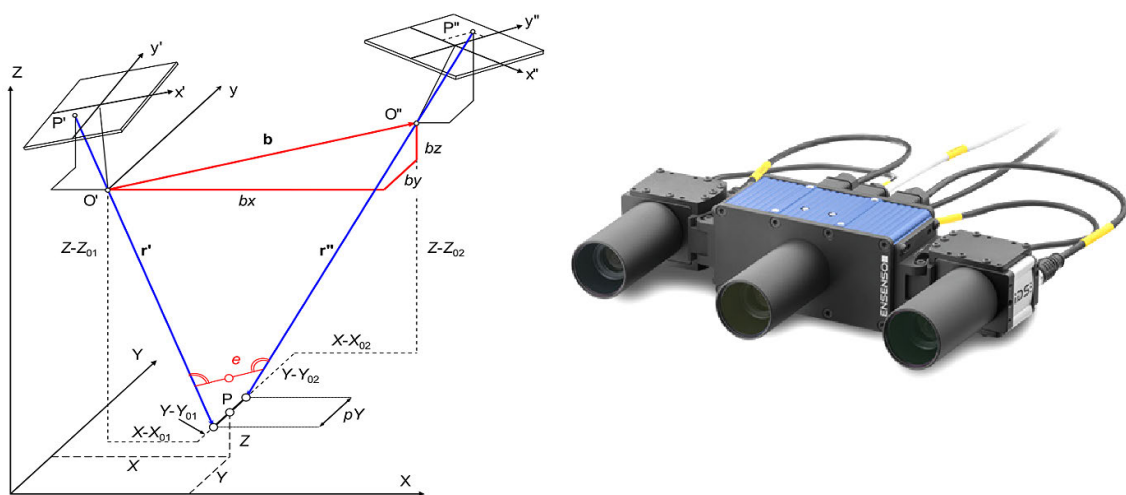


Abbildung 3.10: Schema Stereokamerasysteme, links Stereoanordnung [Luh10a] sowie IDS-Stereokamerasystem mit Streifenprojektor [IDS18]

In Tabelle 3.5 ist eine Auswahl an kommerziell verfügbaren Stereokamerasystemen und deren Arbeitsräume sowie erreichbare Genauigkeiten zusammengestellt. Zur Kalibrierung von Industrierobotern können Stereokamerasysteme als Stand der Technik betrachtet werden (vgl. [Maa99, Maa97b, CSY00, Nik11]). Jedoch muss festgestellt werden, dass meist die erforderliche Messgenauigkeit zur Kalibrierung von WZM noch nicht erreicht werden kann.

In der Forschung sind Ansätze zur Messung von Verlagerungen an WZM bekannt [LRU13]. Als relevanter Ansatz kann [HR13, BHR13] angeführt werden. Dabei wurde mit jeweils zwei Stereokamerasystemen (Aicon Move-Inspect HR mit drei 5 MPixel bzw. zwei 20 MPixel auf-

lösenden Kameras) die Verlagerung des TCP und die thermo-elastische Deformation des Maschinenständers erfasst. Die Blickfelder der Systeme betragen am TCP ca. $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ sowie am Maschinenständer $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. Damit ergibt sich am Objekt eine Ortsauflösung von ca. 0.23 mm/Pixel bzw. 0.1 mm/Pixel . Das Messrauschen der TCP-Messung betrug ca. $2\text{ }\mu\text{m}$ in X- und Z-Richtung sowie ca. $5\text{ }\mu\text{m}$ in Y-Richtung. Weiterhin waren systematische Längenabweichungen eines Referenzmaßstabs mit bis zu $8\text{ }\mu\text{m}$ zu beobachten. Die Untersuchungen wurden dabei in einer klimatisierten Werkhalle durchgeführt, sodass Einflüsse der Temperaturschwankung auf das Messsystem eher zu vernachlässigen sind.

Tabelle 3.5: Messbereich und Genauigkeit verfügbarer Stereokamerasysteme

Hersteller		Messbereich	Genauigkeit [mm]
Nikon [Nik11]	K600	17m^3	< 0.090
	K610	17m^3	< 0.060
Aicon [AIC12]	Moveinspect HF	$0.5\dots 5\text{m}$	< 0.1
	Moveinspect HR	$0.5\dots 5\text{m}$	≥ 0.02
CreaForm [AME14]	C-Track 780	7.8m^3	0.085
	C-Track 1480	14.8m^3	0.170
GV-STARS [Geo14]	DynaMo-D5	ca. 10m	$0.014 + 0.014 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$

Diese Ansätze zeigen, dass prinzipiell Messungen in dem geforderten Messbereich möglich sind. Jedoch lassen sich die Methoden aufgrund der schlechten Anpassbarkeit auf eine vollständige Erfassung des Arbeitsraums von WZM nur bedingt übertragen.

3.5.3 Bündelblockausgleichung

Im Gegensatz zum den 6DoF-Systemen und den Stereokamerasystemen wird bei der Bündelblockausgleichung eine hohe Anzahl von Aufnahmen eines Objektes einer Kamera verwendet (Abbildung 3.11). Ziel ist die Bestimmung von 3D-Koordinaten eines Objekts bzw. der Vergleich der Objektkoordinaten von wenigen Objektzuständen. Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt hier in der Regel während der Messung als On-the-Job-Kalibrierung oder als Selbstkalibrierung. Der Ablauf einer Messung ist dabei iterativ und in Bildaufnahme, Bildmessung, Zuordnung, Vororientierung, Neupunktbestimmung und Ausgleichung gegliedert. Dabei werden meist alle genauigkeitsrelevanten Parameter während der Messung bestimmt, wodurch die Messsystemkalibrierung aktuell ist. Bei kommerziell verfügbarer Software kann in der Regel nur bedingt Einfluss auf den Modellinhalt, begrenzt auf Kameramodelle und Objektpunkte, genommen werden. Damit ist es primär nur möglich,

3D-Koordinaten zu bestimmen. Es können zwar auch sogenannte Features (z.B. Adapter) definiert werden, diese setzen sich jedoch aus den 3D-Koordinaten zusammen und werden nicht, wie bei 6DoF-Systemen, aus den Bildmessungen heraus bestimmt.

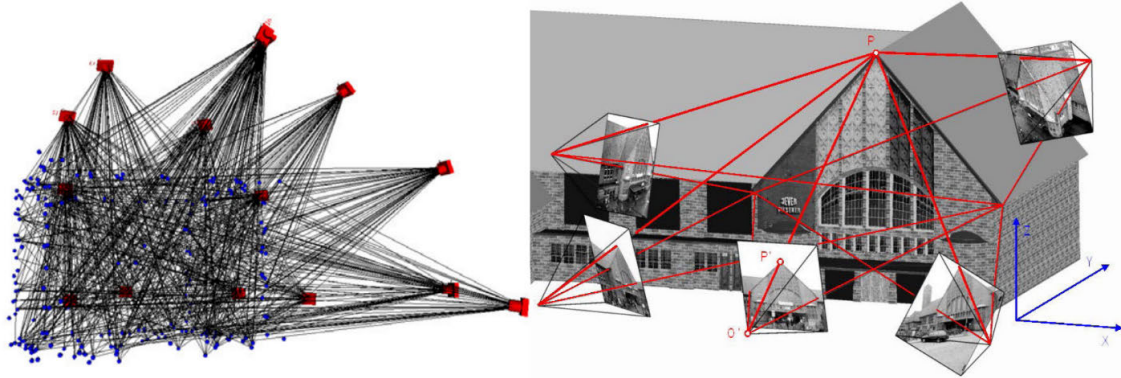


Abbildung 3.11: Schema der Bündelblockausgleichung: links Strahlenbündel [Luh10a] und rechts Anordnung von Bildern am Objekt [Luh10a]

Die Anzahl der Anbieter für Messsysteme zur Bündelblockausgleichung ist relativ gering (Tabelle 3.6). Jedoch sind die erreichbaren Messgenauigkeiten von bis zu $10\ \mu\text{m}$ in einer Größenordnung, die für Messungen an WZM geeignet sind.

Tabelle 3.6: Genauigkeit verfügbarer Systeme zur Bündelblockausgleichung

Hersteller		Genauigkeit [mm]
Linearis3D (bzw. StatusPro)[Sta15]	Standard	$0.1 (1m^3)$
	Professional	$0.030 (1m^3)$
Aicon3D [AIC10]	DPAPro	$0.003 + L * 0.007 \frac{mm}{m}$
Geodetic System (GSI) [Geo14]	VStars N - Gold	$0.007 + L * 0.007 \frac{mm}{m}$
	VStars N - Platinum	$0.005 + L * 0.005 \frac{mm}{m}$

Auch forschungsseitig sind Untersuchungen zur Bündelblockausgleichung nur begrenzt verfügbar. Eine ältere Übersicht ist in [Uff93], eine nicht mehr aktuelle Abschätzung des Genauigkeitspotenzials ist in [Maa97a] zu finden. Eine aktuelle, jedoch aufgrund von statistischen Effekten sehr optimistische Angabe ist in [PGC06] zu finden. Auch Mehrkamerasysteme können im Bündel ausgeglichen werden [SSF11]. Unterschiedliche Programme zur Berechnung sind in [WMS⁺01] vorgestellt. Eine Einordnung der Bündelblockauswertung sowie Messungen an Schienenfahrzeugen sind in [CVV⁺08] vorgestellt. Für die Implementierung ist eine Vorgehensweise in [TMHF99] vorgestellt.

Allgemein bietet der Bündelblockausgleich die Vorteile der Selbst- bzw. Simultankalibrierung sowie der flexiblen Gestaltung des Bildverbandes und kann damit 3D-Koordinaten

mit der höchsten Genauigkeit bestimmen. Jedoch ist der Messablauf prinzipbedingt nicht für Messungen an WZM automatisierbar bzw. aufgrund der benötigten Zeiten zur Datenaufnahme in der Praxis anwendbar.

3.6 Potenziale und Defizite

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass photogrammetrische Methoden prinzipiell zur Messung an WZM verwendet werden können. So besitzen einige Methoden die Fähigkeit, eine vollständige Posemessung und andere eine simultane Messung an einer hohen Anzahl an Messpunkten gleichzeitig zu realisieren. Die Eigenschaften photogrammetrischer Auswertemethoden sind in Tabelle 3.7 gegenübergestellt.

Tabelle 3.7: Eigenschaften photogrammetrischer Auswertemethoden

	Bündel	Stereo	6DoF
Kameraanzahl	meist 1	2-3	meist 1
Blickfeld	variabel	einstellbar	fest
Dauer der Aufnahme	min	msec	msec
Anzahl der Epochen	wenige	viele	viele
Selbstkalibrierung	ja	nein	nein
Redundanz	sehr hoch	gering	mittel
Genauigkeit	ausreichend	zu gering	zu gering

Insgesamt muss jedoch festgestellt werden, dass die Genauigkeit von 6DoF- und Stereokamerasystemen nicht zur Messung der Arbeitsgenauigkeit ausreichend ist (vgl. Tabelle 3.4 und 3.5). Auch sind bei den kommerziell verfügbaren Systemen Kameraanzahl und Blickfeld nur begrenzt anpassbar, was eine aufgabenspezifische Anpassung an die geometrischen Randbedingungen, beispielsweise beengte Platzverhältnisse im Arbeitsraum einer WZM, verhindert. Mit einer Optimierung der Messanordnung könnte die erreichbare Messgenauigkeit gesteigert werden (vgl. [BSS⁺10]). Mit Systemen auf Basis der Bündelblockausgleichung kann die geforderte Genauigkeit unter Laborbedingungen erreicht werden (Tabelle 3.6). Diese Methode bietet auch die Möglichkeit der Anpassung des Blickfeldes, eine hohe Anzahl der Bildmessungen pro Objektpunkt (Redundanz) und vor allem eine Selbstkalibrierung. Dies würde diese Methode zur Erfassung von Verlagerungen und Deformationen an WZM prädestinieren. Jedoch ist die Vorgehensweise der manuellen Aufnahme einer hohen Anzahl an Messbildern langsam sowie fehleranfällig. Eine Kombination der Eigenschaften aller drei vorgestellten Methoden könnte eine tragfähige Lösung zur Anwendung

photogrammetrischer Methoden im Umfeld von WZM darstellen.

Ein enormes Potenzial liegt in der Methode der modellbasierten Objektrekonstruktion (vgl. Kapitel 3.3). Diese stellt einen geschlossenen Zusammenhang zwischen Messgröße, Messanordnung und Messobjekt in einem Modell der Messkonfiguration her. Mit diesem Modell können Messkonfigurationen hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit optimiert werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, in diese Vorgehensweise auch komplexere geometrisch-kinematische, elastische oder thermo-elastische Modelle zu integrieren. Damit könnten die Modellparameter direkt bestimmt werden. Weiterhin könnte das Verhaltensmodell der Maschine mit dem Verhaltensmodell des Messsystems zusammengeführt werden, was eine Optimierung des Messablaufs und der Messanordnung ermöglicht.

Kapitel 4

Konkretisierung der Zielstellung

4.1 Bedarf

Insgesamt lässt sich ein steigender Bedarf für die Charakterisierung und Kalibrierung des Maschinenzustandes, vor allem in Hinblick auf die Anforderungen von Industrie 4.0 (Kapitel 1.3) sowie den zunehmenden Möglichkeiten von steuerungsintegrierten Korrekturen (Kapitel 2.4) feststellen. Diesen steigenden Anforderungen (Kapitel Abschnitt 2.5) können bestehende Messsysteme nur bedingt gerecht werden (Kapitel 2.7). Gründe hierfür sind die in dem geforderten Genauigkeitsbereich nicht realisierbare vollständige Posemessung sowie lediglich eine begrenzt mögliche Deformationsmessung an einer hohen Anzahl an Messstellen. Weiterhin besteht bei konventionellen Messsystemen die Möglichkeit zur Integration spezifischer Korrekturmodelle, die über geometrisch-kinematische Korrekturen hinausgehen. Auch die Generierung von maschinen- und messsystemspezifischen Messbahnen ist noch nicht gelöst. Zusammengefasst ergeben sich folgende Handlungsfelder:

1. **Vollständige Posemessung** am TCP im gesamten Arbeitsraum zur zeitlich aktuellen Erfassung geometrischer, elastischer und thermo-elastischer Abweichungen am TCP.
2. **Deformationsmessung** an Maschinenbaugruppen zur Erfassung des elastischen und thermo-elastischen Zustandes.
3. **Modellierung und Optimierung** komplexer Messanordnungen, bestehend aus Messsystem, Maschine und Maschinensteuerung.

Photogrammetrische Methoden können prinzipbedingt sowohl eine Posemessung als auch eine Messung an einer hohen Messpunktanzahl realisieren (Kapitel 3.6). Jedoch sind kommerziell verfügbare Messsysteme und die zugrundeliegenden Methoden derzeit nicht an die Anforderungen zur Messung im Umfeld von WZM angepasst oder gar darauf optimiert. Dies betrifft sowohl die Anpassung von Blickfeld und Kameraanzahl an die geometrischen Randbedingungen des Arbeitsraums als auch die teilweise manuellen Arbeitsabläufe zur Bildaufnahme. Rücksprachen mit Herstellern kommerzieller Systeme sowie erste Voruntersuchungen ergaben, dass derzeit mit kommerziell verfügbaren Systemen eine Posemessung und eine erweiterte Modellierung noch nicht möglich ist. Um das Potenzial dennoch erschließen zu können, müssen Defizite der methodischen Grundlagen untersucht und ggf. erweitert sowie in einer prototypischen Software realisiert werden.

Photogrammetrischen Methoden liegt der Ansatz der modellbasierten Ausgleichung zugrunde. Dabei werden die Abbildungsprozesse der Kamera, die geometrische Anordnung

des Messobjektes sowie teilweise auch Umgebungsrandbedingungen berücksichtigt. Diese Methodik lässt sich sowohl auf die Bestimmung von Parametern steuerungsintegrierter Korrekturmodelle als auch auf andere Messsysteme, z.B. Laserinterferometer, anwenden.

4.2 Zielstellung

Aufgrund des zunehmenden Bedarfs zur exemplarischen Erfassung und Kalibrierung des Maschinenzustandes von WZM sowie der Potenziale photogrammetrischer Methoden verfolgt die vorliegende Arbeit folgende Zielstellung:

Entwicklung einer Methodik zur hochgenauen photogrammetrischen Verlagerungs- und Deformationsmessung an WZM auf Basis einer vollständigen Modellierung der Messkonfiguration, bestehend aus Messsystem, Maschine und Maschinensteuerung.

Kern der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Erstellung geschlossener Modelle, die eine Modellierung von Messkonfigurationen unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften von Messsystem und Messobjekt ermöglicht. Als Messsysteme werden in erster Linie photogrammetrische Kameras verwendet, jedoch wird auf eine Übertragbarkeit der Methode auf konventionelle Messsysteme aus dem Umfeld der WZM geachtet. Die Priorität beim Messobjekt liegt vor allem auf der physischen Maschinenstruktur, repräsentiert durch die bewegten Gestellbaugruppen. Bei der Erstellung der Methodik wird auch auf die spätere Implementierbarkeit der steuerungsintegrierten Korrekturmodelle geachtet.

4.3 Methodik

Zur Entwicklung, Realisierung und Verifizierung des Konzepts stellen sich, ausgehend von einem allgemeinen Modellansatz (Abschnitt 5.1), folgende Forschungsfragen.

- Welche Elemente müssen in welcher Detaillierung im Modell abgebildet werden?

Die Basis hierfür ist eine Analyse der genauigkeitsrelevanten Einflüsse auf die erreichbare Messgenauigkeit (Abschnitt 5.2). Ziel ist dabei, relevante Einflussfaktoren zu identifizieren und zu charakterisieren. Aus diesen Einflussfaktoren, den photogrammetrischen Elementen und der Maschinenstruktur wird als Rahmen das Modellierungskonzept (Abschnitt 5.3)

abgeleitet. Dieser Rahmen wird durch die Modellkomponenten und deren prinzipielles Zusammenwirken im Strukturmodell gefüllt. Anhand einer beispielhaften Messkonfiguration wird abschließend der Aufbau des entstehenden nichtlinearen Gleichungssystems erläutert (Abschnitt 5.4).

- Wie kann eine Modellierung zweckmäßig in Software umgesetzt werden?

Hierfür muss die Methodik geeignet in eine prototypische Software übertragen werden (Abschnitt 6.1). Im Vordergrund stehen dabei Fragen der Implementierung und der Funktionsfähigkeit einzelner Algorithmen und der Komponenten sowie deren Zusammenwirken. Besonders relevant sind dabei die erreichbare Genauigkeit der Bildmessung (Abschnitt 6.4), die Implementierung der Modularität der Modellkomponenten (Abschnitt 6.5) sowie die Einbindung hoch optimierter BLAS-Bibliotheken (basic linear algebra subroutine) zur Modellausgleichung (Abschnitt 6.6).

- Welche Messanordnungen sind zweckmäßig?
- Welche Genauigkeitssteigerungen können erreicht werden?

Diese Fragen lassen sich beispielhaft beantworten. Der Schwerpunkt liegt dabei in Abschnitt 7.1 auf der Analyse von Maschinenkomponenten sowie in Abschnitt 7.2 auf der Analyse der Gesamtmaschine. Vorgestellt werden die Erfassung von TCP-Bewegungen zur Charakterisierung und Optimierung, der Bestimmung von elastischen Eigenschaften von Maschinenkomponenten sowie der Erfassung der geometrisch-kinematischen Abweichungen einer translatorischen Vorschubachse. Zur Analyse von Maschinen standen zwei Parallelkinematiken zur Verfügung, bei denen die Parameter der geometrisch-kinematischen Korrekturmodelle bestimmt und die Verbesserung experimentell verifiziert werden. Weiterhin wird eine maschinenintegrierte Messkonfiguration erstellt, mit der sich sowohl die geometrisch-kinematischen Fehler als auch die thermo-elastischen Verlagerungen erfassen lassen. Abschließend wird eine komplexe Messkonfiguration mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation simuliert und experimentell verifiziert (Abschnitt 7.3).

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei auf der Entwicklung einer Methodik zur Modellierung des photogrammetrischen Messaufbaus und der Maschinen sowie den sich daraus ergebenden Potenzialen und ggf. Grenzen. Dies stellt an WZM einen vollkommen neuen Ansatz dar. Bisher werden Messsystem, Messaufbau, Fehlermodell sowie die Messbahn meist nicht als geschlossenes System betrachtet bzw. in einem Modell zusammengeführt.

Kapitel 5

Entwicklung eines Modellierungs- konzeptes für WZM

Ausgangspunkt für die Herleitung eines Modellierungskonzeptes sind Methoden zur Modellierung aus der Ingenieurgeodäsie. Basis hierfür ist eine Analyse der relevanten Einflüsse unter den spezifischen Bedingungen an der WZM, um die Modellobjekte definieren und ihren Detaillierungsgrad abschätzen zu können. Daraus folgt die Ableitung des Konzeptes und der benötigten Modellelemente. Abschließend werden die Vorgehensweise und die daraus entstehenden Potenziale anhand einer beispielhaften Messkonfiguration erläutert.

5.1 Struktur und Parameter der Modelle

Das Modell verbindet dabei ein Maschinenmodell und ein photogrammetrisches Abbildungsmodell. Das Ziel ist dabei, durch eine geeignete Modellierung die Fehler der Maschine möglichst gut auf das Messsystem zu projizieren, um die Detektierbarkeit gewährleisten zu können. Das photogrammetrische Modell stellt jedoch auch Anforderungen an das Maschinenmodell, die berücksichtigt werden müssen, um eine optimale Detektierbarkeit der Fehler sowie eine Kalibrierfähigkeit des Messsystems sicherstellen zu können.

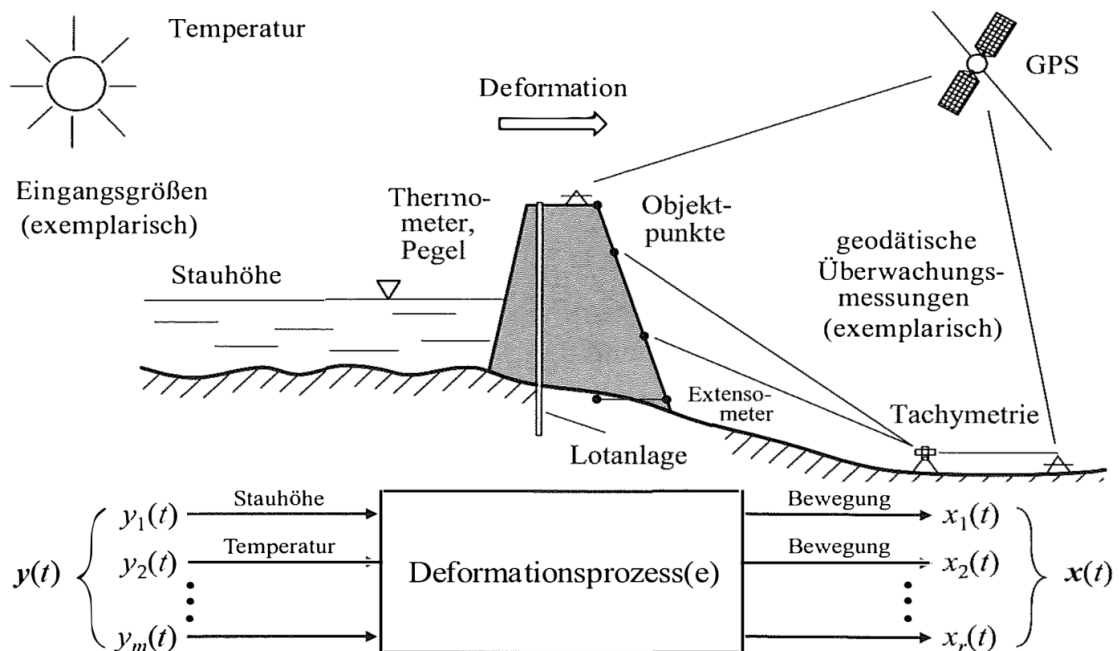


Abbildung 5.1: Beispiel für eine komplexe Überwachung: Modell-Staudamm [HKW⁺13]

5.1.1 Analogien aus der Ingenieurgeodäsie

In der Ingenieurgeodäsie ist eine Modellierung komplexer Messanordnungen üblich. Beispielhaft dafür sind in Abbildung 5.1 Anordnung und Einflussgrößen einer Deformations-

messung eines Staudamms dargestellt. Dabei werden Messungen unterschiedlicher Messsysteme $y(t)$, wie GPS, Tachymeter oder Extensometer, zur Bestimmung der Bewegung des Staudamms $x(t)$ zusammengeführt. Der Kern ist dabei die Erstellung eines funktionalen Modells der Deformationsprozesse in Abhängigkeit aller relevanten Einflüsse $x(t) = f(y(t))$.

Weitere Beispiele für diese Vorgehensweise sind temperatur- und entfernungsabhängige Korrekturmodelle für Interferometer und Laser-Tracker, die simultane Bestimmung von Hauptpunktlage und Brennweite bei 6DoF-Messungen [Luh10b], die Modellierung elastischer Deformationen von Rotorblättern [JSL15], die Kalibrierung dynamischer Prozesse [Dep09] oder die Modellierung von Synchronisationseffekten bei Mehrkamerasystemen [RH06, RH05].

Das Ziel ist es, diesen Ansatz auf die Modellierung einer photogrammetrischen Messkonfiguration an einer WZM zu übertragen.

5.1.2 Modell einer Maschine

Für die Modellierung der Maschine gelten sowohl geometrische als auch kinematische Restriktionen, die berücksichtigt werden müssen. Geometrische Restriktionen sind dabei Sichtbarkeit, Größe und Form von Arbeitsraum und zu überwachender Objekte (Abbildung 5.2, oben).

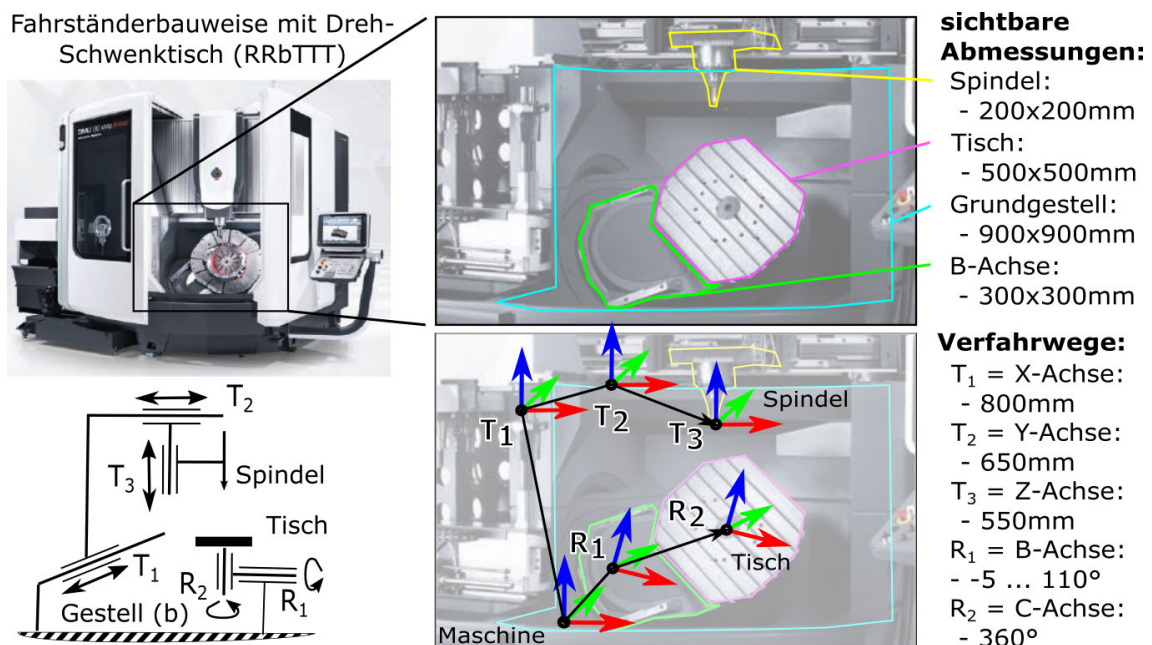


Abbildung 5.2: Zugänglichkeit und kinematische Struktur einer DMU80 [DMG14b]

Am Beispiel der DMU80 sind nur Gestell, Tisch und B-Achse gut sichtbar. Der sichtbare Teil der Spindel ist relativ klein und weist wenige Flächen auf, die für eine Signalisierung für das optische Messsystem geeignet sind. Die translatorischen Achsen sind vollständig durch Abdeckungen verborgen. Eine direkte Erfassung ist, wenn überhaupt, nur mit einem enormen Aufwand möglich.

Aus der kinematischen Anordnung der Vorschubachsen wird das geometrisch-kinematische Fehlermodell der Maschine aufgebaut (vgl. Abschnitt 2.4). Dabei wird für das statische Verhalten von Starrkörpern und für das elastische bzw. thermo-elastische Verhalten von einer Deformation der Gestellbauteile ausgegangen. Am TCP überlagern sich die Fehleranteile der Achsen der kinematischen Ketten, am Beispiel der DMU80 R_1 und R_2 sowie T_1 , T_2 , T_3 , jeweils am Tisch und an der Spindel (Abbildung 5.2 unten). Für die Korrekturmodelle ist eine Zuordnung der Fehlerursachen zu den Achsen sowie ihrer räumlichen Anordnung zwingend notwendig (vgl. Abbildung 2.4).

5.1.3 Modell eines Messsystems

Das Modell von photogrammetrischen Messsystemen besteht aus Kameras und Marken bzw. von Punktgruppen (Lokator bei 6DoF-Systemen). Weitere Verknüpfungen werden in der Regel nicht modelliert, um das Modell möglichst schlank zu halten (Abbildung 5.3).

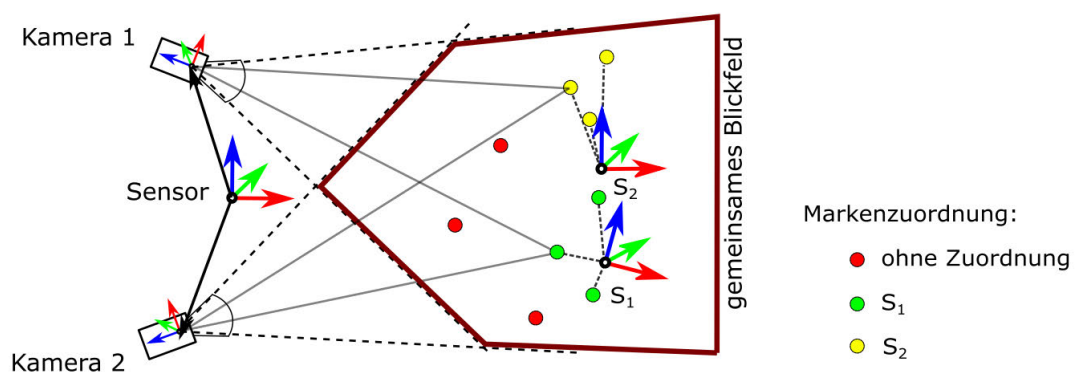


Abbildung 5.3: Komponenten, Blickfeld und Modell eines Stereokamerasystems

Es können ausschließlich 3D-Koordinaten von Marken bestimmt werden, die sich im gemeinsamen Blickfeld beider Kameras befinden. Eine Zuordnung der 3D-Koordinaten zum Messobjekt erfolgt, außer bei 6DoF-Systemen, in einem nachgelagerten Schritt. Dabei sind für die erreichbare Genauigkeit die Anzahl und Anordnung der Marken im gemeinsamen Blickfeld ausschlaggebend. Kritisch ist dabei die Bestimmung der Objektneigung. Beispielsweise summieren sich in der Orientierung des Objektes S_1 die Unsicherheiten der 3D-

Koordinaten der Objektpunkte aufgrund des sehr geringen Abstandes der Marken zueinander ungünstig auf. Beim System S_2 wirkt sich dieser Transformationsfehler weiterhin auf die Lage des Systemursprungs aus. Parameter des photogrammetrischen Messsystems sind die Innere und Äußere Orientierung der Kameras, welche in der Messsystemkalibrierung ermittelt werden müssen. Außer bei der Bündelblockausgleichung sind Messsystemkalibrierung und Messung voneinander getrennt. In der Regel kann bei einer Online-Messung der 6DoF- und Stereokamerasysteme nicht davon ausgegangen werden, dass der Informationsgehalt für eine teilweise oder gar vollständige Kalibrierung des Systems ausreichend ist. Bei der Bündelblockausgleichung werden die benötigten Informationen durch die hohe Anzahl und vorgeschlagene Anordnung der Messbilder (Bildverband) sowie durch eine ausreichende Anzahl und geeignete Anordnung von Maßstäben sichergestellt.

5.1.4 Modell von Maschine und Messsystem

Das Modell verbindet die kinematische Struktur der Maschine mit dem photogrammetrischen Modell (Abbildung 5.4). Damit ist eine Zuordnung von Marken und Kameras zu den Elementen der Maschine und damit zu den gesuchten Abweichungen der Vorschubachsen und des TCP der Maschine direkt möglich. Weiterhin ergeben sich neue Konfigurationsmöglichkeiten, beispielsweise die Messung der Spindelpose durch die Kamera 1 und Kamera 2 als Kombination einer Messung im Vorwärts- und Rückwärtsschnitt.

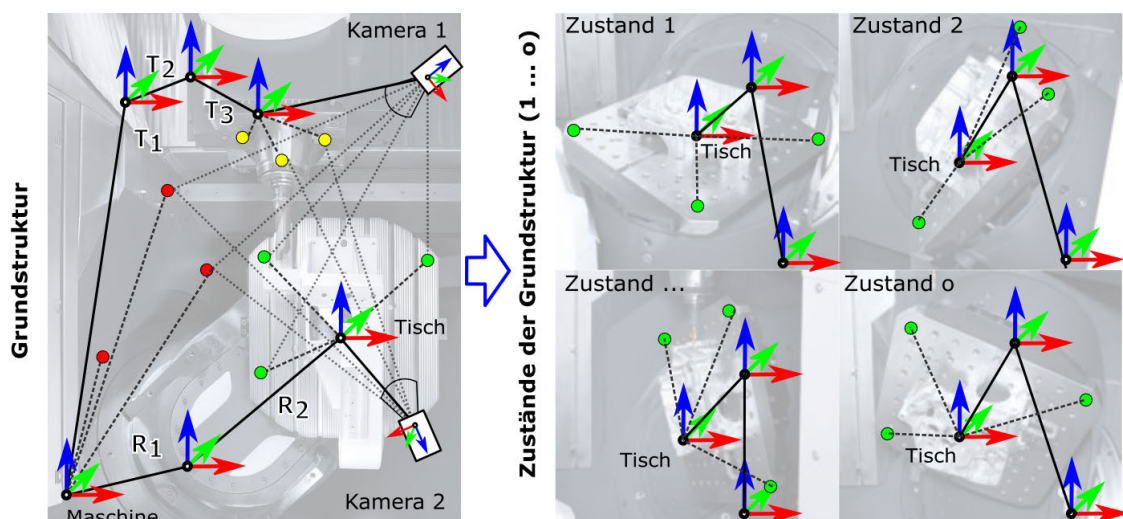


Abbildung 5.4: Gesamtmodell aus Maschine und Messsystem (links) sowie mögliche Zustände des Modells (rechts)

Die Parameter eines Modells der Struktur sowie des Gesamtmodells mit o Objektzuständen sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Die benötigten Elemente für die Struktur sind dabei Koordi-

natensysteme, Kameras sowie Marken. Die Anzahl der Parameter der Objekte sind dabei festgelegt. Es sollte im Modell frei entschieden werden können, ob sie vorgegeben (z.B. Soll-Position) oder ob sie ausgeglichen (z.B. Posefehler) werden. Eine Zusammenfassung der Maschinenzustände zu dem Gesamtmodell, bestehend aus allen n einzeln angefahrenen Messpositionen, ist zweckmäßig. Damit können einerseits veränderliche als auch unveränderliche Größen im Modell separat berücksichtigt werden. Beispielsweise können Marken entweder als unveränderlich angenommen werden, was dem Verhalten eines Starrkörpers entspricht, oder als veränderlich, was einer Deformation gleicht.

Tabelle 5.1: Elemente und Parameter von Modellstruktur und Gesamtmodell

Objekt	Parameter (o Objektzuständen)	
	Struktur	Gesamtmodell
Koordinatensystem	6	$o * 6$
Kamera	$6 + 13$	$6 + 13$
Marke (Starrkörper)	3	3
Marke (Deformation)	3	$o * 3$

Mit diesem Ansatz können die Struktur und die Parameter des Modells beschrieben werden. Dies entspricht einem ungestörten Modell, was in der Praxis nicht vorkommt. Um die Störgrößen auf das Modell abschätzen zu können, bietet sich eine Analyse der genauigkeitsrelevanten Einflüsse auf die Messung an.

5.2 Genauigkeitsrelevante Einflussgrößen

Allgemein sind relevante Einflussgrößen auf die erreichbare Messgenauigkeit neben dem Objekt, dem Beobachter und dem Referenzsystem vor allem das Messgerät (Messsystem), der Messvorgang sowie die Umgebungsbedingungen (Abbildung 5.5). Diese können auf die Messkonfiguration an der WZM übertragen werden (Tabelle 5.2).

Einflüsse von Beobachter und Messablauf werden für die Ableitung des Modellkonzeptes nicht betrachtet. Angestrebt werden möglichst automatisierte Kalibrier- und Messzyklen sowie eine direkte Datenübernahme von der Maschine zur Minimierung von Bedien- und Übertragungsfehlern. Als Haupteinflüsse auf die Genauigkeit photogrammetrischer Messungen werden, beispielsweise in [Jat11], Temperatureinflüsse wie die Änderung der Umgebungstemperatur sowie lokale Temperaturgradienten von 1 K/m angeführt. Wenn der Temperaturgradient unter den spezifischen Randbedingungen eine relevante Größenord-

nung erreichen sollte, müssen diese in der Modellierung berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.1.2).

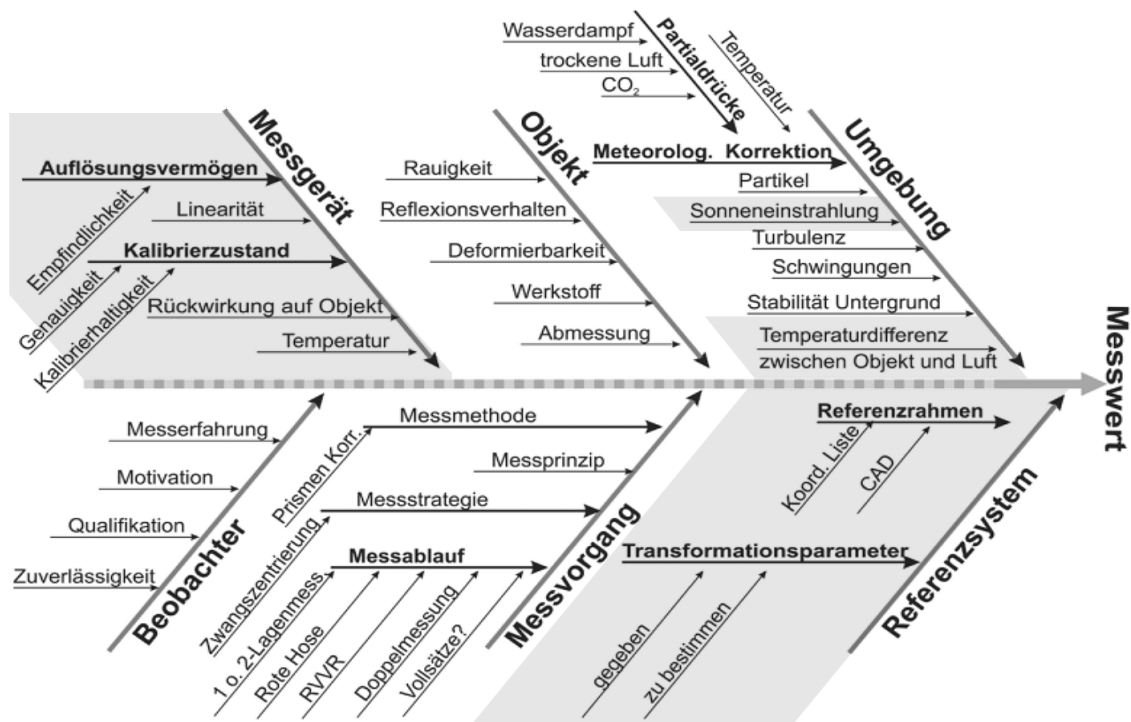


Abbildung 5.5: Beispielhafte Zusammenstellung allgemeiner Einflussgrößen auf eine Messung [Hen07]

Weiterhin ist das Messgerät, die Kamera und der Sensor, von zentraler Bedeutung, da die Bildmessunsicherheit maßgeblich die erreichbare Messgenauigkeit vorgibt. Aus diesen Gründen wird Güte und Stabilität der Bildmessung im Vorfeld unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen experimentell verifiziert.

Tabelle 5.2: Genauigkeitsrelevante Einflüsse und Faktoren

Einfluss		Einflussfaktoren
Messgerät	Auflösungsvermögen	Sensor, Messanordnung, Messvorgang
	thermische Stabilität	innere und äußere Temperaturquellen
	Kalibrierzustand	Sensor, Messvorgang
Objekt	Abmessungen	Größe, Zugänglichkeit
	Deformation	elastische und thermo-elastische Dehnung
Referenzsystem	Maßstab	thermo-elastische Dehnung, Kalibrierung
	Transformationsparameter	Sichtbarkeit des Bezugssystems

Ein weiterer Einfluss ist das Referenzsystem. Relevante Punkte sind dabei Unsicherheiten, die sich aus der Transformation ins Referenzsystem, der Stabilität des Messobjektes sowie der optischen Zugänglichkeit der Messstellen ergeben können.

Besonders schwer lässt sich der Temperatureinfluss auf die Messung sowie, aus Sicht des Maschinenbaus, das Auflösungsvermögen und die Stabilität der Bildmessung beurteilen.

5.2.1 Temperaturverteilung und -schwankung

Um die in einer repräsentativen Maschinenhalle auftretenden Gradienten und Schwankungen von Temperaturverteilung und -schichtung abschätzen zu können, wurde über einen Zeitraum von mehreren Wochen die höhenabhängige Temperaturänderung aufgezeichnet. In Abbildung 5.6 sind Messaufbau und Temperaturverlauf über 24 Stunden dargestellt.

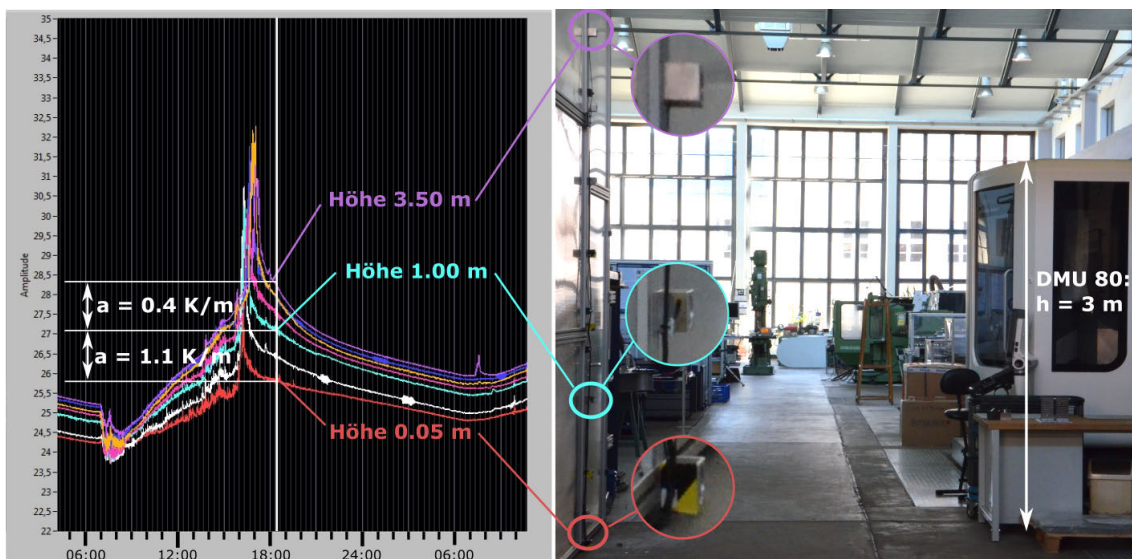


Abbildung 5.6: Beispiele für Temperaturverlauf und -schichtung eines Werktages in der Versuchshalle

Zu Beginn der Aufzeichnung ist im Temperaturverlauf das Öffnen des Hallentors zu Schichtbeginn als Temperaturabfall und Durchmischung der Hallenluft gegen 7:00 Uhr auf 23.8...24.5 °C erkennbar. Temperaturgradienten sind aufgrund der Durchmischung kaum vorhanden. Anschließend steigt während des Tages die Hallentemperatur bis 16:00 Uhr stetig auf 25.5...27.5 °C an. Dabei stellt sich in Bodennähe ein Temperaturgradient von bis zu 0.8 K/m ein. Das Rauschen der Temperaturmessung wird dabei durch den Luftzug, bedingt durch das geöffnete Hallentor, an der Messstelle verursacht. Im weiteren Verlauf zeigt sich ein ausgeprägter Temperatursprung auf maximal 32.5 °C, der durch eine direkte

Sonneneinstrahlung durch das Oberlicht der Halle hervorgerufen wird. Die größten Temperaturgradienten stellen sich mit 0.4 K/m in einer Höhe von über einem Meter bzw. von 1.1 K/m in Bodennähe bei der Abkühlung der Halle über Nacht ein. Der maximale Temperaturhub (Tag-Nacht) lag bei ca. 8 K.

Diese beispielhafte Messung erhebt keinen allgemeingültigen Anspruch, kann jedoch zur Abschätzung der Randbedingungen verwendet werden. Dabei ist deutlich ersichtlich, dass in der Versuchshalle keine thermischen Referenzbedingungen von 20 °C herrschen (vgl. [DIN16]) und dass Temperaturgradienten in Bodennähe von über 1 K/m sowie größere Temperaturschwankungen von bis zu 10 °C zu erwarten sind.

5.2.2 Temperatureinfluss auf die Sichtstrahlableitung

Aufgrund der Temperaturänderungen und -gradienten können die Abschätzungen aus Abschnitt 3.1.2 bestätigt werden. Die zu erwartenden Abweichungen werden bei einem Gradienten von ca. 1 K/m und einer Sichtstrahlänge von ca. 5 m in der Größenordnung von ca. 30 µm am Objekt liegen. Da dieser Wert deutlich größer als die angestrebte Genauigkeit ist, müssen diese Effekte entweder bei der Modellierung berücksichtigt oder die Sichtstrahlen in einem Bereich von unter 1...2 m gehalten werden.

5.2.3 Temperatureinfluss auf den Maßstab

Ein relevanter Einfluss auf die Genauigkeit photogrammetrischer Messungen ist die Güte des Maßstabes. Die Genauigkeit kommerziell erhältlicher, kalibrierter Maßstäbe ist auf ca. 4.5 µm/m begrenzt (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Am Institut vorhandene kalibrierte Maßstäbe mit DKD-Zertifikat

Typ	Länge [mm]	u (95%) [µm]	Δl (+10K)
Aicon	506-507	739.615	3.7
	508-509	1340.118	5.8

Weiterhin ist die Länge der Maßstäbe, offenbar aus Gründen der Handhabbarkeit, auf ca. 2 m limitiert. Die Maßstäbe sind aus möglichst ausdehnungsneutralen Materialien, glas- und carbonfaserverstärktem Kunststoff (GFK bzw. CFK), mit einem kombinierten Ausdehnungskoeffizienten von $-0.2 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ hergestellt. Die Gesamtunsicherheit der Maßstäbe (Δl), unter Berücksichtigung der thermisch bedingten Längendehnung, summieren sich

auf ca. $\Delta l \approx 7...8 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Weiterhin kann die Kalibrierung der Maßstäbe von unterschiedlichen Randbedingungen bei der Messung, beispielsweise von der verwendeten Software, abhängen. Beispielsweise wurde in einem leider nicht repräsentativen Ringtest eine Längenabweichung des gleichen Maßstabes (Nennmaß 1340 mm) bei drei Messungen von ca. $\Delta l \approx 25 \mu\text{m}$ festgestellt [EKS11]. Insgesamt führt dies zu Bestrebungen, die Maßstäbe möglichst zeitnah, beispielsweise mit einem Aufbau aus [Val11], zeitaktuell unter vergleichbaren Bedingungen selbst einzumessen.

