

Holistische, fertigungsnahe, mehrskalige Messung blechmassivumgeformter Bauteile

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Andreas Franz Xaver Loderer
aus Augsburg

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 09.03.2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Kurzzusammenfassung

Neue Fertigungstechnologien ermöglichen die Herstellung zunehmend komplexerer Bauteile bei häufig reduzierter Taktzeit und minimiertem Ressourcenbedarf. Um die dadurch generierten wirtschaftlichen Vorteile voll auszuschöpfen, bedarf es möglichst prozessnaher Messsystemlösungen. Auf diese Weise können relevante Merkmale stichprobenartig bereits kurz nach deren Herstellung erfasst und gleichzeitig hierfür notwendige Werkstückhandhabungszeiten minimiert werden. Insbesondere die präzise, ganzheitliche Erfassung von Merkmalen variierender Größe und Form in einer fertigungsnahen Umgebung stellt die aktuelle Messtechnik vor Herausforderungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher die grundlagenwissenschaftlichen Erkenntnisse für die fertigungsnaher Auslegung eines Multisensor-Messsystems zur holistischen, mehrskaligen Messung am Beispiel komplexer Bauteile der neuen Fertigungstechnologie „Blechmassivumformung“ erarbeitet. Eine eingehende Untersuchung der messtechnisch relevanten Bauteileigenschaften und möglicher Umweltfaktoren bildete die Basis für eine detaillierte Anforderungsanalyse zur Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus. Durch die Entwicklung eines Multisensor-Kalibrierverfahrens konnte die Kombination von Sensordatensätzen, ohne auf eine Überlappung der Sensormessbereiche angewiesen zu sein, realisiert werden. Hierzu wurde ein Kalibrierkörper geschaffen, der flexibel an unterschiedliche Messaufgaben angepasst werden kann. Mit der Digitalisierung des Kalibrierkörpers steht ein Referenzdatensatz für die Ausrichtung der Datensätze der Einzelsensoren zur Verfügung. Hierdurch wird die Bestimmung von sensorspezifischen Transformationsmatrizen als notwendige Voraussetzung zur Ausrichtung der Datensätze in einem einheitlichen Koordinatensystem möglich.

In einer Leistungsevaluation des prototypischen Messsystems erfolgte nicht nur der Funktionsnachweis für das Kalibrierverfahren, sondern vielmehr wurden in beispielhaften Messreihen die Vorteile mehrskaliger Multisensor-Messungen gegenüber Messung mit einzelnen Sensoren aufgezeigt. Als Merkmale kamen Radien, Winkel und Stufenhöhen des PTB-Mikrokonturnormals zum Einsatz. Für Merkmale, die bei mehrskaligen Messungen über den Messbereich eines Sensors hinausreichen, wie dies bei Abstandsmessungen der Fall ist, konnte eine Abhängigkeit zur Genauigkeit der Kalibrierung nachgewiesen werden. Dabei ist das Messsystem zur Erzeugung des Kalibrierkörper-Referenzdatensatzes der limitierende Faktor. Im Rahmen einer abschließenden Messreihe an einem, einer Kugelhantel angenäherten, Zweikugellkörper, fand eine kurze Betrachtung der erreichbaren Messunsicherheit nach dem Prinzip der Substitutionsmessung statt.

Abstract

New production technologies facilitate the production of increasingly complex workpieces with often reduced cycle times and minimized resource requirements. To ensure the economic benefits generated by process control measuring solutions are required to be as close to the process as possible. In this way relevant features can be measured randomly shortly after their production. At the same time a reduction of necessary workpiece handling time can be achieved. Current measuring technologies are challenged by the precise and holistic detection of relevant features varying in size and shape in a production-related environment.

This work presents the basic scientific knowledge framework for a production-related design of a multi-scale multi-sensor measuring system to conduct a holistic measuring data acquisition using example workpieces of the new production technology “sheet-bulk metal forming”. Based on a detailed analysis of possible measuring object properties and tasks, resulting from the characteristics of the sheet-bulk metal forming, a prototypical measuring setup is realized. A calibration procedure, adapted on the setup, enables the combination of the several sensor datasets to a multi-scale multi-sensor dataset without the need of overlapping sensor measuring ranges. For this purpose, a calibration artefact was developed which can be adapted flexibly to different measuring tasks. By digitalizing the calibration artefact, a reference dataset is available for the alignment of the several sensor datasets. Thereby sensor-specific transformation matrices can be determined. These are required for the dataset alignment in a common coordinate system.

With a detailed performance evaluation of the prototypical measuring system not only the correct functionality of the calibration procedure could be proven, but also the advantages and opportunities of multi-scale multi-sensor measurements over measurements with separate sensors were identified. Thereby radii, angles and step heights of the PTB micro contour normal were used as measuring objects. For multi-scale multi-sensor measurements of features, which reach out of the measuring range of one sensor, such as distance measurements, a dependence to the calibration accuracy was shown. In this case the limiting factor is the measuring system used for generating the digital reference dataset of the calibration artefact. In a concluding series of measurements using a two-spheres-artefact, similar to a dumbbell-artefact, the achievable measurement uncertainty, determined with the principle of substitution measurements was considered briefly.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bzw. akademischer Rat am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und war in den letzten Jahren eines der bestimmenden Themen in meinem Leben. Nun, da dieses Kapitel abgeschlossen werden kann, möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich auf meinem Weg zur Doktorwürde unterstützt haben.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik, gilt mein besonderer Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die Übertragung interessanter wie auch herausfordernder Aufgaben in Forschung und Lehre, die Anregung und die hilfreichen Diskussionen zu der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferats.

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier, Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (IMR) der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die sehr gute Zusammenarbeit mit seinem Institut. Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Inhaber des Lehrstuhls für Photonische Technologien (LPT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß, Professor am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (LHFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Ferner danke ich allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls FMT für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit bei verschiedenen Projekten und interessante Diskussionen. Auch der Beitrag meiner zahlreichen Bachelor- und Masterarbeiter/innen sowie Hilfwissenschaftlicher Mitarbeiter sei an dieser Stelle dankend erwähnt.

Meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglicht haben, diesen Weg zu beschreiten, sowie meinen Geschwistern danke ich herzlich für Ihre Motivation und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit.

Besonderer Dank gilt meiner Frau Kerstin für ihr Verständnis, ihre großzügige Geduld und besonders dafür, dass sie mir stets den notwendigen Rückhalt gegeben hat. Ihr Zuspruch und ihre Bestärkung meiner Ziele waren mir stets Motivation und Antrieb.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Überwachung komplexer Fertigungsprozesse	3
2.1	Die neue Fertigungstechnologie der Blechmassivumformung.....	3
2.1.1	Prozesstechnische Grundlagen	3
2.1.2	Bauteildemonstrator und messtechnische Herausforderungen.....	6
2.1.3	Fertigungsnahes Umfeld	8
2.2	Messtechnik für eine ganzheitliche Merkmalsprüfung	10
2.2.1	Kategorien der Prozessqualitätsbewertung.....	10
2.2.2	Einordnung relevanter Messverfahren	12
2.2.3	Taktile Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik	18
2.2.4	Optische Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik.....	20
2.2.5	Röntgen-tomografische Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik	27
2.2.6	Multisensor-Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik	29
2.3	Verbesserungspotenziale für holistische Messungen	30
3	Ziele und wissenschaftlicher Ansatz	32
3.1	Zielsetzung	32
3.2	Methodischer Ansatz und wissenschaftliche Aufgaben	33
4	Spezifikation von Messaufgaben an blechmassivumgeformten Bauteilen	36
4.1	Definition der „holistischen Messung“	36
4.2	Eigenschaften blechmassivumgeformter Bauteile	37
4.2.1	Parameterauswahl	38
4.2.2	Oberflächeneigenschaften	39
4.3	Ableiten von Messaufgaben	42
4.3.1	Bauteilanalyse.....	42
4.3.2	Fehleranalyse.....	43
4.3.3	Normalauswahl	45
5	Multisensor-Messsystemaufbau	49
5.1	Anforderungsanalyse.....	49
5.1.1	Analyse des fertigungsnahen Umfelds.....	49
5.1.2	Analyse der Messaufgabe.....	53
5.1.3	Lastenheft	54
5.2	Sensorauswahl	55
5.2.1	Verfahrensauswahl	56

5.2.2	Sensorauswahl.....	57
5.3	Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus.....	59
5.3.1	Rahmenkonstruktion	60
5.3.2	Sensorpositionierung	62
5.3.3	Messobjekthandhabung.....	63
6	Multisensor-Kalibrierung.....	65
6.1	Grundlagen der Messdatenregistrierung	66
6.1.1	Mathematische Operationen zur Messdatenhandhabung.....	66
6.1.2	Grobregistrierung	67
6.1.3	Feinregistrierung	68
6.2	Konzept zur Detektion der Sensorausrichtungen	70
6.2.1	Entwicklung eines flexiblen Kalibrierkörpers	71
6.2.2	Fertigungsverfahren und Oberflächenbehandlung.....	72
6.2.3	Konzeptioneller Kalibrier- und Messablauf.....	75
6.3	Implementierung einer Messobjekthandhabung	77
6.3.1	Prinzip der erweiterten Kalibrierung	77
6.3.2	Mathematische Realisierung.....	78
6.4	Datenflussmodell für multisensorielle Messungen.....	83
7	Evaluation der Leistung des prototypischen mehrskaligen Multisensor-Messsystems.....	87
7.1	Untersuchung der Multisensor-Kalibrierung.....	87
7.1.1	Positioniergenauigkeit	87
7.1.2	Digitalisierungsgenauigkeit	89
7.1.3	Wiederholpräzision der Ausrichtung.....	90
7.1.4	Verifizierung	91
7.2	Durchführung einer beispielhaften mehrskaligen Multisensor-Messung...96	
7.2.1	Beschreibung der Messreihe.....	97
7.2.2	Ergebnisse der Messungen an Radien, Winkeln und Stufenhöhen.....	98
7.2.3	Ergebnisse der Abstandsmessungen.....	102
7.3	Betrachtung der Messunsicherheit	104
7.4	Bewertung des mehrskaligen Multisensor-Ansatzes und praktische Implikation	110
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	114
9	Schrifttum	117

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

BS	<i>British Standard</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DMD	<i>Digital Mirror Device</i>
GG	Grobgestalt
He-Ne	Helium-Neon
ICP	<i>Iterative-Closest-Point(-Algorithmus)</i>
IQR	<i>Interquartile Range / Interquartilbereich</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
MZ	Mischzone
NF	Nebenformelement
OMC	Dateiformat der Firma LMI Technologies (früher GF Messtechnik GmbH) zur Speicherung der von Messinformationen in Form von Punktwolken
PSD	<i>Position Sensitive Diode</i>
RMZ	Rohmaterialzone
RZ	Randzone
STL	<i>Standard Triangulation Language</i> – Dateiformat zur Speicherung geometrische Informationen dreidimensionaler, polygonisierter Datenmodelle
TDI	<i>Time Delay Integration</i>
TXT	Dateiendung für ein Textformat – häufig verwendet zur Speicherung der von Messinformationen in Form von Punktwolken
UZ	Umformzone
VDE	Verband der Elektrotechnik und Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Einheiten