Damit liegt die Genauigkeit der photogrammetrischen Maßstäbe ungefähr in der gleichen Genauigkeitsklasse direkter Wegmesssysteme von WZM. Beispielsweise sind die Messsysteme mit einer Genauigkeit von $2 \mu\text{m}$ und einer Länge von bis zu 10 m verfügbar [Dr.16]. Typische Ausdehnungskoeffizienten von Glas und Stahlmaßstäben liegen mit $5...10 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ [Ren06, Ren18] höher als von photogrammetrischen Maßstäben, jedoch sind diese vor allem bei temperierten Maschinengestellen meist sehr gut gegenüber inneren und äußeren Temperatureinflüssen geschützt. Als Konsequenz können die direkten Wegmesssysteme der WZM als Maßstab verwendet werden. Andernfalls sollten die photogrammetrischen Maßstäbe zeitnah kalibriert und der thermische Zustand berücksichtigt werden.

5.2.4 Erwärmung von Kamera und Objektiv

Bei Industriekameras lässt sich, abhängig von Kameratyp, Hersteller und Datenbus, eine teils deutliche Erwärmung von Kameragrundkörper und Objektiv feststellen. Beispielhaft hierfür ist in Abbildung 5.7 oben der Erwärmungs- und Abkühlungsverlauf einer Industriekamera (Jay Go5000, USB 3.0) mit Objektiv dargestellt. Dabei ist eine schnelle und deutliche Erwärmung des Kameragehäuses erkennbar. Weiterhin erfolgt eine zeitverzögerte Wärmeleitung von Grundkörper hin zum Objektiv. Der Beharrungszustand wird nach ca. 90 min, bei einer Erwärmung von bis zu 21 K gegenüber der Umgebungstemperatur, erreicht. Nach Trennung der Stromversorgung erfolgt in 90 min eine Abkühlung der Kamera auf Umgebungsniveau. Aufgrund der verwendeten Materialien von Kameragehäuse und Objektiv und deren Ausdehnungsverhalten (Kameragehäuse: Aluminium $\alpha \approx 23 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Objektiv: Kunststoff $\alpha \approx 80...160 \mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ergeben sich zwangsläufig Veränderungen der Linsenordnung und vor allem der Brennweite $c = 12.5 \text{ mm}$ von ca. $25 \mu\text{m}$. Diese Größenordnung ist für den angestrebten Einsatzzweck in hohem Maße genauigkeitsrelevant und muss berücksichtigt werden.

Ergebnisse von Untersuchungen [Han07, HGT⁺13b] hinsichtlich der Auswirkungen auf die

Bildmessung sind in Abbildung 5.7 unten beispielhaft dargestellt. Dabei zeigt sich ein starker Temperatureinfluss auf die Brennweite. Die Charakteristik der Änderungen der Bildkoordinaten ist mit denen von Refraktionseinflüssen ähnlich. Ein direkter Vergleich der zu erwartenden Größenordnungen ist aufgrund der unterschiedlichen Messkonfigurationen nicht möglich, jedoch sind Größenordnungen im Bereich von bis zu 0.5 Pixel zu erwarten.

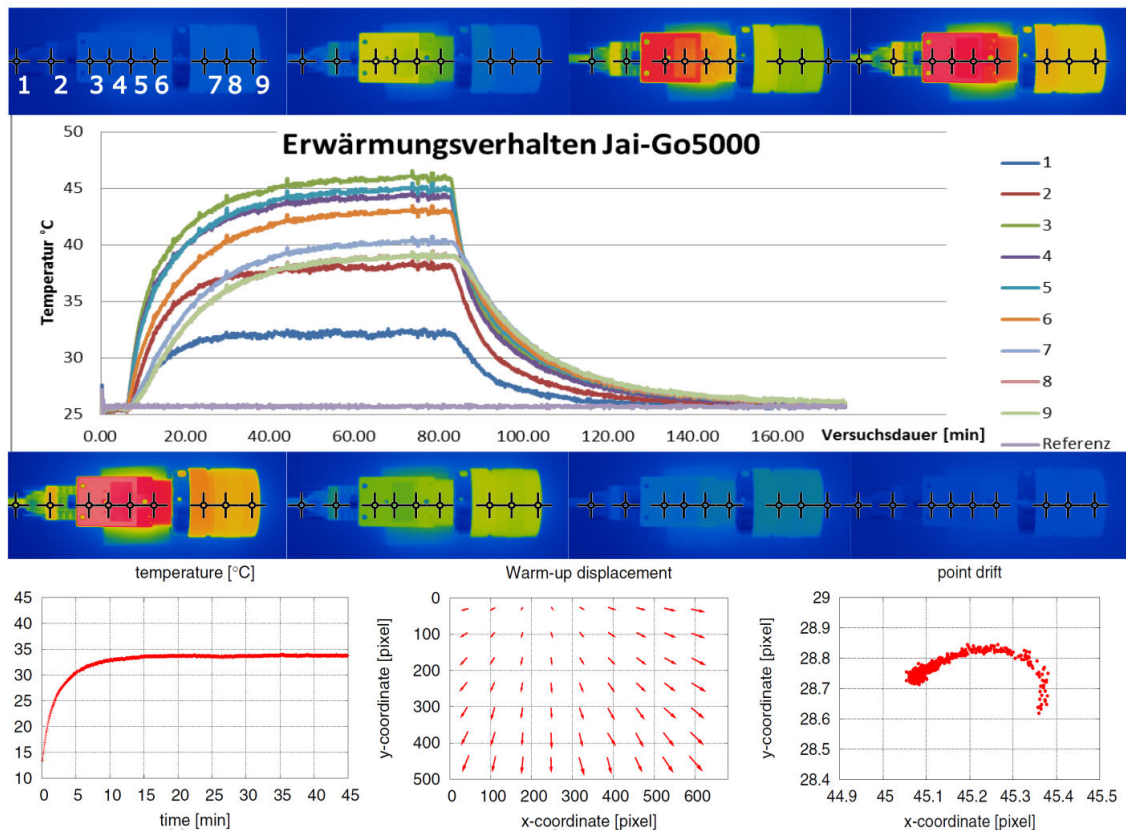


Abbildung 5.7: Oben Aufwärmung von Kamera und Objektiv und unten Auswirkungen auf die Bildmessung [Han07, HGT+13b]

Eine Berücksichtigung des Erwärmungsverhaltens im Modell ist aufgrund der hohen Fehlerwirkung anzustreben. Dies ist jedoch in der Praxis aufgrund der fehlenden Temperatursensoren auf oder in den Kameras schwierig zu realisieren. Wenn eine Überwachung möglich ist, sollte eine Nachführung der genauigkeitsrelevanten Parameter, beispielsweise Hauptpunktlage oder Brennweite, in Abhängigkeit der Temperatur durchgeführt werden. Ein pragmatischer und oft verwendeter Lösungsansatz ist, die Kameras bis zu dem thermischen Beharrungszustand aufzuwärmen und anschließend zu kalibrieren. Wenn keine Erfassung des temperaturabhängigen Verhaltens der Kameras möglich sein sollte, kann alternativ dieser Weg verfolgt werden.

5.2.5 Beleuchtungseinflüsse auf die Bildmessung

In der Literatur ist wenig über Einflüsse der Beleuchtung auf die Güte der Bildmessung zu finden. Es ist jedoch bekannt, dass die in [Luh10c] genannten theoretischen Genauigkeiten der Bildmessung von bis zu 0.004 Pixel (Abbildung 3.5) in der Praxis nicht erreichbar sind. Zur experimentellen Überprüfung der erreichbaren Unsicherheit wurde eine Marke auf einem Positionier-Tisch angebracht und mit einer senkrecht darüber positionierten Kamera beobachtet. Dabei wurden in einem Messdurchlauf über mehrere Stunden bei einer stufenweisen Variation der Belichtungszeit jeweils eine hohe Anzahl an Messungen des Durchmessers und Mittelpunkts der Marken durchgeführt. Als Beleuchtung wurde die natürliche Sonneneinstrahlung verwendet. In Abbildung 5.8 sind die Veränderung der Markenposition in X- und Y-Richtung sowie der Grauwert von Markenkern und Kontraststring in Abhängigkeit der Versuchsdauer dargestellt.

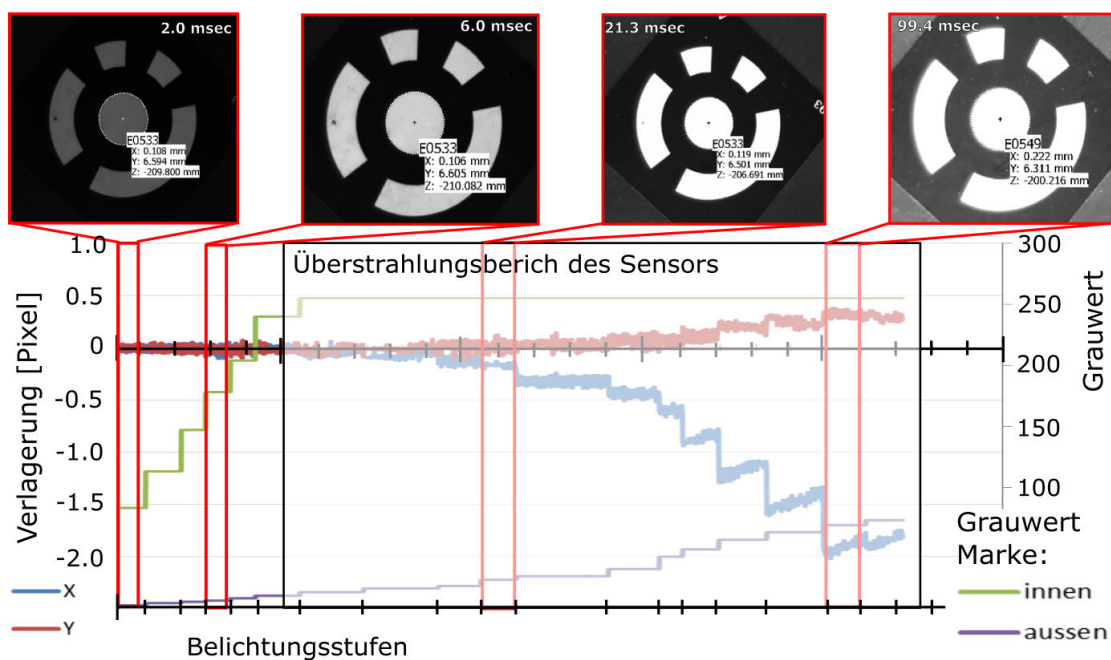


Abbildung 5.8: Einfluss der Markenelligkeit bzw. der Beleuchtung auf die Mittelpunktkoordinate einer Bildmessung

Im zulässigen Helligkeitsbereich, unter einem Grauwert von ca.225 zeigt sich keine auffällige Verlagerung des Markenmittelpunktes. Im Überstrahlungsberreich des Sensors sind jedoch deutliche Verlagerungen des Markenmittelpunktes von bis zu 2 Pixel erkennbar. Auch wenn diese hohen Abweichungen in einem Bereich der Überstrahlung der Marke mit einem inneren Grauwert von 255 auftraten, konnte ein sehr hoher Einfluss der Beleuchtung festgestellt werden. Dies hat zur Konsequenz, dass dieser Effekt tiefergehend untersucht

werden muss, um die Auswirkungen bei der Objektrekonstruktion zu quantifizieren oder ggf. ein Korrekturmodell abzuleiten.

5.2.6 Berücksichtigung der Einflüsse

Zur Berücksichtigung der Einflüsse auf Messgerät, Objekt und Referenzsystem bieten sich unterschiedliche Strategien an (Tabelle 5.4). Da der Einfluss auf das Gesamtsystem nur schwer einschätzbar ist, sollte die Temperatur während einer Messung prinzipiell konstant gehalten und überwacht werden. Zur Minimierung von Refraktionseinflüssen sollte die Sichtstahllänge möglichst gering gehalten werden. Eine Modellierung der Temperatureinflüsse auf die Messobjekte und die Sichtstrahlauslenkung ist perspektivisch anzustreben.

Tabelle 5.4: Berücksichtigung der genauigkeitsrelevanten Einflüsse

	Einfluss	Maßnahmen
Messgerät	Auflösungsvermögen	Optimierung von Messanordnung und Messvorgang
	thermische Stabilität	Überwachung der Temperaturquellen, ggf. Berücksichtigung im Modell
	Kalibrierzustand	Selbst- bzw. Simultankalibrierung, Überwachung der Kalibrierung
Objekt	Abmessungen	Größe, Verkleidungen
	Deformation	Modellierung der Deformation
Referenzsystem	Maßstab	Modellierung und Überwachung
	Transformationsparameter	Sichtbarkeit des Bezugssystems

Eine besondere Relevanz besitzt allerdings eine Optimierung der Messkonfiguration, um das Auflösungsvermögen der Kameras optimal ausnutzen zu können. Dazu gehört, dass die gesuchten Fehler optimal in das Kamerabild übersetzt werden, um auch geringe Fehler detektieren zu können. Weiterhin muss, um dieses Potenzial heben zu können, die Kalibrierung des Messsystems möglichst als Selbstkalibrierung realisiert werden. Die genauigkeitsrelevanten Einflüsse des Messobjektes hinsichtlich elastischer und thermo-elastischer Deformation müssen als zu ermittelnde Größen im Modell abgebildet werden. Den Einfluss der fehlenden Zugänglichkeit bzw. der geringen Größe der zu erfassenden Objekte kann durch eine indirekte Messung der Abweichungen sowohl durch einen geeigneten Messzyklus als auch durch eine 6DoF-Messung im Rückwärtsschnitt erfolgen.

Die Basis ist jedoch die Modellierung der kinematischen Struktur der Maschine. Sie soll die zu ermittelnden Fehlergrößen abbilden und als Referenzsystem dienen. Da die Fehlergrö-

ße gegenüber dem Vorschubweg differenziell gering sind, können die Vorschubrichtungen in ersten Näherungen als Referenzsystem verwendet werden. Zur Einbringung des Maßstabes sind prinzipiell, sofern vorhanden und thermisch geschützt eingebaut, direkte Wegmesssysteme der WZM geeignet. Damit lassen sich Transformationsfehler minimieren.

5.3 Modellierungskonzept

Die Ziele dieses Modellierungskonzepts sind die Bestimmung von Verlagerungen des TCP gegenüber der Bewegungsvorgabe, von Deformationen der Baugruppen unter mechanischen bzw. thermischen Lasten sowie die Bestimmung von Parametern der implementierten Korrekturmodelle. D.h. das Modell soll die Pose des TCP relativ zum Maschinentisch, 3D-Koordinaten zur Deformationsmessung sowie ggf. Korrekturparameter bestehender Deformationsmodelle als Ausgangsgrößen $x(t)$ berechnen können. Dafür stehen als Messgrößen $y(t)$ die Bildmessungen der Kameras, die Ist-Position der Maschine aus den Wegmesssystemen sowie, wenn benötigt, Temperaturmessungen von Maschine und Umgebung zur Kontrolle und Erfassung der thermischen Lastgrößen zur Verfügung (Abbildung 5.9). Als Messsystem sollen Industriekameras sowie aufgrund ihres hohen Genauigkeitspotenzials Marken (Abbildung 3.5) zum Einsatz kommen. Als Soll-Position wird hier die in der Steuerung vorgegebene Ist-Position der Maschinenachsen verwendet. Weiterhin ist eine Einbeziehung der Umgebungseinflüsse, vor allem der Umgebungstemperatur, aufgrund der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Einflüsse auf die Bildmessung notwendig.

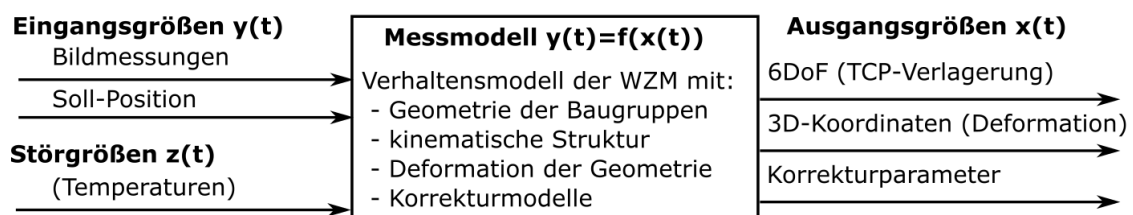


Abbildung 5.9: Modellierung einer Messkonfiguration an einer WZM

Das Messmodell muss dabei als stetige, in jedem Punkt linearisierbare Übertragungsfunktion zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen aufgestellt werden (Kapitel 3.3.3).

5.3.1 Einordnung und Bestandteile des Modells

In Abbildung 5.10 sind dafür eine schematische Grundstruktur sowie die zu übertragenden Größen auf Basis einer Ausgleichung mit Nebenbedingungen (Abschnitt 3.3.6) zusam-

mengefasst. Eingangsgrößen des Messmodells sind die zugeordneten Bildmessungen und Parametervorgaben, beispielsweise Soll-Positionen der Achsen oder bekannte Parameter von Modellobjekten. Das Modell liefert an die Modellausgleichung den Parametervektor x , die Jacobi-Matrix A , die simulierten Bildpunkte $L(X)$ sowie bei Verwendung von Zusatzbedingungen die Bedingungsmatrix B und den Widerspruchsvektor w . Mit diesen Größen kann eine Ausgleichung mit Nebenbedingungen durchgeführt werden (vgl. Gleichung 3.22). Messmodell und Bildmessung stellen alle Parameter des linearisierten Gleichungssystems von Typ $l = Ax$ bereit, welches formal in der Modellausgleichung gelöst werden kann.

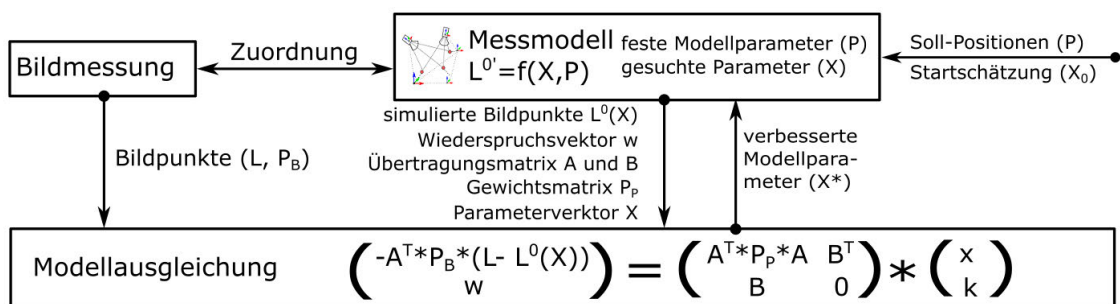


Abbildung 5.10: Bestandteile und Schnittstellen der Modellumgebung

5.3.2 Referenzrahmen und Umgebungsmodell

Im Umgebungsmodell sind Umgebungstemperatursensoren UT mit bekannter Position im Weltkoordinatensystem platziert (vgl. Abbildung 5.12).

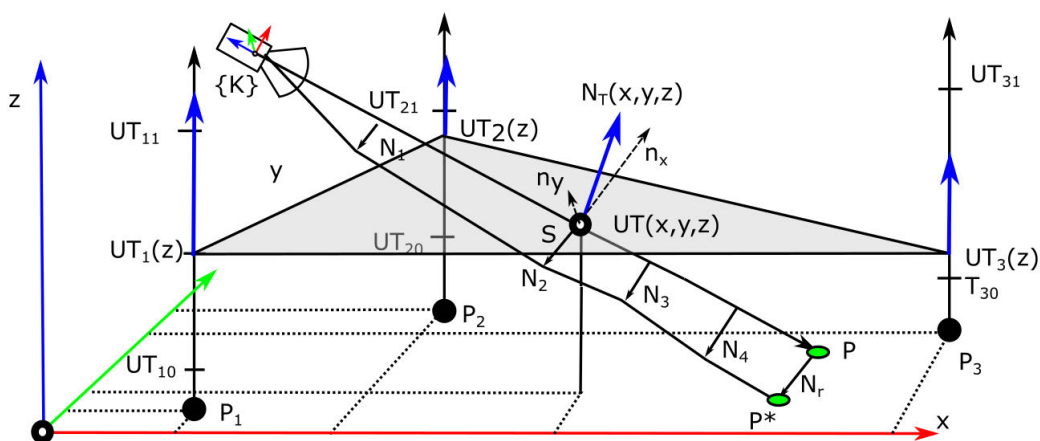


Abbildung 5.11: Berechnung von Temperaturfeld und -gradient

Zur Erfassung horizontaler Temperaturgradienten bietet sich eine Verwendung von Sensoren an Säulen an. Diese sollten das zu überwachende Messvolumen einschließen, um eine Extrapolation zu vermeiden. Die Anzahl der Sensoren wird dabei einen Kompromiss

zwischen Genauigkeitsgewinn und Aufwand darstellen. Berechnet wird im ersten Schritt Verlauf des Temperaturgradienten für den Punkt S auf den Sichtstrahl der Kamera K (Abbildung 5.11). Dafür werden die drei nächsten Temperatursäulen (P_1, P_2, P_3) gesucht und deren Temperaturen in der gesuchten Höhe z berechnet ($UT_1(z), UT_2(z), UT_3(z)$). Damit wird die Temperatur $UT(x, y, z)$ im Durchstoßpunkt S der aufgespannten Ebene interpoliert und der Gradient $N_T(x, y, z)$ bestimmt. Daraus können die wirksamen Anteile normal zur Ausbreitungsrichtung n_x und n_y bestimmt werden.

Da zu erwarten ist, dass der Temperaturgradient in Bodennähe zunimmt, muss der Suchstrahl in entsprechende Abschnitte unterteilt werden, für die die Refraktion separat bestimmt wird. Die Berechnung der Refraktion für eine Strecke ist beispielsweise in [Jat11] in Abhängigkeit des Brechungsindex hergeleitet und kann übernommen werden. Die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex ist in [AFH⁺02] beschrieben.

5.3.3 Modellelemente und Grundstruktur

Die Grundstruktur stellt einen geschlossenen Vektorzug zwischen Kamera, Sichtstrahl, Marke, kinematischer Struktur, übergeordnetem Koordinatensystem zurück zur Kamera dar (Abbildung 5.12). Beispielhaft wird zur Herleitung des Modells eine konventionelle 5-Achs-Maschine (DMU 80, vgl. Abbildung 2.1 links) verwendet.

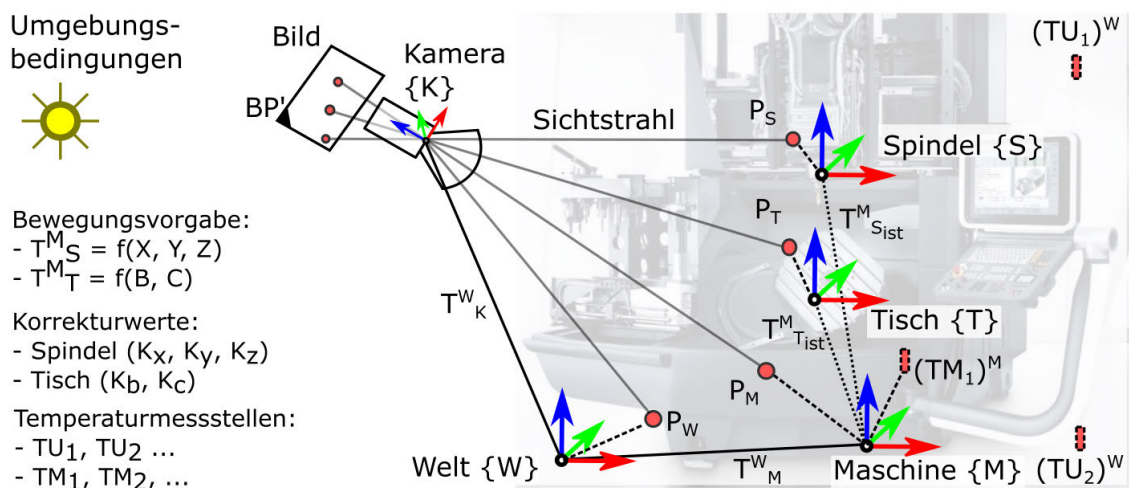


Abbildung 5.12: Kinematisches und photogrammetrisches Grundmodell einer DMU80

Bei der Maschine werden beide kinematischen Ketten, spindelseitig $T_{\{S_{soll}\}}^{\{M\}}$ und tischseitig $T_{\{T_{soll}\}}^{\{M\}}$, relativ zum Maschinenkoordinatensystem $\{W\}$ gesteuert bewegt. Die Spindel wird dabei durch eine kartesische 3-Achs-Kinematik $T_{\{S\}}^{\{M\}} = f(X, Y, Z)$ und der Tisch durch eine zweiachsige Dreh-Schwenkeinrichtung $T_{\{T\}}^{\{M\}} = f(B, C)$ angetrieben. Zur Signalisierung

sind Marken P_S , P_T und P_M auf den entsprechenden Komponenten angebracht. Beobachtet wird die Maschine von einer außerhalb stehenden Kamera $\{K\}$. Als Basis der Kamera kann entweder ein globales Weltkoordinatensystem $\{W\}$ oder das Maschinenkoordinatensystem $\{M\}$ verwendet werden. Die Ist-Position von Spindel und Tisch weicht jedoch von der vorgegebenen Soll-Position $T_{\{S_{soll}\}}^{\{M\}}$ bzw. $T_{\{T_{soll}\}}^{\{M\}}$ aufgrund der Bewegungsfehler um einen differenziell kleinen Bewegungsfehler $T_{\{S_{ist}\}}^{\{S_{soll}\}}$ bzw. $T_{\{T_{ist}\}}^{\{T_{soll}\}}$ ab. Damit lassen sich alle Marken im Kamerakoordinatensystem über den entsprechenden Vektorzug berechnen:

$$\begin{aligned}
 (P_S)\{K\} &= (T_{\{K\}}^{\{W\}})^{-1} * T_{\{M\}}^{\{W\}} * T_{\{S_{soll}\}}^{\{M\}} * T_{\{S_{ist}\}}^{\{S_{soll}\}} * (P_S)\{S_{ist}\} \\
 (P_T)\{K\} &= (T_{\{K\}}^{\{W\}})^{-1} * T_{\{M\}}^{\{W\}} * T_{\{T_{soll}\}}^{\{M\}} * T_{\{T_{ist}\}}^{\{T_{soll}\}} * (P_T)\{T_{ist}\} \\
 (P_M)\{K\} &= (T_{\{K\}}^{\{W\}})^{-1} * T_{\{M\}}^{\{W\}} * (P_M)\{M\} \\
 (P_U)^K &= (T_{\{K\}}^{\{W\}})^{-1} * (P_U)\{W\}
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Unter der Voraussetzung, jedes Koordinatensystem enthält mehr als drei Marken mit bekannten 3D-Koordinaten, können die gesuchten Abweichungen $T_{\{S_{ist}\}}^{\{S_{soll}\}}$ bzw. $T_{\{T_{ist}\}}^{\{T_{soll}\}}$ direkt und aus einem Bild bestimmt werden. Über Marken in der Nähe von oder auf den Umgebungs- $TU_1...TU_n$ bzw. Materialtemperatursensoren $TM_1...TM_n$ kann eine Positionsbestimmung erfolgen (Abbildung 5.12). Damit können Temperaturschichtungen und ggf. lokale Gradienten für das Umgebungsmodell bestimmt werden. Die Materialtemperatursensoren können zur Kontrolle oder zur Nachführung thermisch bedingter Deformationen verwendet werden.

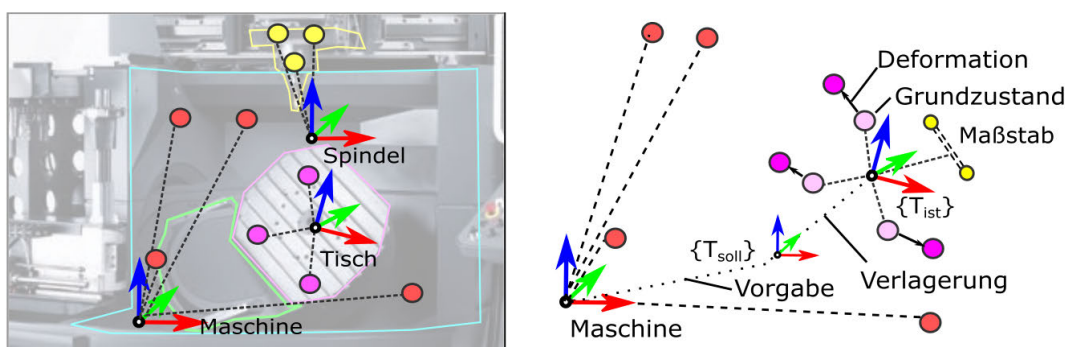


Abbildung 5.13: Berücksichtigung von Verlagerung und Deformation im Modell

Deformationen können im Strukturmodell als Verlagerung von Koordinaten relativ zu einem Grundzustand detektiert werden (Abbildung 5.13, rechts). Eine Schwierigkeit dabei ist die Definition des Ursprungs zur Differenzierung von Verlagerung und Deformation. Bei ungünstiger Wahl des Systemursprunges sind beide Anteile nur bedingt voneinander trennbar. Vorteilhaft sind die Verwendung eines Maßstabes sowie Bildmessungen mehre-

rer Kameras aus möglichst vielen unterschiedlichen Blickrichtungen. Somit kann das Modell zur Erfassung der geometrisch-kinematischen Fehler als Starrkörpermodell aufgebaut werden und Deformation als Veränderung davon betrachtet werden.

Da geometrisch-kinematische Abweichungen der Einzelachsen nur indirekt als Verlagerung des TCP erfasst werden können, muss der gesamte Verfahrbereich aller Achsen zur Messwerterfassung angefahren und zusammengeführt werden. Weiterhin muss zur Trennung zufälliger und systematischer Abweichungen die Messung ausreichend oft wiederholt werden. Für die Modellierung folgt, dass nachdem der geometrisch-kinematische Maschinenzustand durch das mehrmalige Einmessen des gesamten Arbeitsraumes vollständig erfasst wurde, durch die Betrachtung aussagefähiger Messpositionen im Arbeitsraum bzw. von Messpunkten die elastischen und thermo-elastischen Deformationen als Abweichung zu dem Ausgangszustand erfasst werden können. Dazu muss das Strukturmodell, das jede Messposition separat beschreibt, erweitert werden.

Basisklasse - Modellobjekt

Zur Sicherung der Erweiterbarkeit bietet sich eine Schnittstelle an, durch die Modellobjekte ggf. erweitert werden können. Die Objekte enthalten dabei folgende Informationen:

- Namen des Objektes und eine eindeutige Modell-ID,
- Zuordnung zu einem Transformationsobjekt (Pointer auf das Basisobjekt, meist ein lokales Koordinatensystem) sowie
- Objektparameter, aufgeteilt in Parametergruppen.

Somit können im Messmodell die Zuordnungen der einzelnen Modellobjekte zu den entsprechenden Koordinatensystemen hergestellt sowie Transformationsketten gebildet werden. Für das Messmodell ist es zudem notwendig, zur Erstellung des Gleichungssystems alle Parameter der einzelnen Modellobjekte zusammenzufassen.

Allgemeines Transformationsobjekt

Mit dem Transformationsobjekt können zusammengehörige Objektgruppen als lokale Koordinatensysteme gebildet und ggf. bewegt werden. Beispielsweise zur Abbildung einer

bewegten Gestellbaugruppe auf der Marken und Kameras angebracht sind. Die Transformation der Koordinaten eines Objektpunktes P im lokalen System $\{S\}$ in das Weltkoordinatensystem erfolgt über die Basistransformation $T_{\{S\}}^{\{W\}}$. Sie entspricht dabei der wiederholten Ausführung einer Affintransformation zwischen den Koordinatensystemen. Das Transformationsobjekt (T) ist dabei direkt abhängig von der Lage und Orientierung relativ zum Basisobjekt sowie indirekt von allen anderen lokalen Koordinatensystemen der Transformationskette. Eine Temperaturabhängigkeit kann implementiert werden, setzt jedoch eine freie Dehnung ohne Zwangskräfte voraus, was in der Regel nicht gegeben ist. Da eine Deformation eines Körpers auch als Verlagerung der Punkte relativ zueinander modelliert werden kann, wird auf eine Implementierung der Temperaturabhängigkeit des Transformationsobjektes vorerst verzichtet.

$$O^{\{W\}} = T_{\{S\}}^{\{W\}} * O^{\{S\}} \quad (5.2)$$

$$T_{\{S\}}^{\{W\}} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \alpha * (T_K - 20^\circ) \end{bmatrix}$$

Vorschubachsjekt: Korrekturmodell für geometrisch-kinematische Abweichungen

Das Vorschubachsjekt besteht aus einem Basiskoordinatensystem sowie einem Koordinatensystem als positionsabhängiger Ausgang (Abbildung 5.14). Die Pose des Eingangskoordinatensystems wird, auf Basis der Achsanordnung des kinematischen Modells der entsprechenden Maschine, vollständig parametrisiert ($f=6$).

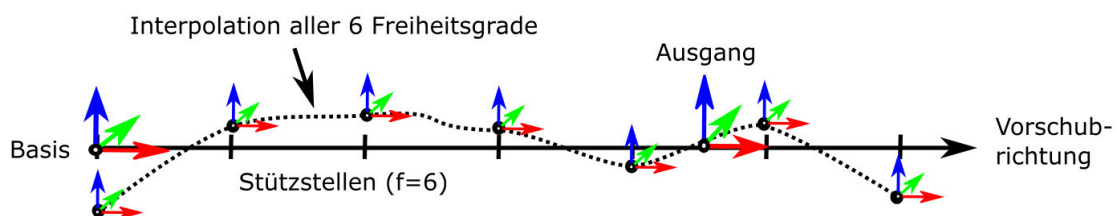


Abbildung 5.14: Grundstruktur des Vorschubachsmodells

Der Ausgang wird abhängig von der aktuellen Position der Vorschubachse und der Positionsvorgabe in Vorschubrichtung aus einem Kennfeld berechnet. Die aktuelle Abweichung wird aus der Interpolation zwischen einer ausreichend hohen Anzahl von Stützstellen berechnet (vgl. Abschnitt 2.2). Diese Stützstellen fließen als zu ermittelnde Parameter ins Mo-

dell ein. Abhängig von der Vorschubrichtung können dabei sowohl translatorische als auch rotatorische Achsen abgebildet werden. Einziger Unterschied bei rotatorischen Achsen ist, dass der Vorschubweg bei Drehachsen unbegrenzt sein kann.

Durch diesen Modellansatz können alle erfassten Posen einer Achse mit dem Fehlermodell beschrieben und die Gesamtanzahl der Objektparameter niedrig gehalten werden. Weiterhin ist dieser Modellansatz mit den üblichen in WZM verwendeten Fehlermodellen für Einzelachsen (vgl. Abbildung 2.4) identisch.

Punktobjekt

Das Punktobjekt wird zur Abbildung der Messmarken verwendet. Es ist im Objektraum definiert und einem Koordinatensystem zugeordnet. Die Koordinaten des Punktobjekts im globalen Koordinatensystem sind direkt von den drei Objektparametern (X, Y, Z) sowie indirekt von der Zuordnung zum lokalen Koordinatensystem $\{B\}$ abhängig. Im Punktobjekt werden zur schnellen Berechnung die Basistransformation ($T_{\{B\}}^{\{W\}}$) und die globalen Objektkoordinaten ($P^{\{W\}}$) gespeichert. Die Basistransformation umfasst dabei die gesamte Kette von lokalen Koordinatensystemen bis zum globalen Weltkoordinatensystem.

$$P = f(X, Y, Z) \quad (5.3)$$

Weiterhin besitzt es eine Orientierung im Raum, die durch einen Normalenvektor beschrieben wird ($f=2$). Dieser wird zur Bestimmung der Abbildungsexzentrizität sowie zur Sichtbarkeitsberechnung benötigt. Weiterhin wird der Markendurchmesser verwendet, um eine Abstandsschätzung zur Gewinnung von Näherungswerten vornehmen zu können. Um die Zuordnung zu den Bildmessungen sicherstellen zu können, werden Marken mit einer Codierung verwendet. Dabei bietet sich eine eindeutige, binäre Codierung an (vgl. Abbildung 3.5). Implementiert wurde eine von kommerziellen Systemen verwendete 14Bit-Codierung (Fa. Aicon) mit max. 512 Marken sowie eine eigene Codierung mit 16, 18 und 20 Bit. In der Praxis hat sich die 16Bit-Codierung mit insgesamt ca. 4000 Marken als ausreichend erwiesen.

Streckenobjekt

Das Streckenobjekt besteht aus dem Abstand von zwei definierten Punkten (P_1 mit der Basis $\{B_1\}$ und P_2 mit der Basis $\{B_2\}$). Die Strecke S_1 wird aus dem Abstand beider Punkte

berechnet.

$$S_1 = |T_{\{B_1\}}^{\{W\}} * P_1^{\{B_1\}} - T_{\{B_2\}}^{\{W\}} * P_2^{\{B_2\}}| \quad (5.4)$$

In das Modell wird die Strecke als Nebenbedingung im mathematischen Modell über die B-Matrix und den w-Vektor (vgl. Gl. 3.22) integriert. Das Streckenobjekt ist damit direkt von den jeweils drei Objektparametern der Objektpunkte abhängig sowie indirekt von der Zuordnung der Objektpunkte zu den jeweiligen lokalen Koordinatensystemen. Die Temperaturabhängigkeit der Strecke ergibt sich indirekt über die Objektpunkte und wird indirekt über eine temperaturabhängige Dehnung des bzw. der Basisobjekte abgebildet.

Kameraobjekt

Das Kameraobjekt berechnet die Abbildung eines Objektpunkts in Kamerakoordinaten auf den Sensor (vgl. Abbildung 3.6). Die Implementierung der Verzeichnungskorrektur orientiert sich dabei an [Luh10c] (vgl. [Bro71]). Das Kameraobjekt enthält folgende Parameter:

- Äußere Orientierung relativ zum lokalen Koordinatensystem ($T_{\{K\}}^{\{B\}}$ mit $X, Y, Z, Omega, Phi, Kappa$) sowie
- Innere Orientierung ($T_{\{S\}}^{\{K\}}$ mit c, x_h, y_h und Verzeichnungsmodell $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2$ sowie D_1, D_2, D_3).

Zur Berechnung der simulierten Bildpunkte (P') werden die im globalen Koordinatensystem definierten Objektpunkte ($P^{\{W\}}$) ins Kamerakoordinatensystem mithilfe der Basistransformation ($T_{\{B\}}^{\{W\}}$) des lokalen Koordinatensystems transformiert.

$$P^{\{K\}} = (T_{\{K\}}^{\{W\}})^{-1} * T_{\{B\}}^{\{W\}} * P^{\{B\}} \quad (5.5)$$

Der simulierte Bildpunkt P' eines Objektpunktes P ist damit abhängig von der Inneren und Äußeren Orientierung der Kamera und den Objektkoordinaten sowie indirekt von lokalen Koordinatensystemen der Basistransformation der Objekte. Dabei entstehen, beispielsweise wenn sich der Objektpunkt in der Nähe der Sensorebene befindet, mathematisch instabile Konstellationen, weshalb eine Begrenzung der simulierten Bildkoordinaten auf die tatsächliche Sensorgröße eingeführt wurde (vgl. [TMHF99]).

Prinzipiell können im Strukturmodell auch weitere Abbildungsmodelle, beispielsweise für Zeilenkameras, oder Kameras mit stark weitwinkligen Objektiven implementiert werden.

Weiterhin sind die Voraussetzungen zur Berücksichtigung der Abbildungsexzentrizität e sowie der Refraktion vorhanden.

Messsysteme

Da die in Abschnitt 2.6 beschriebenen Messmittel geometrische Größen (Lage und Neigung) erfassen, können sie mithilfe von Koordinatensystemen und Punkten abgebildet werden (Tabelle 5.5). Lediglich die Messung eines Feinzeigers auf einer Kugel fordert eine Darstellung des Koordinatensystems in Polarkoordinaten, um den Kugelradius geeignet beschreibbar zu machen.

Tabelle 5.5: Ersatzmodelle für typische Messsysteme an WZM

	Basis		Target	
	Objekt	Freiheitsgrade	Objekt	Freiheitsgrade
Feinzeiger	System	u=5 (X,Y,Z,A,B)	Ebene	u=5 (X,Y,Z,A,B)
			Kugel	u=4 (X,Y,Z,R)
DBB	Punkt	u=3 (X,Y,Z)	Punkt	u=3 (X,Y,Z)
Interferometer	System	u=6 (X,Y,Z,A,B,C)	System	u=6 (X,Y,Z,A,B,C)
Laser-Tracer	Punkt	u=3 (X,Y,Z)	Punkt	u=3 (X,Y,Z)
Laser-Tracker	System	u=6 (X,Y,Z,A,B,C)	System	u=6 (X,Y,Z,A,B,C)

Am einfachsten können DBB und Laser-Tracer dargestellt werden, da sie einem Streckenmodell entsprechen. Weiterhin können Interferometer und Laser-Tracker als ein relativ zur Basis bewegtes Koordinatensystem aufgefasst werden.

5.3.4 Struktur- und Messmodell

Im Strukturmodell werden alle Objekte zusammengeführt. Das Strukturmodell bildet eine geschlossene Kette aus den Modellobjekten (Abbildung 5.15). Die Basis bildet dabei das globale Koordinatensystem Welt $\{W\}$. Die Kamera $\{K\}$ hat als Basis das globale Koordinatensystem $\{W\}$. Die beiden Objektpunkte P_1 und P_2 sind in einem eigenen lokalen Koordinatensystem $\{L\}$ definiert. Das Strukturmodell berechnet die simulierten Bildkoordinaten P' der Objektpunkte in Abhängigkeit der Parameter (X) aller in der Kette befindlichen Modellobjekte. Die Bildkoordinaten der Objektpunkte sowie die Strecke S_1 sind dabei von der Inneren und Äußeren Orientierung der Kamera $\{K\}$, vom lokalen Koordinatensystem sowie der Lage der Objektpunkte abhängig.

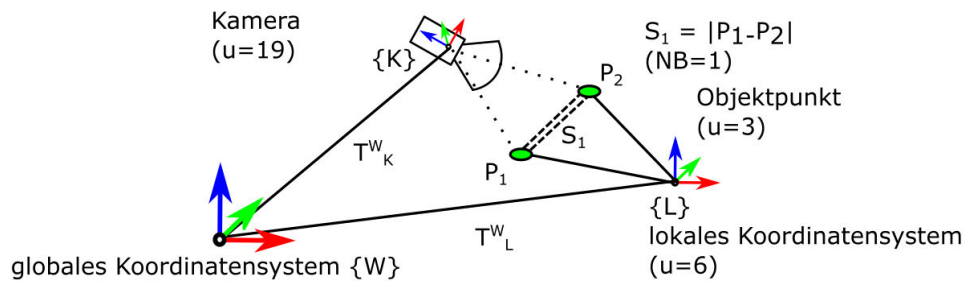


Abbildung 5.15: Strukturmodell mit einer Kamera und mit zwei Objektpunkten in einem lokalen Koordinatensystem

Mit diesem Grundmodell können, abhängig von der jeweiligen Parametrierung, bereits 6DoF, Stereobildauswertung und Bündelblockausgleichung modelliert werden. Bei der 6DoF-Auswertung sind die Lage der Objektpunkte und die Innere Orientierung der Kamera bekannt. Gesucht wird die Transformation von Objektpunkt und Kamera in ein gleiches Koordinatensystem.

$$P'_1 = f(T_{\{K\}}^{\{W\}}, T_{\{L\}}^{\{W\}}) \quad (5.6)$$

Bei der Stereobildauswertung werden zwei Kameras verwendet, deren Äußere Orientierung (zueinander) bekannt ist. Es werden nur die Objektkoordinaten berechnet.

$$P'_1 = f(P_1^{\{L\}}) \quad (5.7)$$

Bei der Bündelblockausgleichung werden alle Parameter des Modells aus mehreren Aufnahmen heraus bestimmt. Dabei wird die Äußere Orientierung und teilweise die Hauptpunktlage der Kamera für jedes Bild separat berechnet.

$$\begin{aligned} P'_1 &= f(T_{\{K\}}^{\{W\}}, T_{\{L\}}^{\{K\}}, P_1^{\{L\}}) \\ P'_2 &= f(T_{\{K\}}^{\{W\}}, T_{\{L\}}^{\{K\}}, P_2^{\{L\}}) \\ S_1 &= f(|P_1, P_2) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Abbildung kinematischer Ketten

Auf den Modellobjekten aufbauend können auch kinematische Ketten in die Ausgleichung integriert werden (Abbildung 5.16, links und mittig), um einerseits direkte Wegmesssysteme der Maschinen zur Skalierung verwenden zu können sowie andererseits Transformationsfehler der Punkte ins Maschinenkoordinatensystem zu vermeiden. Weiterhin können zusätzlich zu den Soll-Vorgaben auch Positionierfehler berücksichtigt werden (Abbildung 5.16, rechts). Bei einer Maschine mit zwei kinematischen Ketten (Abbildung 5.16, mittig)

berechnet sich die Ist-Pose aus der Differenz zwischen Tisch $\{T\}$ und Spindel $\{S\}$ ähnlich 6DoF-Systemen (vgl. Abbildung 3.9).

$$T_{\{S\}}^{\{T\}} = T_{\{S\}}^{\{M\}} * (T_{\{T\}}^{\{M\}})^{-1} \quad (5.9)$$

Wird eine der Transformationen $T_{\{S\}}^{\{M\}}$ bzw. $T_{\{T\}}^{\{M\}}$ als Soll-Vorgabe eingeführt, können die Abweichungen als Pose-Fehler identifiziert werden (Abbildung 5.16, rechts). Dann erweitert sich die Gleichung um eine weitere Transformation:

$$T_{\{S_{Ist}\}}^{\{M\}} = T_{\{S_{Soll}\}}^{\{M\}} * T_{\{S_{Ist}\}}^{\{S_{Soll}\}} \text{ bzw. } T_{\{T_{Ist}\}}^{\{M\}} = T_{\{T_{Soll}\}}^{\{M\}} * T_{\{T_{Ist}\}}^{\{T_{Soll}\}}$$

Damit können alle Messungen direkt auf die zu ermittelnde Größe, die Pose an der Wirkstelle bezogen und direkt die Messsysteme der Werkzeugmaschine zur Skalierung der photogrammetrischen Messung verwendet werden.

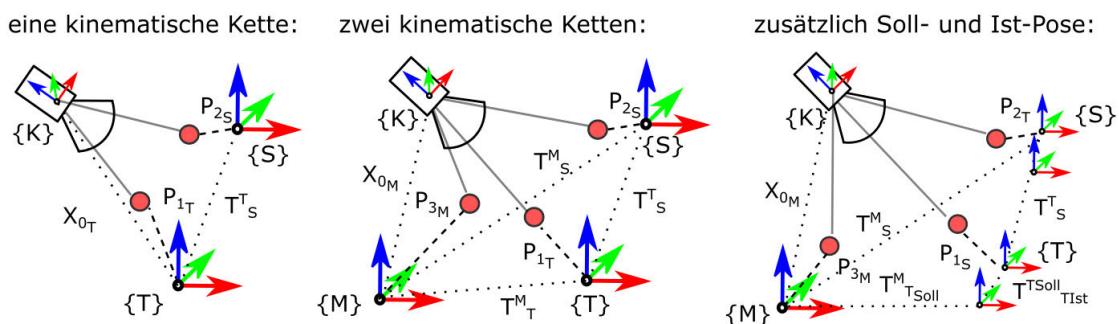


Abbildung 5.16: Minimalmodell mit Spindel- und Tischkoordinatensystem

Verwendung mitbewegter Kameras

Ein weiterer Vorteil dieser Art der Modellierung ist die Möglichkeit, an bewegte Koordinatensysteme Kameras zu binden. Bisher ist das in dieser Form nicht möglich, da die Kameras zueinander fixiert sein müssen (6DoF und Stereokamerasystem) bzw. die Äußere Orientierung im Bündelblock in Bezug zum Weltkoordinatensystem bestimmt wird. Damit wird vor allem das Blickfeld und die Anpassungsfähigkeit der Messkonfiguration an die Gegebenheiten des Arbeitsraumes der WZM stark verbessert. Weiterhin können damit auch relativ kleine Objekte gut erfasst werden (Abbildung 5.17, rechts).