C	Celsius
K	Kelvin
mm	Millimeter

mW	Milliwatt
nm	Nanometer
μm	Mikrometer
μW	Mikrowatt
V	Volt

Größen

A	Fläche (Definitionsbereich für Oberflächenparameter)
Δf	Biegeweg
F_{abs}	absolute Luftfeuchte
F_{rel}	relative Luftfeuchte
F_s	maximal mögliche Menge an Wasserdampf
ΔL	Abweichung 1. Ordnung
m_w	Masse an Wasserdampf
$m_{w,s}$	maximal mögliche Masse an Wasserdampf
S_a	Mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
S_p	maximale Senkenhöhe der skalenbegrenzten Oberfläche
S_q	mittlere quadratische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
S_z	Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche
ΔT	Temperaturdifferenz
V_{ges}	Gesamtvolumen
z	Gemessenen Höhenwerte für Oberflächenparameter

Statistik

α	Signifikanzniveau für Hypothesentests
H_0	Nullhypothese
H_A	Alternativhypothese
N	Grundgesamtheit
σ	Standardabweichung

Unsicherheitsermittlung

α_w	Längenausdehnungskoeffizienten
b	Systematische Abweichung

$\Delta_{\text{Pos.}}$	Abweichungen der Positioniereinheit
E_{N}	<i>Normalized Error Ratio</i>
\bar{E}_{N}	Mittelwert der <i>Normalized Error Ratio</i>
k	Erweiterungsfaktor
k_{cal}	Erweiterungsfaktor der Kalibrierung
l	Größe des zu messenden Merkmals
s	Länge des Translationsvektors
ΔT	Temperaturdifferenz
U	Erweiterte Messunsicherheit
u_{Abbe}	Unsicherheit aus Abweichungen nach dem Abbe'schen Komparatorprinzip
u_{b}	Standardunsicherheit der systematischen Abweichung
U_{cal}	Unsicherheit der Kalibrierung
u_{cal}	Standardunsicherheit der Kalibrierung
u_{temp}	Standardmessunsicherheit des Temperatureinflusses
u_{p}	Standardunsicherheit des Messverfahrens
u_{Pos}	Unsicherheit aus der Positioniereinheit
u_{w}	Standardunsicherheit aus Werkstoff- und Produktionsstreuungen
x_{cal}	Kalibrierwert
Y	Messergebnis
y	Einzelmesswert
\bar{y}	Mittelwert der Einzelmesswerte

1 Einleitung

Die Entwicklung neuer Produkte befindet sich im Spannungsfeld zwischen der Reduktion des Ressourceneinsatzes und den gleichzeitig kontinuierlich wachsenden Anforderungen an die Qualität und Funktionstiefe [Watson et al. 2015; Imkamp et al. 2012]. Als Folge dieser Einflüsse resultiert in der technischen Umsetzung häufig eine stetige Verkleinerung der zulässigen Bauteiltoleranzgrenzen bei gleichzeitiger Steigerung der Geometriekomplexität. Mit herkömmlichen Fertigungsprozessen können diese Anforderungen meist nur mittels aufwändiger Fertigungstechnologien in langen Prozessketten kostenintensiv realisiert werden. Für eine Verkürzung derartig verketteter, mehrstufiger Prozesse und damit zur Sicherstellung einer wirtschaftlichen Produktion wird im Rahmen des transregionalen Forschungsverbundes „Sonderforschungsbereich/Transregio 73“ die neuartige Verfahrenskombination „Blechmassivumformung“ erforscht. Diese erlaubt die effiziente Herstellung komplexer Blechbauteile mit hoher Integrationstiefe bei gleichzeitig stark verkürzten Prozessketten. [Merklein et al. 2012a; Gröbel et al. 2014]

Für die wirtschaftliche Auslegung von Fertigungsprozessen werden Qualitätsregelkreise genutzt, welche die Einhaltung der Qualität bei der Produktentstehung ermöglichen. Entscheidungen zur Qualitätslenkung basieren dabei immer auf messtechnisch erfassten Daten, die mit Prozessparametern verknüpft werden. Am Beispiel eines sequenziell verketteten, mehrstufigen Prozesses werden in Abbildung 1 oben mögliche Qualitätsregelkreise schematisch gezeigt. Hierbei können nach jeder Prozessstufe Produktmerkmale geprüft und erforderliche Änderungen der Prozessparameter vorgenommen werden. Die Regelkreise können dabei die vorherige Prozessstufe umfassen oder auch über mehrere Stufen reichen.

Mehrstufige Prozesse mit einem hohen Integrationsgrad, wie Prozesse der Blechmassivumformung, bieten aufgrund deren Auslegung oft keine Möglichkeit der messtechnischen Erfassung von endgültigen Merkmalen an Zwischenprodukten. Wie in Abbildung 1 unten gezeigt, gilt es, die in einer ganzheitlichen Endprüfung gewonnenen Messdaten den Prozessparametern aller Stufen und deren Einstellungen zuzuordnen und daraus Lenkungsentscheidungen abzuleiten. Durch die mit dieser Auslegung erreichte Verkürzung der Prozesskette wird der Prüfumfang für die Messtechnik erheblich gesteigert. Eine wirtschaftliche Nutzung mehrstufiger integrierter Prozesse ist nur durch eine Messtechnik möglich, die es erlaubt, alle relevanten und für die Prozessregelung erforderlichen Merkmale ganzheitlich zu erfassen und die Ergebnisse den Prozessparametern zuzuordnen.

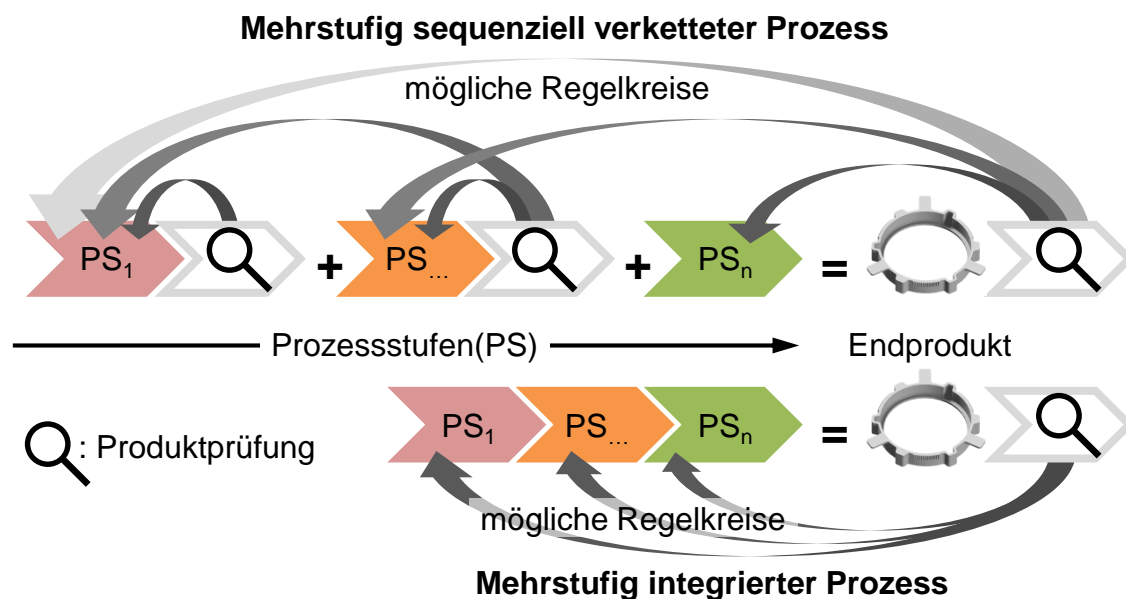


Abbildung 1: Vergleich von Auslegungsarten mehrstufiger Prozesse

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein Messsystem entwickelt, welches die grundlegenden Daten zur schnellen und sicheren Qualitätslenkung einer hochintegrierten Fertigungstechnologie bereitstellt. Am Beispiel der Blechmassivumformung, als typischen Vertreter mehrstufig integrierter Prozesse, wurde ein prototypisches Messsystem zur holistischen und fertigungsnahen Messdatenerfassung von deren Erzeugnissen entwickelt. Um dabei möglichst gut die Bandbreite der neuen Fertigungstechnologie abbilden und darüber hinaus auf Weiterentwicklungen der Verfahren reagieren zu können, wurde auf eine flexible und erweiterbare Auslegung des Messsystems geachtet. Durch eine zusätzliche Berücksichtigung ausgewählter Umwelteinflüsse ist neben der Sicherung adäquater Messbedingungen auch die Erhebung zusätzlicher Messdaten für eine Ermittlung von Wirkzusammenhängen möglich. Auf diese Weise kann nicht nur die Qualität der Erzeugnisse überprüft, sondern auch das Prozessverständnis unterstützt werden.

2 Überwachung komplexer Fertigungsprozesse

Um eine holistische und fertigungsnahe Prüfung am Beispiel blechmassivumgeformter Bauteile entwickeln und realisieren zu können, gilt es, in einem ersten Schritt, einige Grundlagen der neuen Fertigungstechnologie sowie der Messtechnik darzustellen. Ein kurzer Abriss zum Stand der Technik der Blechmassivumformung sowie ausgewählter, im Bereich der Fertigungsmesstechnik eingesetzter Messverfahren und -systeme hilft den aktuellen Forschungsbedarf zur Lösung dieser Aufgabe aufzuzeigen.

2.1 Die neue Fertigungstechnologie der Blechmassivumformung

Aufgrund wachsender Anforderungen an technische Systeme hinsichtlich Leichtbau, Funktionsumfang sowie Belastbarkeit und den hieraus resultierenden technischen wie auch konstruktiven Ansprüchen an die Einzelteile eines Systems, wird eine wirtschaftliche Fertigung zunehmend erschwert [Merklein et al. 2012a; Merklein et al. 2012b]. Dabei erweisen sich umformtechnische Verfahren in der Produktion von Massengütern als besonders wirtschaftlich. Die ökonomischen Vorteile ergeben sich vor allem durch den hohen Grad der Materialausnutzung sowie den kurzen Fertigungszeiten [Behrens und Doege 2007, S. 5-7; Klocke und König 2006]. Jedoch übersteigen die oben genannten hohen Ansprüche die Möglichkeiten der verfügbaren Fertigungstechnologien. Mit der Blechmassivumformung wurde ein neues Verfahren entwickelt, welches durch die Kombination der Vorteile verschiedener umformender Technologien die Realisierung einer neuen Generation von hochkomplexen Bauteilen unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ermöglicht [Merklein et al. 2012a; Merklein et al. 2012b].

2.1.1 Prozesstechnische Grundlagen

Die Blechmassivumformung vereint die Vorzüge der Blech- und Massivumformung. Beide Verfahren sind der Umformtechnik zuzuordnen, welche durch die Formänderung eines festen Körpers unter Beibehaltung von Masse und Stoffverbindung charakterisiert wird [DIN 8580:2003-09]. Bei der Blechumformung werden, in einem meist mehrstufigen Umformprozess, aus einem flachen Halbzeug mit einer Dicke bis zu 10 mm dreidimensionale Strukturen unter annähernder Beibehaltung der Blechdicke erzeugt [Behrens und Doege 2007, S. 5-7]. Typische Vertreter dieser Technologie sind beispielsweise das Biegen, Tiefziehen oder Formstanzen [Behrens und Doege 2007, S. 257-259]. Bei der Massivumformung wird ein Ausgangskörper in allen drei Koordinatenrichtungen verändert. Hierfür kommen anstelle fla-

cher Halbzeuge Ausgangsmaterialien wie Blöcke, Stäbe oder Halbzeuge zum Einsatz, welche in alle drei Raumrichtungen ähnliche Abmessungen aufweisen [Behrens und Doege 2007, S. 5-7; Behrens und Doege 2007, S. 471-473]. Durch diese Eigenschaften der Halbzeuge ergeben sich im Vergleich zur Blechumformung deutlich höhere Umformkräfte, was wiederum eine steifere Auslegung der Werkzeuge erfordert. Die Verfahren des Stauchens, Schmiedens, Walzens und Fließpressens sind der Massivumformung zugeordnet [Behrens und Doege 2007, S. 471-473].