Bündelblockausgleich mehrerer Objektzustände

Zur Erfassung der geometrisch-kinematischen Fehler können alle Aufnahmezeitpunkte zusammengefasst und gemeinsam modelliert werden (Abbildung 5.17, links). Dabei wird in erster Näherung von einem Starrkörperverhalten ausgegangen. Betrachtet man zwei Objektzustände (0 und 1), dann zeigt sich, dass einige Parameter konstant bleiben, sowohl die Lage der Objektpunkte (X) als auch die Äußere Orientierung der Kamera K_1 relativ zum bewegten Koordinatensystem S :

$$X = T(0)_w^{P'} * T(0)_{P'}^P * X_0 * x(0)' \quad (5.10)$$

$$X = T(1)_w^{P'} * T(1)_{P'}^P * X_0 * x(1)'$$

Dies erfordert jedoch die Betrachtung mehrerer Objektzustände in einem Modell. Damit können in einem Modell wesentlich mehr Informationen gebündelt werden. Fasst man die gleichbleibenden Parameter zusammen, können Modelle mit einer höheren Gesamttredanz erstellt werden, wodurch die Genauigkeit gesteigert werden kann.

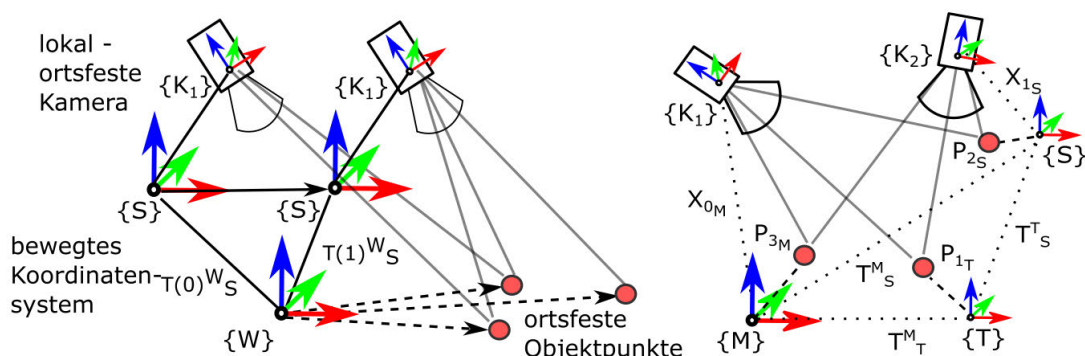


Abbildung 5.17: Links Auswertung mehrerer Objektzustände sowie rechts Zweikamera-System

Indirekte Einführung von Maßstabsinformationen

Durch die Zusammenführung von unterschiedlichen Objektzuständen in einem Modell können Maßstabsinformationen auch einzelnen Zuständen zugeordnet und damit vorhandene zusätzliche Längenmessungen der Wegmesssysteme der Maschine abgebildet werden (vgl. 5.18 links). Beispielsweise können damit auch die Stabachslängen von Hexapoden als Vorgabe oder als Messgröße mit ins Modell integriert werden (vgl. Abbildung 2.1 links). Weiterhin können räumliche Vorgaben, beispielsweise durch mit Laserinterferometer ermittelten Abweichungen in bis zu 6 Freiheitsgraden, abgebildet werden. Die Vorgabe

erfolgt dabei als fest vorgegebene Bewegung zweier Koordinatensysteme zueinander, beispielsweise H_2 relativ zu H_1 (Abbildung 5.18, rechts). Diese Art der Vorgabe ist beispielsweise bei größeren Abständen zwischen Koordinatensystem oder Laserinterferometer und dem entsprechenden direkten Wegmesssystem der Vorschubachse zweckmäßig.

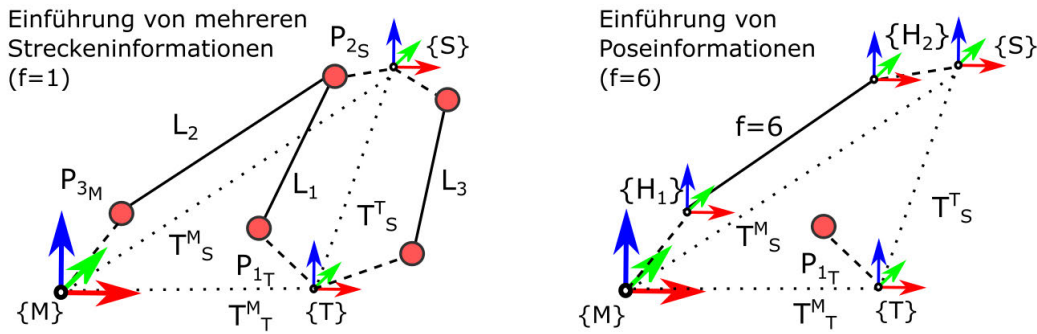


Abbildung 5.18: Vektorzug zur Streckenvorgabe und Posevorgabe

5.4 Beispielhafte Modellierung: DMU80

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wird für die DMU80 beispielhaft eine Messkonfiguration mit zwei Kameras und zwei angefahrenen Positionen modelliert und das Gleichungssystem aufgestellt. Dabei steht die Zusammenfassung der Modellparameter von Struktur- und Messmodell sowie die entstehenden Vorteile bei der Konditionierung des Gleichungssystems im Vordergrund.

5.4.1 Struktur- und Messmodell DMU80

Die Messanordnung (Abbildung 5.19) besteht aus zwei Kameras (K_1, K_2), die die Maschine $\{M\}$, den Tisch $\{T\}$ und die Spindel $\{S\}$ überwachen.

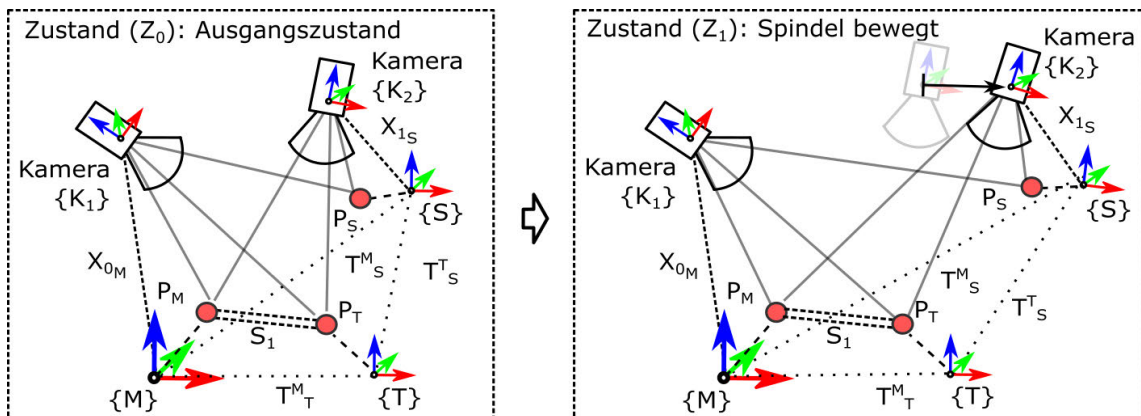


Abbildung 5.19: Parametrierungsbeispiel: Messmodell DMU80 mit zwei Zuständen

Die Kameras sind dabei fest an den jeweiligen Objekten angebracht und es kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass die Innere Orientierung stabil bleibt. Betrachtet werden dabei, um das Beispiel übersichtlich zu halten, nur zwei Zustände Z_0 und Z_1 . Dabei wurde zwischen beiden Zuständen die Spindel $T_{\{S\}}^{\{M\}}$ bewegt, während der Tisch fest stand $T_{\{T\}}^{\{M\}}$. Weiterhin sind auf den Objekten Marken angebracht, der Übersicht halber ist pro Objekt nur eine Marke dargestellt (P_S, P_T, P_M). Prinzipiell stellt jede Variation des Strukturmodells einen Objektzustand dar, der spezifisch parametrisiert und im Messmodell zusammengefasst wird.

5.4.2 Parametrierung des Modells

Damit werden aus allen verwendeten Modellparametern nur diejenigen zur Ausgleichung zugelassen, die auch sinnvoll auszugleichen sind. Weiterhin können konstante Parameter über mehrere Objektzustände hinweg definiert werden und gemeinsam ausgeglichen werden. Für das Beispiel sind in Abbildung 5.20 die Parameter des Messmodells für die Messsystemkalibrierung und für die reine Posemessung zusammengestellt. Die Modellparameter ergeben sich aus der Summe aller vorhandenen Parameter der Struktur entsprechend den Objektzuständen. Werden diese als zustandsunabhängig gesetzt, werden alle Objektzustände mit dem gleichen Parameter berechnet. Wird ein Parameter zustandsveränderlich gesetzt, wird für jeden Objektzustand ein separater Parameter erstellt, beispielsweise die Spindel.

	Verhalten	Zustand Z_0	Zustand Z_1	Kalibrierung	Posemessung
Koordinatensysteme	$\{T\}$	fest	x, y, z, u, v, w	$u=6$	$u=0$
	$\{S\}$	bewegt	$\mathbf{x, y, z, u, v, w}$	$u=12$	$u=12$
Objektpunkte	PM	fest	x, y, z	$u=3$	$u=0$
	PT	fest	x, y, z	$u=3$	$u=0$
	PS	fest	x, y, z	$u=3$	$u=0$
Äußere und Innere Orientierung der Kameras	K_1	fest	x, y, z, u, v, w	$u=6$	$u=0$
		fest	$c, x_{hr}, y_{hr}, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2, D_3$	$u=13$	$u=0$
	K_2	fest	x, y, z, u, v, w	$u=6$	$u=0$
		fest	$c, x_{hr}, y_{hr}, A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2, D_3$	$u=13$	$u=0$
Strecke	S_1	fest	l	$u=0$	$u=0$
				$u_{ges}=65$	$u_{ges}=12$

Abbildung 5.20: Parameter und Parameteranzahl des Modells der DMU80

Für das Modell müssen nun zwei Anwendungsfälle unterschieden werden. Für eine Posemessung der Spindel mit einer kalibrierten Messkonfiguration sind nur die fett markierten

Parameter relevant. Der Unbekanntenvektor (x) hat in diesem Fall $u_{ges} = 12$ Parameter, da zwei Posen der Spindel erfasst werden. Bei der Kalibrierung des Messaufbaus werden jedoch alle Parameter des Modells ermittelt. Der Unbekanntenvektor ist entsprechend der Anzahl an den zur Kalibrierung notwendigen Objektzuständen (o) länger und umfasst $53 + 6 * o$ Parameter, bei $o = 2$ insgesamt $u_{ges} = 65$ Parameter.

5.4.3 Ableitung des Gleichungssystems

Zur Ableitung des Gleichungssystems müssen weiterhin die Jacobimatrix (A) und die Bedingungs matrix (B) durch numerisches Differenzieren des Messmodells bestimmt werden. Für das gewählte Beispiel (Abbildung 5.19) sind beide Matrizen in Abbildung 5.21 dargestellt.

Z = Objektzustand		Jacobi-Matrix A								
		Parametervektor (X)								
		Objektpunkte			Koordinatensysteme			Kameras		
		PM	PT	PS	Tisch	Spindel		K ₁	K ₂	
		Z ₀ und Z ₁	Z ₀ und Z ₁	Z ₀ und Z ₁	Z ₀ und Z ₁	Z ₀	Z ₁	Z ₀ und Z ₁	Z ₀ und Z ₁	
Bildmessung Lo(X)	Zustand Z ₀	K1 _M	BPPM							
			BPPT							
			BPPS							
		K2 _S	BPPM							
			BPPT							
			BPPS							
	Zustand Z ₁	K1 _M	BPPM							
			BPPT							
			BPPS							
		K2 _S	BPPM							
			BPPT							
			BPPS							
w	Z ₁ Z ₀	L1								
	Z ₁	L1								
		Bedingungs matrix B								

Abbildung 5.21: Verknüpfungen zwischen den Parametern und Bildmessungen zweier Objektzustände in der Jacobi-Matrix (A) und Bedingungs matrix (B)

Dabei sind Werte $\neq 0$ als dunkle Felder dargestellt, weiße Felder entsprechen Werten $=0$. Wenn der Wert größer 0 ist, besteht im Modell eine Korrelation zwischen den Größen. Zu beachten ist, dass im Beispiel die Definition des Ursprungs vernachlässigt wurde. Bei einer Definition der Ursprungs koordinaten würden die entsprechenden Parameter der Koordinaten aus dem Unbekanntenvektor entfernt, bei einer freien Netzausgleichung die Bedingungs matrix entsprechend erweitert. Im Beispiel besitzt die Jacobimatrix die Dimension $n \times u$. Dabei ist n die Anzahl der zugeordneten Bildmessungen und u die Anzahl der gesuchten Parameter. Die Widerspruchs matrix hat die Dimension $2 \times u$, da die Steck e für jeden Zustand separat definiert ist. Beide werden mit den numerischen Ableitungen der unbe-

kannten Parameter für die entsprechenden Bildmessungen gebildet (vgl. Gleichung 3.11 und Gleichung 3.20).

5.4.4 Normalgleichungssystem

Das Normalgleichungssystem wird als Ausgleichung mit Nebenbedingungen nach Gleichung 3.22 aufgestellt. Durch den Modellansatz entstehen erweiterte Verknüpfungen der Informationen in der Normalgleichungsmatrix $N = A^T P A$ (Abbildung 5.22). Durch die Einführung der lokalen Koordinatensysteme entstehen Korrelationen zwischen den Koordinatensystemen und den Objektpunkten sowie den Zuständen. Das heißt, die Anzahl der Informationen steigt mit jedem Objektzustand bei als „konstant“ definierten Objektpunkten, also für die Annahme eines Starrkörpers an. Weiterhin können alle Bildmessungen verwendet werden, auch wenn für einen Objektzustand nur eine Bildmessung vorhanden ist. Damit können alle vorhandenen und zugeordneten Bildmessungen zur Ausgleichung verwendet werden, was die statistische Sicherheit steigert. Weiterhin sind zur Bestimmung der Orientierung eines Körpers im Raum vor allem weit voneinander entfernte Marken wichtig, da sie eine hohe Übersetzung der Neigung in Bildkoordinaten erzeugen. Genau für diese stehen meist, aufgrund von Abschattungen, in der Regel nur wenige Bildmessungen zur Verfügung. Dies kann durch diesen Modellansatz deutlich verbessert werden.

		Parametervektor (X)							
		Objektpunkte			Koordinatensysteme			Kameras	
		P _M	P _T	P _S	Tisch	Spindel	Spindel	K ₁	K ₂
Parametervektor (X)	Objektpunkte	P _M							
		P _T							
		P _S							
	Koordinatensysteme	Tisch							
		Spindel Z ₀							
		Spindel Z ₁							
	Kameras	K ₁							
		K ₂							

Abbildung 5.22: Verknüpfung der Parameter in der Normalgleichungsmatrix $A^T P A$

Interessant sind dabei die Korrelationen zwischen Kameras und Koordinatensystemen. Wenn eine Kamera direkt an einem Objekt befestigt ist, stützen alle Messungen der Kamera direkt die Bestimmung der Pose des Objektes, es wird quasi das Objekt durch den Rückwärtsschnitt der Kamera bestimmt. Dieser wird zusätzlich durch die Messung der Ob-

jektpunkte auf dem gleichen Objekt durch die zweite Kamera gestützt. Dadurch ergibt sich aus mathematischer Sicht ein deutlich stabileres Gleichungssystem, in dem die geometrischen Zwangsbedingungen, die aus der Messanordnung heraus entstehen, erkennbar werden. Somit wird mit dieser Modellierung das mathematische Modell besser an den physikalischen Aufbau angepasst und damit ist eine höhere Robustheit und Genauigkeit erreichbar.

Kapitel 6

Realisierung und Test der Modellumgebung

Gegenstand dieses Kapitels ist, ausgehend von einem Hard- und Softwarekonzept, die Beschreibung der Realisierung und Ergebnisse des Funktionstests von Bildmessung und Modellierungsumgebung. Um die Methodik an WZM testen zu können, muss weiterhin die Bildaufnahme sowie eine Schnittstelle zur Maschinensteuerung geschaffen werden.

6.1 Hard- und Softwarekonzept

Um die Methodik zur Modellierung von WZM zu verifizieren, ist es notwendig, eine Software zu realisieren, mit der diese Modellierung durchgeführt werden kann. Kommerzielle Software liefert nicht die benötigte Funktionalität. Weiterhin müssen Schnittstellen zur Maschinensteuerung geschaffen werden, die in dieser Art nicht verfügbar sind.

Das Ziel ist, mit möglichst geringem Aufwand eine Software zu entwickeln, die zur photogrammetrischen Messung an WZM fähig ist (Abbildung 6.1). Bildaufnahme und Erfassung der Positionsdaten erfolgen in „Steuerungsechtzeit“ mit typischen Taktzeiten von 0.5...4 ms, um möglichst geringe und definierte Latenzzeiten zu erreichen. Zur Synchronisation von Bildaufnahme und der Positionsbestimmung der Steuerung wird eine Hardwaresynchronisation über ein Triggermodul verwendet (Abbildung 6.1 links unten). Parameter der Steuerungen können aus einer bereits vorhandenen Schnittstelle (Beckhoff Automation Device Specification, ADS) bzw. einer entwickelten OPC-UA Server/Client ausgelesen und gesetzt werden.

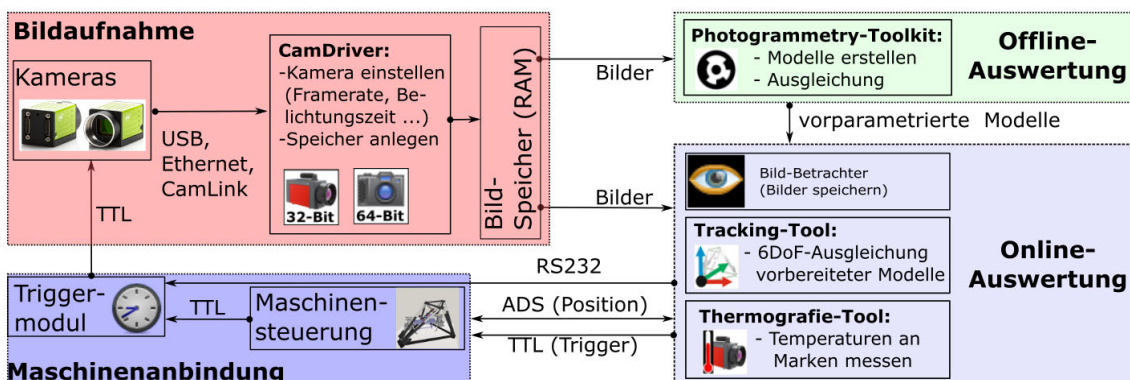


Abbildung 6.1: Grundstruktur der realisierten Anwendungen zur Bildaufnahme, Offline- und Online-Messung

Zur Bildaufnahme (Abbildung 6.1 links oben) wurde eine Anwendung entwickelt, die verschiedene Kamerateypen ansprechen kann. Die Bilder werden in den Bildspeicher in einer definierten Struktur abgelegt, sodass für die Bildauswertung ein Zugriff auf alle Kameras universell möglich ist. Bei der zu verwendenden Kamerahardware werden Standard-

Industriekameras verwendet, die über einen Hardware-Trigger verfügen. Als Datenschnittstellen werden Ethernet, CamLink oder USB 3.0 unterstützt. Um ein möglichst breites Spektrum an handelsüblichen Kameras gleichzeitig verwenden zu können, wurde zur Bildaufnahme der CamDriver eingeführt, der es erlaubt, die herstellerspezifischen Eigenschaften der Schnittstellen und Software Development Kits (SDK) zu kapseln. Die Bildaufnahme liefert neben den reinen Bilddaten noch den Kameranamen und einen Aufnahmezeitpunkt, um die Zuordnung der Bilder zu den simulierten Bildpunkten im Messmodell zu ermöglichen. Damit können alle weiteren Programme über eine einheitliche Schnittstelle (Shared-Mem) auch parallel auf den Bildspeicher zugreifen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Tabelle 6.1: Funktionalitäten und Automatisierung der Messsoftware

Tool	Auswertung	Modellzustände	Automatisierung
Tracking-Tool	Online	ein Objektzustand	ja
Thermografie-Tool	Online	ein Objektzustand	ja
Toolkit	Offline	vollständig	nein

Die Auswertung kann anwendungsspezifisch offline für mehrere oder online für einen einzelnen Objektzustand erfolgen (Tabelle 6.1). Die Online-Tools, Tracking-Tool und Thermografie-Tool, unterscheiden sich hinsichtlich der Unterstützung von Thermografiekameras bzw. zum Tracking von Posen oder Deformationen. Durch die Begrenzung der Modelle auf einen Objektzustand konnte eine vollständige Automatisierung der Messung an einer WZM realisiert werden. Das Toolkit stellt ein universelles Werkzeug zur Erstellung und zur Ausgleichung von komplexen Modellen mit mehreren Objektzuständen, beispielsweise zur Messsystemkalibrierung, dar. Die damit erstellten und parametrisierten Modelle können, in einem begrenzten Umfang, zur Online-Auswertung exportiert und dort verwendet werden. Aufgrund der gleichzeitigen Auswertung mehrerer Objektzustände ist eine Automatisierung der Messung zur Online-Auswertung nur bedingt möglich.

Grundsätzlich basieren alle Auswertungsprogramme auf den gleichen Software-Modulen, die lediglich durch unterschiedliche Oberflächen angesprochen werden.

6.2 Softwarekomponenten

Basis für die Online- und die Offline-Software sind die in Abbildung 5.10 dargestellten Softwaremodule. Die Bildmessung erfasst die Markenkoordinaten (Beobachtungsvektor L) und ihre Gewichtsmatrix PB durch eine Ellipsenmessung. Dabei können zur Beschleunigung

der Bildmessung die geschätzten Suchpositionen aus dem Messmodell berücksichtigt werden. Das Messmodell kapselt die geometrische Beschreibung der Messkonfiguration und stellt der Modellausgleichung die simulierten Bildmessungen ($L_0(X)$), die zugehörige Jacobimatrix A sowie die Nebenbedingungen und den Parametervektor zur Verfügung. Die Zuordnungskomponente ordnet die gemessenen den simulierten Bildmessungen zu, sodass Beobachtungsvektor L und die simulierten Bildmessungen ($L_0(X)$) gleich angeordnet sind. Weiterhin kann die Zuordnungskomponente nicht gemessene Marken im Messmodell zur Geschwindigkeitsoptimierung bei der Berechnung der Jacobimatrix deaktivieren. Die Modellausgleichung kann durch diese Modularisierung beliebige Messmodelle ausgleichen, solange sie sich formal gleich verhalten. Das heißt, es variieren die unbekannt Parameter (X) derart, bis eine Annäherung der Modellaussage zur Bildmessung erfolgt. Dieser iterative Vorgang wird so lange durchgeführt, bis $L - L^0(X) \approx 0$ wird.

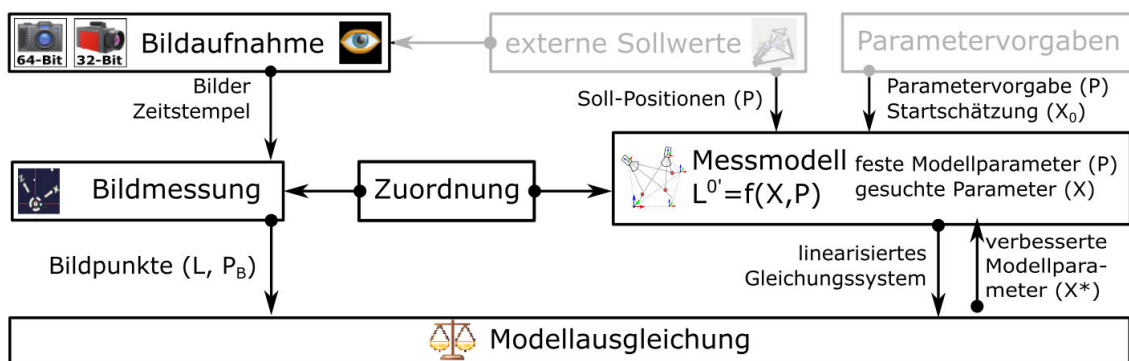


Abbildung 6.2: Bestandteile und Schnittstellen der Modellumgebung

Bei der Implementierung wurde Wert auf eine Verwendung von Softwarebibliotheken gelegt, deren Funktionsweise bekannt und nachvollziehbar ist. Die Priorität liegt nicht auf Geschwindigkeit, sondern auf einem höchstem Maße an Genauigkeit, was zu einem Ausschluss sehr guter und vor allem schneller Bibliotheken wie in die Vision-Toolbox in MATLAB oder OpenCV führte. Insgesamt wurden alle beschriebenen Module zur Online und Offline-Auswertung realisiert und getestet. In Hinblick auf die gesetzte Zielstellung werden in den folgenden Abschnitten Realisierung und Funktionstest von **Bildaufnahme**, **Bildmessung**, **Messmodell** zur Modellerstellung und die **Modellausgleichung** beschrieben.

6.3 Bildaufnahme und Bildspeicher

Zur Realisierung der Bildaufnahme wurden die Spezifika unterschiedlicher Kameraschnittstellen und SDKs der Hersteller in einer Software, dem CamDriver als 32Bit- und 64Bit-

Variante, gekapselt. Er übernimmt die herstellerunabhängige Ansteuerung und Parametrierung für jeweils alle angeschlossenen Kameras. Er erzeugt einen Speicherbereich im Hauptspeicher des Rechners, in den die Bilder direkt ablegt werden können. Bei guten Framegrabbern, beispielsweise von Silicon-Graphics, erfolgt dies ohne die Belastung der CPU, um eine hohe Schreibrate sicherstellen zu können. Getestet wurden die gleichzeitige Aufzeichnung mit drei Kameras und einer Schreibrate von jeweils 800MByte/s .

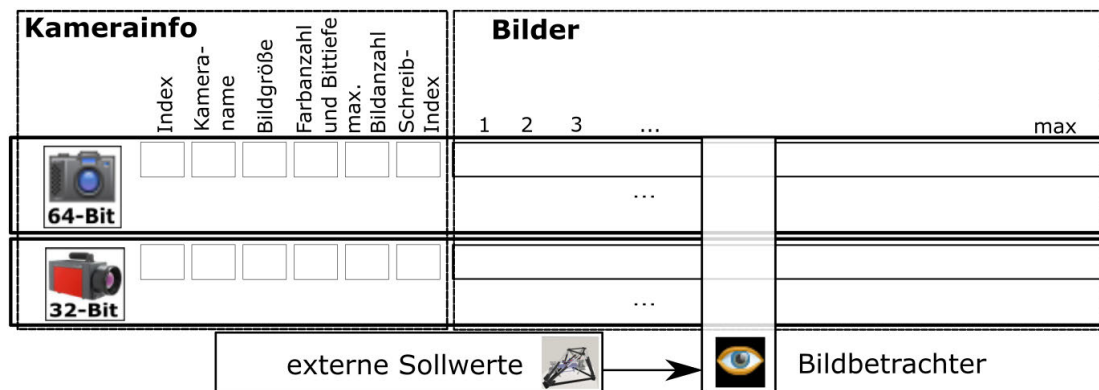


Abbildung 6.3: Struktur des Bildspeichers im RAM

Die Struktur des Bildspeichers ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Dabei werden in einem Header die Kamerainformationen abgelegt, die zur Interpretation des Speicherbereichs benötigt werden. Die Größe des Bildbereiches ist dabei lediglich nur durch den Hauptspeicher limitiert, wodurch der Einsatz von Highspeed-Kameras ermöglicht wird. Der Speicherbereich ist dabei als Ringspeicher aufgebaut und überschreibt zyklisch die veralteten Bilder. Die Größe des Bildspeichers ist einstellbar und richtet sich nach Aufnahme- und Auswertungsgeschwindigkeit. Aus dem Bildspeicher können dann, beispielsweise durch Bildbetrachter, die Bilder dargestellt oder durch die Online-Auswertung entnommen und der Bildmessung zugeführt werden. Mehrfachzugriffe auf das gleiche Bild sind möglich.

6.4 Realisierung und Test der Bildmessung

Die Priorität der Bildmessung liegt auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit. Eine Optimierung hinsichtlich Geschwindigkeitsaspekten erfolgte nicht. Das Hauptaugenmerk liegt in der Erfassung möglichst vieler und hochwertiger Informationen aus den aufgenommenen Bildern. Dabei wird die Bildmessung im grünen Farbkanal bzw. auf Basis der Helligkeitsinformationen bei Grauwertbildern durchgeführt (vgl. [Luh10c, S.117, 179]). Die Vorgehensweise (Abbildung 6.4) gliedert sich in eine schnelle Näherungswertbestimmung (ohne Interpo-

lation), genaue Ellipsenmessung (mit Sub-Pixel-Interpolation) sowie die Code-Bestimmung. Alternativ können zur Steigerung der Geschwindigkeit der Bildmessung Positionsvorgaben aus dem Messmodell zur Näherungswertbestimmung verwendet werden. In den folgenden Abschnitten wird der verwendete Operator zur Ellipsenmessung beschrieben, da er gegenüber dem klassischen Ellipsen- oder Sternoperator modifiziert und erweitert wurde. Anschließend wird die Unsicherheit und Erkennungsrate der Bildmessung überprüft. Weiterhin wird der Einfluss der Beleuchtung auf die Bildmessung experimentell untersucht. Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird auf Basis eines neuen Markendesigns eine Korrekturmethode vorgeschlagen.

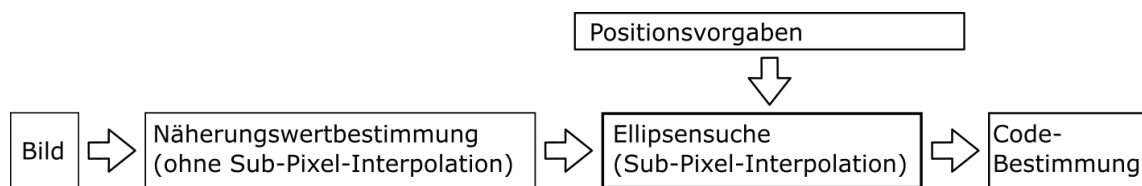


Abbildung 6.4: Implementierter Ablauf der Bildmessung

6.4.1 Modifizierter Ellipsenoperator

Die Grundlage zur Bestimmung einer ausgleichenden Ellipse ist die Bestimmung der Kantenpositionen des Hell-Dunkel-Übergangs des Markenkerns (vgl. Abschnitt 3.2 und Abbildung 3.5 rechts). Zur Bestimmung der Kantenpositionen werden Suchstrahlen vom Mittelpunkt der Startnäherung radial über den Kantenübergang gelegt und der Grauwertsprung am Markenkern gemessen. Üblich sind dabei zwischen 50 und 100 Suchstrahlen. Dabei werden die Suchstrahlen in der Regel in einem konstanten Winkel zueinander angeordnet (Abbildung 6.5 links).

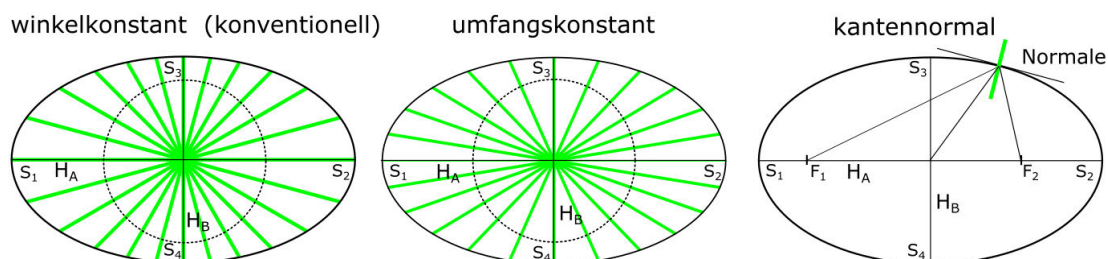


Abbildung 6.5: Optimierung der Suchstrahlanordnung des Ellipsen-Operators

Dies hat bei Ellipsen bei einem größer werdenden Verhältnis der Halbmesser $\frac{H_A}{H_B}$ den Nachteil, dass die Verteilung der Kantenpunkte an den Ellipsenpunkten S_1 und S_2 deutlich geringer ist als an S_3 und S_4 . Damit wirken sich Unsicherheiten der Kantenmessung an den

Punkten S_1 und S_2 stärker auf den Mittelpunkt aus als in Querrichtung. Aus diesem Grund wird eine umfangskonstante Anordnung der Suchstrahlen bevorzugt (Abbildung 6.5 mittig). Diese lässt sich erstellen, wenn eine Schätzung der Halbmesser vorliegt. Weiterhin ist ersichtlich, dass wiederum bei einem größer werdenden Verhältnis der Halbmesser $\frac{H_A}{H_B}$ der Suchstrahl nicht mehr normal auf die Kante trifft, was vor allem bei der Sub-Pixel-Interpolation zu einem Genauigkeitsverlust führen kann. Aus diesem Grund wurde der Operator um eine kantennormale Suchstrahlausrichtung erweitert (Abbildung 6.5 rechts). Damit ist eine gleichmäßige Verteilung und ein konstanter Schnittwinkel der Suchstrahlen zum Markenrand über den gesamten Markenumfang gewährleistet.

Zur Bestimmung der Kantenpunkte auf den Suchstrahlen werden sowohl gradientenbasierte als auch der Moment-Preservation-Operator implementiert (vgl. [LRKB14]). Da diese Operatoren vor allem bei hohen Kontrastverhältnissen arbeiten (vgl. Abschnitt 5.2.5) und dies unter den realen Bedingungen in der Maschine nur bedingt sichergestellt werden kann, wurde ein zusätzlicher Operator, der Gran-Operator, implementiert. Dabei wird der Bildstrahl $y = f(x)$ wie folgt transformiert:

$$g_1 = e^y \text{ sowie } g_2 = e^{-y} \quad (6.1)$$

Die Schnittpunkte $S_1 \dots S_5$ beider transformierten Helligkeitsverläufe g_1, g_2 entsprechen dabei dem gesuchten Helligkeitssprung normal zur Kante. Dies funktioniert auch bei einer schlechten Abbildungsqualität der Marken (beispielsweise überstrahlt, hohes Rauschen und hohe chromatische Aberrationen) zuverlässig (Abbildung 6.6). Ursprünglich wurde das Verfahren in der Chemie eingesetzt und liefert, aufgrund seiner geringen Rauschneigung, vor allem bei geringen Helligkeitsunterschieden sehr gute Ergebnisse.

Die Berechnung der ausgleichenden Ellipse erfolgt konventionell durch einen Ausgleichung einer ausgleichenden Ellipse in die gefundenen Kantenübergänge. Bestimmt werden dabei der Mittelpunkt x_B und y_B , die Halbmesser H_A und H_B sowie der Drehwinkel α der Ellipse im Bild. Unter der Kenntnis des Durchmesser der Marke (D_M) und der Brennweite des Objektivs (c) kann die Entfernung der Marke von der Kamera (Z) mithilfe des Strahlensatzes geschätzt werden. Benötigt wird dazu der Halbmesser H_A der Ellipse sowie die Bildkoordinaten des Ellipsenmittelpunktes (x_B, y_B). Weiterhin kann bei Kenntnis der Sensorgröße die Position des Objektpunktes im Kamerakoordinatensystem geschätzt werden:

$$X = \frac{x_B * D_M}{2 * H_A}, Y = \frac{y_B * D_M}{2 * H_A}, Z = \frac{c * D_M}{2 * H_A} \quad (6.2)$$

Interessanterweise kann die seitliche Verschiebung dabei nur auf Basis von bekannten und konstanten Parametern ermittelt werden. Lediglich zur Abschätzung der Entfernung ist die Objektivbrennweite notwendig, die aus dem Datenblatt entnommen werden kann. Dabei ist jedoch anzumerken, dass aufgrund des geringen Markendurchmessers im Bild die Unsicherheit der Schätzung relativ hoch sein wird und mit hoher Wahrscheinlichkeit nur zur Näherungswertgewinnung hilfreich sein wird.

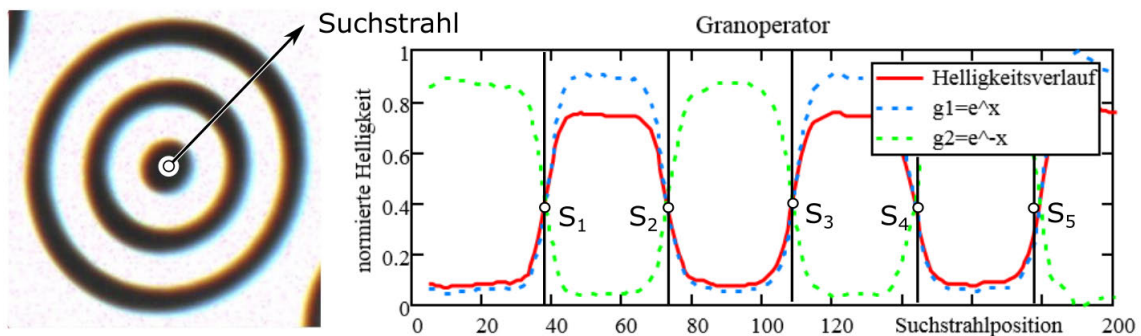


Abbildung 6.6: Links Suchstrahlanordnung sowie rechts Helligkeitsverlauf und Schnittpunkte des Gran-Operators

6.4.2 Messunsicherheit der Bildmessung

Zur Abschätzung der Unsicherheit der Bildmessung wurden mit einer Kamera mit einer Sensorauflösung von 1280×1024 Pixel bei einer Pixelgröße von $5.3 \mu\text{m}$ und unterschiedlichen Brennweiten über eine hohe Anzahl von Bildmessungen einer Marke mit einem Durchmesser von 10 mm die Unsicherheiten der Bildkoordinaten bestimmt (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Blickfelder und Ortsauflösung in Abhängigkeit der Brennweite

Brennweite [mm]	Blickfeldgröße [mm]		Streuung Bild [Pixel]		Streuung Objekt [μm]		
	x	y	s_x	s_y	s_x	s_y	s_z
6.5	300	230	0.046	0.038	12.9	8.8	338.7
12.5	142	112	0.034	0.034	5.9	3.4	179.5
25.0	71	57	0.026	0.049	2.1	2.7	66.1
50.0	39	30	0.019	0.034	0.5	0.8	23.4

Zur Bildmessung wurde der Ellipsen-Operator mit einer Kantenpunktdetektion mit dem Gran-Operator verwendet. Die mittlere Unsicherheit der Bildkoordinaten bei ca. 500 Einzelmessungen pro Brennweite liegt bei unter 0.05 Pixel. Daraus lassen sich die Objektkoordinaten bei bekanntem Markendurchmesser nach Gleichung 6.2 schätzen. Da-

bei zeigt sich, dass die Unsicherheit der Bildmessung für eine ebene Verlagerungsmessung ein hohes Genauigkeitspotenzial bietet.

In einem zweiten Test wurde die Stabilität der Verlagerungsmessung über einen längeren Messzeitraum untersucht. Als Kamera wurde eine Jai-Go verwendet, die sich stark aufheizt (vgl. Abbildung 5.7). Die Streuungen der Objektkoordinaten betragen dabei $s_x = 0.4 \mu\text{m}$, $s_y = 0.6 \mu\text{m}$ sowie $s_z = 7 \mu\text{m}$. Der Verlauf der zeitlichen Messung und ein Histogramm der Abweichungen sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Dabei zeigt sich eine Drift der Messung in Y-Richtung, was durch ein Erwärmen der Kamera in Zusammenhang mit der einseitigen Befestigung hervorgerufen werden kann. Die X-Richtung bleibt bei der Kamera jedoch stabil. Dies bestätigt die Annahme, dass die Kalibrierung bei sich stark erwärmenden Kameras nachgeführt werden muss. Bei dieser Kamera und den gewählten Umgebungsbedingungen wäre das eine Nachführung der Kippung um die X-Achse des Kamerakoordinatensystems.

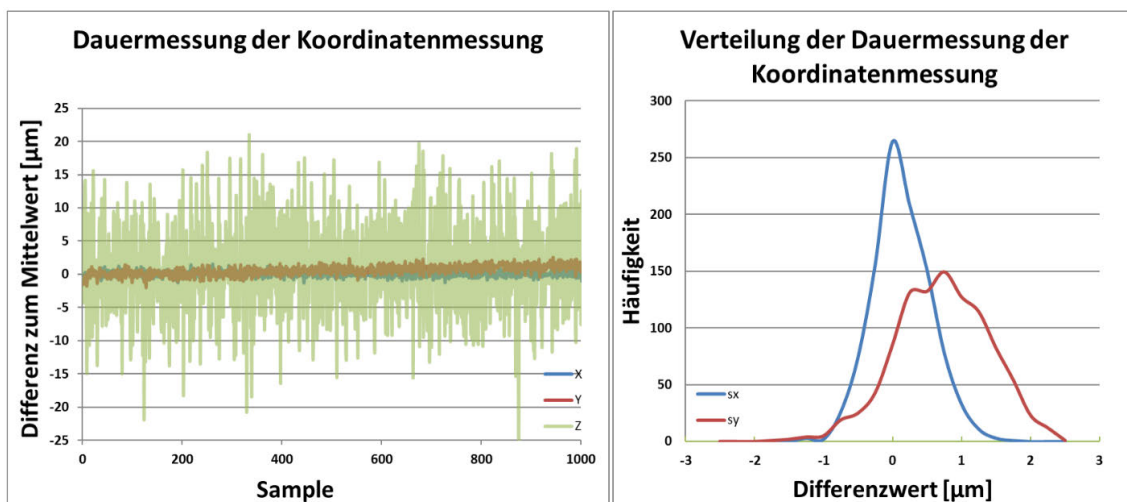


Abbildung 6.7: Messrauschen und Histogramm einer statischen Dauermessung

In einem dritten Test wurden die Marken in einer vorgegebenen Schrittweite in der Ebene bewegt. Die Positionierunsicherheit des Tisches kann dabei mit ca. 0.010mm abgeschätzt werden. Dabei sind in der Ebene eher geringe systematische Fehler der Bildmessung zu erkennen (Abbildung 6.8, links). Eine Schiefstellung der Bewegungs- gegenüber der Sensorebene ist jedoch deutlich erkennbar. In Tiefenrichtung ist eine entfernungsabhängige systematische Abweichung deutlich sichtbar (Abbildung 6.8, rechts). Das systematische Verhalten lässt vermuten, dass eine blickrichtungsabhängige Korrektur den Fehler, analog zu den radialsymmetrischen Korrekturen der Verzeichnung von Objektiven, reduzieren kann. Für eine reine Näherungswertgewinnung sind diese Abweichungen nicht relevant, da die Unsicherheiten ausreichend gering sind.

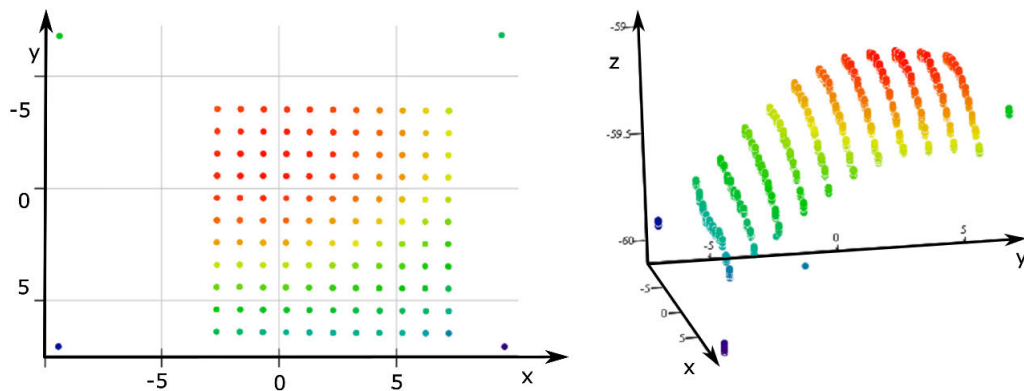


Abbildung 6.8: 3D-Koordinaten der Abstandsschätzung in der Bildebene (links) sowie in Tiefenrichtung (rechts)

6.4.3 Erkennungsrate der Bildmessung

Zum Vergleich von Erkennungsgüte und -rate der implementierten Bildmessung gegenüber kommerziell erhältlichen Messsystemen wurde ein Test-Chart mit einer vollflächigen Abdeckung mit Marken (14-Bit, Aicon-Codierung) erstellt und Bilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten der Kamera aufgenommen.

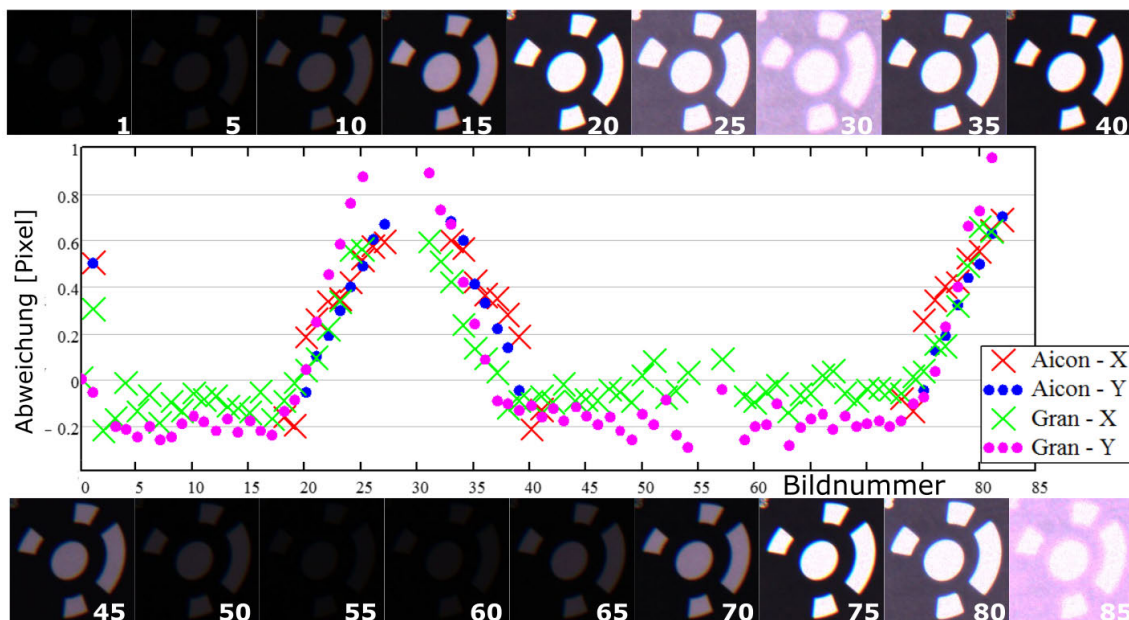


Abbildung 6.9: Helligkeitsabhängige Erkennungsrate unterschiedlicher Bildmessoperatoren

Verwendet wurde dabei eine Kamera (IDS-UEye-LE) mit einer Auflösung von 3840×2748 Pixel, einer Pixelgröße von $1.67 \mu\text{m}$ und einem Objektiv mit 4.8 mm Brennweite. Dabei wurde bei der Auswahl der Komponenten bewusst auf eine für die Messungen an WZM durchaus

repräsentative Konfiguration geachtet, die erhebliche Abbildungsfehler aufweist. Die Auswertung der Bilder erfolgte mit der Software DPA-Pro der Fa. AICON mit den Standardeinstellungen sowie mit dem implementierten Ellipsen-Operator. In Abbildung 6.9 sind Markenkontrast sowie die Anzahl der richtig erkannten Marken der unterschiedlichen Operatoren gegenübergestellt. Die Belichtungsreihe erfolgte von dunkel über hell wieder zu dunkel und abschließend hell, um Erwärmungseffekte der Kamera auszuschließen.