Eine Verknüpfung beider Verfahren fand bisher lediglich in der Produktion von Halbzeugen statt. So werden beispielweise häufig die Halbzeuge der Blechumformung durch einen Massivumformprozess gewonnen, indem das Blech als Ausgangsstoff mittels Walzen auf die gewünschte Dicke gebracht wird [Behrens und Doege 2007, S. 257-259]. Mit der Blechmassivumformung werden Eigenschaften und Verfahrensschritte beider Umformtechniken vereint und in ihrer Anwendbarkeit verbessert. Bezeichnend für die neue Fertigungstechnologie ist ein, ähnlich der Massivumformung, dreidimensionaler Materialfluss [Merklein et al. 2012a]. Typischerweise werden als Ausgangsmaterial für Umformprozesse in der Blechmassivumformung sogenannte *Tailored Blanks* verwendet. Diese speziell dem Prozess angepassten Halbzeuge können lokale Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften, der Materialstärke und Beschichtung aufweisen. Durch diese lokal angepassten Halbzeuge kann die Herstellung und Funktionalität verschiedener Komponenten verbessert oder erst ermöglicht werden. Für die Herstellung von *Tailored Blanks* können bereits Prozesse der Blechmassivumformung eingesetzt werden. Eine typische Prozesskette zur Bauteilerzeugung wird durch die sequenzielle Verknüpfung mehrerer Verfahrensschritte der Blechmassivumformung erreicht. [Merklein et al. 2011a]

Die an der Blechmassivumformung beteiligten Einzelprozesse können unterschiedlich klassifiziert werden. In Abbildung 2 ist eine Einteilung anhand der Bewegungsrichtung des Werkzeugs sowie der Möglichkeiten zur Änderung der Materialdicke zu sehen. Aus der Eigenschaft Material sowohl aufzudicken als auch auszudünnen, wird die Flexibilität der neuen Fertigungstechnologie erkennbar. [Merklein et al. 2011b] Die hierzu notwendige dreidimensionale Flussrichtung des Materials erfordert sehr hohe Umformkräfte. Für eine gezielte Steuerung des Materialflusses sind daher die Reibungsbedingungen von essenzieller Bedeutung.

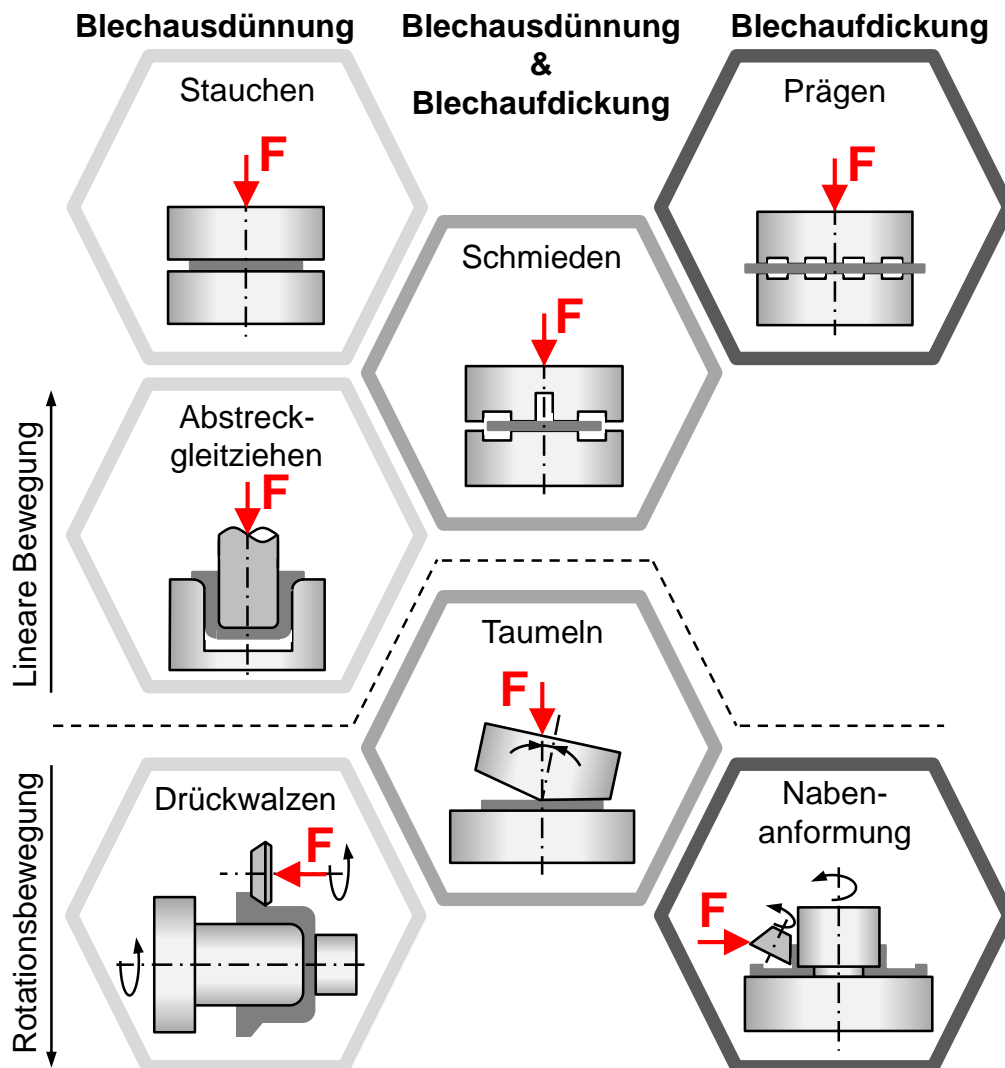


Abbildung 2: Verfahren der Blechmassivumformung nach [Merklein et al. 2012b]

In [Hetzner et al. 2011] sowie [Hetzner 2014] konnte gezeigt werden, dass eine Optimierung der Reibverhältnisse eine signifikante Steigerung der Formfüllung bewirkt. Dieser hohe Stellenwert der Tribologie unterscheidet die Blechmassivumformung von anderen Prozessen der Umformtechnik. Eine Beherrschung der tribologischen Eigenschaften ist daher essentiell für die Produktion qualitativ hochwertiger Produkte. Daher werden verschiedene Möglichkeiten zur lokalen Einstellung der Reibereigenschaften genutzt. Beispielsweise können die polierten Oberflächen des Werkzeugs, die Beschichtung mit Spezialkeramiken oder das Aufbringen von Schmierstoffen eine Senkung der Materialreibung bewirken [Hetzner et al. 2011]. Zusätzlich kann durch eine Strukturierung der Werkzeugoberfläche mittels Mikrofräs- oder Mikroprägeprozessen eine Reibungsreduktion erzeugt werden [Biermann et al. 2011]. Durch den lokal begrenzten Einsatz dieser Techniken bei der Herstellung des Umformwerkzeuges ist eine örtlich unterschiedliche Beeinflussung des Materialflusses möglich. Auf diese Weise kann die Fließbewegung gesteuert und Material gezielt

dorthin geleitet werden, wo es für eine ideale Formfüllung benötigt wird. [Merklein et al. 2012a]

Bei den Prozessen der Blechmassivumformung liegt die Herausforderung in den deutlich erhöhten Umformkräften [Merklein et al. 2012a; Scharper et al. 2011]. Diesen muss mit einer speziellen Prozessauslegung begegnet werden. Insbesondere die Werkzeuge, in welchen die Kräfte schließlich die Umformung des Materials bewirken, müssen den Belastungen standhalten. Die Maßnahmen zur gezielten Steuerung des Materialflusses wirken dabei vorteilhaft, da die Reibkräfte zwischen Werkzeug und Werkstoff minimiert werden. Jedoch müssen die zu diesem Zweck vorgenommenen Maßnahmen, wie aufgebrachte Strukturen oder Beschichtungen, die hohen Kräfte unbeschadet überstehen können. [Sieczkarek et al. 2013a]

Ebenso herausfordernd ist die Auslegung entsprechender, auf die Blechmassivumformung abgestimmter Umformmaschinen. Einerseits müssen diese in der Lage sein, die hohen Umformkräfte aufzubringen, andererseits gilt es eine hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten. Nur wenn alle Parameter des Umformprozesses exakt eingehalten werden, können in einem stabilen Prozess auch filigrane Bauteilmerkmale erzeugt werden. Aus diesen Anforderungen resultiert ein äußerst stabiler und steifer Aufbau aller Maschinenkomponenten. [Sieczkarek et al. 2013b] In [Merklein et al. 2011c] und [Sieczkarek et al. 2013b] sind unterschiedliche Maschinenkonzepte erläutert, welche die Anforderungen an die neue Umformtechnologie erfüllen. Die Konzepte finden sich jeweils in den zur Anwendung kommenden Teilprozessen der Blechmassivumformung wieder.

2.1.2 Bauteildemonstrator und messtechnische Herausforderungen

Die Leistungsfähigkeit der Blechmassivumformung liegt in der großen Gestaltungsfreiheit der erzeugbaren Bauteilmerkmale. Zur Verdeutlichung der Möglichkeiten und Herausforderungen der neuen Umformtechnologie dient ein Bauteildemonstrator, welcher in Abbildung 3 mittig dargestellt ist [Merklein et al. 2010; Kästner et al. 2013]. Dieser besteht aus einer Ringstruktur mit allseitig angebrachten Nebenformelementen [Ohr et al. 2012a]. Letztere können in die Geometrielemente Lasche, Verzahnung und Mitnehmer aufgeteilt werden. Den Mitnehmer wiederum gibt es in offener und geschlossener Ausführung.

Anhand der Gestalt des Bauteildemonstrators lassen sich die Anforderungen an die Blechmassivumformung aufzeigen. Die Ausformung der komplexen Geometrielemente wird durch eine Kaltverfestigung während der Umformung erschwert. Daher ist eine Vorverteilung des Werkstoffs vor den Stauch- und Fließprozessen notwendig. Durch eine lokale Variation der Blechdicke können der Formfüllgrad erhöht und gleichzeitig die erforderlichen Umformkräfte gesenkt werden. Diese Maßnahme

wird durch die Bereitstellung entsprechend ausgelegter *Tailored Blanks* erreicht. Zusätzlich können die werkzeugseitigen Methoden zur Reduktion der Umformkräfte angewendet werden. [Merklein et al. 2010; Merklein et al. 2012a; Vierzigmann et al. 2011; Loderer et al. 2013a]