Dabei zeigt sich, dass mit dem eigenen Gran-Operator auch bei ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen sehr gute Ergebnisse erreicht werden können. Das nutzbare Kontrastverhältnis der Bilder, in denen zuverlässige Messungen mit dem Gran-Operator möglich sind, ist gegenüber den Standardeinstellungen einer kommerziell erhältlichen Software erweitert. Damit kann von einer möglichst hohen Anzahl an nutzbaren Eingangsinformationen für die Messung an WZM ausgegangen werden.

6.4.4 Beleuchtungsabhängigkeit und Markendesign

Wie in Abbildung 6.9 zu erkennen, zeigen auch Messungen kommerzieller Software auf kommerziellen Messmarken unter den gewählten Bedingungen eine starke Verlagerung des gemessenen Ellipsenmittelpunktes.

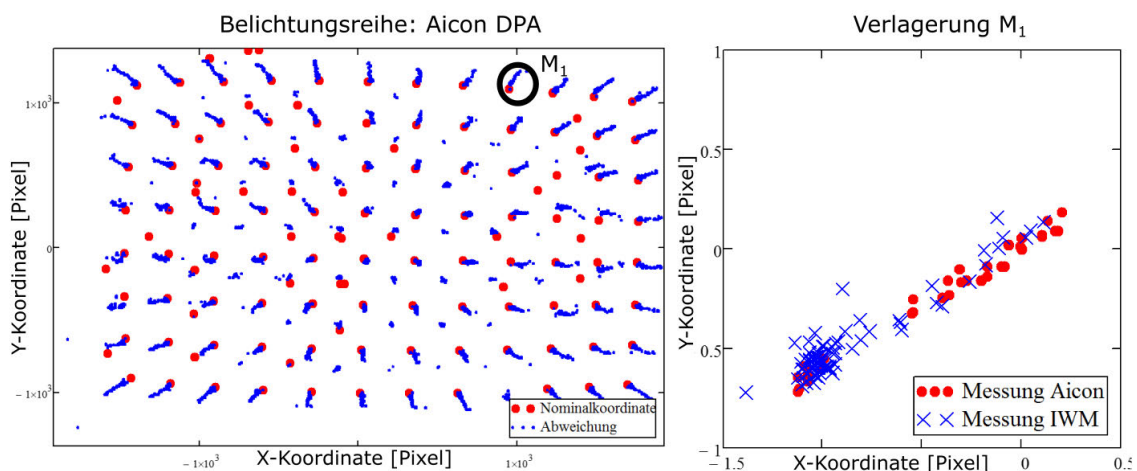


Abbildung 6.10: Verlagerung der Mittelpunktkoordinaten der gemessenen Ellipsen: links Verteilung über das gesamte Bild sowie rechts Verteilung eines Mittelpunktes bei unterschiedlichen Kanten-Operatoren

Betrachtet man die Verteilung der Abweichungen über das Bild (Abbildung 6.10 links), zeigt sich eine radialsymmetrische Verlagerung der gemessenen Ellipsenmittelpunkte von bis zu 2 Pixel, unabhängig davon, welcher Operator zur Bestimmung der Kantenpunkte verwendet wird (Abbildung 6.10 rechts). Dabei zeigt sich, dass die Kantenübergänge auf einem

Kantenstrahl zur Ellipsenmessung mit zunehmender Beleuchtung von Hell nach Dunkel überstrahlen, was eine Zunahme des Markendurchmessers im Bild bewirkt (Abbildung 6.11). Dieser Effekt ist systematisch und ist damit prinzipiell einer Korrektur zugänglich. Ein pragmatischer Ansatz ist die Verwendung zweier komplementärer Helligkeitsübergänge. Da ihr Verhalten gegenläufig ist, kann durch die Betrachtung von zwei Kanten dieser Effekt minimiert werden.

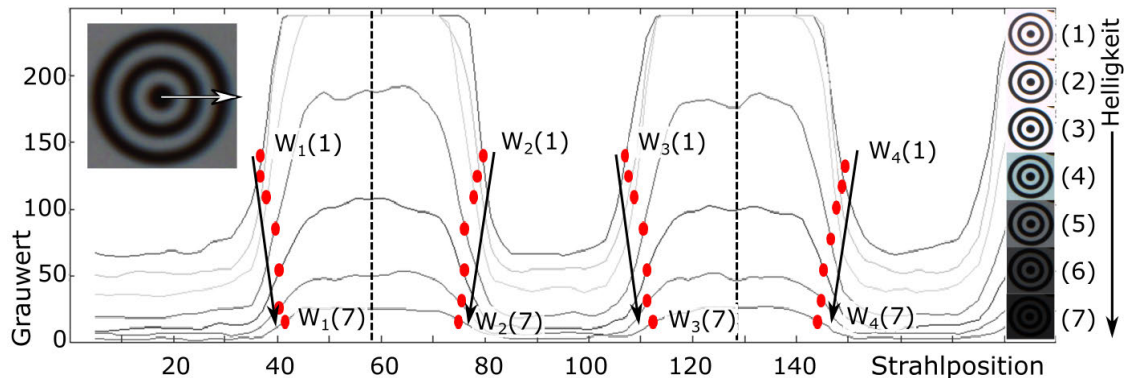


Abbildung 6.11: Helligkeitsabhängige Änderung der Kantenpositionen W_1 bis W_4

Auch auf die Lage des Ellipsenmittelpunktes scheint dieser Ansatz einen Einfluss zu besitzen. In Abbildung 6.12 mittig und rechts sind die korrigierten Verlagerungen in unterschiedlichen Belichtungsstufen dargestellt. Dabei konnte die Verlagerung minimiert werden. Die Marke befindet sich jedoch parallel zur Sensorebene, um eine Überlagerung mit der Abbildungsexzentrizität zu vermeiden.

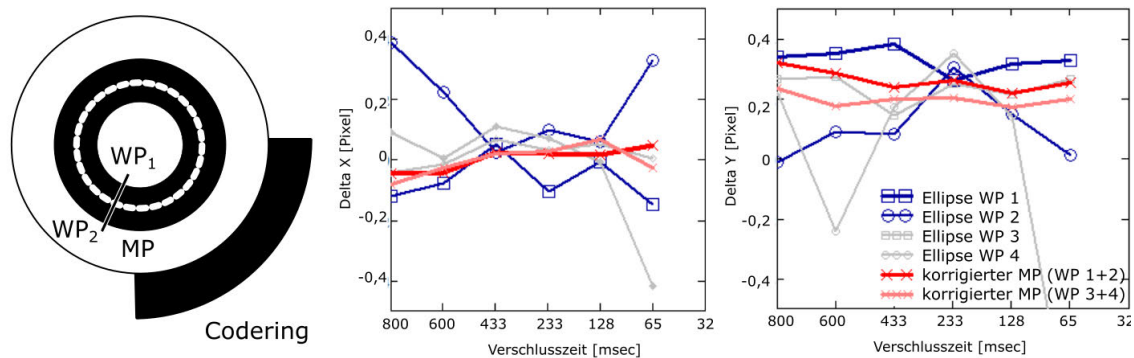


Abbildung 6.12: Rechts und mittig: beleuchtungsabhängige Änderung der X- und Y-Position des Markenmittelpunktes korrigiert und unkorrigiert sowie links: Markendesign zur Minimierung der beleuchtungsabhängigen Verschiebung des Markenmittelpunktes

Bereits mit dem jetzigen Erkenntnisstand scheint eine Anpassung des Markendesigns zweckmäßig (Abbildung 6.12, links). Damit kann die Beleuchtungsabhängigkeit der Bildmessung

mindestens in den bisher betrachteten Aufnahmekonstellationen reduziert werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, wenn der abgebildete Markendurchmesser groß genug ist, aus dem Bild heraus die Abbildungsexzentrizität zu schätzen, was wiederum die erreichbare Genauigkeit der Bildmessung verbessern wird. Auch die Schätzung der 3D-Koordinaten, basierend auf der Bestimmung des Markendurchmessers, sollte damit deutlich verbessert werden.

Die benötigten Operatoren sind derzeit bereits in der Software implementiert und werden zur experimentellen Untersuchung verwendet. In den folgenden Messungen werden konventionelle Marken ohne die Korrektur der beleuchtungsabhängigen Effekte verwendet.

6.5 Implementierung der Modellkomponenten

Eingebettet ist die Modellkomponente in das „Toolkit“, da bei der Einrichtung, Optimierung und Kalibrierung der Messkonfigurationen der Bedarf zur softwareseitigen Unterstützung hinsichtlich Plausibilitätsprüfung und Visualisierung am größten ist. Die Zielstellung bei der Implementierung der Modellkomponente ist dabei, möglichst schnell und effizient Änderungen des Modells hinsichtlich Struktur und Parametrierung vornehmen zu können, weshalb auf ein Baukastenprinzip zurückgegriffen wird (Abbildung 6.13).

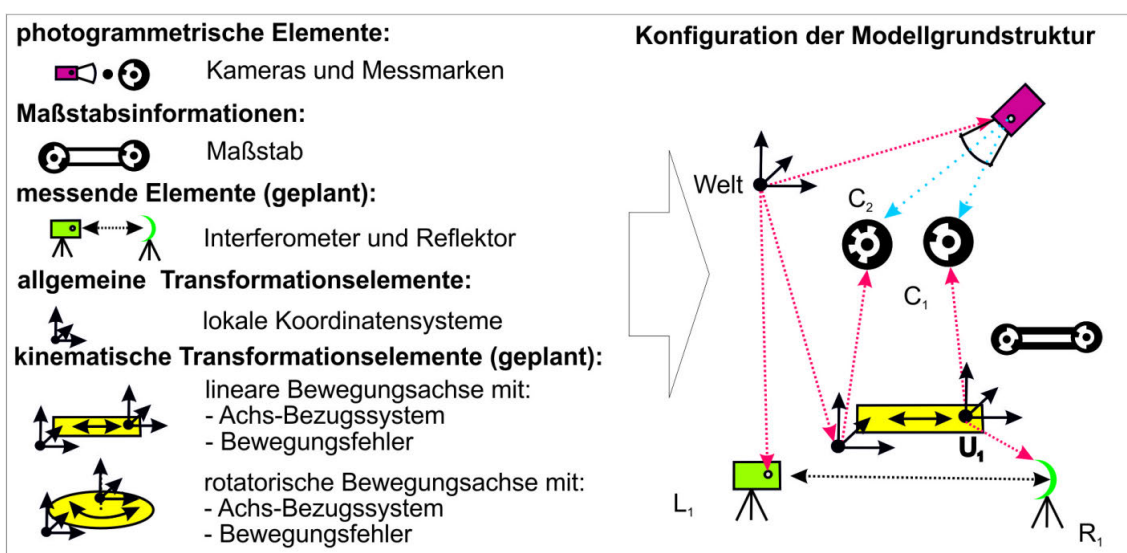


Abbildung 6.13: Baukasten zur Erstellung von Messkonfigurationen

Der Baukasten enthält aktuell vorgefertigte Elemente für Kameras und Marken sowie allgemeine Transformationsobjekte, mit denen beliebige serielle Strukturen modelliert werden können. Zur Visualisierung und zur Konsistenzprüfung der Modellstruktur wurde ein

3D-Viewer erstellt, der die Abhängigkeiten darstellen kann (Abbildung 6.14 oben rechts). Weiterhin kann ein Objekt über einen Dialog erstellt und einem Basisobjekt zugewiesen werden. Die Parametrierung eines Objektes ist direkt zugänglich und kann auch nach und nach weiter detailliert werden. Dazu kann über eine Parametermatrix direkt auf alle Parameter des Modells in allen Objektzuständen zugegriffen werden.

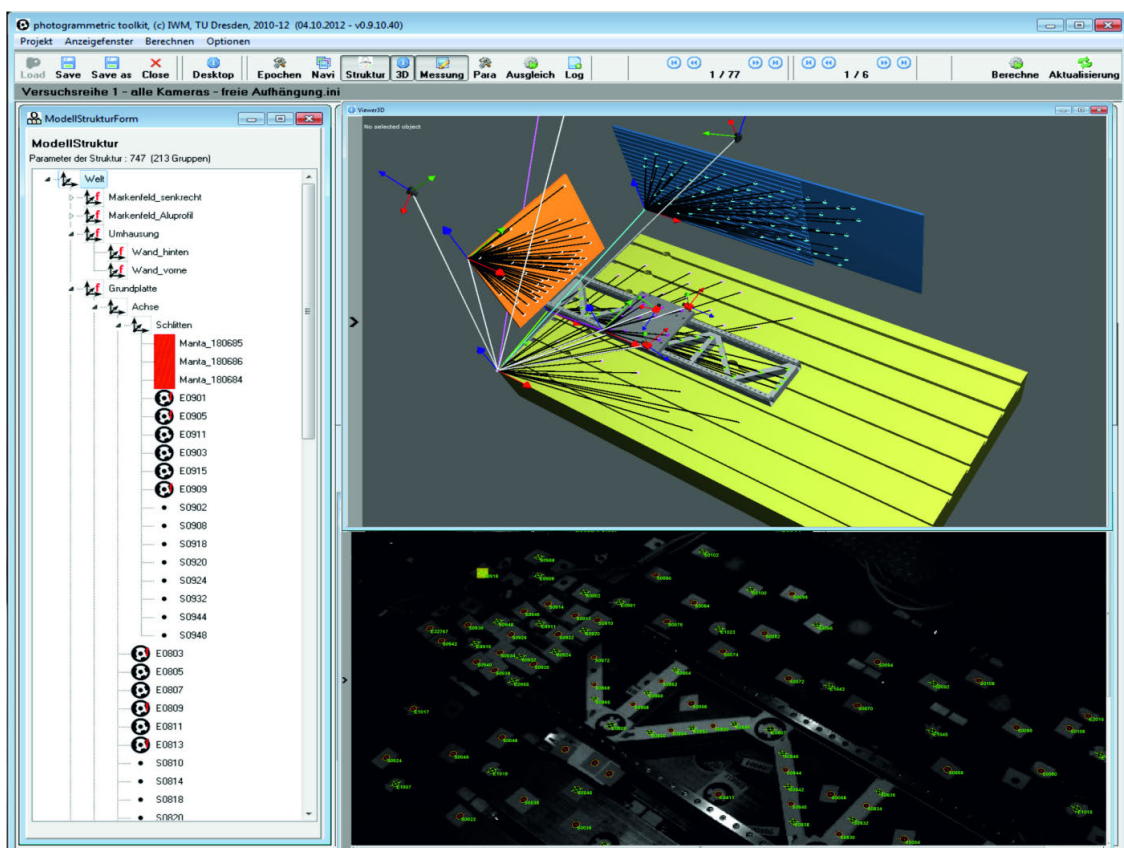


Abbildung 6.14: Objektstruktur (links), 3D-Visualisierung (rechts oben) und Messbild (rechts unten) des Demomodells im Toolkit

Die realisierte Modellkomponente konnte erfolgreich getestet werden. Es können Strukturmodelle erstellt und Objektzustände abgeleitet werden. Die Fähigkeit, Achsen und Gelenke zu erstellen, konnte getestet werden und wird in den folgenden Abschnitten diskutiert. Maßstabsinformationen von Strecken werden berücksichtigt und im Gleichungssystem als Nebenbedingungen eingeführt. Die Datumsfestlegung erfolgt durch die Festlegung von entsprechenden Fixpunkten, da eine freie Netzausgleichung aktuell noch nicht implementiert ist.

Die Modellkomponente generiert automatisch das lineare Gleichungssystem, bestehend aus dem Vektor der simulierten Bildmessung $L_0(X)$, der zugehörigen Jacobimatrix A sowie dem Parametervektor x . Dieses wird zusammen mit dem Beobachtungsvektor L aus der

Bildmessung an die Ausgleichungskomponente übergeben.

6.6 Realisierung und Test der Ausgleichungskomponente

Die Ausgleichungskomponente löst das formal aufgestellte lineare Gleichungssystem $L - L_0(X) = Ax$. Dazu können prinzipiell unterschiedliche Lösungsverfahren verwendet werden, beispielsweise Gauss-Markov oder Levenberg-Marquardt. Da das Modell auf eine Standard-Ausgleichungsaufgabe zurückführbar ist, können hochspezialisierte und hinsichtlich Speicherbedarf und Rechenleistung optimierte BLAS-Softwarebibliotheken verwendet werden (Abbildung 6.15). Interessant sind dabei vor allem Bibliotheken, die eine Parallelisierung auf Rechnebene verwenden, wie etwa Plasma (CPU) oder cuBLAS (GPU). Hauptaugenmerk wird dabei auf die Bibliothek Plasma gelegt, da sie kostenfrei eingesetzt werden kann und eine Parallelisierung über mehrere CPUs hinweg bietet. Zum Test der Funktionalität und Performance wurde ein repräsentatives Beispiel der Bestimmung der geometrisch-kinematischen Abweichung einer linearen Einzelachse mit einem Verfahrensweg von 1500 mm gewählt. In (Abbildung 6.14) ist die Visualisierung des Modells im Toolkit dargestellt.

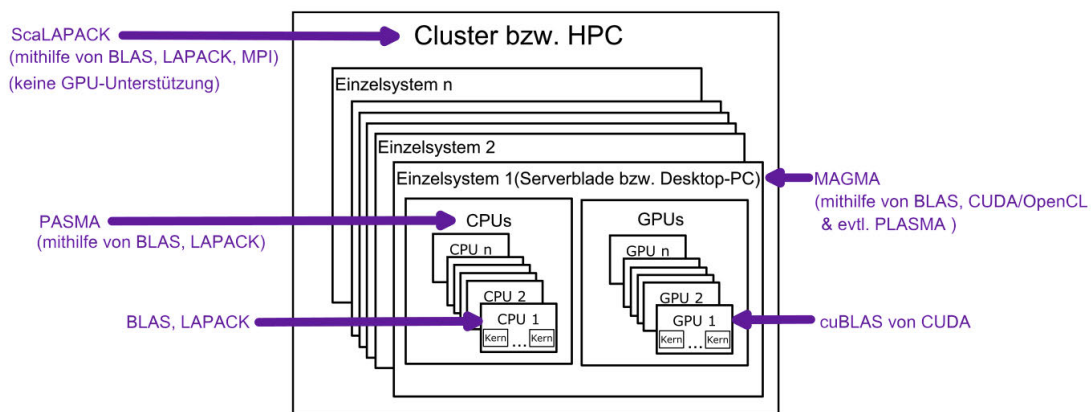


Abbildung 6.15: Übersicht verfügbarer Softwarebibliotheken zur linearen Algebra (BLAS)

Dieses Modell wurde reduziert (75 Objektzustände, zwei Kameras, 500 Marken) sowie vollständig (151 Objektzustände, vier Kameras, ca. 500 Marken) aufgestellt und berechnet. In Tabelle 6.3 sind dabei Parameteranzahl, Bildmessungen und der Speicherbedarf der Elemente des Normalgleichungssystems beider Modelle gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass auch größere Modelle mit insgesamt 600 Bildern, 60000 Bildmessungen und 4000 unbekanntem Parametern mit Desktop-Hardware verarbeitet werden können.

Tabelle 6.3: Modell zur Optimierung der Performance mit Anzahl von Parametern und Bildmessungen sowie der benötigte Speicher

	vollständiges Modell	reduziertes Modell
Objektzustände	151	75
Bildanzahl und Auflösung	304 mit 6576x4069 304 mit 2448x2050	75 mit 4928x3264 75 mit 384x288
unbekannte Parameter u	3934	1014
Bildmessungen $\frac{1}{2}n$	59973	1876
$A_{n,u}$ bzw. $A_{u,n}^T$	3600 MB	29 MB
$l_{n,1}$	0,9 MB	0,03 MB
$Q_{u,u} = A_{u,n}^T * P_{n,n} * A_{n,u}$	118 MB	7,8 MB
$n_{u,1} = A_{u,n}^T * P_{n,n} * l_{n,1}$	0,03 MB	0,008 MB
\sum (Gesamt)	7,1 GB	65,8 MB

Auf einem inzwischen betagten Desktoprechner (Einführungsdatum 2009, Intel I7-960 mit 4 physischen Kernen, aktiviertem Hyperthreading und 64 GByte RAM) sind in Tabelle 6.4 die benötigten Berechnungszeiten beider Modelle gegenübergestellt. Die benötigte Zeit zur Berechnung der Jacobimatrix in der Modellkomponente ist dabei nur wenig geringer als die Lösung des Gleichungssystems, was Optimierungspotenzial aufzeigt. Insgesamt kann festgestellt werden, dass selbst auf älterer Hardware auch große Modelle in überschaubaren Berechnungszeiten berechnet werden können.

Tabelle 6.4: Performance der Modellausgleichung als CPU-Zeit [s]

Rechenschritte	vollständiges Modell	reduziertes Modell
Vorbereitung Bilder	5	ca. 0
Vorbereitung Parametervektor	1	ca. 0
Vorbereitung Bildpunktarray	3	ca. 0
Vorbereitung Jakobi-Matrix	505	26
\sum (Datenvorverarbeitung)	514	26
Jacobimatrix transponieren Normalgleichungssystem Jacobimatrix ^T * Jacobimatrix Ergebnis Invertieren	805	9
Varianz-Kovarianz-Matrix	165	3
\sum (Berechnung)	970	12
\sum (Gesamt)	1484	38

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass Modelle erstellt und auch ohne Optimierungen des Lösungsverfahrens auf BLAS-Ebene ausgeglichen werden können. Dabei hat sich die Anbindung der Plasma-Bibliothek als zielführend erwiesen.

6.7 Verifikation der 3D-Koordinatenbestimmung

Zur Verifikation der Ausgleichungsergebnisse wurden an einer Experimentalmaschine mit einem Messvolumen von über 2.5 m x 2.5 m x 2.5 m die 3D-Koordinaten geklebter Marken durch eine Bündelblockausgleichung im Aicon-DPA sowie im Toolkit miteinander verglichen. Der RMS der Standardabweichungen der mit Aicon 3D-Studio ermittelten 3D-Koordinaten beträgt $s_x = 0.216$ mm, $s_y = 0.104$ mm sowie $s_z = 0.259$ mm. In Abbildung 6.16 sind die Punktwolken aus Aicon (schwarz) und dem Toolkit (grün) übereinandergelegt und die Restklaffungen (rot) dargestellt.

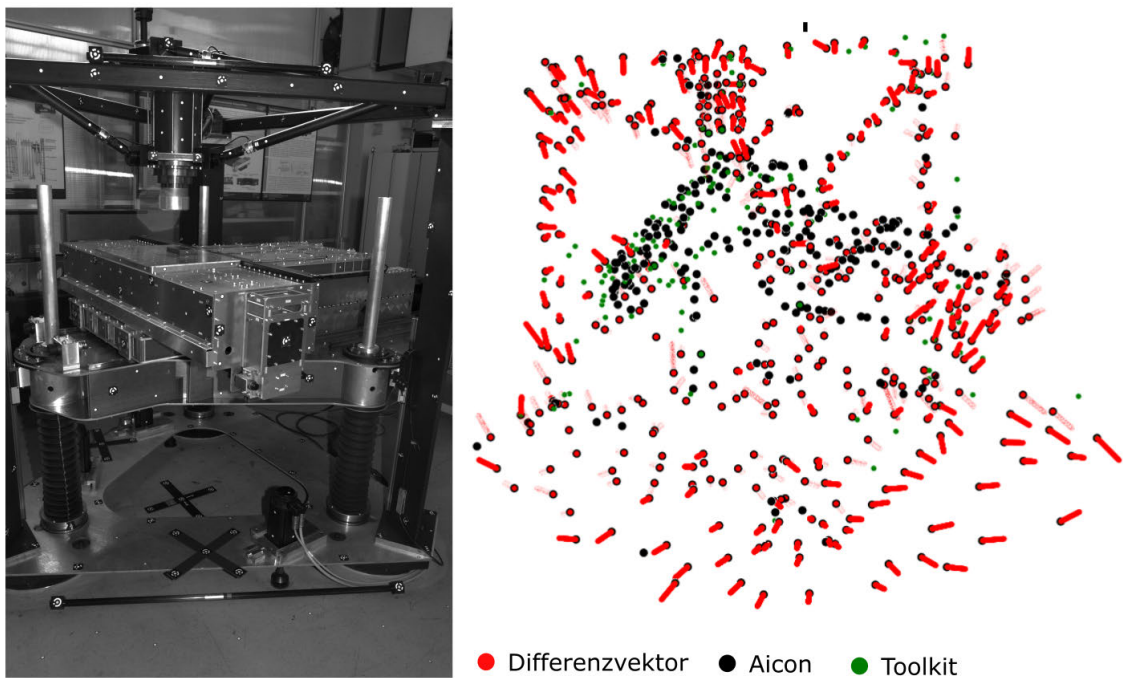


Abbildung 6.16: Stark überhöhte Residuen der 3D-Koordinaten einer Bündelblockausgleichung, einmal Aicon 3D-Studio und einmal mit dem Toolkit gerechnet

Dabei zeigen sich mittlere Restklaffungen der 3D-Koordinaten von ca. 0.1 mm mit einem deutlich erkennbaren systematischen Anteil. Die Abweichungen liegen insgesamt innerhalb der Standardabweichung beider Ausgleichungen. Das Fehlerbild der systematischen Abweichungen deutet vor allem auf die Art der Datumsfestlegung hin. Weiterhin ist im Toolkit keine Varianzkomponentenschätzung implementiert, was auch eine systematische Abweichung der Koordinaten erklären kann.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Ausgleichungsergebnisse im Rahmen der im Toolkit implementierten Funktionen hinsichtlich Netzausgleichung und Varianzkomponentenschätzung relativ gut übereinstimmen. Es kann von einer prinzipiellen Funktionsfähigkeit ausgegangen werden.

6.8 Zwischenfazit

Mit dem Funktionstest der Komponenten kann gezeigt werden, dass die Softwarekomponenten und die daraus abgeleiteten Anwendungen prinzipiell funktionsfähig sind. Weiterer Forschungsbedarf hat sich bei der Bildmessung Verifikation der Beleuchtungseinflüsse herausgestellt. Diese Einflüsse sind sowohl in kommerzieller Software als auch in der implementierten Bildmessung vorhanden und können als limitierender Faktor angesehen werden.

Für die Modellausgleichung sollte zur Verbesserung der Genauigkeit der Bündelblockausgleichung eine freie Netzausgleichung sowie eine Varianzkomponentenschätzung implementiert werden. Im jetzigen Stand ist somit eine Aussage hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit der Methoden nur über den Vergleich mit externen Referenzgrößen oder als relative Messung möglich.

Kapitel 7

Experimentelle Verifikation

Die experimentelle Verifikation der Modellierungsmethode erfolgt an ausgewählten Beispielen (Tabelle 7.1) zur Komponenten- und Maschinenanalyse sowie zur simulativen Erstellung und Optimierung von Messkonfigurationen. Die Anwendungsbeispiele stammen aus erfolgreich abgeschlossenen Forschungsprojekten zur Verbesserung des geometrischen, elastischen und thermo-elastischen Verhaltens von Hexapoden bzw. einer 3-achsigen-Experimentalmaschine, zur Optimierung der Bahnbewegung an schnell laufenden Verarbeitungsmaschinen sowie zur wirtschaftlichen Posemessung. Die Beispiele verdeutlichen generell das Potenzial photogrammetrischer Messungen im Maschinenbau sowie speziell der erweiterten Modellierungsmethode. Weiterhin zeigen sie, dass wenn ein realitätsnahes Messmodell verwendet wird, auch mit einfacher Messtechnik die geforderte Messauflösung und auch Genauigkeit erreicht wird.

Tabelle 7.1: Vorgehensweise zur Verifikation der erweiterten Modellierung

	Nr.	Szenario
Komponenten-analyse	1	Posemessung am Arbeitsorgan einer schnell laufenden Verarbeitungsmaschine
	2	Erfassung der elastischen Verlagerung an Kardangelenken
	3	Erfassung der geometrische-kinematischen Abweichungen an einer Linearachse
Maschinenanalyse	4	Geometrisch-kinematische Kalibrierung von Hexapoden unterschiedlicher Baugröße
	5	Erfassung der thermo-elastischen Verlagerung an einem Hexapoden
Simulation	6	Messsystemoptimierung zur Verlagerungsmessung an einer 3-Achs-Maschine
	7	Verifikation der Simulation

Zur Komponentenanalyse werden die Bewegungen an einer schnelllaufenden Verarbeitungsmaschine, die elastische Verlagerung von Kardangelenken sowie die geometrisch-kinematischen Abweichungen an einer translatorischen Vorschubachse erfasst. Die Maschinenanalyse erfolgt an zwei Hexapoden. Dabei werden die geometrisch-kinematischen Abweichungen direkt erfasst und die Parameter des Fehlermodells bestimmt. Weiterhin werden die thermo-elastischen Verlagerungen des Endeffektors im Arbeitsraum durch eine vollständige Posemessung erfasst. Mit den letzten beiden Beispielen werden die Möglichkeiten zur simulationsgestützten Modellierung und Optimierung von Messkonfigurationen sowie die Verifikation der Simulation am realen Objekt dargestellt. Gegenstand ist dabei die Monte-Carlo-Simulation einer Messkonfiguration zur Erfassung der geometrisch-kinematischen Abweichungen sowie der thermo-elastischen Verlagerungen.

Der Schwerpunkt liegt dabei in der Beschreibung der Vorgehensweise und der Modelle der Messkonfigurationen. Zur Beurteilung des Genauigkeitspotenzials der Messungen wird in der Regel auf die inneren Genauigkeitskenngrößen zurückgegriffen. Dies ermöglicht eine Darstellung der Potenziale zur Senkung der Unsicherheiten, erlaubt jedoch keinen direkten Rückschluss auf die Genauigkeit der Messungen (vgl. Abschnitt 3.4.1).

7.1 Komponentenanalyse

Die Beispiele, die Analyse der Arbeitsorganbewegung einer schnelllaufenden Verarbeitungsmaschine und die Verlagerungsmessung an Kardangelenken, werden anhand der Komplexität der verwendeten Modelle aufsteigend dargestellt. Während die Erfassung der Arbeitsorganbewegung alternativ mit einem Stereokamerasystem realisiert werden könnte, sind Messungen der elastischen Verlagerungen und die geometrisch-kinematischen Fehler der Linearachse mit kommerziell verfügbaren Mitteln nur bedingt realisierbar.

7.1.1 6DoF-Arbeitsorganbewegung (TCP)

Das Ziel ist die Bestimmung der Bewegungsgüte an der Wirkstelle zur Optimierung von Bahngeometrie und Bahngeschwindigkeit für einen stabilen, möglichst taktratenunabhängigen Prozess. Dazu wurde in einem ersten Versuch die Bewegung des Arbeitsorgans zur Verifikation der simulierten Bewegungsbahn erfasst. Mit der optimierten Bahn wurde anschließend in einem zweiten Versuch mit einer verfahrbaren Kamera die Stückgutbewegung überwacht, um die Bewegungsgüte zu analysieren und ggf. bei Überschreitung der zulässigen Bewegungsabweichung des Stückgutes die Maschine zu stoppen.

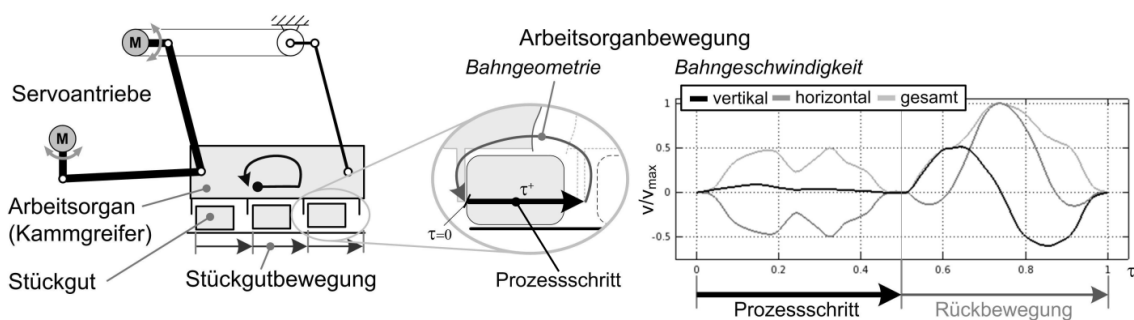


Abbildung 7.1: Aufbau und Arbeitsorganbewegung des Kammgreifers einer schnelllaufenden Verarbeitungsmaschine [HRKG13]

Die Messaufgabe besteht in der Erfassung einer als eben anzunehmenden Bewegung eines

bis zu 400 Takte/min schnelllaufenden Kammgreifers (Abbildung 7.1) sowie der Bewegung des Stückguts mit einer hohen zeitlichen Auflösung (1 ms) mit einer mittleren Messunsicherheit (< 0.1 mm bzw. $< 0.1^\circ$).

Der zu überwachende Messbereich zur Analyse der Arbeitsorganbewegung beträgt ca. 350 mm \times 200 mm und besitzt nur eine sehr geringe Tiefenausdehnung. Um die geforderte Messrate von 1 kHz erreichen zu können, wurden in den beiden Versuchen eine Highspeed-Kamera mit einer effektiv nutzbaren Speicherbandbreite von über 800 MByte/s eingesetzt. Mit der verwendeten Auflösung der Messbilder von 1200×400 Pixel ergibt sich eine Ortsauflösung von ca. $0,3$ Pixel/mm. Zur Überwachung der Stückgutbewegung gelten erhöhte zeitliche Anforderungen, da bei einer fehlerhaften Bewegung das Arbeitsorgan innerhalb der Rückbewegung zum Stillstand gebracht werden soll. Dazu wurde eine zusätzliche mit dem Stückgut mitbewegte Kamera verwendet, die ein entsprechend kleineres Blickfeld überwacht (Abbildung 7.2).

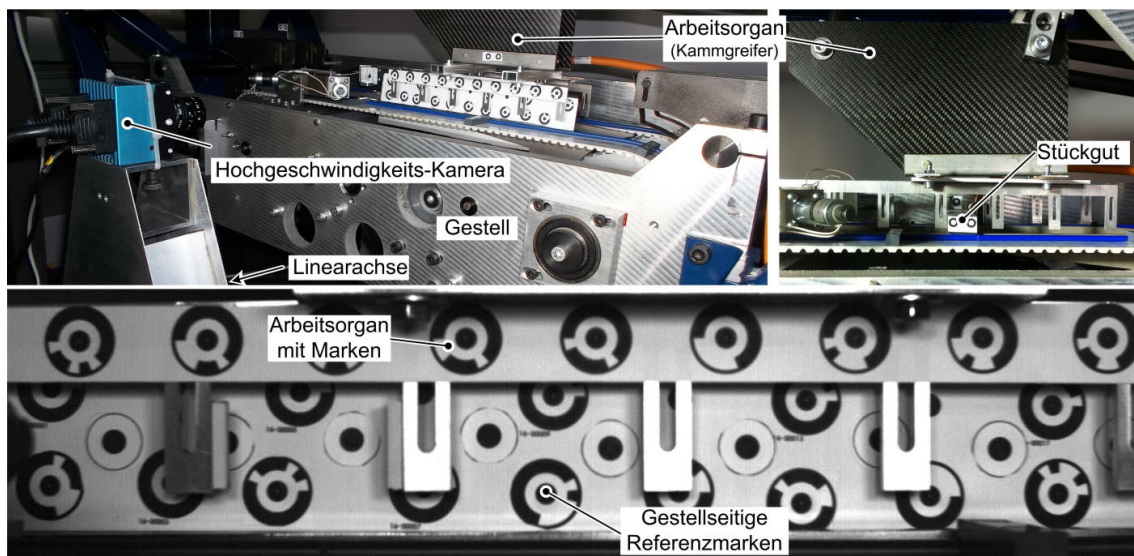


Abbildung 7.2: Messanordnung und Blickfeld der Kamera an der Verarbeitungsmaschine [HRKG13], [RHG15]

Zur Signalisierung wurde am Gestell eine Referenzplatte mit Marken fest angebracht sowie der Kammgreifer mit einer Reihe von Marken versehen. Die Referenzplatte $\{R\}$ wurde parallel zum Arbeitsorgan $\{A_0\}$ ausgerichtet. In erster Näherung wurde davon ausgegangen, dass der Kammgreifer eine ebene Bewegung mit drei Bewegungsfreiheitsgraden $T_{\{R\}}^{\{A_0\}} = f(x, y, \alpha)$ ausführt. Die Koordinaten der Marken wurden vorbestimmt und können bei den geforderten Genauigkeiten als bekannt definiert werden. Die Kamera K_1 wurde relativ zum übergeordneten Koordinatensystem definiert und überblickt die Referenzplatte und den Greifer vollständig (Abbildung 7.3).

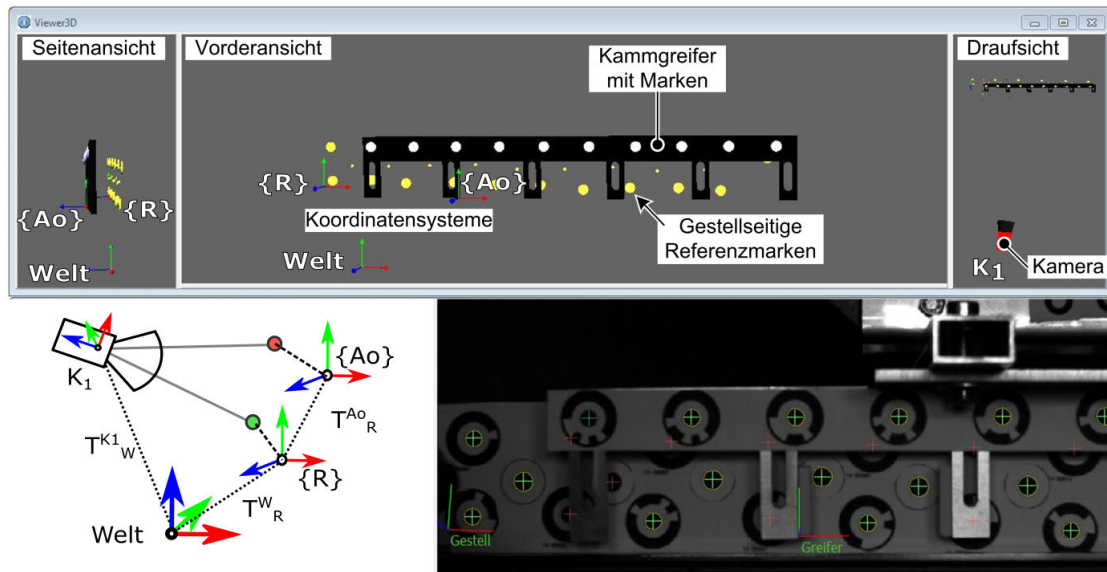


Abbildung 7.3: Modellstruktur, Koordinatensysteme und Bildmessung am Kammgreifer

Berechnet werden die taktratenabhängige vektorielle Abweichung und der Drehwinkel. Dabei kann festgestellt werden, dass mit diesem einfachen Messaufbau die reale Bewegung mit einer hohen Güte erfasst werden kann. Auffällig ist bei der quasistatischen und der schnellen Bewegung, dass eine hohe Verdrehung in Abhängigkeit der Taktrate auftritt (Abbildung 7.4 oben).

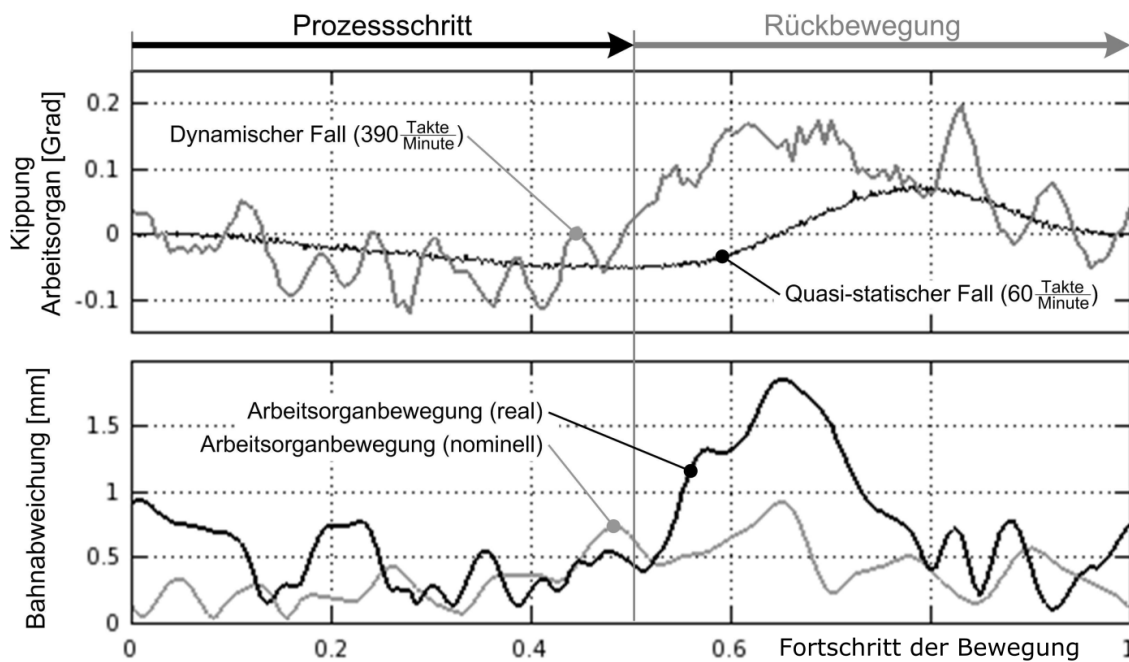


Abbildung 7.4: Analyse der Arbeitsorganbewegung hinsichtlich Abweichung und Kippung des Arbeitsorgans

Weiterhin sind Torsionsschwingungen um die Y-Achse deutlich erkennbar. Vergleicht man

die Antriebs-Istwerte mit den gemessenen Verlagerungen, zeigt sich weiterhin eine ähnliche Charakteristik, jedoch eine deutliche Überhöhung der Abweichungen, was auf elastische Deformationen im Riementrieb der Antriebe zurückgeführt werden kann (vgl. Abbildung 7.1 links). Während in den Antrieben aufgrund der Rückwirkung der Massenträgheitskräfte eine Schwankung des Schleppabstandes zu erkennen ist, wirken am Arbeitsorgan zusätzlich die Deformationen von Getriebe und Antriebsstrang (Abbildung 7.4 oben).

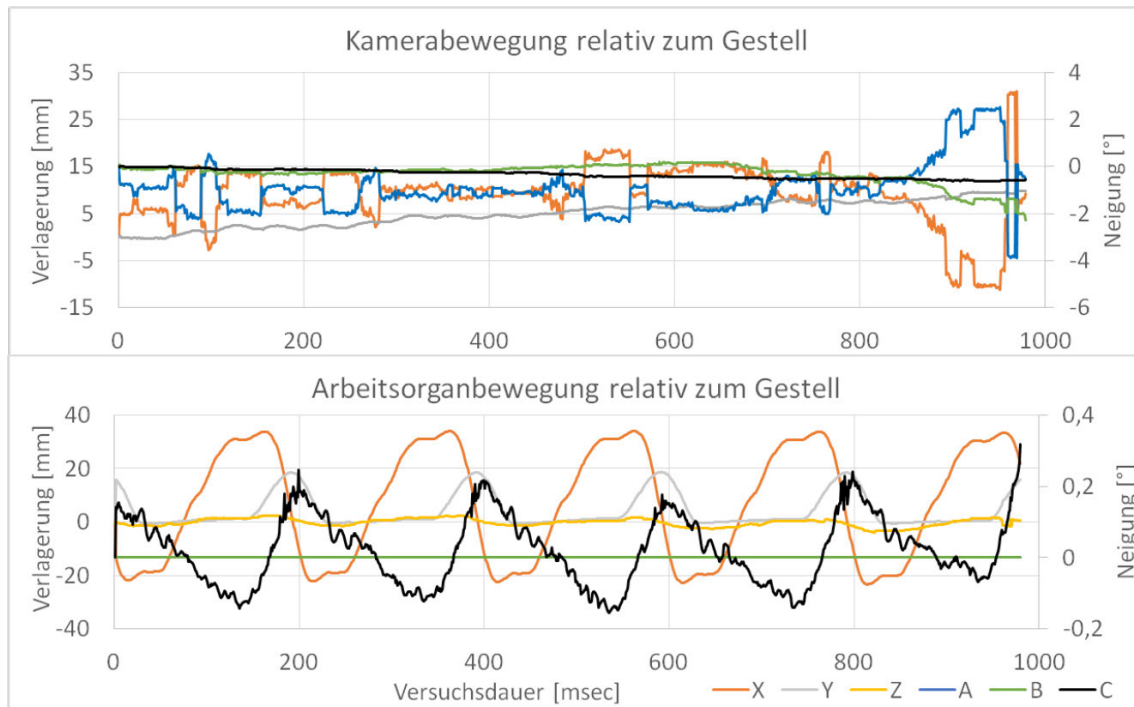


Abbildung 7.5: Verlauf der Äußeren Orientierung der bewegten Kamera

In dem zweiten Versuch wurde das Blickfeld der Kamera deutlich verkleinert und die Kamera mit der Linearachse synchron zum Stückgut verfahren. Bei der Analyse der Kamerabewegung ist allerdings eine Kippung der Kamera relativ zum Gestell um X bei einer gleichzeitigen Verlagerung in Y mit bis zu 10 mm erkennbar (Abbildung 7.5 oben). Dabei hat sich aufgrund der hohen wirkenden Masseträgheitskräfte das Gestell relativ zum Schlitten bewegt. Betrachtet man nur die Verlagerung am Arbeitsorgan relativ zum Gestell (Abbildung 7.5 unten), zeigt sich der gleiche charakteristische Verlauf. Gemessen wurden X, Y, Z, A mit Unsicherheiten von $s_x = 7 \mu\text{m}$, $s_y = 23 \mu\text{m}$, $s_z = 231 \mu\text{m}$ sowie $s_a = 0,005^\circ$. Jedoch ist eine Drehschwingung auch in dieser Messung sehr dominant. Eine weiterführende Ursachenanalyse konnte die Schwachstellen auch finden und beseitigen. Auf Basis dieser Messwerte wurde eine Optimierung der Vorschubbewegung und gleichzeitig eine Überarbeitung der Mechanik durchgeführt.

Zur Analyse der überarbeiteten Kinematik wurde ein Stereokamerasystem, bestehend aus

zwei Highspeed-Kameras, verwendet und wieder die Pose des Arbeitsorgans relativ zum Gestell erfasst. Bei dem Vergleich der steuerungsinternen Messungen, auf Basis der Weggeber der Motoren, mit der photogrammetrisch erfassten Bewegung zeigt sich horizontal eine ideale Bewegung, jedoch in vertikaler Richtung eine deutliche Schiefstellung von ca. $3 \mu\text{m}/\text{mm}$ gegenüber der angenommenen Bewegung (Abbildung 7.6 links). Da die Abweichungen über mehrere Messzyklen hinweg reproduzierbar sind, kann von einem Maßfehler der Getriebeglieder oder der Gelenkpunkte ausgegangen werden. Eine leichte Schwingung sowohl der Antriebsmesswerte (ca. $1 \mu\text{m}$) als auch der optischen Messung (ca. $2 \dots 3 \mu\text{m}$) ist erkennbar. In der optischen Messung ist jedoch eine Hysterese von bis zu $10 \mu\text{m}$ auffällig, die auf ein Spiel in den Gelenken der Kinematik deutet.

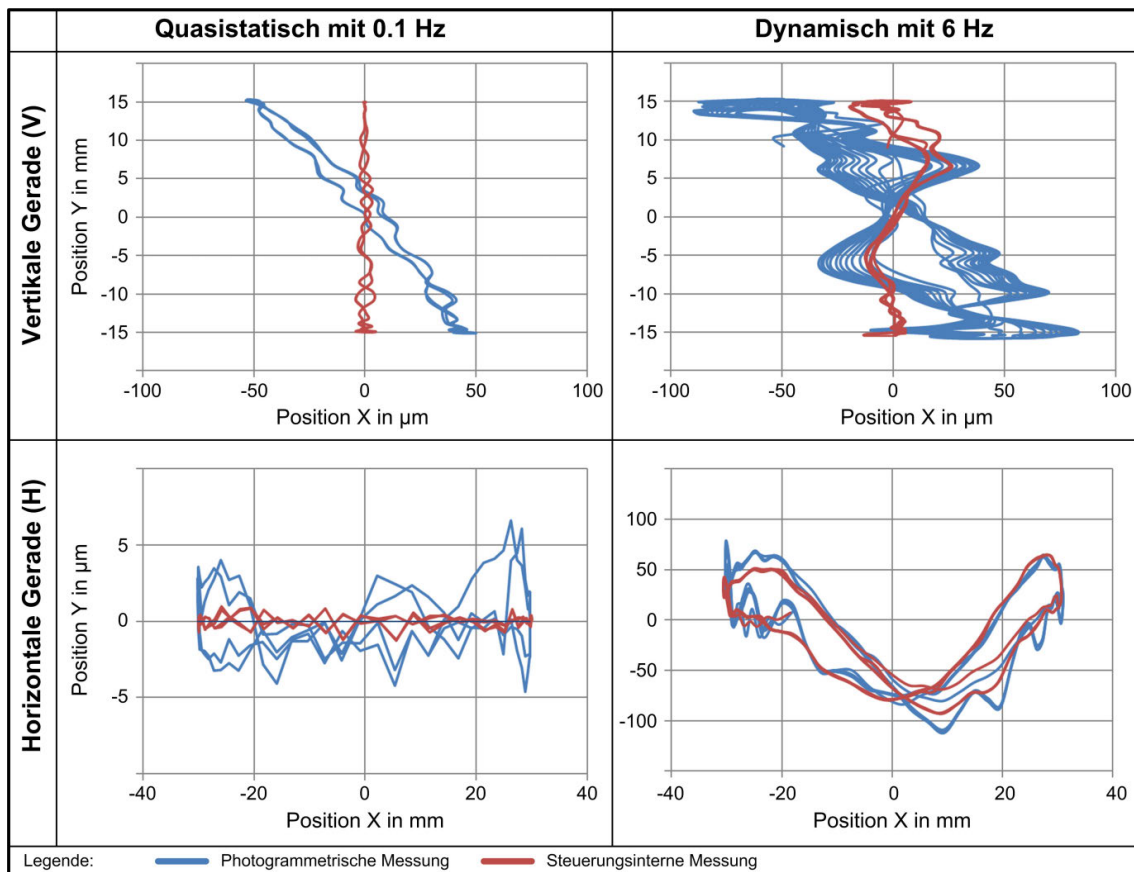


Abbildung 7.6: Bewegungsanalyse der überarbeiteten Kinematik

Betrachtet man die Abweichungen der horizontalen Bewegung des Arbeitsorgans mit 6 Hz (Abbildung 7.6 rechts), zeigen sich deutliche elastische Abweichungen in Form einer Hysterese von bis zu $50 \mu\text{m}$, die auch in den Messsystemen der Antriebe registriert werden können. Dies zeigt eine dynamische Vergrößerung des Schleppabstandes der Antriebe aufgrund der wirkenden Massenträgheit des Arbeitsorgans. Die Größenordnung der Verlagerung steigt auf insgesamt $120 \mu\text{m}$ an. In vertikaler Bewegungsrichtung zeigen sich jedoch

deutliche Unterschiede. Während die registrierte Hysterese der Antriebe mit ca. $10\ \mu\text{m}$ relativ gering ausfällt, werden mit dem optischen Messsystem Größenordnungen von bis zu $50\ \mu\text{m}$ erfasst.

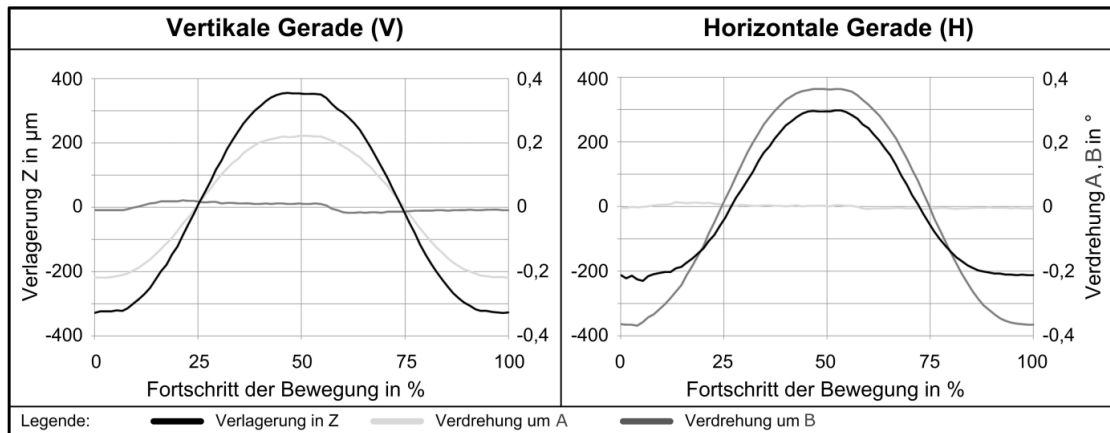


Abbildung 7.7: Abweichung von der horizontalen und vertikalen Bewegungsvorgabe des Arbeitsorgans

Die Größenordnung der Verlagerung ändert sich gegenüber der quasistatischen Bewegung jedoch nur geringfügig. Betrachtet man die statischen Bewegungsabweichungen normal zur Arbeitsbewegung (Z), beträgt die vertikale Verlagerungen $0.7\ \text{mm}$ sowie die horizontale $0.5\ \text{mm}$ bei einem Verfahrensweg von $30\ \text{mm}$ (Abbildung 7.7). Weiterhin ist eine Verdrehung des Arbeitsorgans um die X-Achse (A) von 0.45° sowie um die Y-Achse (B) von 0.7° erkennbar. Dies kann auf eine Schiefstellung der Achsen zueinander zurückgeführt werden.

Für die Bewegung des Stückgutes wurden zwei optimierte Arbeitsorganbewegungen erstellt: eine kontinuierliche Schiebebewegung, bei der das Stückgut vorwärts geschoben wird, sowie eine neuartige unterbrochene Bewegung, bei der das Stückgut angestoßen und anschließend wieder aufgefangen wird. Dabei werden für die Realisierung der neuartigen Bewegung höhere Beschleunigungen des Arbeitsorgans benötigt. Betrachtet man bei beiden Arbeitsorganbewegungen die Abweichung normal zur Arbeitsbewegung (Z) sowie die Verdrehung (A, B) (Abbildung 7.8), zeigen sich sowohl statische Verlagerungen aufgrund der Schiefstellung der Bewegungsachsen als auch dynamische Effekte aufgrund des Spiels der Gelenke. Während die statischen Verlagerungen bei beiden Bewegungsvorgaben bis auf die Umsteuerpunkte bei 50% und 85% der Bewegung nahezu identisch sind, zeigen sich bei der Arbeitstaktrate deutliche Unterschiede. Markant ist vor allem eine Taumelbewegung in Z-Richtung. Dabei ist bereits bei der quasistatischen Bewegung eine Verlagerung mit insgesamt ca. $700\ \mu\text{m}$ wesentlich größer als die Abweichungen in Vorschubrichtung mit max. $100\ \mu\text{m}$. In der dynamischen Bewegung wird zusätzlich eine Schwingung mit einer

Amplitude von bis zu 600 μm bei der unterbrochenen Bewegung bzw. bis zu 200 μm bei der kontinuierlichen Bewegung überlagert.

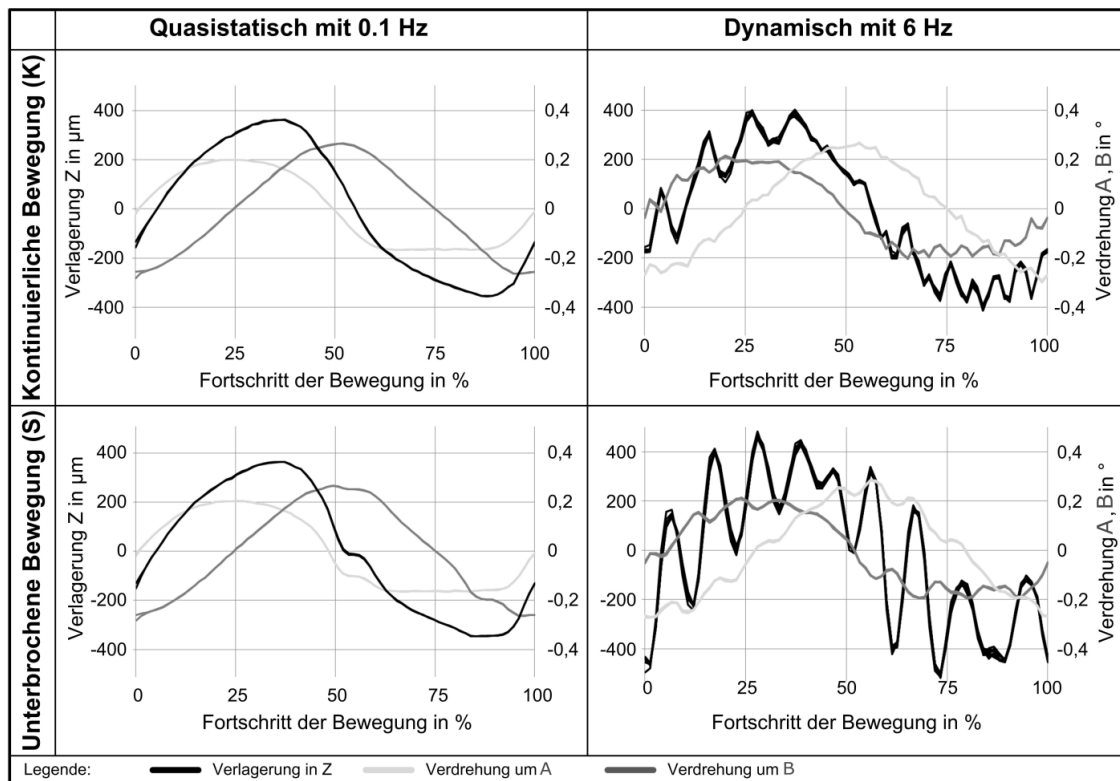


Abbildung 7.8: Abweichung von der quasistatischen und dynamischen Vorschubbewegung des Arbeitsorgans

Anhand dieses Beispiels kann gezeigt werden, dass eine Analyse der quasistatischen, geometrisch-kinematischen sowie elastischen Abweichungen am TCP prinzipiell mit der geforderten Messauflösung im einstelligen Mikrometerbereich in einem begrenzten Messvolumen schon mit relativ einfachen Messkonfigurationen erreicht werden kann. Diese Ergebnisse mit diesen Messkonfigurationen lassen sich direkt auf Messungen an WZM zur Messungen der Bahngüte in kleinen Messvolumen übertragen (Aufnahmeraten von bis zu 4 kHz [Opt18b] sind mit aktueller Kamerahardware bei gleicher Auflösung möglich).

7.1.2 6DoF-Verlagerungsmessung-Gelenkmessung

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Messung der schwenkwinkelabhängigen elastischen Verlagerung der Gelenkkörper von Kardangelenken unter mechanischer Belastung in einem Verlagerungsprüfstand (Abbildung 7.9). Dies dient einerseits zur Analyse und zum Vergleich unterschiedlicher Bauformen sowie zur Gewinnung von Parametern eines elastischen Korrekturmodells (vgl. Abbildung 2.10 oben). Die Herausforderung besteht dabei

in der Erfassung von räumlichen Verlagerungen mit wenigen Mikrometern an kompakten und schwer zugänglichen Kardangelenken.

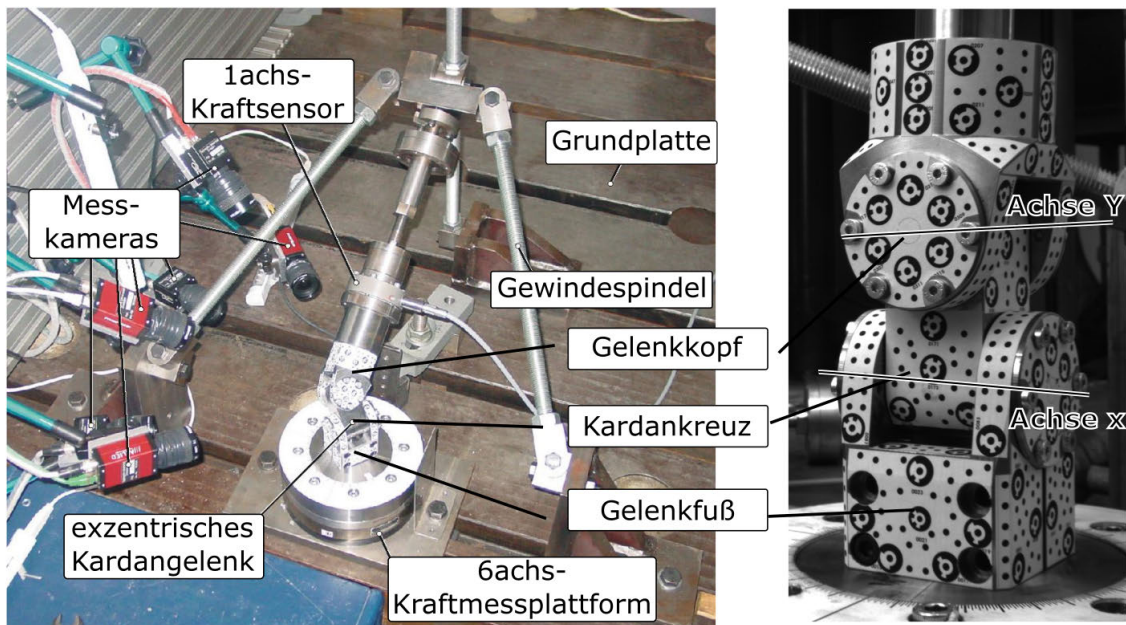


Abbildung 7.9: Aufbau des Gelenkprüfstandes mit Belastungseinrichtung und Messkameras links sowie mit Marken versehenes Kardangelenk rechts

Zum Vergleich mit dem konventionellen Kardangelenk, bei dem sich beide Kardanachsen in einem Punkt kreuzen, wurden drei neu entwickelte Gelenke mit exzentrischen Gelenkachsen und unterschiedlichen Lagerarten untersucht. Der zu betrachtete Schwenkwinkelbereich umfasst jeweils $\pm 70^\circ$ bei beiden Gelenkachsen. Um dabei repräsentative Abdeckung des Bewegungsbereiches zu gewährleisten, waren 8...10 Belastungsversuche mit Lasten von bis zu 4 kN in Zug- und Druckrichtung notwendig. Jede Versuchsreihe pro Gelenk und Schwenkwinkel setzt sich aus ca. 50 Belastungsstufen zusammen. Eine Herausforderung ist dabei die hohe Anzahl an Einzelmessungen. Dafür musste eine Messkonfiguration und ein Messablauf gewählt werden, der mit einem Minimum an manuellem Aufwand möglichst automatisiert die Datenerfassung und Auswertung sicherstellt.

Zur optischen Messung wurden insgesamt fünf Kameras zur Messung und einer zur Dokumentation verwendet (Abbildung 7.10 oben mittig). Die Blickfelder der Messkameras sind dabei so angeordnet, dass sie das gesamte Volumen, das die Gelenke in allen Schwenkwinkelanordnungen einnehmen werden, vollständig überdecken. Aufgrund der Lasten von bis zu 4 kN kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Aufspannung des Gelenkes und die Vorrichtung zur Krafteinleitung während der Belastung raumfest bleiben. Aus diesem Grund wurden zusätzlich die Verlagerungen der als Starrkörper definierten Aufspannungen, Kopfadapter und Aufspannplatte, erfasst (Abbildung 7.10 oben links). Auf

Basis einer vorherigen Steifigkeitsanalyse bei der Auslegung der Gelenke kann von einem Starrkörperverhalten der mechanisch sehr massiv ausgeführten Gelenkkörper mit einer Verlagerung innerhalb der Kugellager ausgegangen werden. Dafür bietet sich eine 6DoF-Messung an, weshalb die zu überwachenden Körper mit Marken versehen wurden (Tabelle 7.2).

Tabelle 7.2: Markenanzahl auf den Gelenkkörpern (Kegelrollenlager)

Marken	Aufspannplatte	Gelenkfuß	Kardankreuz	Gelenkkopf	Kopfadapter
codiert	16	13	12	32	18
uncodiert	105	140	41	41	81
gesamt	121	153	53	73	99

Die Gelenkkörper wurden dabei mit einer sehr hohen Anzahl an Marken versehen, um eine Messung aus möglichst allen Blickrichtungen bei allen zu prüfenden Schwenkwinkeln zu ermöglichen. Mit den insgesamt ca. 200 Marken pro Gelenk kann sichergestellt werden, dass immer eine ausreichende Anzahl und eine homogene Verteilung der Bildmessungen auf dem Gelenk zur Verfügung stehen.

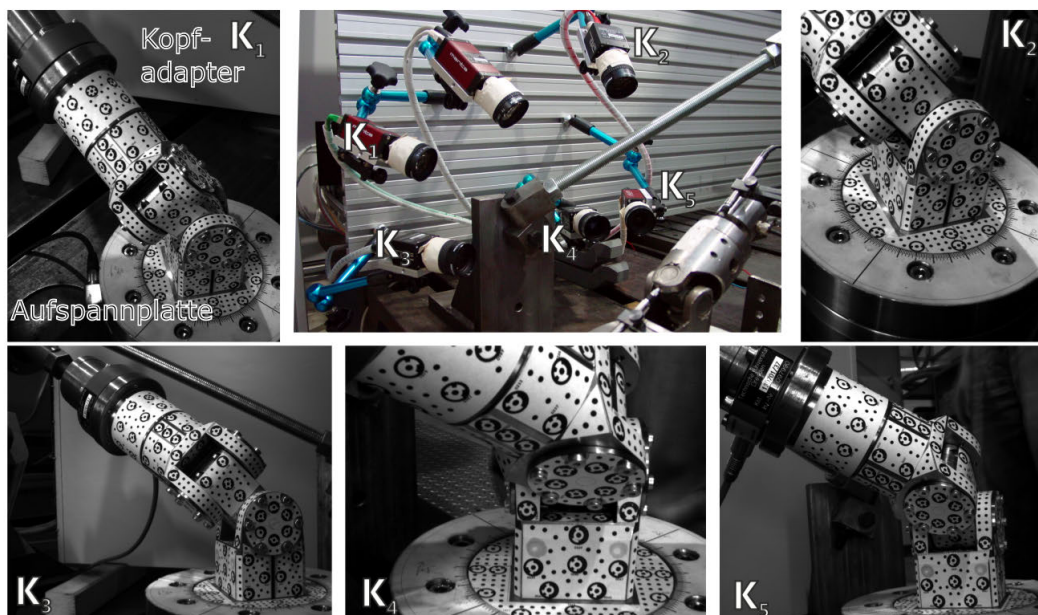


Abbildung 7.10: Anordnung und Blickfelder der Messkameras am Gelenkprüfstand

Aufgrund der hohen Anzahl an Messungen ist eine konsequente Nutzung von Vorwissen zur Minimierung der Messdauer zweckmäßig. Bei den verwendeten Kameras kann davon ausgegangen werden, dass die Innere Orientierung innerhalb der Versuchsdauer im erwärmten Zustand stabil bleibt und sich lediglich die Äußere Orientierung in einem sehr

engen Rahmen ändern wird.

Weiterhin wird angenommen, dass die Koordinaten der geklebten Marken zwischen Kalibrierung der Gelenkkörper und der Verlagerungsmessung stabil bleiben. Somit kann die Kamerakalibrierung als konventionelle Bündelblockausgleichung mit einem vorhandenen Probekörper realisiert werden und die Inneren Orientierungen der Kameras bestimmt werden. In einem zweiten Schritt werden die 3D-Koordinaten der Marken auf den Gelenkkörpern sowie die Lage und Orientierung der Gelenkachsen bestimmt. Dazu wird das Gelenk vor den Kameras bewegt, sodass einerseits alle Marken in einer ausreichenden Anzahl an Kamerabildern sowie andererseits ein großer Bereich der Schwenkwinkel beider Kardanachsen erfasst werden. Das Gelenkmodell besteht dabei aus Starrkörpern, die nur jeweils ihren Gelenkschwenkwinkel um die entsprechende Kardanachse während der Messung zueinander ändern (Abbildung 7.11).

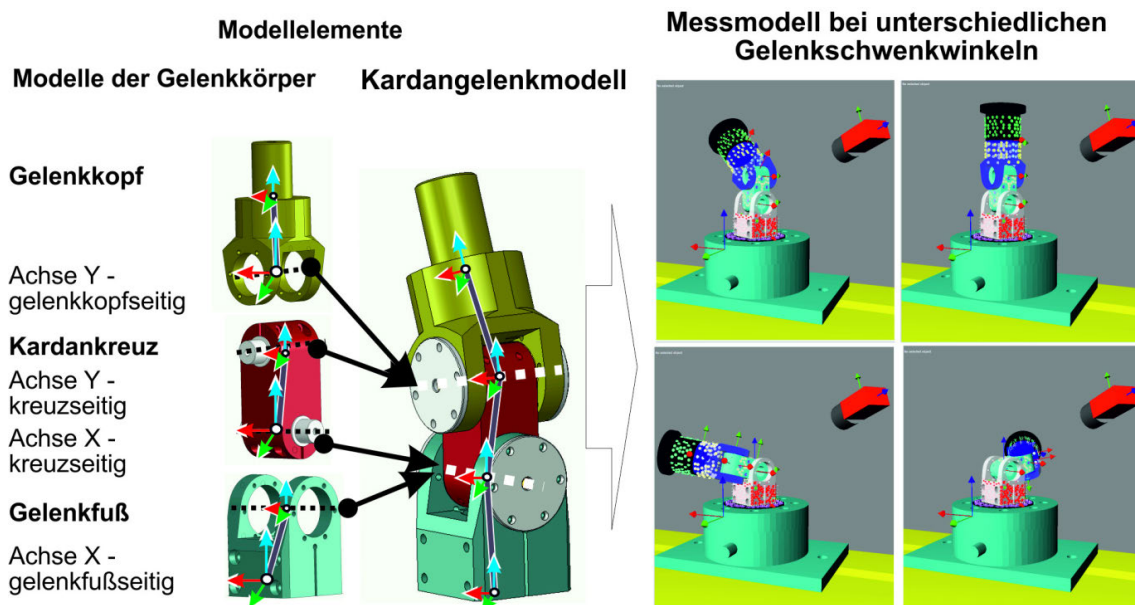


Abbildung 7.11: Links Elemente des Gelenkmodells sowie rechts vier Objektzustände mit unterschiedlichen Schwenkwinkeln der Gelenkkörper

Dazu wurden ca. 20 Bildsätze pro Gelenk mit der in Abbildung 7.10 dargestellten Kameraanordnung aufgenommen. Die Struktur, die Körper und die Parameter des Gelenkmodells sind in Tabelle 7.3 in verkürzter Form zusammengestellt. Die Basis des Gelenkmodells ist dabei der Gelenkfuß, der durch ein Koordinatensystem repräsentiert wird. In dem Koordinatensystem sind Marken sowie die Gelenkachse X definiert. Die Parameter der Lage und Orientierung des Gelenkfußsystems sind unbekannt und werden für jeden Bildsatz neu bestimmt ($x_1, \dots, c_1 \dots x_{20}, \dots, c_{20}$). Da die Marken ihre Lage relativ zum Gelenkfußsystem nicht ändern, können die Parameter der Marken (x,y,z) zusammengefasst werden. Die Ge-

lenkachse X wird wieder als über alle Bildsätze hinweg festes Koordinatensystem definiert. Der Drehwinkel der Achse um die X-Achse (A) wird festgehalten, da er für die Achse nicht relevant ist. Das Kardankreuz wird auch als Koordinatensystem mit dem Ursprung und der Ausrichtung des Koordinatensystems der Achse X definiert. Lediglich der Schwenkwinkel ($a_1 \dots a_{20}$) wird als für jeden Bildsatz unbekannt definiert. Die Modellierung der Marken und der Achse Y erfolgt in gleicher Weise wie beim Gelenkfuß. Die Parameter der Marken und des Koordinatensystems Y werden auch wieder als unbekannt und als über alle Bildsätze unveränderlich angenommen. Die Modellierung des Gelenkkopfes erfolgt wieder in gleicher Vorgehensweise. Der Schwenkwinkel um die Y-Achse wird über die Parameter ($b_1 \dots b_{20}$) abgebildet. Dieses Modell kann als Starrkörpermodell angesehen werden, mit dem die Lage und Orientierung der Drehachsen ermittelt werden konnte. Die ermittelten Koordinaten der Gelenkkörper und der Kardanachsen wurden für die lastabhängige Verlagerungsmessung exportiert.

Tabelle 7.3: Parameter des Gelenkmodells

Körper	Basis	Objekt	Parameter	Bildsatz (Zustand)			
				1	2	...	20
Gelenkfuß	Welt	System	unbekannt	$x_1, y_1,$ $z_1, a_1,$ b_1, c_1	$x_2, y_2,$ $z_2, a_2,$ b_2, c_2	...	$x_{20}, y_{20},$ $z_{20}, a_{20},$ b_{20}, c_{20}
		Marken	unbekannt	x,y,z			
		Achse X	unbekannt	x,y,z,b,c			
			fest	a=0			
Kardankreuz	Achse X	System	fest	x,y,z,b,c=0			
			unbekannt	a_1	a_2	...	a_{20}
		Marken	unbekannt	x,y,z			
		Achse Y	unbekannt	x,y,z,a,c			
			fest	b=0			
Gelenkkopf	Achse Y	System	fest	x,y,z, a,c=0			
			unbekannt	b_1	b_2	...	b_{20}
		Marken	unbekannt	x,y,z			

Für die Ermittlung der schwenkwinkelabhängigen Verlagerung wurde eine 6DoF-Messung mit bekannten Gelenkkörpern verwendet. Dafür wurden die Gelenkkörper freigeschnitten, da die Gelenkachse aufgrund der aufgebrachten Lasten nicht mehr als ortsfest betrachtet werden kann. Bei der Messung wurden damit nur die 6DoF-Parameter der Gelenkkörper relativ zueinander mit einem Mehrkamerasystem für jeden Gelenkzustand separat erfasst.

Betrachtet man beispielhaft an einem exzentrischen Kardangelen mit Kegelrollenlagern

die gestellseitige Gelenkaufspannung (Abbildung 7.12 links), zeigen sich nennenswerte lastabhängige Verlagerungen (0.025 mm) und Neigungen (0.075 mm/m) sowie eine ausgeprägte Hysterese (0.010 mm bzw. 0.040 mm/m).

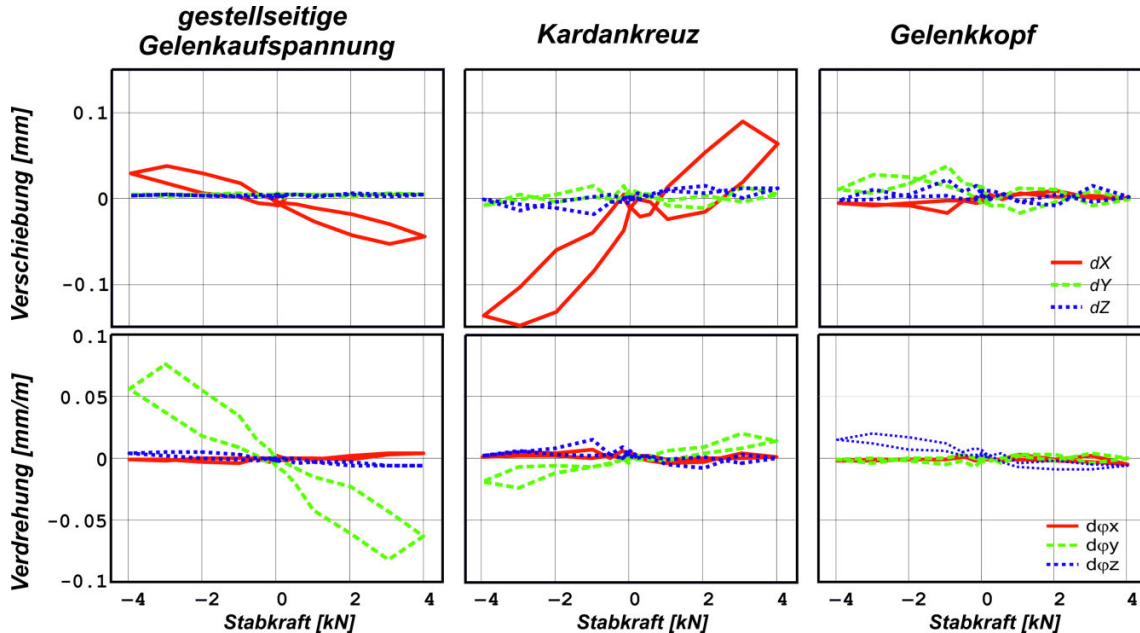


Abbildung 7.12: Verschiebung und Verdrehung der Gelenkkörper eines Kegelrollenlagers (Schwenkwinkeln 45°x0°)

Diese Effekte werden vor allem durch die Nachgiebigkeit der verwendeten Kraftmessdose sowie der Fugen in der Aufspannung von Kraftmessdose und Gelenk verursacht und lassen sich prinzipbedingt nicht ausschließen. Dabei übertragen sich diese Verlagerungen auch auf das Kardankreuz und sind vor allem als Verschiebung von bis zu 0.125 mm und einer Hysterese von 0.075 mm (Abbildung 7.12 mittig) erkennbar. Dies sind jedoch keine Nachgiebigkeiten des Gelenkes und müssen somit abgezogen werden.

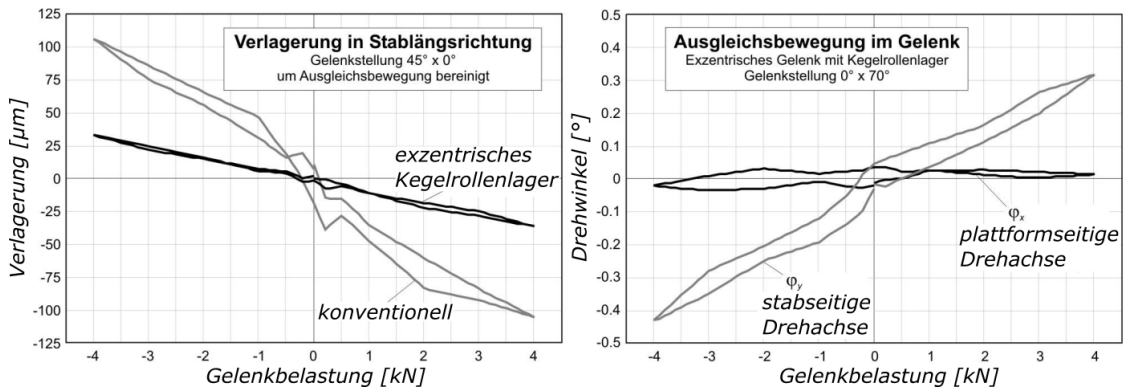


Abbildung 7.13: Lastabhängige Nachgiebigkeit untersuchter Kardangelenke (links) sowie Ausgleichsbewegungen (rechts)

Für die Bestimmung des Nachgiebigkeitsverhaltens wurde die Relativverlagerung zwischen

Gelenkkopf und gestellseitiger Gelenkaufspannung um die Verlagerung der Kraftmessdose bereinigt. Damit kann nur die relevante Verlagerung innerhalb des Gelenkes betrachtet werden (Abbildung 7.13 links). Beispielhaft ist in Abbildung 7.13 rechts die Ausgleichsbewegung im Gelenk, verursacht durch die Nachgiebigkeit der Kraftmessdose, dargestellt.

Zusammenfassend zeigt sich bei diesem Anwendungsbeispiel, dass durch eine möglichst exakte Modellierung der Messanordnung die Güte der Messungen deutlich gesteigert werden kann. Beispielsweise konnte durch die konsequente Modellierung der Gelenke die physisch nur bedingt zugängliche Drehachse indirekt über die Bewegung der Gelenkkörper identifiziert werden. Dies bildet die Basis zur Trennung von Rückdrehung und Gelenknachgiebigkeit. Dabei ist anzumerken, dass die Anteile der Nachgiebigkeit des Messaufbaus in diesem Fall größer als die Nachgiebigkeit der Gelenke waren. Mit einer konventionellen Erfassung der Verlagerungen über Feinzeiger wäre eine ähnliche Güte der Messungen nicht möglich gewesen.

7.1.3 6DoF-Messung-Linearachse

Das Ziel dieses Anwendungsbeispiels ist die Bestimmung der geometrisch-kinematischen Fehler einer translatorischen Vorschubachse, auch als Linearachse bezeichnet. Zur Bestimmung der Güte der optischen Messung wurde als Referenzmessung ein 6D-Interferometer (API, XD-Laser) verwendet. Die Transformation zwischen den Messsystemen ist in Abbildung 7.14 zusammengestellt.

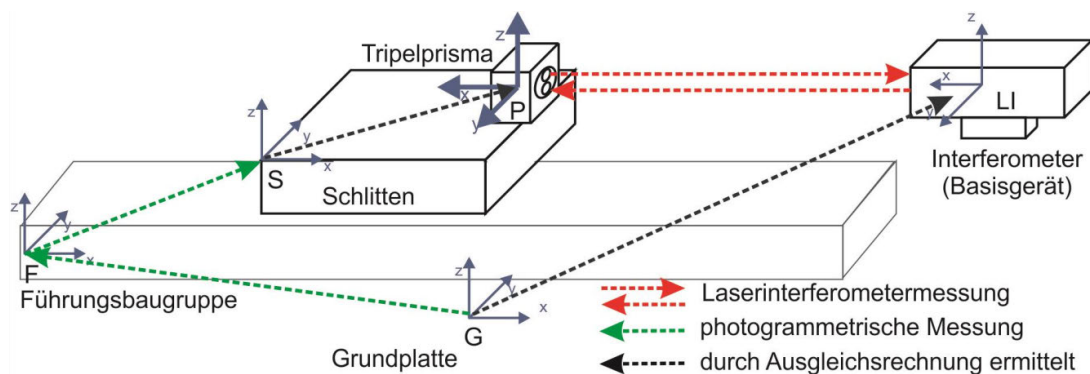


Abbildung 7.14: Linearachs-Versuchsstand und Transformationsbeziehungen der Messkette (vgl. [Sch12, S.26,27], [GKRS12])

Dabei werden mit dem photogrammetrischen Messsystem relativ zur Grundplatte die positionsunabhängige Pose der Führungsbaugruppe sowie die positionsabhängige Pose des Schlittens ermittelt. Das Laserinterferometer bestimmt die Pose des Tripelprismas relativ

zur fest im Basisgerät eingebauten Referenzoptik des Interferometers. Um eine Vergleichbarkeit beider Messungen herstellen zu können, müssen beide Messungen in ein gemeinsames, übergeordnetes Koordinatensystem transformiert werden. Dafür bietet sich das Gestellkoordinatensystem an, da die massive Grundplatte des Gestells während der Messung als raumfest angenommen werden kann.

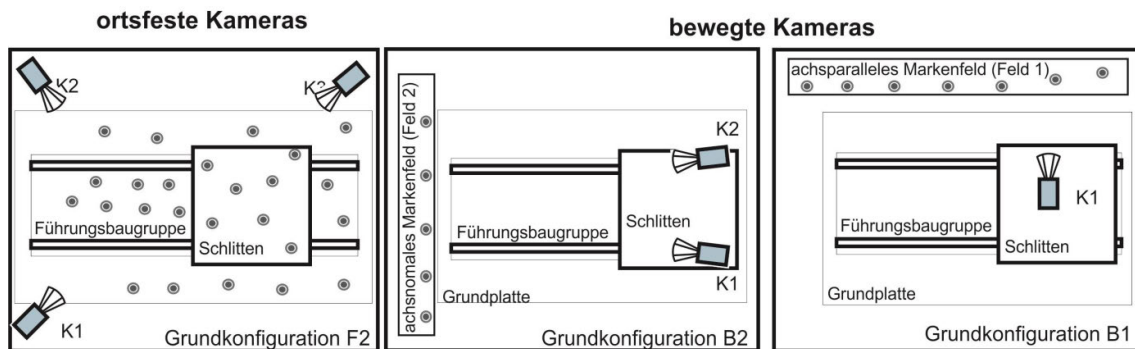


Abbildung 7.15: Anordnung der Kameras–beste Messsystemkonfiguration

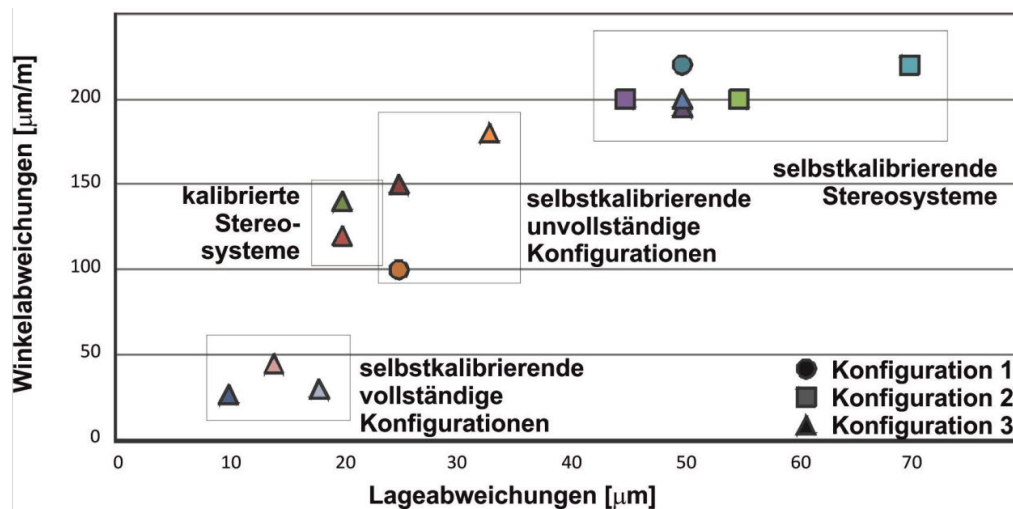
Prinzipiell kann davon ausgegangen werden, dass Schlitten, Führungsbaugruppe und Grundplatte als Starrkörper betrachtet werden können, weshalb sich eine 6DoF-Messung anbietet. Die Basis bildet dabei ein feststehendes 3-Kamera-Stereosystem mit einem sich fast vollständig überlappenden Blickfeld. Damit können Grundplatte, Führungsbaugruppe und Schlitten gleichzeitig erfasst werden. Um eine möglichst gute Messung der Neigung zu ermöglichen, wurden zusätzlich zu den ortsfesten Kameras (Konfiguration F2) auf dem Schlitten mitbewegte Kameras (Konfiguration B1 und B2) angebracht, die auf außerhalb montierte Markenplatten blicken (Abbildung 7.15).

Weiterhin sind auf dem Schlitten jeweils ein Stereokamerasystem mit zwei Kameras und eine separate Kamera angebracht. Die Abmessungen des Versuchstandes und der Achse betragen ca. 2500 mm in Vorschubrichtung bei einer Gesamtbreite von 1500 mm und einer Höhe von 2000 mm bei einem Verfahrensweg des Schlittens von insgesamt 1500 mm. Als Kameras der Grundkonfiguration F2 wurden Prosilica GC2450 sowie als mitbewegte Manta G125B (vgl. Tabelle 3.2) mit einer Ortsauflösung von 1 mm/Pixel eingesetzt. Im Modell der Messkonfiguration (Tabelle 7.4) sind die geometrischen Bedingungen (Abbildung 7.14) enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass sich während der Messung nur der Schlitten bewegt und Lage und Orientierung aller anderen Objekte konstant bleiben.

Tabelle 7.4: Parameter des Linearachs-Modells

Körper	Basis	Objekt	Parameter	Bildsatz (Zustand)			
				1	2	...	170
Grundplatte	Welt	System	fest	$x,y,z,a,b,v=0$			
		Marken	unbekannt	x,y,z			
Markenfelder	Welt	System	fest	$x,y,z, a,b,c=0$			
		Marken	unbekannt	x,y,z			
Kameras	Welt	K_1, K_2, K_3	unbekannt	x,y,z, a,b,c			
Führungsbaugruppe	Grundplatte	System	fest	$x,y,z,a,b,c=0$			
		Marken	unbekannt	x,y,z			
Schlitten	Führungsbaugruppe	System	fest	$x_1,$ $y_1, z_1,$ $a_1,$ b_1, c_1	$x_2,$ $y_2, z_2,$ $a_2,$ b_2, c_2	...	$x_{170},$ $y_{170}, z_{170},$ $a_{170},$ b_{170}, c_{170}
		Marken	unbekannt	x,y,z			
Kameras	Schlitten	K_1, K_2, K_3	unbekannt	x,y,z, a,b,c			

Da der Inhalt der Kamerabilder, bis auf die lineare Bewegung des Schlittens bzw. die Bewegung der Markenfelder, statisch ist, erscheint auf den ersten Blick eine Selbstkalibrierung der Grundkonfigurationen nicht zweckmäßig. Es fehlen konvergente Bilder sowie die Rotation um die Blickrichtung, um die Innere Orientierung der Kameras sicher bestimmen zu können, was experimentell verifiziert wurde. Während mit einem gut kalibrierten Stereokamerasystem (Grundkonfiguration F2) Restabweichungen gegenüber dem Laserinterferometer von ca. 20 μm (Lage) bzw. 125 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Neigung) erreicht werden können, verdoppeln sich die Abweichungen bei einer Selbstkalibrierung (Abbildung 7.16).

**Abbildung 7.16:** Lage- und Winkelabweichungen der untersuchten Messkonfigurationen

Werden jedoch die mit dem Schlitten mitbewegten Kameras (unvollständige Konfiguri-

on) mitberücksichtigt, verbessert sich die Güte der Kalibrierung deutlich. Die geringsten Abweichungen gegenüber dem Laserinterferometer ergeben sich, wenn alle drei Grundkonfigurationen in einem Modell zusammengeführt werden (vollständige Konfiguration). Dann sinken die Abweichungen gegenüber dem Stereokamerasystemen vor allem bei der Neigungsmessung deutlich. Betrachtet man die Abweichung der Messung mit der vollständigen Messkonfiguration (Abbildung 7.17), zeigen sich Abweichungen gegenüber dem Laserinterferometer von unter $\pm 10 \mu\text{m}$ (Lage) bzw. $\pm 35 \mu\text{m/m}$ (Neigung). Weiterhin zeigen sich verbleibende systematische Restfehler.

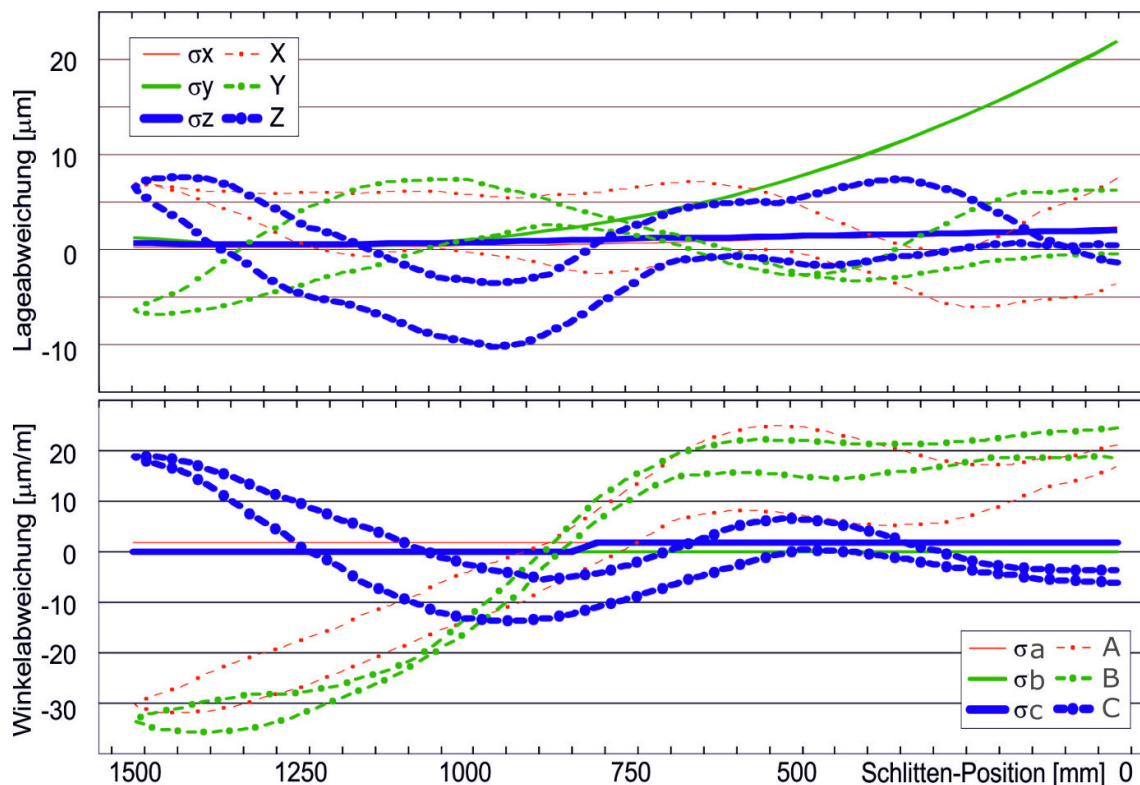


Abbildung 7.17: Messunsicherheit der besten Messkonfiguration

Eine Ursache für die verbleibenden systematischen Restfehler lässt sich in der verwendeten Messanordnung finden. Vergleicht man die Kameraanordnung mit der Unsicherheit der Y-Komponente der Schlittenpose (Abbildung 7.17), ist erkennbar, dass eine zusätzliche ortsfeste Kamera benötigt wird, um bei Schlittenposition 0 diesen Parameter gut zu bestimmen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit der gleichzeitigen Verwendung von stationären mitbewegten Kameras in einer Messkonfiguration eine Selbstkalibrierung auch bei ungünstigen Bedingungen erreicht werden kann. Weiterhin können auch bei der Verwendung von niedrig auflösenden Kameras (5 bzw. 1 MPixel) Lagefehler von $20 \mu\text{m}$ und

Winkelabweichungen von $50 \mu\text{m}/\text{m}$ in einem Volumen von $2000 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ detektiert werden, was einer relativen Genauigkeit von ca. $1 : 100'000$ entspricht. Um bei dieser Messkonfiguration eine weitere Steigerung zu erreichen, ist die Verwendung einer zusätzlichen Kamera notwendig, was leider nicht realisiert werden konnte.

7.2 Analyse von Maschinen

Das Ziel ist die Bestimmung der Parameter des geometrisch-kinematischen Fehlermodells sowie die thermo-elastische Verlagerung der Maschinen. Dafür standen zwei parallelkinematische Hexapoden zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.1). Der MiniHex (Abbildung 7.18 links) besitzt bei einer Gesamthöhe von bis zu 1500 mm einen Arbeitsraum von ca. $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, in dem eine Neigung um alle drei Achsen von bis zu 45° erreicht wird. Bei dem Hexapod Felix sind Arbeitsraum und Größe ungefähr doppelt so groß.