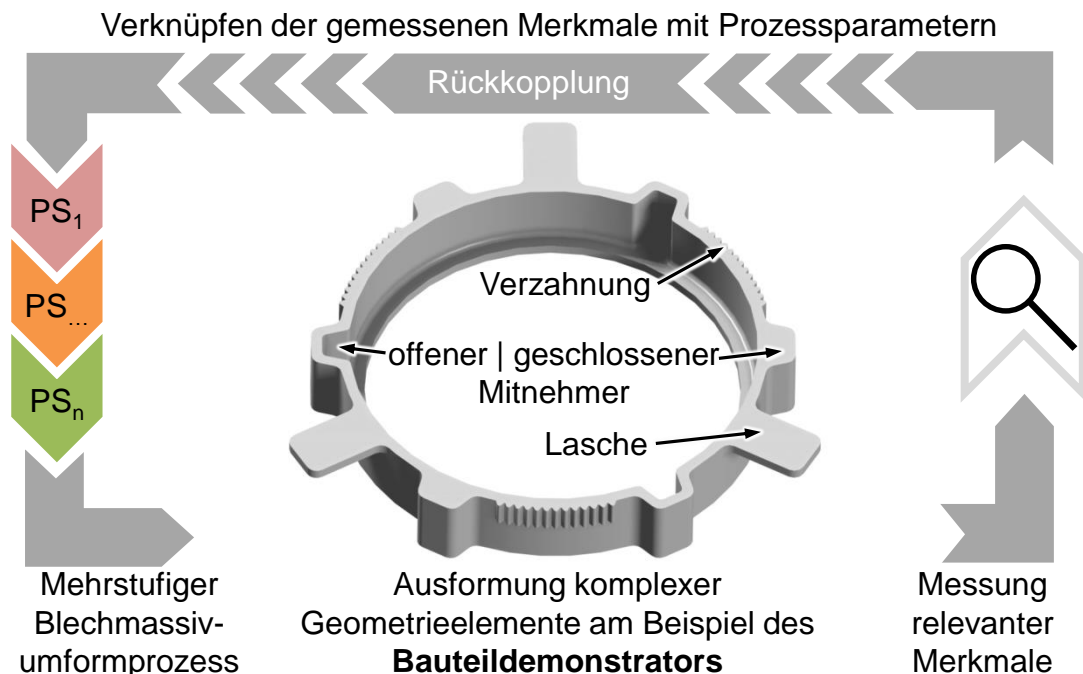


Abbildung 3: Bauteildemonstrator der Blechmassivumformung und Prozessregelkreis

Der Bauteildemonstrator ist in der dargestellten Form zwar rein fiktiv, jedoch existieren insbesondere im Automobilbereich Werkstücke, welche in ein und demselben Bauteil sehr ähnliche, ebenso stark variierende Geometrielemente vereinen. Daher gelingt es mit der gewählten Form, die Herausforderungen der Blechmassivumformung an nur einem Bauteil darzustellen. [Ohrt et al. 2012b; Merklein et al. 2010]

Für eine effektive Qualitätssicherung und als Grundlage für eine nachhaltige Prozesslenkung ist eine ganzheitliche Bauteilprüfung erforderlich. Durch die Inspektion aller wichtigen Merkmale können Abweichungen ausfindig gemacht und die Stellgrößen für eine Nachregelung angepasst werden. Je größer der Anteil der geprüften Bauteile in Relation zur Gesamtproduktion ist, desto schneller und effektiver ist eine Prozessregelung [Loderer et al. 2013b]. Aufgrund der kurzen Taktzeiten in der Blechmassivumformung, bedingt durch die hohe Integrationstiefe der Prozesse, ergibt sich die Forderung nach einer möglichst sehr kurzen Prüfdauer – idealerweise entspricht diese der Taktzeit des Fertigungsprozesses. Die Prüfdauer setzt sich aus für die Messinformation, „wertschöpfenden“ und „nicht wertschöpfenden“ Prozessschritten zusammen. Neben der „wertschöpfenden“ Messzeit, in welcher die Messdaten erhoben und ausgewertet werden, nehmen Nebenzeiten, wie beispielsweise

die Messobjekthandhabung, eine „nicht wertschöpfende“ Rolle ein. Derartige Nebenzeiten können minimiert werden, indem eine messtechnische Prozessüberwachung möglichst nahe an Fertigungsprozessen durchgeführt und damit die Zeiten für die Handhabung von Bauteilen verkürzt werden [Dietlmaier 2012; Imkamp und Berthold 2012]. Hierbei ist jedoch eine Berücksichtigung der Umwelteinflüsse auf die Messtechnik notwendig. Je weniger diese aus der Fertigung entkoppelt ist und je näher diese an Fertigungsprozesse heranrückt, desto höher ist die Gefahr von systematischen und zufälligen Abweichungen durch Störeinflüsse wie z. B. Staub, Schmutz, Temperaturschwankungen, etc. Die Einhaltung der, von der verwendeten Messtechnik geforderten Messbedingung ist an jedem Ort der Prozessüberwachung zu gewährleisten.

Zusätzlich stellen die durch die Blechmassivumformung realisierbaren Geometrielemente, welche erheblich in Form und Größe variieren können, eine Herausforderung für die Bauteilinspektion dar. Gemäß Georg Berndts „goldener Regel der Messtechnik“ sollte für eine sichere und robuste Inspektion eines Merkmals die Messunsicherheit des verwendeten Messgeräts ein Fünftel, besser noch ein Zehntel der Toleranzbreite nicht überschreiten [Berndt et al. 1968]. Demnach hat eine ganzheitliche Inspektion mit einem Messsystem zu erfolgen, welches sowohl für kleine Merkmale eine adäquate Messunsicherheit aufweist, als auch für große Merkmale einen entsprechend ausreichenden Messbereich.

Die hohe Integrationstiefe der Blechmassivumformprozesse erlaubt lediglich eine Inspektion der Endprodukte. Diese Ausgangslage, kombiniert mit einer möglichst kurzen Prüfdauer, einem Prüfort in der Nähe der Fertigungsprozesse und den komplexen Geometrielementen mit den daraus resultierenden Anforderungen bezüglich der Genauigkeit, stellen die derzeit verfügbare Messtechnik vor große Herausforderungen und erfordern individuelle Lösungsansätze. Nur auf diese Weise kann der in Abbildung 3 dargestellte Prozessregelkreis für eine moderne Fertigungstechnologie mit hochintegrierten Prozessen realisiert werden. [Kästner et al. 2013, Merklein et al. 2012a]