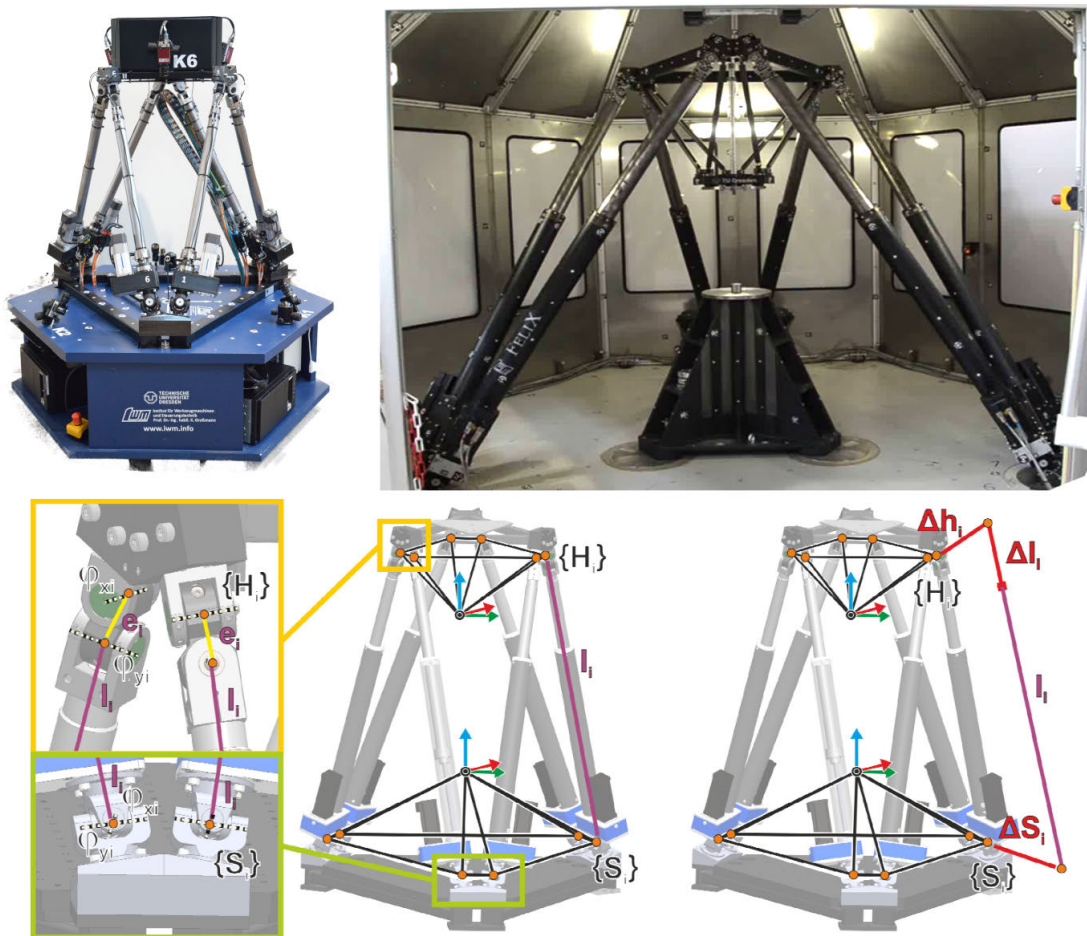


Abbildung 7.18: Hexapoden: oben links MiniHex, rechts Felix, unten Größen des geometrisch-kinematischen Fehlermodells (vgl. [RK16])

Das geometrisch-kinematische Fehlermodell ist bei diesen Maschinen positionsunabhängig und wird durch die Lage der Handgelenkpunkte (H), der Schultergelenkpunkte (S) sowie den Längenfehlern der Stabachsen (Δl_i) bestimmt (Abbildung 7.18 unten). Fehler der Exzentrizität und der Orientierung der Gelenkachsen werden in der kinematischen Transformation zwar verwendet, aber nicht als Fehlergröße im Korrekturmodell berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Gelenke ideal ausgerichtet werden können. Im Modell bilden die nominellen Hand- und Schultergelenkpunkte einen Kreis, deren Durchmesser für beide Maschinen in Tabelle 7.5 zusammengefasst ist.

Tabelle 7.5: Kenngrößen der Hexapoden

	MiniHex	Felix
Schultergelenkkreis (S) [mm]	1060	3000
Handgelenkkreis (H) [mm]	560	1200
Stabachslänge (l) [mm]	1110	2050
Verfahrbereich der Achsen [mm]	520	1000

Die Zielstellung ist, für beide Maschinen die geometrisch-kinematischen Parameter der Fehlermodelle sowie am MiniHex die thermo-elastischen Verlagerungen zu bestimmen.

7.2.1 Geometrisch-kinematische Kalibrierung: Bündelblockausgleichung

Für die geometrisch-kinematische Kalibrierung muss die Lage der Gelenke im Raum bestimmt werden. Diese kann mit konventionellen Messmitteln an Standardgelenken ohne Passbohrung nicht direkt erfasst werden, da sie nicht zugänglich ist (Abbildung 7.19 oben). Aus diesem Grund erfolgt die Identifikation indirekt über eine Messung der Verlagerung des TCP mittels DBB (vgl. [Kau06, Sza07]).

Bei der Entwicklung neuer Gelenke für beide Maschinen wurden in den Gelenkachsen Passbohrungen vorgesehen, die mechanisch antastbar sind und damit eine direkte Messung ermöglichen. Damit können die Gelenkachsen durch sogenannte Adapter (Abbildung 7.19, mittig) für optische Messverfahren signalisiert und somit erfasst werden. Die Adapter werden jeweils in Bohrungen an den Gelenken befestigt. Die Lotfußpunkte der senkrecht auf beiden Achsen stehenden Verbindungsgerade mit dem geringsten Abstand werden als Gelenkpunkte definiert (vgl. Abbildung 7.19 unten links). Bei Gelenken mit einer einseitigen Bohrung kamen Systemadapter zum Einsatz. Diese besitzen eine ausreichende Anzahl an Marken, um ein Koordinatensystem definieren zu können (Abbildung 7.19 mittig rechts). Dafür muss die Lage der Marken relativ zur Achse des Passzapfens bekannt sein.

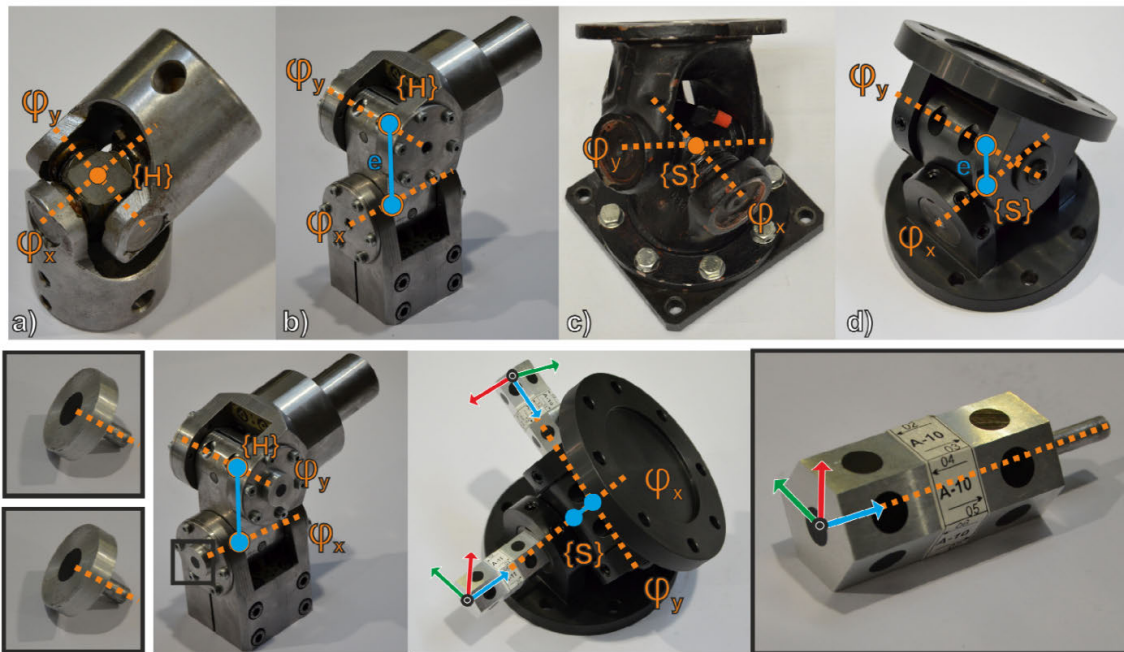


Abbildung 7.19: GelenkbaufORMen und Adapter zur Signalisierung der Gelenkachsen [RK16]

In einem zweiten Schritt, können mit einer Bündelblockausgleichung die 3D-Koordinaten der Marken bestimmt werden. In Abbildung 7.20 ist beispielhaft ein Screenshot aus einer verwendeten Auswertesoftware (Aicon DPA) dargestellt, in dem die Punktwolke (links) so wie zusätzlich die insgesamt 350 Kamerastandorte (rechts) dargestellt sind.



Abbildung 7.20: 3D-Punktwolke Hexapod Felix

Um eine ausreichend hohe Messgenauigkeit zu erreichen, werden neben den Messpunkten der Adapter zusätzliche Stützpunkte benötigt. Für die Messung am Hexapod Felix werden 520 Marken (Abbildung 7.20, links) benötigt. Diese Messpunkte dienen der Herstellung

eines ausreichend dichten Punktfeldes im Messvolumen, um den Abstand zwischen den Gelenkachsen überbrücken und ausreichend Informationen für die Kamerakalibrierung im Rahmen der Bündelblockausgleichung zur Verfügung zu stellen. Die hohe Anzahl am Hexapod Felix resultiert dabei aus der schlechten Zugänglichkeit der Schultergelenke sowie aus der Größe der Maschine. Die bei beiden Messungen erreichte mittlere Messunsicherheit der 3D-Koordinaten beträgt ca. $s_x = s_y = 3 \mu\text{m}$ sowie $s_z = 8 \mu\text{m}$ (1 sigma).

Tabelle 7.6: Geometrisch-kinematische Parameter des Hexapod Felix

	Exzentrizität [mm]		Winkel [°]		Stabachslänge [mm]
	Handgel.	Schultergel.	Handgel.	Schultergel.	
Achse 1	50.021	0.205	89.865	89.910	2270.400
Achse 2	50.094	0.100	89.997	89.791	2270.998
Achse 3	49.866	0.110	89.892	89.914	2271.473
Achse 4	49.988	0.073	89.916	90.194	2271.265
Achse 5	49.971	0.122	89.936	89.959	2271.330
Achse 6	49.953	0.028	90.012	90.087	2271.111

Aus den gemessenen 3D-Punktkoordinaten können die Lage und Ausrichtung der Gelenkachsen bestimmt und somit die Gelenkpunkte berechnet werden (Tabelle 7.6). Zur geometrischen Kalibrierung werden die gefundenen Koordinaten der Gelenkpunkte mit denen des geometrischen Modells verglichen, der Offset berechnet und in die Maschinensteuerung übertragen. Die Größe der Abweichungen liegt beim Hexapod Felix in einem Bereich zwischen 0.3...2.5 mm (Abbildung 7.21 links).

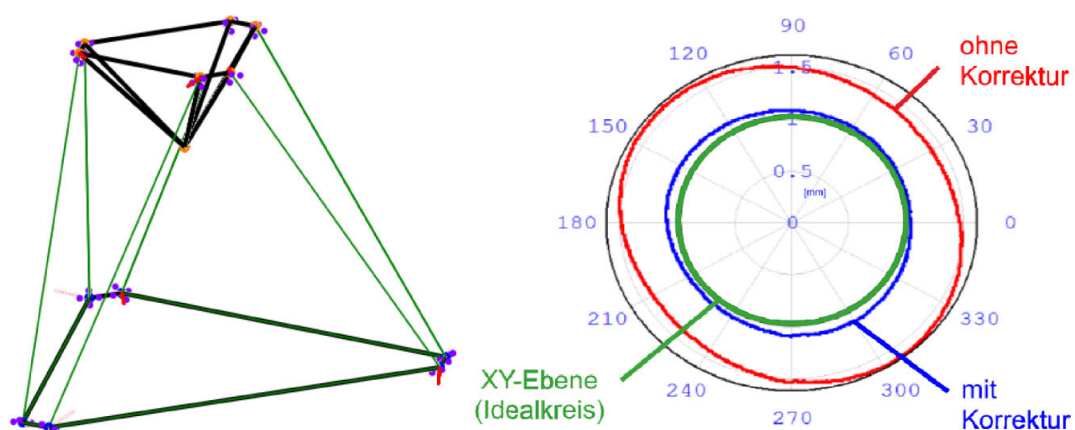


Abbildung 7.21: Links Abweichungen der Koordinaten und rechts Keisformtest mit und ohne Korrektur

Dies erscheint auf den ersten Blick nicht typisch für WZM. Der Grundgedanke ist jedoch, einfache und sehr preisgünstige geschweißte bzw. betonierte Gestellstrukturen zur ver-

wenden, die möglichst nur systematische Fehler aufweisen. Diese Fehler können, wie mit dieser Messung gezeigt, messtechnisch erfasst und durch ein steuerungsintegriertes Verhaltensmodell korrigiert werden. Zur Verifikation der Messungen wurde eine DBB-Messung mit einem Kreisradius von 300 mm verwendet. In Abbildung 7.21 rechts ist jeweils eine Messung mit und ohne geometrisch-kinematischer Kalibrierung dargestellt. Die Kreismessung ohne Korrektur (rot dargestellt) zeigt eine Überhöhung des Kreises zwischen 0.3 mm und 0.5 mm. Diese Größenordnung ist darauf zurückzuführen, dass nur sehr grobe Näherungen der Gelenkpunkte im unkalibrierten geometrischen Modell vorhanden sind. Im kalibrierten Zustand kann dieser Fehler signifikant auf unter 0.1 mm reduziert werden. Dabei zeigen sich immer noch ähnliche systematische Fehleranteile wie im unkalibrierten Zustand. Diese sind auf elastische Einflüsse zurückzuführen, die bei einer statischen Messung nicht berücksichtigt werden können. Die geometrisch-kinematische Kalibrierung erfolgte in der Mittelstellung des Messkreises. Die verlagerten Eigengewichte von Plattform und Stabachsen bei der Bewegung bewirken eine elastische Deformation und verursachen somit den verbleibenden Restfehler.

Insgesamt zeigt sich, dass diese Vorgehensweise bei diesen Maschinen zweckmäßig ist und aufgrund des positionsunabhängigen Fehlermodells gute Ergebnisse erreicht. Jedoch ist der Zeitaufwand zur Bildaufnahme mit ca. zwei Stunden und Auswertung mit ca. sechs Stunden enorm hoch, sodass für die Erfassung elastischer und thermo-elastischer Verlagerungen eine andere Methode gefunden werden muss, die automatisiert werden kann.

7.2.2 Erfassung thermo-elastischer Verlagerungen: Posemessung

Für eine automatisierte Messung bieten sich prinzipbedingt die Stereobild- und 6DoF-Auswertung an (vgl. Abschnitt 3.6). Bei den Hexapoden ist dabei die Pose $T_{\{P\}}^{\{M\}}$ der bewegten Plattform $\{P\}$ relativ zum Maschinenkoordinatensystem $\{M\}$ zu ermitteln. Bei der konventionellen Auswertung müsste dazu ein System aus einer oder mehreren Kameras außerhalb der Maschine, mit freiem Blickfeld auf das Grundgestell sowie auf die bewegte Plattform, platziert werden (Abbildung 7.22 links).

Bei bekannten Grundabmessungen können dafür die zu erwartenden Unsicherheiten zur Bestimmung von 3D-Koordinaten für den Stereonormalfall abgeschätzt werden. Am Beispiel des MiniHex wird zur Abschätzung ein Basisabstand der Kameras von 950 mm und eine Bildmessunsicherheit von 0.05 Pixel angenommen. Die über den Stereonormalfall abgeschätzten Unsicherheiten der 3D-Koordinaten sind in Tabelle 7.7 zusammengefasst. Die

Größenordnung der Unsicherheiten sind mit den Angaben der Hersteller kommerzieller Messsysteme in etwa vergleichbar und können damit als realistisch angenommen werden.

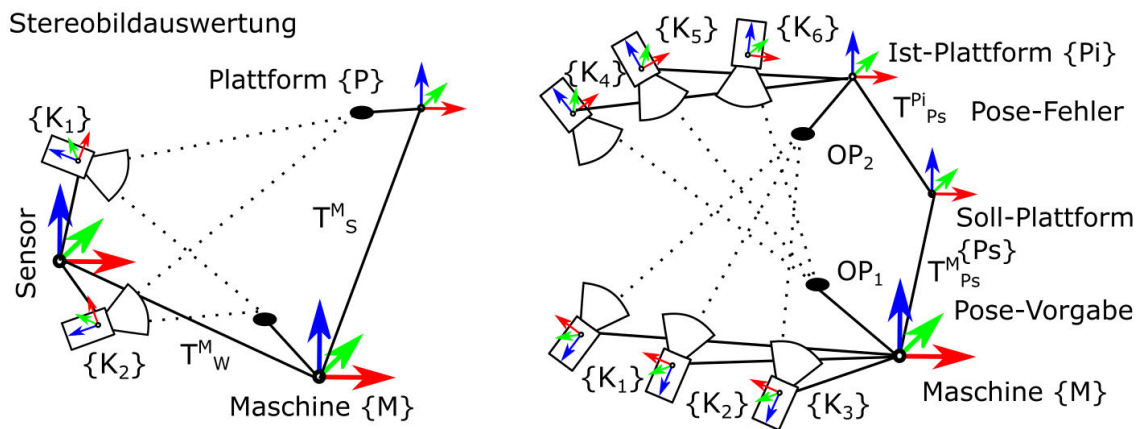


Abbildung 7.22: Vergleich Stereobildauswertung und kombinierter Vorwärts- und Rückwärtsschnitt

Aus dieser Abschätzung der Unsicherheiten der 3D-Koordinaten folgt, dass nur mit sehr hochauflösenden Kameras ausreichend geringe Unsicherheiten zur Erfassung der thermisch bedingten Abweichungen relativ zwischen Plattform und Tisch möglich sind. Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass Neigungsfehler aufgrund des geringen Abstandes der Marken zueinander und des nicht vollständig ausgefüllten Blickfeldes mit einer höheren Unsicherheit bestimmt werden können.

Tabelle 7.7: Unsicherheiten der 3D-Koordinaten bei der Stereobildauswertung [μm]

Sensorgröße und Brennweite			Abstand von Sensor								
			1000 mm			1500 mm			1750 mm		
			sx	sy	sz	sx	sy	sz	sx	sy	sz
GX6600	43 mm	28	10	10	10	15	15	23	17	17	32
		20	14	14	14	21	21	33	24	24	44
GC2450	2/3"	6.5	27	27	28	40	40	63	46	46	86
		4.8	36	36	38	54	54	85	63	63	116
G125B	1/3"	4.8	39	39	41	59	59	93	68	68	126
		3.5	54	54	56	80	80	127	94	94	173

Aufbauend beste Messkonfiguration an der Linearachse (Abschnitt 7.1.3) bietet sich eine Anbringung der Kameras an den relativ zueinander bewegten Baugruppen an (Abbildung 7.22 rechts). Im Gegensatz zur klassischen Stereobildauswertung werden die Kameras direkt an den Gestellbaugruppen montiert. Die Blickfelder der insgesamt sechs Kameras sind in Abbildung 7.23 dargestellt. Die Auflösung der Kameras beträgt plattformseitig 1.2MPixel (Manta G-125B), gestellseitig 5MPixel (Prosilica GC2450B), mit Brennweiten

von 5 mm bzw. 8.5 mm (vgl. Tabelle 3.2). Die Ortsauflösung beträgt für alle Kameras ca. 0.5 mm/Pixel. Insgesamt sind an der Plattform 31 Marken sowie am Grundgestell 61 Marken angebracht. Das Blickfeld der plattformseitig angebrachten Kameras ist nahezu vollständig, das der gestellseitig angebrachten Kameras jedoch nur teilweise mit Marken ausgefüllt. Die Blickfelder wurden derart gewählt, dass in allen möglichen Posen der Plattform noch ausreichend Marken im Blickfeld sind.

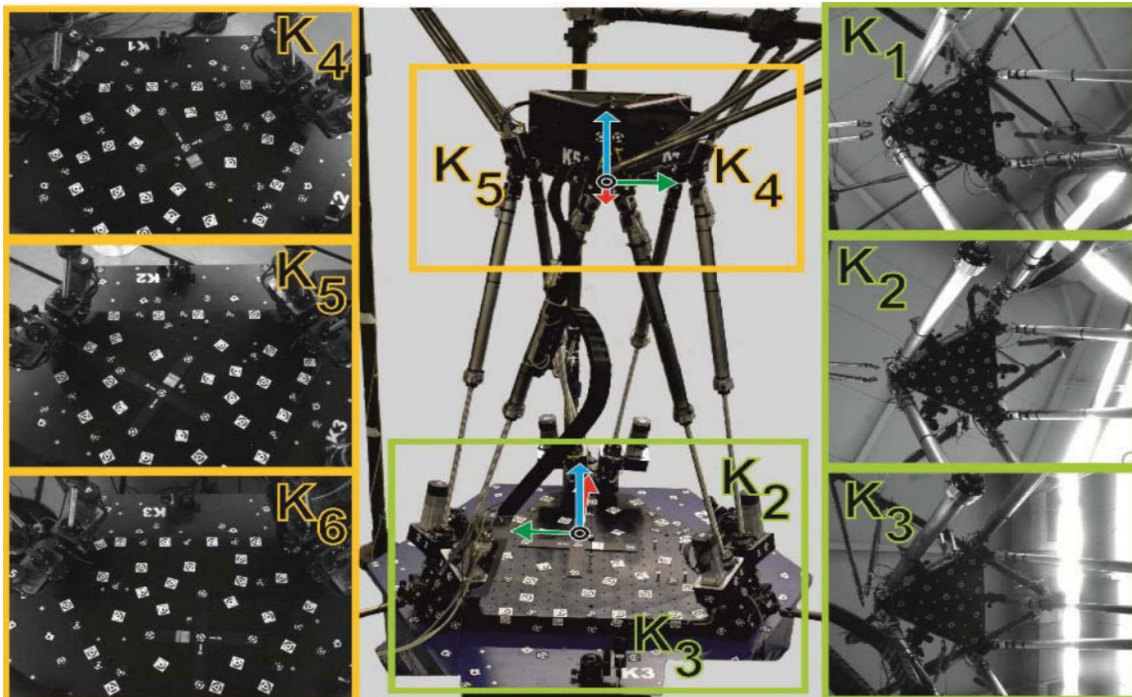


Abbildung 7.23: Grundaufbau der Verlagerungsmessung am MiniHex

Die Parameter des Messmodells (vgl. Abbildung 7.22) sind in Tabelle 7.8 zusammengestellt. Dabei wird die Soll-Pose für die 12 Kalibrierposen als Vorgabe der Bewegung der Plattform berücksichtigt, fixierte Parameter werden nicht ausgeglichen.

Tabelle 7.8: Parameterliste des Modells der Messkonfiguration

Objekte Bezeichnung	Anz.	Art	Parameter	
			unbekannt	bekannt
Soll-Pose $T_{P_s}^M$	12	variabel	0	72
Ist-Pose $T_{P_i}^{P_s}$	12	variabel	54	18
Marke (plattformseitig)	31	konstant	93	0
Marke (gestellseitig)	74	konstant	222	0
Kameras (plattformseitig)	3	konstant	48	0
Kameras (gestellseitig)	3	konstant	48	0
		Summe:	465	90

Zur Kalibrierung des Messsystems ist eine ausreichend hohe Anzahl von Messposen notwendig, die einen möglichst großen Bereich des Arbeitsraums umfassen (Tabelle 7.9). Die größte Strecke beträgt dabei 700 mm, der größte Winkelbereich insgesamt 60° . Die Pose Nr. 12 dient dabei der Kontrolle von Pose Nr. 1. Die Messsystemkalibrierung erfolgt dabei in drei Schritten. Zuerst werden die Objektpunkte und die Äußere Orientierung der Kameras, anschließend die Innere Orientierung und abschließend die Posefehler für ausgesuchte Messposen (Tabelle 7.9) bestimmt. Damit ist die Bestimmung der geometrisch-kinematischen Fehler ein Teil der Messsystemkalibrierung. Durch die gleichzeitige Berechnung der Kameraparameter und der gesuchten Posefehler ist die Kalibrierung immer aktuell und steigert somit die Genauigkeit.

Tabelle 7.9: Messposen zur Messsystemkalibrierung und die Unsicherheit der Posefehler

Idx	Pose [mm, °] und Fehler [μm , m°]						
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔA	ΔB	ΔC	
1	Pose	0	0	-100	0	0	0
	Fehler	fix					
2	Pose	0	0	-100	0	0	30
	Fehler	-138 ± 35	-242 ± 33	-106 ± 4	4 ± 0.1	-22 ± 0.1	236 ± 0.1
3	Pose	0	0	-100	0	0	-30
	Fehler	114 ± 35	39 ± 33	11 ± 4	5 ± 0.1	13 ± 0.1	-164 ± 0.1
4	Pose	350	0	-150	0	22	0
	Fehler	16 ± 15	-169 ± 6	4 ± 9	-61 ± 0.1	104 ± 0.2	-10 ± 0.2
5	Pose	250	250	-100	-7	7	-7
	Fehler	fix			54 ± 0.1	14 ± 0.1	-86 ± 0.1
6	Pose	0	350	-150	-22	0	0
	Fehler	-17 ± 1	73 ± 17	-51 ± 12	-83 ± 0.2	-57 ± 0.0	21 ± 0.1
7	Pose	-250	250	-100	-7	-7	7
	Fehler	fix			25 ± 0.1	-58 ± 0.1	48 ± 0.1
8	Pose	-350	0	-150	0	-22	0
	Fehler	-53 ± 16	145 ± 7	-31 ± 11	62 ± 0.1	-110 ± 0.2	4 ± 0.1
9	Pose	-250	-250	-100	7	-7	7
	Fehler	fix			32 ± 0.1	-25 ± 0.1	-83 ± 0.1
10	Pose	0	-350	-150	22	0	0
	Fehler	50 ± 2	43 ± 15	27 ± 7	88 ± 0.2	55 ± 0.0	17 ± 0.1
11	Pose	250	-250	-100	7	7	-7
	Fehler	fix			4 ± 0.1	66 ± 0.1	-37 ± 0.1
12	Pose	0	0	-100	0	0	0
	Fehler	23 ± 2	-2 ± 2	46 ± 4	1 ± 0.0	3 ± 0.0	-3 ± 0.1

Um die Größenordnung des Einflusses des Posefehlers auf die Kalibrierung abschätzen zu können, sind die Residuen in Abbildung 7.24 gegenübergestellt. Insgesamt verbessert sich

die Güte der Ausgleichung durch die Berücksichtigung des Posefehlers von $\sigma_0 = 0.647$ Pixel auf $\sigma_0 = 0.080$ Pixel um den Faktor 8. Trotzdem muss festgestellt werden, dass die Schlussprobe (vgl. Abschnitt 3.4.1) immer noch systematische, d.h. modellbedingte, Restfehler anzeigt. Diese können beispielsweise aus der elastischen Deformation der Maschine durch die Bewegung hervorgerufen werden. Wahrscheinlicher ist jedoch als Ursache die Art der Maßstabseinbringung und die implizite Datumsvorgabe über die Bewegungsvorgabe. Reduziert man die fixierten Strecken weiter, verschlechtert sich das Ergebnis der Ausgleichung bzw. das Gleichungssystem wird instabil. Eine andere Art der Maßstabs- und Datumsfestlegung ist nicht möglich, da keine geeigneten Maßstäbe mit einem ausreichend hohen Genauigkeitspotenzial zur Verfügung stehen (vgl. Tabelle 5.3).

2844 Messpunkte plattformseitige Kamera K_6
Sigma=0.013 Pixel

gestellseitige Kamera K_1

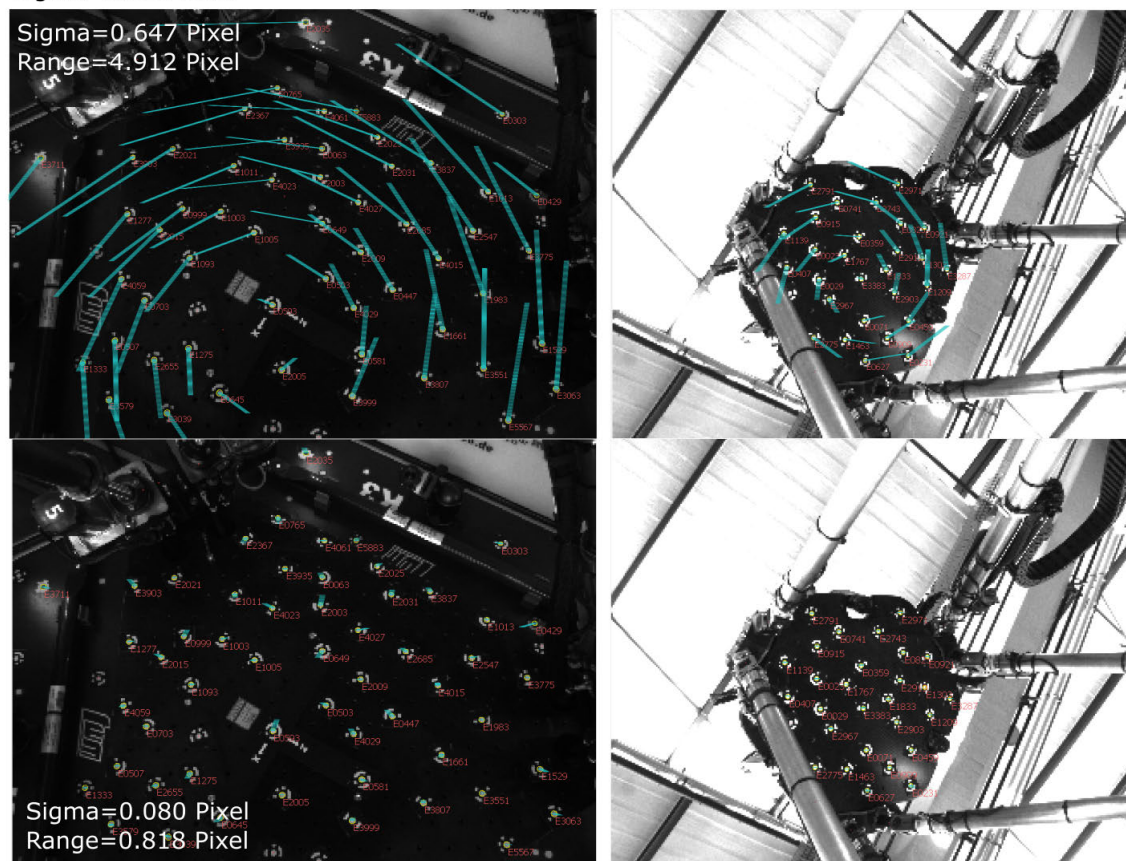


Abbildung 7.24: verbleibende Residuen mit und ohne Berücksichtigung des Posefehlers

Insgesamt zeigt sich an diesem Beispiel deutlich, welches Potenzial durch die Verbindung von Messmodell und kinematischem Maschinenmodell erschlossen werden kann. Einerseits kann die Messsystemkalibrierung deutlich verbessert werden, andererseits werden direkt Maschinenfehler erfasst.

Erreichbare Messunsicherheit

Zur Beurteilung der Verbesserung der Unsicherheit des gewählten Ansatzes gegenüber einer Stereobildauswertung oder einer 6DoF-Auswertung bietet sich eine Unterteilung in Sub-Systeme an. Dazu wurde auf Basis des gleichen Bildsatzes die Verlagerung der Plattform einmal nur mit dem gestellseitigen, einmal nur mit dem plattformseitigen Kamerasystem und einmal mit beiden Systemen zusammen bestimmt (Abbildung 7.25).

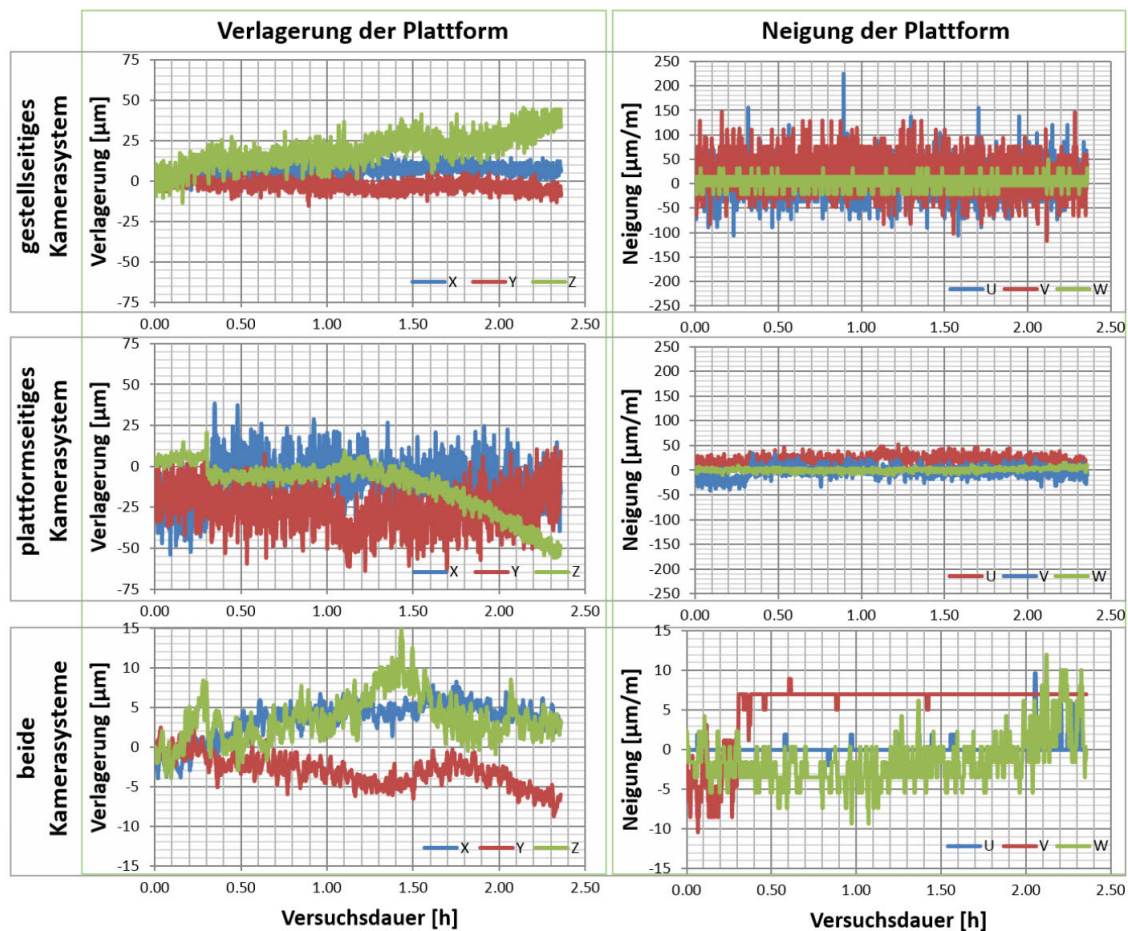


Abbildung 7.25: Vergleich der Sub-Systeme am MiniHex

Während die gestellseitigen Kameras die Lage der Plattform sehr gut erfassen können, ist die Erfassung der Neigung durch das gering ausgefüllte Blickfeld eher als schlecht zu bezeichnen (Abbildung 7.25 oben). Die plattformseitigen Kameras können die Lage der Plattform schlechter bestimmen, jedoch durch das vollständig ausgefüllte Blickfeld die Neigung deutlich besser erfassen (Abbildung 7.25 mittig). Werden beide Sub-Systeme in einem Modell gleichzeitig ausgeglichen, verbessert sich sowohl die Lage- als auch die Neigungsmessung deutlich (Abbildung 7.25 unten). Das heißt, durch die gegenseitige Stützung beider Systeme werden die Schwächen kompensiert und die gesamte Messung verbessert.

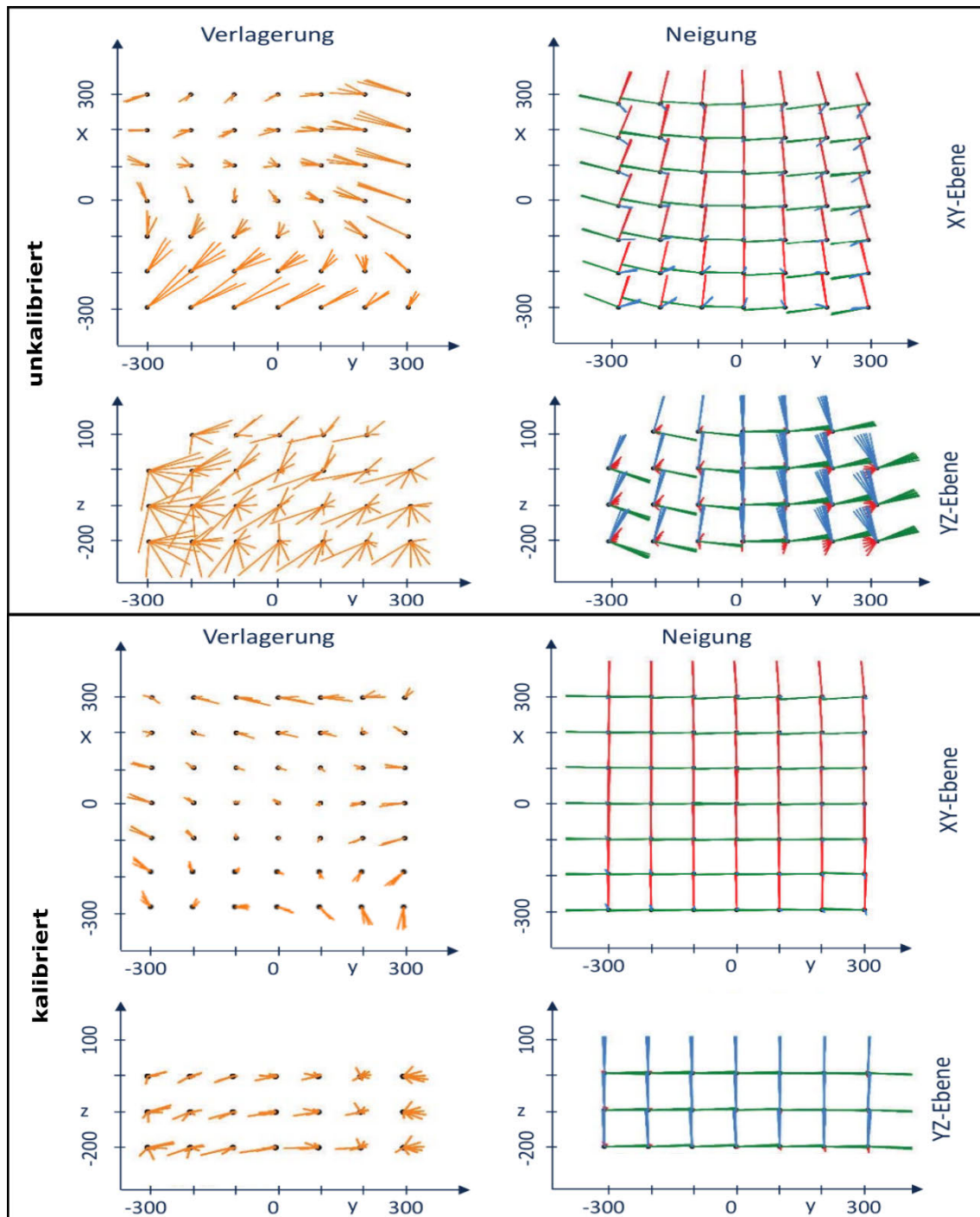


Abbildung 7.26: Verlagerung und Neigung der Plattform des MiniHex im Arbeitsraum: geometrisch-kinematisch unkalibriert (oben) sowie kalibriert (unten)

Geometrisch-kinematische Genauigkeit

Zur Verifikation der geometrisch-kinematischen Genauigkeit der Maschine wurde im gesamten erreichbaren Arbeitsraum der Maschine (600 mm x 600 mm x 300 mm) mit einem Rasterabstand von 100 mm jeweils eine vollständige Posemessung vorgenommen. Dazu ist in Abbildung 7.26 der unkalibrierte sowie der kalibrierte Maschinenzustand als Verla-

gerung und als Neigungsänderung als Blick auf die XY-Ebene sowie auf die YZ-Ebene gegenübergestellt. Zur Kalibrierung wurden die mit der Bündelblockausgleichung ermittelten Parameter verwendet (vgl. Abschnitt 7.2.1). Dabei ist die Verbesserung der Genauigkeit vor allem in der Mitte des Arbeitsraums sehr deutlich erkennbar. Jedoch sind Restfehler in den Randbereichen des Arbeitsraumes vorhanden. Dies deutet auf eine elastische Deformation des Grundgestells oder der Plattform aufgrund der Verlagerung der Schwerpunkte der Baugruppen hin.

Thermo-elastische Verlagerungsmessung

Zur Erfassung der thermo-elastischen Verlagerung wurde mit dem kalibrierten Mehrkammersystem in einer definierten Pose wiederholt gemessen, während die Maschine in einem definierten Zyklus bewegt wurde. Dabei wurden in jeweils eine Stabachse thermische Lasten mittels einer definierten Bewegung eingebracht.

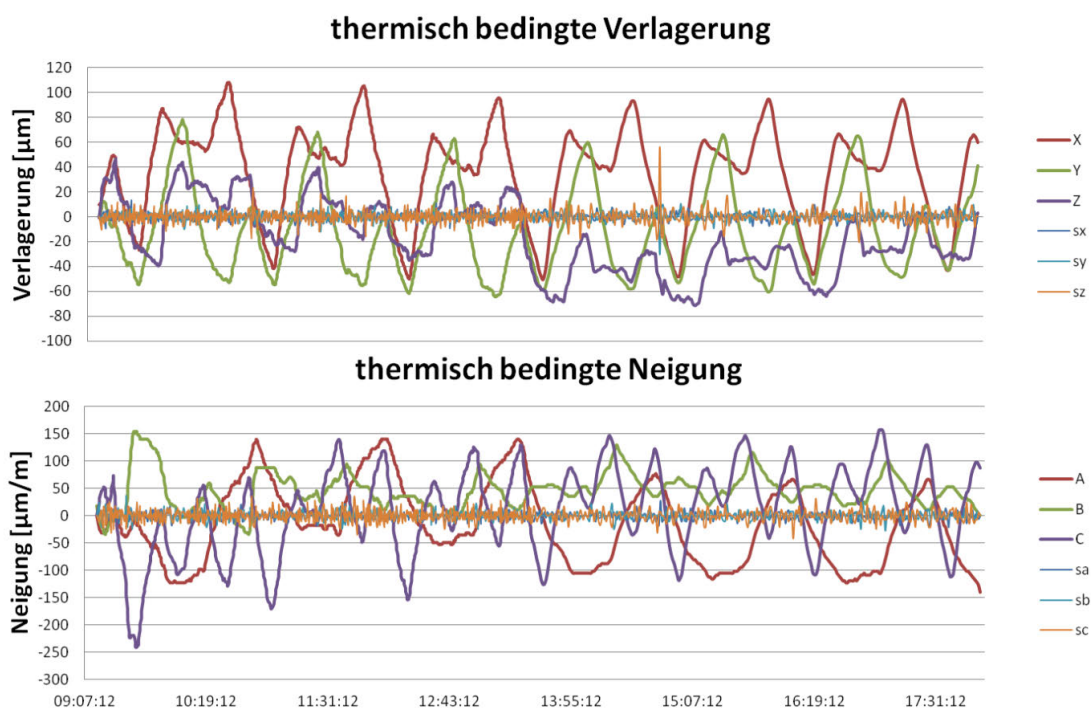


Abbildung 7.27: Verlagerungen am TCP aufgrund thermischer Dehnungen

Zwischenzeitlich wurde in regelmäßigen Abständen eine Messposition angefahren. Nach einer ausreichenden Anzahl von Wiederholungen wurde die belastete Achse gewechselt. Sobald alle sechs Achsen belastet wurden, startete das Programm wieder von vorne. Die Ergebnisse einer Verlagerungsmessung, die über einen Tag erfasst wurden, sind in Abbildung 7.27 dargestellt.

Gut zu erkennen ist dabei die Dauer des Belastungszyklus, beispielsweise an der wiederkehrenden Verlagerung in X-Richtung, von etwas mehr als einer Stunde. Durch den Start der Messung erfolgt der erste Erwärmungszyklus nicht vollständig, was an der Neigung der Plattform um w erkennbar ist. Gegen 14 Uhr ist eine deutliche Verringerung der gemessenen Verlagerung in Z-Richtung und eine Verringerung der Neigung um U zu erkennen. Dies kann auf die Änderung der Umgebungsbedingungen (Klimaanlage) zurückgeführt werden. Dabei wird der Anteil der durch Konvektion an die Umgebung abgeführten Wärme durch die Zuschaltung der Klimaanlage erhöht, wodurch die Temperaturen insgesamt sinken und die Ausdehnung leicht zurückgeht.

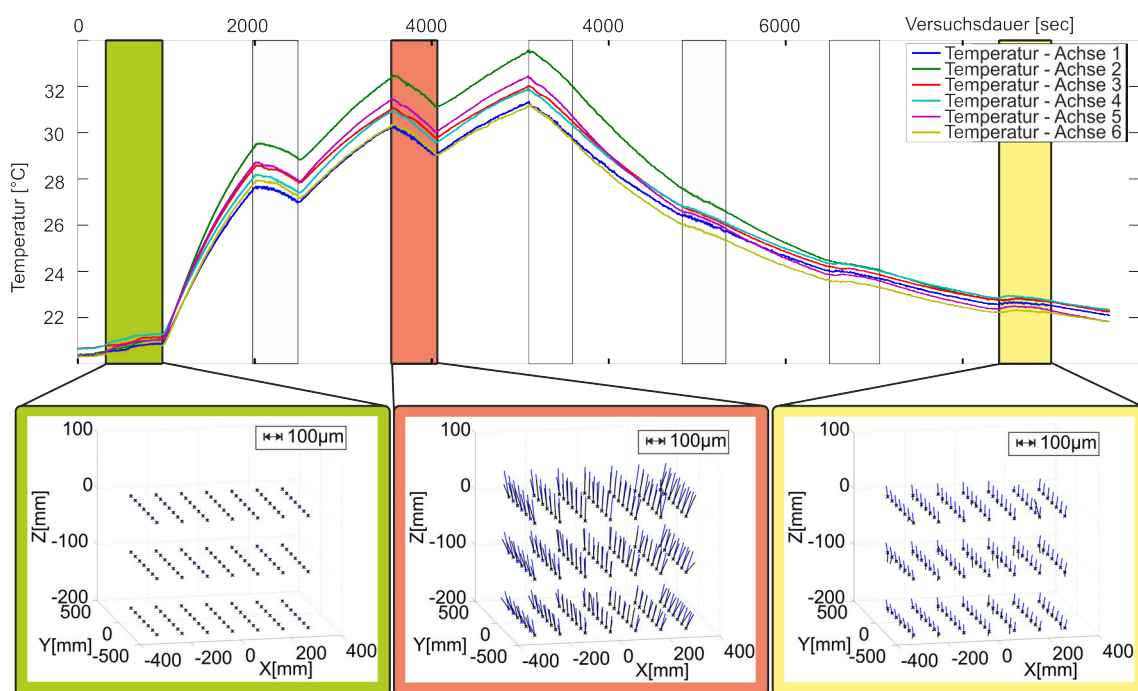


Abbildung 7.28: Poseabhängige thermisch bedingte Verlagerung

In einem weiteren Versuch wurden die thermisch bedingten Verlagerungen im gesamten Arbeitsraum der Maschine erfasst (Abbildung 7.28). Das Messraster betrug dabei 50 mm und umfasste insgesamt 343 Posemessungen im gesamten Arbeitsraum der Maschine. Die Dauer der Messwertaufnahme, bestehend aus Ausschwingen der Maschine und Bildaufnahme, lag bei ca. 5 s pro Pose. Insgesamt dauerte eine Messwertaufnahme im gesamten Volumen aufgrund der Zeit zur Bewegungsausführung und Bildaufnahme ca. 500 s. Dieses Messregime wurde insgesamt 6 mal während der Aufwärmphase sowie während der Abkühlphase der Maschine wiederholt. Verglichen wurde die Messung mit einer Simulation der thermisch bedingten Verlagerung (Abbildung 7.28 unten). Dabei zeigen sich insgesamt geringe Abweichungen zwischen Simulation und Messung. Mit diesem Messaufbau kann

somit der thermo-elastische Verlagerungszustand mit einer vollständigen Posemessung im gesamten Arbeitsraum erfasst werden. Die erreichte Messauflösung der verwendeten Messkonfiguration von unter $5\ \mu\text{m}$ (Lage) bzw. $5\ \mu\text{m}/\text{m}$ (Neigung) ist zur Analyse des überwachten Arbeitsraumes von $600\ \text{mm} \times 600\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ vollkommen ausreichend.

7.3 Simulation von Messkonfigurationen

Zur Erprobung der Simulation und ggf. Optimierung von Messkonfigurationen wurde eine Messanordnung zur Messung thermisch bedingter Verlagerungen an einer Experimentalmaschine verwendet. Dabei handelt es sich um eine kartesische 3-Achs-Maschine (Versuchsträger MAX) mit differenziell kleinen Neigungen zur Kompensation von geometrischen, elastischen oder thermo-elastischen Verlagerungen, die aktiv nachgeführt werden können (Abbildung 7.29 links). Die CAD-Geometrien der Baugruppen des Versuchsträgers standen für die Modellierung zur Verfügung (Abbildung 7.29 rechts). Weiterhin wurden in Vorversuchen Marken angebracht und deren 3D-Koordinaten durch eine Bündelblockausgleichung bestimmt.

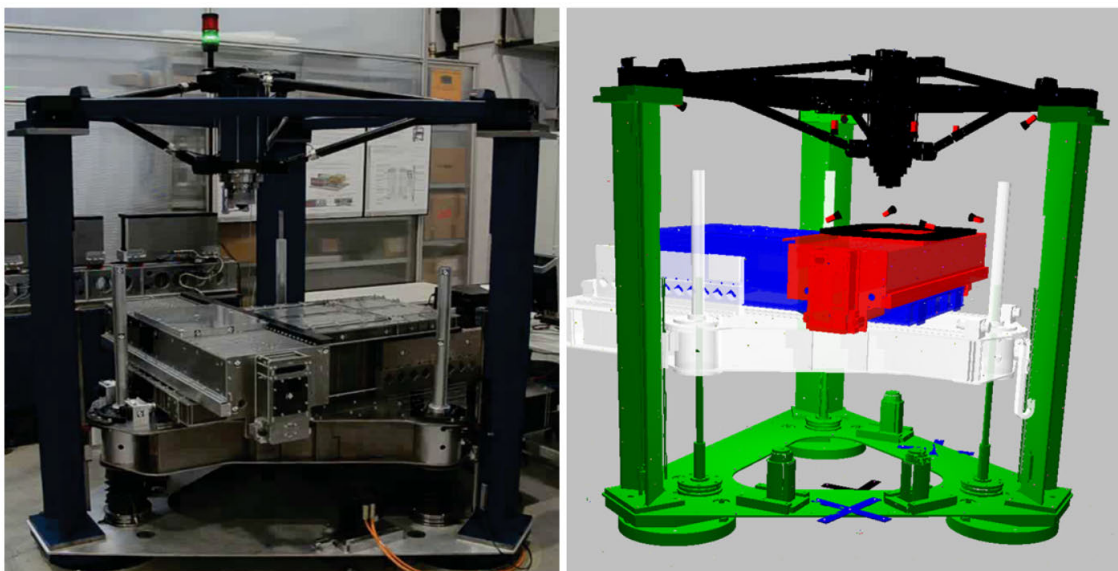


Abbildung 7.29: Aufbau und 3D-Modell des Versuchsträgers MAX

Das Ziel ist die simulative Verifikation der erreichbaren Messauflösung und Genauigkeit einer noch nicht existierenden Messkonfiguration und die Verifikation der Simulationsergebnisse. Wenn die simulierten Unsicherheiten im Experiment bestätigt werden können, ermöglicht dies eine Offline-Versuchsplanung die wertvolle Maschinenzeit sparen kann.

7.3.1 Simulation der Messkonfiguration

Die Grundstruktur des Messmodells orientiert sich an der kinematischen Struktur der Maschine (Tabelle 7.10). Basis ist das Gestell mit Spindel und steuerungsseitig definiertem Nullpunkt der Maschine. Darauf bauen die drei translatorischen Achsen mit jeweils einem Koordinatensystem zur Bewegungsvorgabe und einem Fehlerkoordinatensystem auf. Zu den Koordinatensystemen werden entsprechend Marken und Kameras zugeordnet.

Tabelle 7.10: Struktur des Messmodells

Objekt	Basis	Bezeichnung	
Gestell mit Spindel	Welt	Basiskoordinatensystem	f=0
Nullpunkt	Welt	Maschinennullpunkt	f=0
Z-Schlitten	Nullpunkt	Bewegungsvorgabe Z	f=0
Z-Fehler	Z-Schlitten	Fehler Z	f=6
Y-Schlitten	Z-Fehler	Bewegungsvorgabe Y	f=0
Y-Fehler	Y-Schlitten	Fehler Y	f=6
X-Schlitten	Y-Fehler	Bewegungsvorgabe X	f=0
X-Fehler	X-Schlitten	Fehler X	f=6
Tisch	X-Fehler		f=0

Das Ziel ist, eine Messkonfiguration zur Erfassung der Verlagerungen des TCP (Spindel relativ zu Tisch) hinsichtlich der erreichbaren Unsicherheiten zu evaluieren. Dabei wurde aus Vorwissen eine Messkonfiguration erstellt, die eine gute Überdeckung der Bildbereiche der Kameras bietet, um eine Verlagerungsmessung durchzuführen.

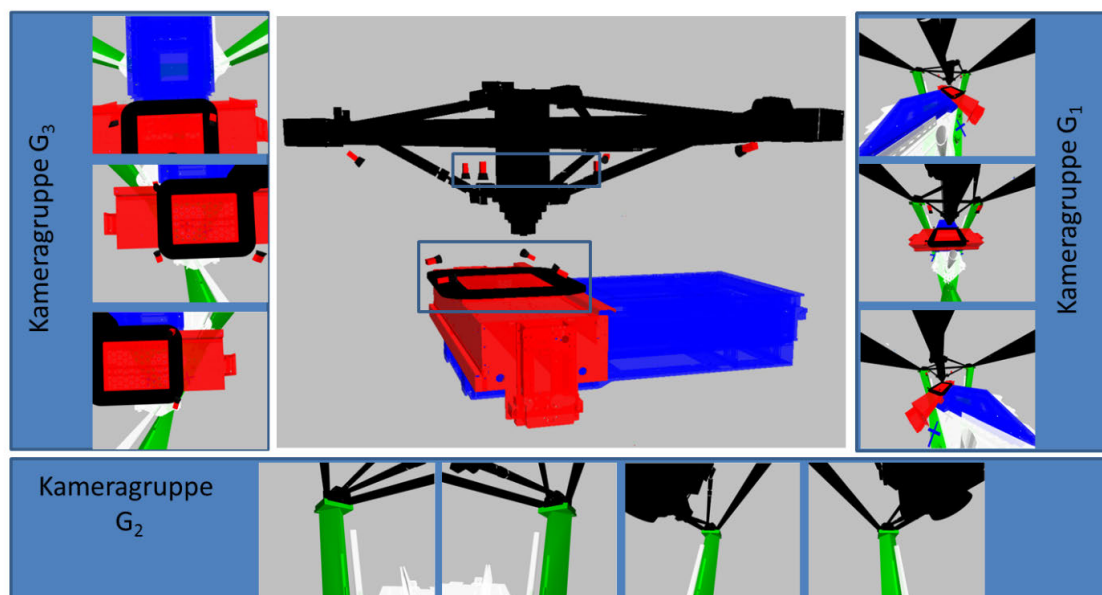


Abbildung 7.30: Anordnung und Blickfelder der verwendeten Kameras

In Abbildung 7.30 ist eine Visualisierung des Messmodells sowie der erwarteten Blickfelder dargestellt. Die Kameras an der Spindel (G3) und auf dem Maschinentisch (G2) sind jeweils auf einem deformationsfreien Grundkörper aus CFK am Tisch angebracht. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass sich die Lage und Orientierung der Kameras relativ zueinander sowie relativ zum Maschinentisch bzw. der Spindel während der Messung nicht ändern. Die Kameragruppe G1 überwacht die gesamte Struktur und kann Verlagerungen und Deformationen des Gestells sowie die Verlagerungen der Spindel relativ zum Tisch direkt detektieren. Die Kameras der Gruppe G2 sind am Maschinentisch installiert. Sie blicken auf die Kameras der Gruppe G1 und das Maschinengestell und können die Verlagerung des Tisches relativ zum Gestell messen. Im Blickfeld der Gruppe G3 liegt der Maschinentisch mit den Kameras und Marken der Gruppe G2. Durch die Anordnung der Kameras ist es möglich, mit jeweils einem Bild aller Kameras die Verlagerung des Tisches relativ zur Spindel sowie die Lage und Orientierung der drei Kameras der Gruppe G1 zu bestimmen. Die Auflösung der Kameras und die Brennweiten sind so gewählt, dass die Ortsauflösung am Messobjekt für alle Kameras ca. 0.25 mm/Pixel beträgt (Tabelle 7.11). Damit kann eine homogene Verteilung der Messunsicherheiten im gesamten Arbeitsraum der Maschinen im gesamten Messvolumen sichergestellt werden.

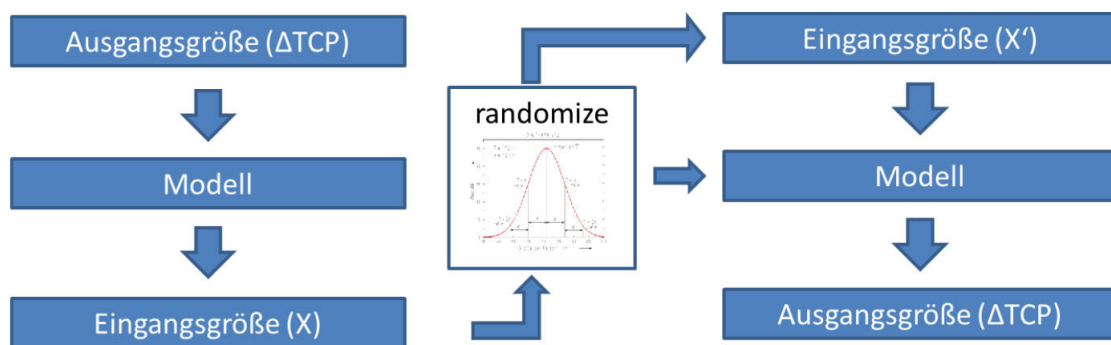


Abbildung 7.31: Ablauf der Monte-Carlo-Simulation

Um die erreichbare Messunsicherheit dieser Messkonfiguration abschätzen zu können, bietet sich eine Monte-Carlo-Simulation an (Abbildung 7.31). Dabei werden für eine vorgegebene Verlagerung (ΔTCP) mit dem vorkonfigurierten Modell an einer definierten Position der Achsen die Bildkoordinaten (X) berechnet. Diese werden einem künstlichen Messrauschen unterzogen und als Eingangsgrößen X' zur Bestimmung der TCP-Verlagerung $\Delta TCP'$ verwendet. Angenommen wurde eine Unsicherheit der Bildmessung von $\sigma \approx 0.025$ Pixel, was für Marken mit einem mittleren Durchmesser im Bild von über 10 Pixel realistisch ist (vgl. Abbildung 3.5 links).

Tabelle 7.11: Auflösung, Brennweite und Blickfeld der verwendeten Kameras

Kameragruppe	Auflösung [Pixel]	Brennweite [mm]	Blickfeld [m]	Ortsauflösung [mm/Pixel]
G1 (K1, K2, K3)	6576 x 4384	18	2.0x1.5	0.30
G2 (K4, K5, K6, K7)	2560 x 2048	25	1.0x0.8	0.25
G3 (K8, K9, K10)	2448 x 2050	12	1.0x0.8	0.25

Insgesamt wurden zur Bestimmung der Unsicherheiten 1000 Simulationsdurchläufe mit jeweils neu verrauschten Bildkoordinaten berechnet. Dafür sind in Tabelle 7.12 für eine TCP-Pose ($\Delta TCP'$) die mittleren inneren Unsicherheiten (σ) und die mittlere Abweichung vom Vorgabewert (Δ) des Modells den Standardabweichungen und Streubreiten aller Simulationsdurchläufe gegenübergestellt. Dabei zeigen die inneren Streuungen eine unrealistisch geringe Unsicherheit, die unter Versuchsbedingungen nicht erreichbar ist. Auch die Standardabweichung der Verteilung der Simulationen ist zu optimistisch. Jedoch zeigen Position und Neigung ungefähr die gleiche Größenordnung der Fehler an, was näher an den zu erwartenden Unsicherheiten liegt.

Tabelle 7.12: Unsicherheiten der Ausgleichung

n=1000	ΔX [μm]	ΔY [μm]	ΔZ [μm]
innere Unsicherheit (1σ)	0.281	0.334	0.065
Abweichung (Δ)	0.017	-0.086	-0.015
Standardabweichung (1σ)	0.530	0.590	0.263
Streuung (Range)	3.272	3.587	1.576

	ΔA [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ΔB [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ΔC [$\mu\text{m}/\text{m}$]
innere Unsicherheit (1σ)	0.008	0.008	0.005
Abweichung (Δ)	-0.064	0.007	0.014
Standardabweichung (1σ)	0.371	0.367	0.299
Streuung (Range)	2.274	2.190	1.974

Da noch keine Messwerte vorliegen können, bilden Schätzwerte der Eingangsgrößen (x) und ihre Standardunsicherheiten ($u(x)$) die Simulationsbasis (vgl. JCGM 2008B). Eingangsgrößen sind hier die Schätzwerte der Bildmessungen. Auf dieser Basis können Schätzwerte der Ausgangsgrößen (y), die kombinierte Standardunsicherheit ($u_c(y)$) und daraus die theoretische Unsicherheit (U) der Ausgangsgrößen bestimmt werden.

$$\Delta TCP = \bar{y} \pm U \text{ mit } U = k * u_c(y) \quad (7.1)$$

Die kombinierte Standardunsicherheit $u_c(y)$ wird dabei aus der Übertragungsmatrix A mit Hilfe der Umkehrregel bestimmt.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum c_k^2 * u(x_k)^2} \text{ mit } c_k = \frac{\partial f}{\partial x_k} \quad (7.2)$$

Tabelle 7.13 zeigt die Größen für die Fehlerabschätzung der Monte-Carlo-Simulation. Dabei zeigen die Fehler Größenordnungen von unter $2 \mu\text{m}$ (Lage) sowie $2 \mu\text{m/m}$ (Neigung). Dies würde die Anforderungen zur Beurteilung der Genauigkeit einer WZM erfüllen.

Tabelle 7.13: Unsicherheiten der Ausgleichung

n=1000	$\Delta X [\mu\text{m}]$	$\Delta Y [\mu\text{m}]$	$\Delta Z [\mu\text{m}]$
Mittelwert: \bar{y}	0.017	-0.086	-0.015
Unsicherheit U ($k = 2$)	1.570	1.666	1.713

	$\Delta A [\mu\text{m/m}]$	$\Delta B [\mu\text{m/m}]$	$\Delta C [\mu\text{m/m}]$
Mittelwert: \bar{y}	-0.064	0.007	0.014
Unsicherheit U ($k = 2$)	1.707	1.707	1.695

In die Bestimmung der Unsicherheit fließen keine Veränderungen der Kalibrierung des Messsystems ein, es wurden nur zufällige Fehler der Bildmessung angenommen. Nimmt man zusätzlich Unsicherheiten der Markenkoordinaten ($\pm 5 \mu\text{m}$), der Äußeren ($\pm 5 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 5 \mu\text{m/m}$) und Inneren Orientierung der Kameras hinzu, zeigen sich erwartungsgemäß deutlich höhere Unsicherheiten zur Bestimmung der Verlagerung von unter $6 \mu\text{m}$ bzw. der Neigung $4 \mu\text{m/m}$ (Tabelle 7.14).

Tabelle 7.14: Unsicherheiten der Ausgleichung

n=250	$\Delta X [\mu\text{m}]$	$\Delta Y [\mu\text{m}]$	$\Delta Z [\mu\text{m}]$
Mittelwert	0.148	0.103	0.012
Standardabweichung (1σ)	4.119	5.389	2.302
Streubreite (Range):	28.259	34.829	14.493

	$\Delta A [\mu\text{m/m}]$	$\Delta B [\mu\text{m/m}]$	$\Delta C [\mu\text{m/m}]$
Mittelwert	0.121	-0.173	0.126
Standardabweichung (1σ)	3.835	3.091	2.889
Streubreite (Range)	23.675	21.493	15.269

Die Streubreite der Verlagerungen mit bis zu $35 \mu\text{m}$ bzw. $35 \mu\text{m/m}$ sind für die zu erwartende Größenordnung der Verlagerungen von unter $10 \mu\text{m}$ deutlich zu hoch. Dies heißt, dass

die Messsystemkalibrierung während der Messung überwacht und bei größer werdenden Standardabweichungen eine Neukalibrierung durchgeführt werden muss.

Mit dieser Methode ist es möglich, dass Genauigkeitskenngrößen für eine nicht existierende Messkonfiguration bestimmt werden können. In welchem Maß diese unter realen Bedingungen erreicht werden können, muss experimentell bestimmt werden.

7.3.2 Verifikation der Simulation

Dafür wurde die simulierte Messkonfiguration in der angenommenen Form realisiert. Insgesamt wurden auf den Baugruppen 247 Marken sowie an Gestell und Tisch insgesamt 4 Maßstäbe appliziert.

Tabelle 7.15: Struktur des Messmodells

Objekt	Marken	Kameras
Gestell und Nullpunkt	149	3xGX6600, c=18mm, frei
Spindel	50	3xGC2450, c=6.7mm, fest
Z-Schlitten und Z-Fehler	0	
Y-Schlitten, Y-Fehler	—	
X-Schlitten, X-Fehler	18	4x JaiGo5000, c=8.5mm, frei

Zur Messsystemkalibrierung wurden insgesamt 36 Positionen angefahren und dabei der Arbeitsraum nahezu vollständig ausgenutzt. Der Maschinenursprung wurde, aufgrund der guten Sichtbarkeit, auf den Mittelpunkt des Arbeitsraumes gelegt. Aufgrund des relativ weichen Gestells der Maschine werden die Kameras der Gruppe (G2) im Modell nicht als starr betrachtet. Ebenso konnte der Tisch nicht als starr betrachtet werden, da er sich aufgrund einer inneren Verspannung während der Bewegung deformiert.

Tabelle 7.16: Unsicherheit der Kameraparameter

Parameter		JaiGo5000	GC2450	GX6600
Brennweite	c	$1.67E - 05$	$1.70E - 05$	$3.03E - 05$
Hauptpunkt	xh	$1.80E - 05$	$8.37E - 06$	$2.25E - 05$
	yn	$2.81E - 05$	$7.11E - 06$	$2.06E - 05$
radialsymm.	a1	$5.35E - 09$	$1.86E - 08$	$6.40E - 11$
	a2	$1.90E - 11$	$1.06E - 10$	$4.50E - 15$
	a3	$6.10E - 15$	$5.59E - 14$	$2.60E - 20$
tangential	b1	$2.41E - 10$	$1.66E - 10$	$1.90E - 11$
	b2	$2.75E - 10$	$1.59E - 10$	$1.10E - 11$
Affinität und Scherung	c1	$5.37E - 08$	$7.91E - 09$	$4.49E - 09$
	c1	$4.19E - 08$	$8.96E - 09$	$5.96E - 09$

Trotzdem konnten bei der Kalibrierung, obwohl nur translatorische Bewegungen mit der Maschine realisierbar sind, die Parameter der Inneren Orientierung der Kameras erstaunlich gut bestimmt werden. In Tabelle 7.16 sind die Unsicherheiten der Parameter für jeweils eine Kamera angegeben. Anscheinend wird durch diese Art der Modellierung die Bestimmung der kritischen Verzeichnungsparameter (c_1 und c_2 sowie b_1 und b_2) durch die hohe Redundanz der Messungen gestützt.

Die geometrisch-kinematischen Fehler der Achsen konnten, da der Verfahrensweg aller Achsen jeweils neunmal vollständig überfahren wurden, mit modelliert werden. In Tabelle 7.17 sind die Unsicherheiten der ermittelten Parameter gegenübergestellt. Dabei ist deutlich ersichtlich, dass die Parameter der X-Achse nur schwer bestimmt werden können, was aufgrund der Deformation der Schlittenplatte nicht anders zu erwarten ist. Jedoch zeigen die Unsicherheiten der Y-Achse und der Z-Achse, dass eine Bestimmung der Parameter prinzipiell möglich ist. Leider ist aufgrund der Deformation der Schlittenplatte ein direkter Vergleich mit der Simulation nur bedingt möglich. Die ermittelten Unsicherheiten von Verlagerung und Neigung der nur gering deformierten Z-Achse zeigen jedoch eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. Wenn man dies zugrunde legt, ist es möglich, mit photogrammetrischen Methoden an einer WZM die geometrisch-kinematischen Fehler mit einer hinreichend geringen Unsicherheit zu bestimmen.

Tabelle 7.17: Mittlere Unsicherheit der geometrisch-kinematischen Fehler der Achsen

		X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
Verlagerung [μm]	x	10.57	5.42	3.17
	y	16.47	7.48	2.81
	z	4.26	8.16	1.48
Neigung [$\mu\text{m}/\text{m}$]	a	3.96	2.08	0.51
	b	2.46	1.22	0.74
	c	1.60	0.51	0.30

Insgesamt stellt dieses Vorgehen zur Offline-Versuchsplanung eine Möglichkeit zur Erstellung und Simulation von maschinen- und messsystemspezifischen Messkonfigurationen dar. Dies eröffnet die Möglichkeit, ohne Maschinenzeit zu beanspruchen, optimale photogrammetrische Messkonfigurationen zu erstellen, die zur Bestimmung der geometrisch-kinematischen Verlagerungen geeignet sind.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Charakterisierung und Verbesserung der Genauigkeit von WZM mithilfe photogrammetrischer Methoden. Ausgangspunkt ist eine Analyse von Aufbau, Verhalten und Korrektur an WZM sowie typischer eingesetzter Messmittel. Für die Fertigung von Werkstücken ist die Pose der Spindel relativ zum Werkstück relevant, zur Kalibrierung die positionsabhängige, räumliche Verlagerung und Neigung der translatorischen und rotatorischen Vorschubachsen sowie deren Anordnung zueinander. Das genauigkeitsrelevante Verhalten kann, aufgrund der voneinander unabhängigen Wirkmechanismen, in geometrisch-kinematische, elastische und thermo-elastische Verhalten unterschieden werden. Das geometrisch-kinematische Verhalten zeichnet sich durch die räumliche Bewegung von Starrkörpern im Raum aus. Korrekturmodelle, beispielsweise die VCS, können als Stand der Technik bezeichnet werden. Auch sind geeignete Messsysteme zur Erfassung der Fehler, beispielsweise Laserinterferometer und Laser-Tracker, vorhanden. Das elastische und thermo-elastische Verhalten wird durch zeitlich veränderliche Lasten verursacht und bewirkt eine Deformation der Baugruppen bzw. der Koppelstellen. Korrekturmodelle sind hierfür in der Steuerung nicht implementiert. Ebenso sind Messsysteme, die eine vollständige Posemessung realisieren können, nicht verfügbar. Aktuelle Trends hin zu sinkenden Losgrößen und zunehmender Anpassungsfähigkeit und Wandelbarkeit verstärken dabei den Zwang zur zeitaktuellen Bestimmung des Maschinenzustands.

Photogrammetrische Methoden sind prinzipbedingt in der Lage, eine vollständige Posemessung und eine Deformationsmessung an einer hohen Anzahl an Messpunkten zu realisieren. Vor allem 6DoF und Stereokamerasysteme sind für derartige Messungen aufgrund ihrer hohen Messraten und einfachen Bedienbarkeit interessant. Allerdings erreichen sie nicht die notwendigen Genauigkeiten und sind hinsichtlich Kameraanzahl und Blickfeld nur bedingt anpassbar. Die Bündelblockausgleichung kann beides realisieren. Jedoch sind die Methoden aufgrund der handgeführten Bildaufnahme nicht automatisierbar.

Damit ergibt sich das Ziel der Arbeit, eine photogrammetrische Methode zur Charakterisierung des Maschinenzustandes zu entwickeln. Die fokussierte Anwendung ist die Charakterisierung sowie die Bestimmung von Parametern von Korrekturmodellen. Die Basis bildet dabei ein geeignetes Messmodell mit einem Abbild der kinematischen Maschinenstruktur sowie der Korrekturmodelle. Kernpunkt ist die Integration der kinematischen Struktur ins Messmodell. Damit können die geometrisch-kinematischen Abweichungen als Starrkörperbewegung abgebildet werden. Weiterhin zeigt sich, dass mit Hinblick auf die Redundanz des Modells eine mehrfache Messung des gesamten Fahrwegs aller Vorschubachsen zweckmäßig ist. Hierfür wird ein Modellierungskonzept erarbeitet und dessen Vorteile dar-

gestellt. Das Modellierungskonzept baut auf kinematisch verkoppelten Starrkörpern auf, denen die Marken und Kameras zugeordnet werden. Weiterhin werden mehrere Objektzustände in einem Modell zusammengeführt. Damit können kinematische Zwangsbedingungen modelliert werden sowie unterschiedlichste Messkonfigurationen, beispielsweise die Zusammenführung von mit Objekten mitbewegten Kameras, abgebildet werden.

Dieses Modellierungskonzept wurde in eine prototypische Software umgesetzt, um die Potenziale und Defizite des Modellierungskonzepts experimentell bestimmen zu können. Entstanden ist eine Softwareumgebung, mit der automatisiert Bilder aufgenommen und Verlagerungen ermittelt werden können. Weiterhin ist mit dem Toolkit eine Software entstanden, die eine Erstellung, Simulation und Kalibrierung von nahezu beliebigen Messkonfigurationen ermöglicht.

Zur Verifikation der Methodik wurde eine Messaufgabe zur Analyse von Maschinenkomponenten und Maschinen sowie zur Simulation von Messkonfigurationen vorgestellt. Dabei wurden die kinematischen Modelle im Messmodell integriert, was den Aufbau erweiterter Messkonfigurationen sowie die Bestimmung von Parametern der Korrekturmodelle ermöglicht. Bei der Analyse der Kardangelenke konnte die kinematische Struktur, vor allem die Lage der Kardanachsen relativ zueinander, identifiziert werden. Dies ermöglicht einerseits die Verbesserung des geometrisch-kinematischen Verhaltens sowie andererseits die exakte Bestimmung des elastischen Verhaltens. Zur Bestimmung der thermo-elastischen Verlagerungen an dem Hexapod wurde eine erweiterte 6DoF-Messkonfiguration, bestehend aus ortsfesten und mit der Maschine mitbewegten Kameras, erstellt. Mit dieser konnten Messunsicherheiten von unter $10\ \mu\text{m}$ bzw. $10\ \mu\text{m}/\text{m}$ in einem Messvolumen von $600\text{mm} \times 600\text{mm} \times 400\text{mm}$ experimentell nachgewiesen werden. Dabei stellt die Möglichkeit der freien Erstellung von Messkonfigurationen eine erhebliche Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten photogrammetrischer Systeme an WZM gegenüber dem Stand der Technik dar. Bei der Messsystemkalibrierung konnte gezeigt werden, dass die geometrisch-kinematischen Fehler der Maschine mitbestimmt werden können. Dieser Nebeneffekt im Sinne der Messsystemkalibrierung liefert Parameter für die geometrisch-kinematische Kalibrierung der Maschine und führt zu einer deutlichen Verbesserung des statischen Verhaltens. Mit dem kalibrierten Messsystem konnte weiterhin gezeigt werden, dass die erweiterte Messkonfiguration aufgrund des Schleifenschlusses eine deutliche Senkung der Unsicherheiten gegenüber konventionellen 6DoF-Systemen ermöglicht. Somit können die erreichbaren Messunsicherheiten zur Erfassung von thermisch bedingten Verlagerungen verwendet werden. Anhand der beispielhaften Simulation und Beurteilung einer Messkon-

figuration wurde gezeigt, dass eine simulative Bewertung durch eine Monte-Carlo-Simulation möglich ist. Dies ermöglicht eine Anwendbarkeit dieser Systeme durch eine Kapselung des notwendigen Fachwissens zur Modellierung, da die vorgefertigten Modelle dem Anwender bereitgestellt werden können. Bei der Verifikation der simulierten Messkonfiguration konnte gezeigt werden, dass in der Maschinenstruktur, vor allem am Maschinentisch, erhebliche Deformationen auftreten, die einen Betrieb der Maschine innerhalb ihrer Spezifikation nicht zulässt. Dabei zeigt sich, dass durch die Erweiterung des Messmodells um die kinematische Struktur und die Verwendung des Schleifenschlusses eine Selbstkalibrierung auch bei eingeschränkter Bewegungsfreiheit des Messobjektes möglich ist.

Insgesamt lag der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Erarbeitung des Modellierungskonzepts für photogrammetrische Messungen an WZM. Anhand beispielhafter Messungen kann festgestellt werden, dass diese erweiterte Modellierung zweckmäßig ist und die erreichbare Messgenauigkeit deutlich steigern kann. Damit kann die Genauigkeit photogrammetrischer Messungen in einen Bereich gehoben werden, der eine Anwendung an WZM ermöglicht. Der Kernpunkt der erreichten Verbesserungen ist dabei die Verbindung der Modelle von Maschine und Messsystem sowie des Messzyklus in einem geschlossenen Modell. In Hinblick auf die Entwicklungen im Bereich Industrie 4.0 liegt hier, aus Sicht des Autors, das größte Anwendungspotenzial. Es besteht die steigende Notwendigkeit, Maschinen zu konfigurieren und zu kalibrieren. Gleichzeitig verbessert sich auch die Leistungsfähigkeit, die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit der maschinenspezifischen Modelle. Deshalb bietet es sich an, die maschinenspezifischen Modelle mit den Modellen der Messsysteme zu verbinden und damit einen Modellabgleich mithilfe der entwickelten Methodik durchzuführen. Dies ermöglicht eine deutliche Steigerung der Messgenauigkeit.

Die Implementierung erfolgte in dem notwendigen Umfang, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass in der Implementierung weiteres Genauigkeitspotenzial vorhanden ist. Beispielsweise wurde keine freie Netzausgleichung oder Varianzkomponentenschätzung realisiert. Weiterhin wurde bei der Analyse der Bildmessung festgestellt, dass genauigkeitsbestimmende Einflüsse der Beleuchtung vorhanden sind. Diese lassen sich durch eine Anpassung des Markendesigns deutlich verringern. Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Modellierung von konventionellen Messsystemen möglich ist. Dies ermöglicht eine Optimierung der Messkonfigurationen und Messbahn zur Bestimmung der Parameter der steuerungintegrierten Korrekturmodelle und damit eine Steigerung der erreichbaren Genauigkeit und Aussagefähigkeit. Damit kann die entwickelte photogrammetrische Methodik auch auf konventionelle Messmittel angewendet werden.

Nomenklatur

ADM	absolute distance measurement
BKS	Bezugskordinatensystem
BLAS	Basic Linear Algebra Subprograms
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
CamLink	Camera Link
CFK	carbonfaserverstärkter Kunststoff
DBB	Double-Ball-Bar
DIN	Deutsches Institut für Normung
DOF	Degres of freedom, Freiheitsgrad
dyn	dynamisches Verhalten
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GigE	Grigabit Ethernet
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
IR	Industrieroboter
IR-Filter	Infrarot-Sperrfilter
ISO	International Organisation for Standardization
Pose	Lage und Orientierung
SDK	Software Development Kit
TCP	Tool Center Point

USB	Universal Serial Bus
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Wst	Werkstück
Wz	Werkzeug
ela	elastischer Verhaltensbereich
geo	geometrischer Verhaltensbereich
thr	thermischer Verhaltensbereich
VCS	Volumetric Compensation System
WZM	Werkzeugmaschine

Formelzeichen

In der Liste sind nicht alle Formelzeichen enthalten. Weiterhin sind einige der hier aufgeführten Formelzeichen in einzelnen Kapiteln in einem anderen Zusammenhang verwendet und werden in diesen Kapiteln gesondert definiert.

Zeichen	Bezeichnung
A	Koeffizientenmatrix oder Jacobimatrix
A_1, A_2, A_3	Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung
A, B, C	Rotation um die karthesischen Achsen im Objektkoordinatensystem
B	Bedingungsmatrix
B_1, B_2	Parameter der radial-asymmetrischen und tangentialen Verzeichnung
BP	Bildpunkt
C_1, C_2	Parameter der Affinität und Scherung eines Bildes
c	Kamerakonstante bzw. Brennweite
D_1, D_2, D_3	Parameter der entfernungsabhängigen Verzeichnung
D_M	Markendurchmesser
e	Abbildungsexzentrizität
H'	Bildhauptpunkt
H_A, H_B	Halbachsen einer Ellipse
$\{K\}$	Kamerakoordinatensystem
l	Beobachtungsvektor
K	Lage des Projektionszentrum einer Kamera im globalen Koordinatensystem
$\{M\}$	Maschinenkoordinatensystem

Zeichen	Bezeichnung
m_b	Bildmaßstab
N	Normalengleichungsmatrix
n	Anzahl der Beobachtungen
O	Projektionszentrum
o	Anzahl der Objektzustände
P, P'	Punkt im Objekt- und im Bildkoordinatensystem
$Q_{LL}, Q_{XX},$ Q_{vv}	Kofaktorenmatrix der Beobachtungen, der Unbekannten und der Verbesserungen
R, r_{ij}	Rotationsmatrix und Rotationselemente
R_1, R_2	rotatorische Achsen einer WZM
σ_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit
σ	Standardabweichung
s	(empirische) a-posteriori Standardabweichung
\hat{s}	(empirische) a-posteriori Standardabweichung der Gewichtseinheit
$\{S\}$	Spindelkoordinatensystem
T_B^A	Koordinatentransformation, ausgehend von der Basis A zum Ziel B
T_1, T_2, T_3	translatorische Vorschubachsen einer WZM
$\{T\}$	Tischkoordinatensystem
u	Anzahl der Unbekannten
$\{W\}$	übergeordnetes Weltkoordinatensystem
X, Y, Z	kartesische Koordinaten im Objektkoordinatensystem
X_0, Y_0, Z_0	Position einer Kamera im Objektkoordinatensystem
x, y, z	kartesische Koordinaten Gerätekoordinatensystem
x', y', z'	kartesische Koordinaten eines Bildpunktes im Kamerakoordinatensystem

Literaturverzeichnis

- [Aer12] Aerospace Industries Association of America, Incorporated: *NAS 913 Rev. 5: Milling Machine - Numerically Controlled Profiling and Contouring*. 2012
- [AFH⁺02] Arnold, B. ; Freyer, B. ; Herzog, M. ; Hoffmann, M. ; Husemann, B. ; Schütz, C. ; Tietsche, S.: *Optik-Projekt: Der Brechungsindex*, 2002
- [AfM10a] AfM Technology GmbH: Volumetrische Vermessung und Kompensation einer Gantry Fräsmaschine mit FIDIA CNC C20 und Option VAC. Version: 2010. www.afm-tec.info. 2010. – Forschungsbericht
- [AfM10b] AfM Technology GmbH: Volumetrische Vermessung und Kompensation einer kleinen 3 Achs-Fräsmaschine mit FAGOR CNC 8070. Version: 2010. www.afm-tec.info. 2010. – Forschungsbericht
- [AfM11a] AfM Technology GmbH: KinematicsComp bewährt sich in der Praxis - Höhere Genauigkeit durch volumetrische Kompensation. Version: 2011. www.afm-tec.info. 2011. – Forschungsbericht
- [AfM11b] AfM Technology GmbH: MultiTRACE - Das Echtzeit Multilaterationssystem zur hochgenauen Bestimmung von Raumpunkten, basierend auf der LaserTRACER Technologie. Version: 2011. www.afm-tec.info. 2011. – Forschungsbericht
- [AfM12] AfM Technology GmbH: S10C Modellbasierte Methoden in der Mechatronik: Volumetrische Korrektur von Bearbeitungsmaschinen. Version: 2012. www.afm-tec.info. 2012. – Forschungsbericht
- [AfM13a] AfM Technology GmbH: Volumetrische Korrektur - Erfahrungen eines internationalen Dienstleisters. Version: 2013. www.afm-tec.info. 2013. – Forschungsbericht

- [AfM13b] AfM Technology GmbH: Volumetrische Vermessung und Kompensation einer Heckert CS800 mit Heidenhain iTNC 530 und Option KinematicsComp. Version: 2013. www.afm-tec.info. 2013. – Forschungsbericht
- [AfM13c] AfM Technology GmbH: Volumetrische Vermessung und Kompensation eines Präzisions Lehren Bohrwerks mit SIEMENS 840D pl und Option VCS. Version: 2013. www.afm-tec.info. 2013. – Forschungsbericht
- [AIC10] AICON 3D Systems GmbH: DPA - 3D Koordinatenmessung mit handgehaltener Digitalkamera. Version: 2010. <http://aicon3d.de>. 2010. – Forschungsbericht
- [AIC12] AICON 3D Systems GmbH: MoveInspect HF | HR - 3D Messung dynamischer Vorgänge. Version: 2012. <http://aicon3d.de>. 2012. – Forschungsbericht
- [AIC14] AICON 3D Systems GmbH: Vehicle Safety - 3D Messtechnik in der Fahrzeugsicherheit. Version: 2014. <http://aicon3d.de>. 2014. – Forschungsbericht
- [AME14] AMETEK GmbH – Creaform Deutschland: Tragbares CMM-System HandyPROBE: technische Daten. Version: 2014. <http://www.creaform3d.com>. 2014. – Forschungsbericht
- [API06] API Metrology Equipment Limited: API Product Specifications - SmartTrack. Version: 2006. <https://apimetrology.de/>. 2006. – Forschungsbericht
- [API12a] API Metrology Equipment Limited: API Product Specifications - Omnitrac2. Version: 2012. <https://apimetrology.de/>. 2012. – Forschungsbericht
- [API12b] API Metrology Equipment Limited: API Product Specifications - Radian. Version: 2012. <https://apimetrology.de/>. 2012. – Forschungsbericht
- [API12c] API Metrology Equipment Limited: *Manual XD-Laser*, 2012
- [API12d] API Metrology Equipment Limited: XD-Laser. Version: 2012. <https://apimetrology.de/>. 2012. – Forschungsbericht
- [API15] API Metrology Equipment Limited: *Werkzeugmaschinenkalibrierung*. <https://apimetrology.de/>. Version: 2015
- [ASSA12a] Aguado, S. ; Samper, D. ; Santolaria, J. ; Aguilar, J. J.: Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on

- laser tracker measurements. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 53 (2012), S. 160–169
- [ASSA12b] Aguado, S. ; Samper, D. ; Santolaria, J. ; Aguilar, J. J.: Towards an effective identification strategy in volumetric error compensation of machine tools. In: *Meas. Sci. Technol.* 23 (2012)
- [ASSA13a] Aguado, S. ; Santolaria, J. ; Samper, D. ; Aguilar, J. J.: Influence of measurement noise and laser arrangement on measurement uncertainty of laser tracker multilateration in machine tool volumetric verification. In: *Precision Engineering* 37 (2013), S. 929–943
- [ASSA13b] Aguado, S. ; Santolaria, J. ; Samper, D. ; Aguilar, J. J.: Study of self-calibration and multilateration in machine tool volumetric verification for laser tracker error reduction. In: *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 0(0) 1-14 *IMechE 2013* (2013)
- [ASSA14] Aguado, S. ; Santolaria, J. ; Samper, D. ; Aguilar, J. J.: Protocol for machine tool volumetric verification using commercial laser tracker. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 75 (2014), S. 425–444
- [Atk96] Atkinson, K. B.: *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. 1996
- [Axi18] Axios 3d Services GmbH: *CamBar B2 C4 und CamBar B2 C8*. www.axios3d.de. Version: 2018
- [Bü01] Bürgel, R.: *Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben*, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität München, Diss., 2001
- [BB06] Burger, W. ; Burge, M. J.: *Digitale Bildverarbeitung - Eine Einführung mit Java und ImageJ*. 2006
- [BB07] Burger, W. ; Burge, M. J.: *Digital Image Processing - An algorithmic introduction using Java*. 2007. – ISBN 978-1-84628-379-6
- [BBDW14] Brecher, C. ; Brockmann, B. ; Daniels, M. ; Wennemer, M.: Herausforderungen bei der messtechnische Untersuchung von Werkzeugmaschinen. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (2014), Nr. 12, S. 885–888

- [Ben11] Benning, W.: *Statistik in Geodäsie, Geoinformation Maschinenbau, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage*. 2011. – ISBN 978-3-87907-512-6
- [Bey04] Beyer, L.: *Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern - Insbesondere mit Parallelkinematik*, Fachbereich Maschinenbau der Helmut-Schmidt-Universität - Universität der Bundeswehr Hamburg, Diss., 2004
- [Bey06] Beyer, L.: Roboterkalibrierung steigert Positioniergenauigkeit - Reduzierte Stillstandszeiten und weniger Peripheriesysteme nötig - Neue Anwendungen denkbar. In: *A&D-Kompodium 2006/2007* (2006)
- [BFW15] Brecher, C. ; Fey, M. ; Wennemer, M.: Volumetric thermo-elastic machine tool behavior. In: *Production Engineering. Research and Development* 9 (2015), S. 119–124
- [BFW16] Brecher, C. ; Fey, M. ; Wennemer, M.: Volumetric measurement of the transient thermo-elastic machine tool behavior. In: *Production Engineering. Research and Development* 10 (2016), S. 345–350. – ISSN 0944-6524
- [BHF01] Böhm, J. ; Hefele, J. ; Fritsch, D.: Towards On-line Pose Measurement for Robots. In: *Joint Pattern Recognition Symposium* (2001)
- [BHR13] Brecher, C. ; Haber, D. ; Rietdorf, A.: Thermoelastische Verformung von Werkzeugmaschinen - Thermisch bedingte Strukturverformungen kamerabasiert erfassen und visualisieren. In: *wt Werkstattstechnik online* 103 (2013), Nr. 5, S. 364–369
- [BK05] Bringmann, B. ; Küng, A.: A Measuring Artefact for true 3D Machine Testing and Calibration. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005), Nr. 01, S. 471–474
- [BK09] Bringmann, B. ; Knapp, W.: Machine tool calibration: Geometric test uncertainty depends on machine tool performance. In: *Precision Engineering* 33 (2009) 524-529 (2009)
- [BL12] Bethmann, F. ; Luhmann, T.: Monte-carlo-simulation for accuracy assessment of a single camera navigation system. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B5, 2012* (2012)

- [BPT06] Bleicher, F. ; Puschwitz, F. ; Theiner, A.: Laser based measurement system for calibrating machine tools in 6 DOF. In: *na*. (2006)
- [Bri07] Bringmann, B.: *Improving Geometric Calibration Methods for Multi-Axis Machining Centers by Examining Error Interdependencies Effects*, ETH Zürich, Diss., 2007
- [Bro71] Brown, D.: Close-Range Camera Calibration. In: *Photogramm. Eng* (1971)
- [BSMM05] Bronstein, I. N. ; Semendjajew, K. A. ; Musiol, G. ; Mühlig, H.: *Taschenbuch der Mathematik - 6., vollständig überarbeitete und ergänzte Auflage*. 2005
- [BSR⁺09] Boochs, F. ; Schütze, R. ; Raab, C. ; Wirth, H. ; Meier, J.: A flexible multi-camera system for precise tracking of moving effectors. In: *Robotics and Applications, Cambridge, MA, USA* (2009)
- [BSRQ14] Brinken, F. ; Schoppe, E. ; Richter, M. ; Queins, M.: Maschinenintegrierte Kompensationsstrategien für die Präzisionsbearbeitung. In: *ICMC* (2014)
- [BSS⁺10] Boochs, F. ; Schütze, R. ; Simon, C. ; Marzani, F. ; Wirth, H. ; Meier, J.: Increasing the accuracy of untaught robot positions by means of a multi-camera system. In: *IPIN* (2010)
- [BW02] Beyer, L. ; Wulfsberg, J.: Roboterkalibrierung mit ROSY. In: *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002), Nr. 9, S. 415–418
- [BW06] Bringmann, B. ; W.Knapp: Model-based - Chase-the-Ball - Calibration of a 5-Axes Machining Center. In: *Annals of the CIRP* 55 (2006), Nr. 01
- [BWF14] Brecher, C. ; Wennemer, M. ; Fey, M.: Temperaturstabile Werkzeugmaschinen - Messverfahren zur volumetrischen Korrektur thermoelastischer Verlagerungen. In: *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014), Nr. 7/8, S. 490–495
- [Con15] Conrad, K.-J.: *Taschenbuch der Werkzeugmaschinen*. 2015
- [CSY00] Conrad, K. L. ; Shiakolas, P. S. ; Yih, T. C.: Robot calibration issues - accuracy, repeatability and calibration. In: *Proceedings of the 8th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED 2000), Rio, Patras, GREECE, 17-19 July 2000* (2000)

- [CVW⁺08] Cuypers, W. ; VanGestel, N. ; Voet, A. ; Kruth, J.-P. ; Mingneau, J. ; Bleys, P.: Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. In: *Optics and Lasers in Engineering 47* (2009) 292-300 (2008)
- [CW00] Clarke, T. ; Wang, X.: The control of a robot end-effector using photogrammetry. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (2000)
- [Den05] Dencheva, V.: *Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie*, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (E122), Technische Universität Wien, Diss., 2005
- [Dep09] Depenthal, C.: *Entwicklung eines zeitreferenzierten 4D-Kalibrier- und Prüfsystems für kinematische optische Messsysteme*, Universität München, Diss., 2009
- [DFG15] DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft: *SPP 1180: Prognose und Beeinflussung der Wechselwirkungen von Strukturen und Prozessen (Prediction and manipulation of interaction between Structure and Process)*. 2015
- [DGT⁺13] Darr, T. ; Götz, C. ; Tuttas, S. ; Becker, T. ; Stilla, U.: Genauigkeit der inversen Navigation bei hoher Passpunktsichtbarkeit zur Absolutpositionierung eines geführten Messsystems. In: *DGPF Tagungsband 22 / 2013 - Dreiländertagung DGPF, OVG, SGPF* (2013)
- [DIN81] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 69651 Teil 1-6: Werkzeugmaschinen - Maschinen für die Metallbearbeitung*. 1981
- [DIN87] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 55350 Teil 13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*. Juli 1987
- [DIN90a] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN V 8602 Teil 1: Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Last - Teil 1*. Mai 1990
- [DIN90b] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN V 8602 Teil 2: Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Last - Teil 2*. Mai 1990
- [DIN90c] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN V 8602 Teil 3: Verhalten von Werkzeugmaschinen unter statischer und thermischer Last - Teil 3*. Mai 1990

- [DIN96] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 8373: Industrieroboter - Wörterbuch*. 1996
- [DIN99] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 230-1: Prüffregeln für Werkzeugmaschinen - Geometrische Genauigkeit von Maschinen, die ohne Last oder unter Schlichtbedingungen arbeiten*. Juli 1999
- [DIN01a] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 10791 Teil 7: Prüfbedingungen für Bearbeitungszentren - Genauigkeit eines fertigbearbeiteten Prüfwerkstückes*. Januar 2001
- [DIN01b] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 230-4: Prüffregeln für Werkzeugmaschinen - Kreisformprüfung für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen*. Mai 2001
- [DIN07] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 230-3: Prüffregeln für Werkzeugmaschinen - Prüfung des Thermischen Verhaltens*. August 2007
- [DIN14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 230-7: Prüffregeln für Werkzeugmaschinen - Geometrische Genauigkeit von Rotationsachsen*. Juli 2014
- [DIN16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Standardreferenztemperatur für die Geometrische Produktspezifikation und -prüfung*. 2016
- [DMG14a] DMG MORI Aktiengesellschaft: 3D-Quickset. Version: 2014.
<https://de.dmgmori.com>. 2014. – Forschungsbericht
- [DMG14b] DMG MORI Aktiengesellschaft: DMU 80eVo linear - Baureihe. Version: 2014.
<https://de.dmgmori.com>. 2014. – Forschungsbericht
- [DMG16a] DMG MORI Aktiengesellschaft: DMU / DMC duoBLOCK. Version: 2016.
<https://de.dmgmori.com>. 2016. – Forschungsbericht
- [DMG16b] DMG MORI Aktiengesellschaft: DMU / DMC FD. Version: 2016.
<https://de.dmgmori.com>. 2016. – Forschungsbericht
- [DMG16c] DMG MORI Aktiengesellschaft: DMU / DMC monoBLOCK. Version: 2016.
<https://de.dmgmori.com>. 2016. – Forschungsbericht

- [Dol96] Dold, J.: Influence of large Targets on the results of photogrammetric bundle adjustment. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (1996)
- [Dol97] Dold, J.: *Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchste Genauigkeit und seine Überprüfung*, Universität der Bundeswehr München, Diss., 1997
- [Dor18] Dornbusch GmbH: *Werkzeug für eine PKW-Stirnwand*.
<http://dornbusch-gmbh.de/umform-und-stanzwerkzeuge>. Version: 2018
- [Dr.05] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: *3D-Tastsysteme für Werkzeugmaschinen*.
Heidenhain-Messtaster.pdf. Version: 2005
- [Dr.14] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: *Messgeräte zur Abnahme und Kontrolle von Werkzeugmaschinen*. 2014
- [Dr.16] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*. 2016. – Forschungsbericht
- [DT03] Denkena, Berend ; Tönshoff, Hans K. ; Denkena (Hrsg.): *Grundlagen der Werkzeugmaschinen*. 2003
- [DZ13] Du, G. ; Zhang, P.: Online robot calibration based on vision measurement. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 29 (2013) 484-492 (2013)
- [EEPP02] Estler, W. T. ; Edmundson, K. L. ; Peggs, G. N. ; Parker, D. H.: Large-Scale Metrology - An Update. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2002), S. 587-609
- [EKS11] Ekkel, T. ; Kipper, T. ; Schröder, H.: *Interferometrische Maßstabskalibrierung*, 2011
- [EPD12] Eger, J. S. ; Porath, M. ; Donatelli, G. D.: Use of stationary receivers located by multilateration for the improvement of the metrological performance of indoor-gps systems. In: *IICIMMEC* (2012)
- [Erh08] Erhardt, A.: *Einführung in die digitale Bildverarbeitung - Grundlagen, Systeme und Anwendungen*. 2008
- [Ess12] Ess, M.: *Simulation and Compensation of Thermal Errors of Machine Tools*, ETH Zürich, Diss., 2012

- [ETA12a] ETALON GmbH: Katalog 2012. Version: 2012. www.etalon-gmbh.com. 2012. – Forschungsbericht
- [ETA12b] ETALON GmbH: Produktdatenblatt: Laser-Tracer-MT - Höchste Genauigkeit für kleine und mittlgroße Maschinen. Version: 2012. www.etalon-gmbh.com. 2012. – Forschungsbericht
- [ETA12c] ETALON GmbH: Produktdatenblatt LaserTracer - Räumlich messen mit submikrometer-Genauigkeit. Version: 2012. www.etalon-gmbh.com. 2012. – Forschungsbericht
- [ETA18] ETALON GmbH: LineCal. Version: 2018. www.etalon-gmbh.com. <http://www.etalon-ag.com/produkte/linecal/>, 2018. – Forschungsbericht
- [FAR12] FARO Technologies, Inc.: Laser Tracker Vantage. Version: 2012. www.faro.com. 2012. – Forschungsbericht
- [Fra12] Fraunhofer IPT: Flexible und schnelle Inspektion von Achssystemen - Messtechnische Untersuchung von Großmaschinen und Robotern. In: *MAV-online* (2012). www.mav-online.de
- [FS12] Florussen, G. H. J. ; Spaan, H. A ..: Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools. In: *Procedia CIRP 1 (2012)* (2012), S. 536 – 539
- [GA08] Gutierrez, J. A. ; Armstrong, S. S. R.: *Precision Landmark Location for Machine Vision and Photogrammetry*. 2008 ZI9510G984
- [GAOOC13] Gomez-Acedo, E. ; Olarra, A. ; Orive, J. ; Calle, L. N. L. I.: Methodology for the design of a thermal distortion compensation for large machine tools based in state-space representation with Kalman filter. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture 75* (2013), S. 100–108
- [Geb14] Gebhardt, M.: *Thermal Behaviour and Compensation of Rotary Axes in 5-Axis Machine Tools*, ETH Zürich, Diss., 2014
- [Geo14] Geodetic Systems, Inc.: V-Stars/N. 2014. – Forschungsbericht
- [GEW⁺13] Gebhardt, M. ; Ess, M. ; Weikert, S. ; Knapp, W. ; Wegener, K.: Phenomenological compensation of thermally caused position and orientation errors of rotary axes. In: *Journal of Manufacturing Processes 15* (2013) 452-459 (2013)

- [GF08] Grote, K.-H. ; Feldhusen, J.: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. 2008
- [GKB⁺15] Gao, W. ; Kim, S. W. ; Bosse, H. ; Haitjema, H. ; Chen, Y. L. ; Lu, X. D. ; Knapp, W. ; Weckenmann, A. ; Estler, W. T. ; Kunzmann, H.: Measurement technologies for precision positioning. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 64 (2015), S. 773–796
- [GKRS12] Großmann, K. ; Kauschinger, B. ; Riedel, M. ; Scharenberg, W.: Bestimmung der Bewegungsfehler einer Linearachse. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.) ; Müller, Christina (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012*. 2012. – ISBN 978-3-87907-515-7, S. 340–347. – Herbert Wichmann Verlag - Heidelberg
- [GMF⁺14] Gebhardt, M. ; Mayr, J. ; Furrer, N. ; Widmer, T. ; Weikert, S. ; Knapp, W.: High precision grey-box model for compensation of thermal errors on five-axis machines. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014), S. 509–512
- [Gra99] Graeser, R.-G.: *Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern*, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Diss., 1999
- [Gra09] Gramlich, G. M.: *Lineare Algebra - Eine Einführung*. 2009
- [Gre15] Gressel AG: Standard-Werkstückspanntechnik löst Sonderaufgaben. In: *Fertigungstechnik - Das Fachmagazin für die zerspanende Industrie* (2015)
- [Gro12] Großmann, K.: Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen - Eine Übersicht zu Zielen und Vorgehen im SFB/Transregio 96. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107 (2012), Nr. 5, S. 307–314
- [GSC⁺13] Gebhardt, M. ; Schneeberger, A. ; Capparelli, S. ; Knapp, W. ; Wegener, K.: Messtechnische Charakterisierung thermisch bedingter Abweichungen von 5-Achs Werkzeugmaschinen. (2013)
- [GSKW13] Gebhardt, M. ; Schneeberger, A. ; Knapp, W. ; Wegener, K.: Measuring, modeling and compensating thermally caused location errors of rotary axes. In: *Proceedings of Machine Tools Technology Research Foundation 2013 Meeting, 2013, San Francisco* (2013)

- [GSW⁺14] Gebhardt, M. ; Schneeberger, A. ; Weikert, S. ; Knapp, W. ; Wegener, K.: Thermally Caused Location Errors of Rotary Axes of 5-Axis Machine Tools. In: *International Journal of Automation Technology* 8 (2014), Nr. 4
- [GTE⁺12] Götz, C. ; Tuttas, S. ; Eder, K. ; Neumann, I. ; Liebl, W. ; Stilla, U.: Genauigkeitsuntersuchungen zur photogrammetrischen Positionsbestimmung eines Multi-Kamera-Systems. In: Luhmann, Thomas (Hrsg.): *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012*, 2012
- [GTH⁺12] Götz, C. ; Tuttas, S. ; Hoegner, L. ; Eder, K. ; Stilla, U.: Accuracy evaluation for a precision indoor multi-camera pose estimation system. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38 (3/W22) (2012)
- [Han07] Handel, H.: Analyzing the Influences of Camera Warm-Up Effects on Image Acquisition. In: Y. Yagi et al. (Eds.): *ACCV 2007, Part II, LNCS 4844*, pp. (2007), S. 258–268
- [HB01] Hefele, J. ; Brenner, C.: Robot Pose Correction using Photogrammetric Tracking. In: *Intelligent Systems and Smart Manufacturing* (2001)
- [HBM17] HBM - Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: WI - Induktiver Wegaufnehmer (Miniatur-Taster). Version: 2017. www.hbm.com. 2017. – Forschungsbericht
- [Hef01] Hefele, J.: On-Line Pose Messsystem für Roboter. In: *na*. (2001)
- [Hef02] Hefele, J.: Real-Time photogrammetric algorithms for robot calibration. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2002)
- [Hen07] Hennes, M.: Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* (2007)
- [Her05] Hermes, T.: *Digitale Bildverarbeitung - Eine praktische Einführung*. 2005
- [HFKW11] Härtig, F. ; Franke, M. ; Kniel, K. ; Wendt, K.: Coordinate Measurement Technique Considering the 3D-Abbe Principle. In: *10th IMEKO TC14 Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry* (2011)

- [HGT⁺13a] Hanel, A. ; Götz, C. ; Tuttas, S. ; Becker, T. ; Stilla, U.: Orientierungsgenauigkeit eines Multi-Kamerasystems bei Roboterbewegungen in einer Fahrzeugkarosserie. In: *DGPF Tagungsband 22 / 2013 - Dreiländertagung DGPF, OVG, SGPF* (2013)
- [HGT⁺13b] Hanel, A. ; Götz, C. ; Tuttas, S. ; Becker, T. ; Stilla, U.: Reduktion der Positionierfehler eines Multi-Kamerasystems durch Schleifenschluss unter beschränkten Sichtbedingungen im teilmontierten Fahrzeigrahmen, 2013
- [HHS16] Hartmann, W. ; Havlena, M. ; Schindler, K.: Recent developments in large-scale tie-point matching. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (2016), Nr. 115, S. 47–62
- [HHW06] Haig, C. ; Heipke, C. ; Wiggenhagen, M.: Lens inclination due to instable fixings detection and verified with VDI/VDE 2634 PART 1. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (2006)
- [HIM11] Hong, C. ; Ibaraki, S. ; Matsubar, A.: Influence of position-dependent geometric errors of rotary axes on a machining test of cone frustum by five-axis machine tools. In: *Precision Engineering 35 (2011) 1-11* (2011)
- [HIO12] Hong, C. ; Ibaraki, S. ; Oyama, C.: Graphical presentation of error motions of rotary axes on a five-axis machine tool by static R-test with separating the influence of squareness errors of linear axes. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture 59* (2012), S. 24–33
- [Hir12] Hirsch, A.: *Werkzeugmaschinen - Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 2012
- [HKK⁺04] Härtig, F. ; Keck, C. ; Kniel, K. ; Schwenke, H. ; Wäldele, F. ; Wendt, K.: Selbstnachführendes Laserinterferometer für die Koordinatenmesstechnik. In: *tm - Technisches Messen 71* (2004), Nr. 4, S. 227–232
- [HKW⁺13] Heunecke ; Kahlmann ; Welsch ; Eichhorn ; Neuner: *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage*. 2013
- [HLP⁺13] He, D. ; Liu, X. ; Peng, X. ; Ding, Y. ; Gao, B. Z.: Eccentricity error identification and compensation for high-accuracy 3D optical measurement. In: *Meas. Sci. Technol. 24 (2013) 075402 (7pp)* (2013)

- [HLT04] Hastedt, H. ; Luhmann, T. ; Tecklenburg, W.: Bestimmung von Einflussgrößen in der Nahbereichsphotogrammetrie mittels Monte-Carlo-Simulation. In: *Publikationen der DGPF (2004)*
- [HLT05] Hastedt, H. ; Luhmann, T. ; Tecklenburg, W.: Simulationsbasiertes Systemdesign für die optische Messtechnik nach VDI/VDE 2634. In: *Tagungsbeiträge der Jahrestagung der DGPF (2005)*
- [HR13] Haber, D. ; Rietdorf., A.: Kamerabasierte Erfassung des thermischen Verlagerungsverhaltens von Werkzeugmaschinen. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, 2013*
- [HRKG13] Holowenko, O. ; Riedel, M. ; Kauschinger, B. ; Grossmann, K.: Effiziente Abarbeitung hoch dynamischer Bewegungen Teil 2: Vorteile und Grenzen beim Einsatz taktratenabhängiger Bewegungen an Verarbeitungsmaschinen. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 108 (2013), Nr. 9, S. 664–669. – Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
- [HS15] Heisel, U. ; Schön, M.: Positions- und Lagefehler von Werkzeugmaschinen präzise detektieren. In: *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015), Nr. 1/2, S. 2–7
- [HSS12] Heisel, U. ; Schön, M. ; Strehle, T.: Entwicklung eines 5D-Koordinatenmessgeräts. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 7-8 (2012), Nr. 107, S. 493–496
- [HZ08] Hartley, R. ; Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in computer vision*. 2008
- [IBS13] IBS Precision Engineering Deutschland GmbH: Inspektions- & Analyser-Lösungen für Werkzeugmaschinen. Version: 2013. <http://www.ibspe.de/>. 2013. – Forschungsbericht
- [IBS⁺16] Ibaraki, S. ; Blaser, P. ; Shimoike, M. ; Takayama, N. ; Nakaminami, M. ; Ido, Y.: Measurement of thermal influence on a two-dimensional motion trajectory using a tracking interferometer. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65 (2016), S. 483–486
- [IDS18] IDS Imaging Development Systems GmbH: *3D-Vision: Mit den modularen 3D-Kamerasystem Die Ensenso X-Serie*. <https://de.ids-imaging.com>. Version: 2018

- [Ihl18] Ihlenfeldt, S.: *Maschinen Daten einfach Nutzen - vom Sensor zur Entscheidung*. 2018
- [IIM04] Iwasawa, K. ; Iwama, A. ; Mitsui, K.: Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder. In: *Precision Engineering 28 (2004) 399-408 (2004)*
- [IK12] Ibaraki, S. ; Knapp, W.: Indirect Measurement of Volumetric Accuracy for Three-Axis and Five-Axis Machine Tools: A Review. In: *IJAT?Vol.6 No.2?pp. 110-124 (2012) (2012)*
- [IKY+15] Ibaraki, S. ; Kudo, T. ; Yano, T. ; Takatsuji, T. ; Osawa, S. ; Sato, O.: Estimation of three-dimensional volumetric errors of machiningcenters by a tracking interferometer. In: *Precision Engineering 39 (2015) 179-186 (2015)*
- [IM09] Iwai, H. ; Mitsui, K.: Development of a measuring method for motion accuracy of NC machine tools using links and rotary encoder. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture 49 (2009), S. 99-108*
- [IST14] Ibaraki, S. ; Sato, G. ; Takeuchi, K.: Open-loop tracking interferometer for machine tool volumetric error measurement - Two-dimensional case. In: *Precision Engineering 38 (2014) 666-672 (2014)*
- [ITN+16] Ihlenfeldt, S. ; Thiem, X. ; Naumann, C. ; Riedel, M. ; Kauschinger, B.: Experimenteller Vergleich kennfeldbasierter und strukturmodellbasierter Korrektur. In: *Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen: Tagungsband zum 4. Kolloquium zum SFB/TR 96, 2016. - ISBN 978-3-95735-038-1, S. 111-128*
- [ITY+11] Ibaraki, S. ; Takeuchi, K. ; Yano, T. ; Takatsuji, T. ; Osawa, S. ; Sato, O.: Estimation of Three-Dimensional Volumetric Errors of Numerically Controlled Machine Tools by a Tracking Interferometer. In: *Journal of Mechanics Engineering and Automation 1 (2011) 313-319 1 (2011), S. 313-319*
- [Jä12] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung, 7., neu bearbeitete Auflage*. 2012
- [Jat11] Jatzkovski, P.: *Recourceneffiziente Kalibrierung von 5-Achs-Werkzeugmaschinen mit Tracking-Interferometern*, Fraunhofer IPT, Diss., 2011

- [JHSF08] Juretzko, M. ; Hennes, M. ; Schneider, M. ; Fleischer, J.: Überwachung der raumzeitlichen Bewegung eines Fertigungsroboters mit Hilfe eines Lasertrackers. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* (2008)
- [JK03] Janocha, H. ; Königstein, F.: Schätzung der Pose einer Kamera mithilfe von Landmarken - Estimating the Pose of a Camera Using Several Landmarks in a Room. In: *tm - Technisches Messen* 70 (2003), Nr. 10, S. 475–481
- [JSL15] Jepping, C. ; Schulz, J.-U. ; Luhmann, T.: Konzept zur Erfassung kinematische Rotorblattverformung an Windkraftanlagen. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015*, 2015
- [Kau06] Kauschinger, B.: *Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit an einem Hexapod einfacher Bauart*, TU-Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Diss., 2006
- [KLC⁺04] Kihlman, H. ; Loser, R. ; Cooke, A. ; Sunnanbo, A. ; Arb, K. von: Metrology-integrated Industrial Robots - Calibration, Implementation and Testing. In: *Proceedings of the 35th ISR* (2004)
- [Kli10] Klingauf, W.: Kompensation aller Achsfehler in 3D - Höhere Genauigkeit von Werkzeugmaschinen. In: *WB Werkstatt + Betrieb* (2010), Nr. 4, S. 77–79
- [Kno10] Knorrenschild, M.: *Numerische Mathematik - Eine beispielorientierte Einführung*. 2010
- [Koc04] Koch, K.-R.: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*. 2004
- [KR04] Klette, R. ; Rosenfeld, A.: *Digital Geometry - Geometric Methods for digital picture analysis*. 2004
- [Kra96] Kraus, K.: *Photogrammetrie Band 2 - Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. 1996
- [Kra04] Kraus, K.: *Photogrammetrie Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 2004
- [Kra07] Kraus, K.: *Photogrammetrie Band 3 - Geometry from Images and Laser Scans - 2nd edifrom*. 2007
- [Lé17] Lévêque, S.: Metrology for the European Extremely Large Telescope (E-ELT). In: *3rd Etalon Forum 3-4/11/16*, 2017

- [LBK09] Liebrich, T. ; Bringmann, B. ; Knapp, W.: Calibration of a 3D-ball plate. In: *Precision Engineering 33 (2009) 1-6 (2009)*
- [LCJS⁺14] Linares, J.-M. ; Chaves-Jacob, J. ; Schwenke, H. ; Longstaff, A. ; Fletcher, S. ; Flore, J. ; Uhlmann, E. ; Wintering, J.: Impact of measurement procedure when error mapping and compensating a small CNC machine using a multilateration laser interferometer. In: *Precision Engineering 38 (2014) 578-588 (2014)*
- [Lei06] Leica Geosystems AG: Leica Absolute Tracker - ASME B89.4.19-2006 Specifications. Version: 2006. <https://leica-geosystems.com/de-de>. 2006. – Forschungsbericht
- [Lei10a] Leica Geosystems AG: Leica Absolute Tracker AT401 - ASME B89.4.19-2006 Specifications. Version: 2010. <https://leica-geosystems.com/de-de>. 2010. – Forschungsbericht
- [Lei10b] Leica Geosystems AG: PCMM Systemspezifikationen - Leica Absolute Tracker und Leica T-Produkte. Version: 2010. <https://leica-geosystems.com/de-de>. 2010. – Forschungsbericht
- [LFM16] Luhmann, T. ; Fraser, C. ; Maas, H.-G.: Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (2016), Nr. 115, S. 37-46*
- [LH05] Lin, C.-C. ; Her, J.-L.: Calibrating the volumetric errors of a precision machine by a laser tracker system. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 26 (2005), S. 1255-1267*
- [LRKB14] Luhmann, T. ; Robson, S. ; Kyle, S. ; Boehm, J.: *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 2014
- [LRU13] Lu, X. ; Rao, N. ; Usman, I.: Six-axis position measurement system for levitated motion stages. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology 62 (2013), S. 507-510*
- [Luh09] Luhmann, T.: Precision potential of photogrammetric 6DOF pose estimation with a single camera. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (2009) 275-284 (2009)*
- [Luh10a] Luhmann, T.: Close range photogrammetry for industrial applications. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65 (2010) 558-569 (2010)*

- [Luh10b] Luhmann, T.: *Erweiterte Verfahren zur geometrische Kalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie*, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU-Dresden, Diss., 2010
- [Luh10c] Luhmann, T.: *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Wichmann Verlag, Berlin, 2010
- [LUM16] LUMINAR: *LUMINAR - Large Volume Metrology in Industry*.
<http://projects.npl.co.uk/luminar/the-project/>. Version: 2016
- [Maa97a] Maas, H.-G.: The accuracy potential of large format stillvideo cameras. In: *SPIE* (1997)
- [Maa97b] Maas, H.-G.: Dynamic Photogrammetric Calibration of Industrial Robots. In: *Optical Science, Engineering and Instrumentation'97* (1997)
- [Maa99] Maas, H.-G.: Image sequence based automatic multi-camera system calibration techniques. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (1999)
- [Mau12] Mautz, R.: *Indoor Positioning Technologies*, ETH Zürich, Diss., 2012
- [May07] Mayer, H.: Automatische Orientierung mit und ohne Messmarken - Das Mögliche und das Unmögliche. In: *DGPF Tagungsband 16 / 2007 - Dreiländertagung SGPBF, DGPF und OVG* (2007)
- [May09] Mayr, J.: *Beurteilung und Kompensation des Temperaturganges von Werkzeugmaschinen*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [McG05] McGlone, J. C.: *Manual of Photogrammetry*. 2005
- [Met14] Metronor AS ; Metronor (Hrsg.): *Metronor Dou - Datasheet*.
www.metronor.com. Version: 2014
- [MGHW09] Moustafa, S. ; Gerwien, N. ; Haertig, F. ; Wendt, K.: Comparison of error mapping techniques for coordinate measuring machines using the plate method and laser-tracer technique. In: *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology* (2009)
- [MGM⁺14] Mayr, J. ; Gebhardt, M. ; Massow, B. ; Weikert, S. ; Wegener, K.: Cutting fluid influence on thermal behavior of 5-axis machine tools. In: *Procedia CIRP 14* (2014) 395 - 400 (2014)

- [MHM⁺12] Möser ; Hoffmeister ; Müller ; Schlemmer ; Staiger ; Wanninger: *Handbuch Ingenieurgeodäsie - Grundlagen - 4., völlig neu bearbeitete Auflage*. 2012
- [Mik17] Mikromat GmbH: *Mikromat Präzisionsportale*.
<http://www.mikromat-wzm.de/html/fraesen.html>. Version: 2017
- [MJU⁺12] Mayr, J. ; Jedrzejewski, J. ; Uhlmann, E. ; Donmez, M. A. ; Knapp, W. ; Härtig, F. ; Wendt, K. ; Moriwaki, T. ; Shore, P. ; Schmitt, R. ; Brecher, C. ; Würz, T. ; Wegener, K.: Thermal issues in machine tools. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61 (2012), S. 771–791
- [MKSS01] Ma, Y. ; Kosecka, J. ; Soatto, S. ; Sastry, S.: *An Invitation to 3-D Vision - From Images to Models*. 2001
- [MTBP16] Mordwinzew, W. ; Tietz, B. ; Boochs, F. ; Paulus, D.: Korrektur der Ellipse-Exzentrizität im Kontext von Kamerakalibrierung. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*, 2016
- [MWFH07] Möser, M. ; Wallstab-Freitag, S. ; Herrmann, J.: Der Laser-Tracker LTD 800 - eine neue Generation in der Industriemesstechnik. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* 05 (2007)
- [Nav06a] Navratil, G.: *Ausgleichsrechnung I*. 2006
- [Nav06b] Navratil, G.: *Ausgleichsrechnung II*. 2006
- [NC 00] NC Gesellschaft e.V.: *Prüfrichtlinie und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitung (HSC)*. 06 2000
- [NC 05] NC Gesellschaft e.V.: *NCG - Empfehlung 2005*. 09 2005
- [Nes06] Nestmann, S.: Mittel und Methoden zur Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. In: *iwb-Seminar Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen* (2006)
- [Neu05] Neumann, B.: *Bildverarbeitung für Einsteiger*. 2005
- [Neu12] Neugebauer, R.: *Werkzeugmaschinen - Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*. 2012
- [Nie08] Niemeier, W.: *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. 2008

- [Nik11] Nikon: K-Series Optical CMM solutions - supporting a variety of metrology applications. 2011. – Forschungsbericht
- [NM97] Niederöst, M. ; Maas, H.-G.: Entwurf und Erkennung von codierten Zielmarken. In: *na*. (1997)
- [NRWE07] Neuschaefer-Rube, U. ; Wendt, K. ; Ehrig, W.: Optische Sensoren für die Koordinatenmesstechnik - Prinzipien und Prüfung. In: *PTB-Mitteilungen* 117 (2007)
- [NSGS13] Norman, A. R. ; Schönberg, A. ; Gorlach, I. A. ; Schmitt, R.: Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (2013), S. 427–446
- [OH07] Ouellet, J.-N. ; Hébert, P.: A Simple Operator for Very Precise Estimation of Ellipses. In: *Computer and Robot Vision, 2007. CRV'07. Fourth Canadian Conference on* (2007)
- [OH09] Ouellet, J.-N. ; Hébert, P.: Precise ellipse estimation without contour point extraction. In: *Machine Vision and Applications* (2009) 21:59-67 (2009)
- [Opt18a] Optris GmbH ; GmbH, Optris (Hrsg.): *Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung*. www.optris.de. Version: 2018
- [Opt18b] Optronis GmbH: Optronis Machine Vision Beschreibung CP70-1HS-M/C-1900 / Optronis GmbH. Version: 2018.
<https://optronis.com/products/cp70-1hs-mc-1900/>. 2018. – Forschungsbericht
- [PGC06] Parian, J. A. ; Gruen, A. ; Cozzani, A.: High accuracy space structures monitoring by a close range photogrammetric network. In: *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (2006)
- [Phy18] Physik Instrumente GmbH: *Hexapoden*. <https://www.physikinstrumente.de/de/produkte/hexapoden-parallelkinematiken/>. Version: 2018
- [Plu02] Plutowsky, A.: *Charakterisierung eines optischen Messsystem unter den Bedingungen des Arbeitsraumes einer Werkzeugmaschine*, wbk - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Diss., 2002

- [PMH⁺09] Peggs, G. N. ; Maropoulos, P. G. ; Hughes, E. B. ; Forbes, A. B. ; Robson, S. ; Ziebart, M. ; Muralikrishnan, B.: Recent developments in large-scale dimensional metrology. In: *Proc. IMechE Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture* (2009)
- [PP11] Papari, G. ; Petkov, N.: Edge and line oriented contour detection: State of the art. In: *Image and Vision Computing* 29 (2011) 79-103 (2011)
- [Pre15] Pressebüro Hammaburger Texte (PHT) ; Kerz, Hertha (Hrsg.): *MDA - Windkraftanlagen stellen höchste Anforderungen an Antriebstechnik*. www.hammaburger-industrie.de. Version: 2015
- [Rü87] Rüger: *Photogrammetrie*. 1987
- [Ren06] Renishaw plc: RGS40-G Wegmess-System mit Glasmaßstab. Version: 2006. www.renishaw.de. 2006. – Forschungsbericht
- [Ren14a] Renishaw plc: Messtastersysteme für CNC-Werkzeugmaschinen - Technische Daten. Version: 2014. www.renishaw.de. 2014. – Forschungsbericht
- [Ren14b] Renishaw plc: QC20-W kabelloser Kreisformtest. Version: 2014. www.renishaw.de. 2014. – Forschungsbericht
- [Ren16] Renishaw plc: *Systeme zur Maschinenmessung*, 2016. www.renishaw.de
- [Ren18] Renishaw plc: RTLC20-S, RTLC20 /FASTRACK hochgenaues, inkrementelles Maßbandsystem. Version: 2018. www.renishaw.de. 2018. – Forschungsbericht
- [RH05] Raguse, K. ; Heipke, C.: Photogrammetrische Auswertung asynchroner Bildsequenzen, 2005
- [RH06] Raguse, K. ; Heipke, C.: Photogrammetric synchronization of image sequences. In: *ISPRS Commission V Symposium 'Image Engineering and Vision Metrology'* (2006)
- [RHG15] Riedel, M. ; Holowenko, O. ; Grossmann, K.: Photogrammetrische Bahnvermessung an einer schnelllaufenden Verarbeitungsmaschine. In: *VVD 2015 - Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik*. 2015. – ISBN 978-3-86780-430-1, S. 145-158

- [Rie08] Riedel, M.: Integration, Kalibrierung und Anwendung eines Mehrkamarasystems in einer Werkzeugmaschine. In: Luhmann, T. (Hrsg.); Chr., Müller (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008*. 2008. – ISBN 978-3-87907-463-1, S. 53–62. – Herbert Wichmann Verlag - Heidelberg
- [RK16] Riedel, M. ; Kauschinger, B.: Geometrisch-kinematische Kalibrierung von Hexapoden. In: *Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*. 2016. – ISBN 978-3-87907-604-8, S. 319–328. – Herbert Wichmann Verlag - Heidelberg
- [RMK⁺16] Robson, S. ; MacDonald, L. ; Kyle, S. ; Boehm, J. ; Shortis, M.: Optimised multi-camera systems for dimensional control in factory environments. In: *Proc IMechE Part B: J EngiProc IMechE Part B: 1-12* (2016)
- [RMKS16] Robson, S. ; MacDonald, L. ; Kyle, S. ; Shortis, M. R.: Close range calibration of long focal length lense in a changing environment. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLI-B5 (2016)
- [RMP00a] Ramesh, R. ; Mannan, M. A. ; Poo, A. N.: Error compensation in machine tools - a review - Part I: geometric, cutting-force induced and fixturedependent errors. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000), S. 1235–1256
- [RMP00b] Ramesh, R. ; Mannan, M. A. ; Poo, A. N.: Error compensation in machine tools - a review - Part II: thermal errors. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000), S. 1257–1284
- [RW02] Rautenberg, U. ; Wiggenhagen, M.: Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1. In: *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)* (2002)
- [SBR⁺10] Schütze, R. ; Boochs, F. ; Raab, C. ; Wirth, H. ; Meier, J.: OptoPose - Ein Mehrkamarasystem zur exakten Positionsbestimmung von beweglichen Endeffektoren, 2010
- [Sch07] Schmalzried, S.: *Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effiziente geometrische Maschinenbeurteilung*, wbk - Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2007

- [Sch08] Schneider, D.: *Geometrische und stochastische Modelle für die integrierte Auswertung terrestrischer Laserscannerdaten und photogrammetrischer Bilddaten*, Institut für Photogrammetrie und Fernerkunden - TU-Dresden, Diss., 2008
- [Sch12] Scharenberg, W.: *Vergleichende Untersuchung photogrammetrischer Messprinzipien: Posemessung mittels Vorwärts- bzw. Rückwärtsschnitt*, TU-Dresden, Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Diplomarbeit, 2012
- [Sch13] Schmalzried, S.: GPS für die Werkzeugmaschine - Beschleunigte Abnahme dank Mikro-GPS-Laservermessung und -ausrichtung von Maschinen. In: *WB Werkstatt + Betrieb* 03 (2013), S. 66–69
- [SFB15] SFB/Transregio 96: *SFB/Transregio 96 - Thermo-energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen*. <http://transregio96.de/>. Version: 2015
- [SFH05] Schwenke, H. ; Franke, M. ; Hannaford, J.: Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2005)
- [SH00a] Sieg, D. ; Hirsch, M.: Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen Teil 1: Theorie. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* (2000)
- [SH00b] Sieg, D. ; Hirsch, M.: Varianzkomponentenschätzung in ingenieurgeodätischen Netzen Teil 2: Anwendungen. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* (2000)
- [SHWW01] Schwenke, H. ; Härtig, F. ; Wendt, K. ; Wäldele, F.: Future challenges in co-ordinate metrology - addressing metrological problems for very small and very large parts. In: *Proceedings of IDW conference, Knoxville* (2001)
- [Sie09a] Siemens AG: *Volumetric Compensation System for SINUMERIC 840D sl*. <https://new.siemens.com/de/de.html>. Version: 2009
- [Sie09b] Siemens AG: *Volumetric Compensation System for SINUMERIK 840D sl*. <http://www.volumetric.com.br/cases/volumetric-compensation-system.pdf>. Version: 2009
- [Sie11] Siemens AG: *SINUMERIK 840D sl / 828D - Erweiterungsfunktionen - Funktionshandbuch*, 2011

- [SJS09] Schmitt, R. ; Jatzkowski, P. ; Schwenke, H.: Kinematische Kalibrierung von 5-Achs Werkzeugmaschinen mit LaserTracern. In: *avn - allgemeine vermessungs-nachrichten* (2009)
- [SKQ⁺16] Schmitt, R. ; Kimmelman, W. ; Quinders, S. ; Storm, C. ; Oberhansberg, F.: Investigation of the Applicability of an iGPS Metrology System to Automate the Assembly in Motion of a Truck cabin. In: *Applied Mechanics and Materials* (2016)
- [SN07] Stojmenovic, M. ; Nayak, A.: Direct Ellipse Fitting and Measuring Based on Shape Boundaries. In: *Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology* (2007)
- [SP15] Schmitt, R. ; Peterek, M.: Traceable measurements on machine tools - thermal influences on machine tool structure and measurement uncertainty. In: *Procedia CIRP* (2015), S. 576–580
- [Spu96] Spur, G.: *Die Genauigkeit von Werkzeugmaschinen - Eine Konstruktionslehre*. 1996
- [SRB⁺09] Schütze, R. ; Raab, C. ; Boochs, F. ; Wirth, H. ; Meier, J.: OptoPose - A multi-camera System for fast and precise determination of position and orientation for moving effectors. In: *9th Conference on Optical 3D measurement Techniques Vienna Austria* (2009)
- [SSD10] Schmitt, R. ; Schönberg, A. ; Damm, B.: Indoor-GPS based robots as a key technology for versatile production. In: *ISR / Robotik 2010* (2010)
- [SSF11] Schneider, J. ; Schindler, F. ; Förstner, W.: Bündelausgleichung für Multikamerasysteme. In: *DGPF Jahrestagung* (2011)
- [SSHR05] Shortis, M. R. ; Seager, J. W. ; Harvey, E. S. ; Robson, S.: The influence of Bayer filters on the quality of photogrammetric measurement. In: *Videometrics VIII* (2005)
- [SSJW09] Schwenke, H. ; Schmitt, R. ; Jatzkowski, P. ; Warmann, C.: On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs using a tracking interferometer. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009), S. 477–480
- [SSM15] Soot, M. ; Schulze, M. ; Mulsow, C.: Untersuchung zur Genauigkeit der Kamerakalibrierung über Merkmalspunkte in SfM-Werkzeugen. In: *Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015*, 2015

- [SSZ13] Schmalzried, S. ; Schmitz, H. ; Zimmermann, M.: A Flexible and, robust 3D coordinate measurement system based on white light inerferometry for calibration of industrial systems. In: *11th International Symposium on Measurement and Quality Control*, 2013
- [ST01] Spilke, J. ; Tuchscherer, A.: Simulationsuntersuchungen zum Einfluss verschiedener Strategien der Varianzkomponentenschätzung und Hypothesenprüfung auf die statistischen Risiken in gemischten linearen Modellen mit ungleicher Klassenbesetzung. In: *Zeitschrift für Agrarinformatik* 4 (2001), Nr. 1, S. 66–75
- [Sta12] Status Pro Maschinenmesstechnik GmbH: uLine F1 System. Version: 2012. www.statuspro.de. 2012. – Forschungsbericht
- [Sta15] Status Pro Maschinenmesstechnik GmbH: Photogrammetrie - ProGeo3D - 3D CMM - Photogrammetrie für Maschinenbauer. Version: 2015. www.statuspro.de. 2015. – Forschungsbericht
- [Ste05] Steinbrecher, R.: *Bildverarbeitung in der Praxis*. 2005
- [Str98] Strang, G.: *Lineare Algebra*. 1998
- [SVE95] Srivastava, A. K. ; Veldhuis, S. C. ; Elbestawit, M. A.: Modelling geometric and thermal errors in a five-axis machine tool. In: *Int. J. Mach. Tools Manufact* 35 (1995)
- [SW11] Schwenke, H. ; Warmann, C.: High Speed High Accuracy Multilateration System Based on Tracking Interferometers. In: *10th IMEKO TC14 Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry* (2011)
- [Sza07] Szatmari, S.: *Kinematic Calibration of parallel kinematics mmachine on the example of the hexapod of sinmple design*, IWM - TU-Dresden, Diss., 2007
- [Sze10] Szeliski, R.: *Computer Vision: Algorithms and Applications*. 2010
- [Tan83] Taniguchi, N.: Current status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing. In: *Annals of the CIRP* 32 (1983), Nr. 02
- [TAS07] Teunissen, P. J. G. ; Amiri-Simkoei, A. R.: Least-squares variance component estimation. In: *J Geod* (2008) 82:65-82 (2007)

- [TES17a] TESA Germany: *GT 21 HP High Precision Probe*, 2017. www.tesatechnology.com
- [TES17b] TESA Germany: *GT21 Standard probes, extended range*, 2017.
www.tesatechnology.com
- [TL01] Tecklenburg, W. ; Luhmann, T.: Kameramodellierung mit bildvarianten Parametern und Finiten Elementen. In: *Publikationen der DGPF* (2001)
- [TLH04] Tecklenburg, W. ; Luhmann, T. ; Hastedt, H.: Camera Modelling with Image-variant Parameters and Finite Elements. In: *Optical* (2004)
- [TM84] Tabatabai, A. J. ; Mitchell, O. R.: Edge Location to Subpixel Values in Digital Imagery. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 6 (1984), March, Nr. 2
- [TMHF99] Triggs, B. ; McLauchlan, P. F. ; Hartley, R. I. ; Fitzgibbon, A. W.: Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In: *International workshop on vision algorithms* (1999)
- [TML⁺14] Tan, B. ; Mao, X. ; Liu, H. ; Li, B. ; He, S. ; Peng, F. ; Yin, L.: A thermal error model for large machine tools that considers environmental thermal hysteresis effects. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 82-83 (2014), S. 11–20
- [Uff93] Uffenkamp, V.: State of the art of high precision industrial photogrammetry. In: *Third international workshop on accelerator alignment* (1993)
- [UZA⁺13] Uriarte, L. ; Zatarain, M. ; Axinte, D. ; Yagüe-Fabra, J. ; Ihlenfeldt, S. ; Eguia, J. ; Olarra, A.: Machine tools for large parts. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (2013)
- [Val11] Valerius, L.: *Herstellung, Kalibrierung und Validierung universell einsetzbarer Referenzmaßstäbe für Nahbereichsphotogrammetriesysteme*, TU-Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Diplomarbeit, 2011
- [VDI77a] VDI Gesellschaft Produktionstechnik - ADB: *VDI/DDQ-3441 - Statische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen*. März 1977
- [VDI77b] VDI Gesellschaft Produktionstechnik - ADB: *VDI/DDQ-3443: Statische Prüfung der Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. März 1977

- [VDI83] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren: *VDI 2851 Blatt 2: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen - Beurteilung von NC-Drehmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke*. 01 1983
- [VDI86a] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren: *VDI 2851 Blatt 1: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen - Beurteilung von Bohrmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke*. 11 1986
- [VDI86b] VDI-Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren: *VDI 2851 Blatt 3: Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen - Beurteilung von Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren durch Einfachprüfwerkstücke*. 11 1986
- [VDI02] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA): *VDI/VDE 2634 Blatt 1: Optische 3D-Messsysteme Bildgebende Systeme mit punktförmiger Antastung*. 05 2002
- [Ver17] Verein deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V. (VDW): *Marktübersicht 2017*. 2017
- [Vyr12] Vyroubal, J.: Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method. In: *Precision Engineering 36 (2012) 121- 127 (2012)*
- [WB05] Weck, M. ; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen - Band 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche - 6. Auflage*. 2005
- [WB06a] Weck, M. ; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen - Band 2 - Konstruktion und Berechnung - 8. Auflage*. Springer Verlag, 2006
- [WB06b] Weck, M. ; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen - Band 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität - 7. Auflage*. Springer Verlag, 2006
- [Wei04] Weikert, S.: R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology (2004)*
- [WEPM04] Weckenmann, A. ; Estler, T. ; Peggs, G. ; McMurtry, D.: Probing Systems in Dimensional Metrology. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology (2004)*
- [WFH12] Wendt, K. ; Franke, M. ; Härtig, F.: Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers. In: *Measurement 45 (2012) 2339-2345 (2012)*

- [WGZX12] Wang, J. ; Guo, J. ; Zhou, B. ; Xiao, J.: The detection of rotary axis of NC machine tool based on multi-station and time-sharing measurement. In: *Measurement* 45 (2012) 1713-1722 (2012)
- [Wik14] Wikipedia: *Elektromagnetisches Spektrum*.
http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum. Version: 2014
- [Wil08] Wilms, M.: *Lokalisierung und Verfolgung von codierten Messmarken mit Hilfe von Bildverarbeitung*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Diplomarbeit, 2008
- [WL01] Wulfsberger, J. ; Lettenbauer, H.: Roboter als Messmaschinen. In: *wt Werkstattstechnik online* 91 (2001), Nr. 10, S. 649-653
- [WM14] WF-Messtechnik: *Normale für die 3D-Koordinatenmesstechnik*.
http://www.wf-messtechnik.de/Lehren_Normale/3D-Normale/Kugelplatte/kugelplatte.html. Version: 2014
- [WMS⁺01] Wiedemann, A. ; Moré, J. ; Suthau, T. ; Theodoropoulou, I. ; Weferling, U. ; Ergün, B.: Comparison of bundle block adjustments for close range application. In: *Fourth Turkish-German Joint Geodetic Days. Paper presented to the conference organized at Berlin, Germany, April* (2001)
- [WSW⁺01] Wendt, K. ; Schwenke, H. ; Wäldele, F. ; Krawczyk, M. ; Kniel, K.: Error mapping of large CMMs by sequential multi-lateration using a laser tracker. In: *Proc EUSPEN* (2001)
- [WW12] Wrobel, B. P. ; Wachtberg: Kreismarken in perspektiver Abbildung - im Bild und im Bündelblock. In: *PFG 2012 / 3*, 0221-0236 (2012)
- [WWM16] Wegener, K. ; Weikert, S. ; Mayr, J.: Age of Compensation - Challenge and Chance for Machine Tool Industry. In: *International Journal of Automation Technology* 10 (2016), Nr. 04
- [YF14] Yang, X. ; Fang, S.: Eccentricity error compensation for geometric camera calibration based on circular features. In: *Meas. Sci. Technol.* 25 (2014) 025007 (10pp) (2014)
- [YFP05] Ye, J. ; Fu, G. ; Poudel, U. P.: High-accuracy edge detection with Blurred Edge Model. In: *Image and Vision Computing* 23 (2005) 453-467 (2005)

- [ZH13] Zhang, Z. ; Hu, H.: A general strategy for geometric error identification of multi-axis machine tools based on point measurement. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 69 (2013), S. 1483–1497
- [ZM09] Zargarbashi, S. H. H. ; Mayer, J. R. R.: Single setup estimation of a five-axis machine tool eight link errors by programmed end point constraint and on the fly measurement with Capball sensor. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49 (2009), S. 759–766

Schriftenreihe Lehre • Forschung • Praxis

Die Professur für Werkzeugmaschinenentwicklung und adaptive Steuerungen veröffentlicht die Ergebnisse ihrer Arbeit u. a. in ihrer Schriftenreihe Lehre • Forschung • Praxis. In dieser Reihe sind in Zusammenarbeit mit dem Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik e. V. bisher erschienen:

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1995/96**

121 Seiten, erschienen 12/1996

- Andreas Mühl

- **Technologie und angepasste Maschinenkonzepte zum Schleifen von Konstruktionskeramik auf Koordinatenschleifmaschinen**

Dissertation, 116 Seiten, erschienen 02/1997

- Simeon Christov

- **Einbaugenauigkeit und Querschnittsberechnung von Profilschienenführungen**

Dissertation, 244 Seiten, erschienen 05/1997

- Knut Großmann; Horst Neundorf; Roger Grundmann

- **Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik**

Zwischenbericht 1997 zum Landesinnovationskolleg, 206 Seiten, erschienen 04/1997

- Knut Großmann

- **Die Realität im Virtuellen. Simulation in technischen Anwendungen**

396 Seiten, erschienen 12/1997

- **Potentiale und Chancen**

Absolvententagung am Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik 20.-21. November 1998, 260 Seiten, erschienen 11/1998

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1997/98**

300 Seiten, erschienen 12/1998

- Andreas Mühl; Bernd Wunderlich

- **ACC-Regelung von Bahnschleifprozessen**

Abschlussbericht zu den Forschungspraktika 55/96 und 56/96 bei der Stiftung Industrieforschung, 94 Seiten, erschienen 01/1999

- **Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik**
Abschlussbericht zum Landesinnovationskolleg 1995-1998, 228 Seiten, erschienen 07/1999
- Günter Jungnickel
Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen
228 Seiten, erschienen 02/2000
- Holger Arndt
Auslegung und Bewertung von Vorschubantrieben mit Spindel-Mutter-Systemen
Dissertation, 180 Seiten, erschienen 12/2000
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 1999/2000**
200 Seiten, erschienen 04/2001
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2001/2002**
200 Seiten, erschienen 04/2003
- Knut Großmann; Günter Jungnickel
Instationäres thermoelastisches Verhalten von Vorschubachsen mit bewegtem Wälzkontakt
230 Seiten, erschienen 09/2003
- Knut Großmann; Andreas Mühl
Adaptiv geregeltes Fräsen auf einem Hexapoden
108 Seiten, erschienen 02/2004
- Hajo Wiemer
Stand und Möglichkeiten der Systemsimulation von mechanischen Pressmaschinen
Dissertation, 228 Seiten, erschienen 12/2004
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2003/2004**
243 Seiten; erschienen 05/2005
- Bernd Kauschinger
Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit an einem Hexapod einfacher Bauart
Dissertation, 172 Seiten, erschienen 04/2006

- Knut Großmann; Günter Jungnickel
Prozessgerechte Bewertung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen
 259 Seiten, erschienen 12/2006

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2005/2006**
 251 Seiten; erschienen 04/2007

- Szabolcs Szatmári
Kinematic Calibration of Parallel Kinematic Machines in the Example of the Hexapod of Simple Design
 Dissertation, 175 Seiten, erschienen 10/2007

- Knut Großmann; Hajo Wiemer
Simulation in der Produktionstechnik – wovon, womit, wofür?
 Bericht zur WGP Summer School Dresden 2007, Herausgegeben von der WGP Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik, 103 Seiten, erschienen 10/2007

- Knut Großmann; Günter Jungnickel
Thermische Modellierung von Prozesseinflüssen an spanenden Werkzeugmaschinen
 134 Seiten, erschienen 09/2008

- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2007/2008**
 243 Seiten; erschienen 03/2009

- Jens Müller
Vergleichende Untersuchung von Methoden zur Verringerung der Gestellanregung durch linearmotorgetriebene Werkzeugmaschinenachsen
 Dissertation, 171 Seiten, erschienen 04/2009

- Volker Möbius
Produktprozess im Computerzeitalter – Methodische Grundsätze zur Informationsbehandlung im Produktprozess und deren Anwendung auf die Entwicklung eines Steuerungskonzepts
 Dissertation, 201 Seiten, erschienen 08/2009

- Knut Großmann; Günter Jungnickel
Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen Modellierung und Parametrierung
 223 Seiten, erschienen 05/2010
- André Hardtmann
Entwicklung und Bewertung eines erweiterten Blechumformprozessmodells unter besonderer Berücksichtigung der elasto-statischen Wechselwirkungen zwischen Maschine und Prozess
 Dissertation, 116 Seiten, erschienen 10/2010
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2009/2010**
 300 Seiten, erschienen 02/2011
- Holger Rudolph
Ein Beitrag zur Analyse der nichtlinearen Systemdynamik in der Entwurfsphase von Werkzeugmaschinen
 Dissertation, 172 Seiten, erschienen 11/2012
- **Tätigkeitsbericht des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen 2011/2012**
 322 Seiten, erschienen 03/2013
- Lars Neidhardt
Wälzkontaktbezogene Lebensdauer von Profilschienenführungen – Bewertung der experimentellen Ermittlung des Lebensdauerkennwerts
 Dissertation, 178 Seiten, erschienen 01/2014
- Michael Löser
Ein Beitrag zur effizienten Analyse der Prozessstabilität beim HSC-Fräsen
 Dissertation, 159 Seiten, erschienen 03/2015
- Lars Penter
Qualifizierung von FE-Prozessmodellen zur Inbetriebnahme von Karosserieziehwerkzeugen
 Dissertation, 140 Seiten, erschienen 01/2017

Die Hefte der Schriftenreihe können käuflich erworben werden bei:

DWM e. V.

c/o Institut für Mechatronischen Maschinenbau

Technische Universität Dresden

01062 Dresden

Bestellungen bitte schriftlich an o. g. Anschrift,

per Fax: +49 351 463-37073 oder

per E-Mail: werkzeugmaschinen@tu-dresden.de, mailbox@dwm.info