2.1.3 Fertigungsnahe Umfeld

Als Grundlage für die Auswahl geeigneter Messsysteme und -strategien muss eine ganzheitliche Betrachtung der auf die Messung wirkenden Einflüsse herangezogen werden [Bauer 2007, S. 22-31]. Häufig findet hierzu eine Untergliederung der Einflüsse in die fünf Kategorien Mensch, Messgerät, Material, Methode und Mitwelt statt. Alle ermittelten Einflüsse können einer der fünf Kategorien zugeordnet werden [Pfeifer und Schmitt 2007]. Die zur Anwendung der Blechmassivumformung konzipierten Werkzeugmaschinen unterliegen keinen, von anderen Werkzeugmaschinen

abweichenden Anforderungen an die Umgebungsbedingungen. Es können daher die nach [Pfeifer und Schmitt 2007; Bernstein 2011; VDI/VDE 2627-1:1998-08; VDI/VDE 2627-1:2015-12] und [Keferstein und Marxer 2015] genannten Einflüsse auf die Messung angenommen werden:

- Temperatur, Temperaturgradienten (räumlich) und Temperaturkonstanz (zeitlich),
- Luftfeuchtigkeit,
- eigen- und/oder fremdinduzierte Schwingungen,
- Luftzirkulation und –geschwindigkeit,
- Licht-/Strahlungsverhältnisse,
- elektromagnetische Störgrößen,
- Reinheit der Luft, Schmutz, Staub, Ölnebel, etc.

Diese Einflüsse unterliegen meist Schwankungen in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit oder weiteren in der Mitwelt stattfindenden Prozessen [Bernstein 2011].

Tabelle 1: Klassifizierung von Messräumen nach [VDI/VDE 2627-1:1998-08]

Güteklasse	Benennung	Beispiele
0	Sondermessraum	Messraum mit besonderen Anforderungen für spezielle Aufgaben
1	Präzisionsmessraum	Kalibrierung von Bezugsnormalen; Messung von Maßstäben
2	Feinmessraum	Kalibrierung von Gebrauchsnormalen; Messung von Einstellstücken
3	Standardmessraum	Messung von Werkzeugen und Prüfmitteln; Musterprüfungen; Erstbemusterung
4	Fertigungsnaher Messraum	Überwachen der Produktion und Maschineneinstellung
5	Fertigungsmessplatz	Fertigungsnahe Messungen in der Produktion

Für die Auslegung von messtechnischen Lösungen zur fertigungsnahen Überwachung von Prozessen der Blechmassivumformung, ist eine Konsolidierung relevanter Normen, die den Einfluss der Umwelt auf das Messergebnis beschreiben, unerlässlich. In Abhängigkeit vom Grad der Entkopplung der Messtechnik von den oben

genannten Einflüssen werden sowohl in [VDI/VDE 2627-1:2015-12] als auch in der Vorgängerrichtlinie [VDI/VDE 2627-1:1998-08] unterschiedliche Güteklassen von Messräumen definiert. Unter einem Messraum wird demnach ein Raum oder Teilbereich eines Raumes bezeichnet, der bestimmte Anforderungen an die Umgebungsbedingungen erfüllt [VDI/VDE 2627-1:2015-12]. Aufgrund der weniger spezifischen Einteilung in der neueren Richtlinie wird für die Erläuterung der unterschiedlichen Klassen in Tabelle 1 auf die [VDI/VDE 2627-1:1998-08] zurückgegriffen. Der Sondermessraum nimmt mit der Güteklasse 0 eine Ausnahmerolle ein, da für diesen alle Bewertungskriterien individuell festgelegt werden können. Auf diese Weise kann ein auf eine spezielle Messaufgabe zugeschnittener Messraum definiert werden.

2.2 Messtechnik für eine ganzheitliche Merkmalsprüfung

Der Inspektion von Bauteilen nahe deren Fertigung kommt in der Messtechnik immer größere Bedeutung zu. Aus ökonomischen wie auch technischen Gründen findet eine Verlagerung, heraus aus den klassischen Messräumen, hin zur Produktentstehung statt [Frick 2006]. Die dabei zu berücksichtigenden Grundlagen sollen im Folgenden näher erläutert werden. Messtechnische Bauteilbewertungen im prozessnahen Umfeld führen meist zu individuellen, auf die Messaufgabe zugeschnittenen Messsystemlösungen [Schwarz 2011; Donner 2009; Bauer 2007, S. 22-31]. Die aufgezeigten Systeme stellen somit nur eine beispielhafte Auswahl dar.

2.2.1 Kategorien der Prozessqualitätsbewertung

Für die Bestimmung der Anforderungen an messtechnische Lösungen zur Bewertung der Prozess- und Produktqualität gilt es in einem ersten Schritt den Fertigungsprozess zu analysieren. Dabei ist zu prüfen, welche Reaktionszeit für die Regelung des Prozesses notwendig ist und wie hoch der Integrationsgrad der Messtechnik im Prozess ausfallen kann. Abhängig von diesen beiden Parametern kann eine für den Prozess passende Kategorie der Prozessqualitätsbewertung gewählt werden. In Abbildung 4 sind die verschiedenen Kategorien in Abhängigkeit des Integrationsgrads und der Reaktionszeit der Prozessregelung schematisch aufgezeigt. [Schmitt und Damm 2008]

Eine fertigungsferne Lösung zur Prozessüberwachung findet meist in separaten Messräumen statt. Die Messgeräte sind dabei von den Bedingungen der Fertigung entkoppelt und unterliegen damit nicht den gleichen Einflüssen, wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchte, Umgebungslicht und Vibrationen. Die Integration in die Fertigungsprozesse fällt dabei oft sehr gering aus. Häufig befinden sich in Messräumen mehrere Messsysteme, welche für die Kontrolle der Produkte verschiedener

Prozesse und meist Stichprobenprüfung genutzt werden. Werden Indikatoren für eine Regelung des Prozesses festgestellt, fällt die Reaktionszeit, bedingt durch die notwendige Handhabung des Messobjekts aus dem Prozess- in den Messraum, entsprechend langsam aus. [Fleischle et al. 2013; Schmitt und Damm 2008]

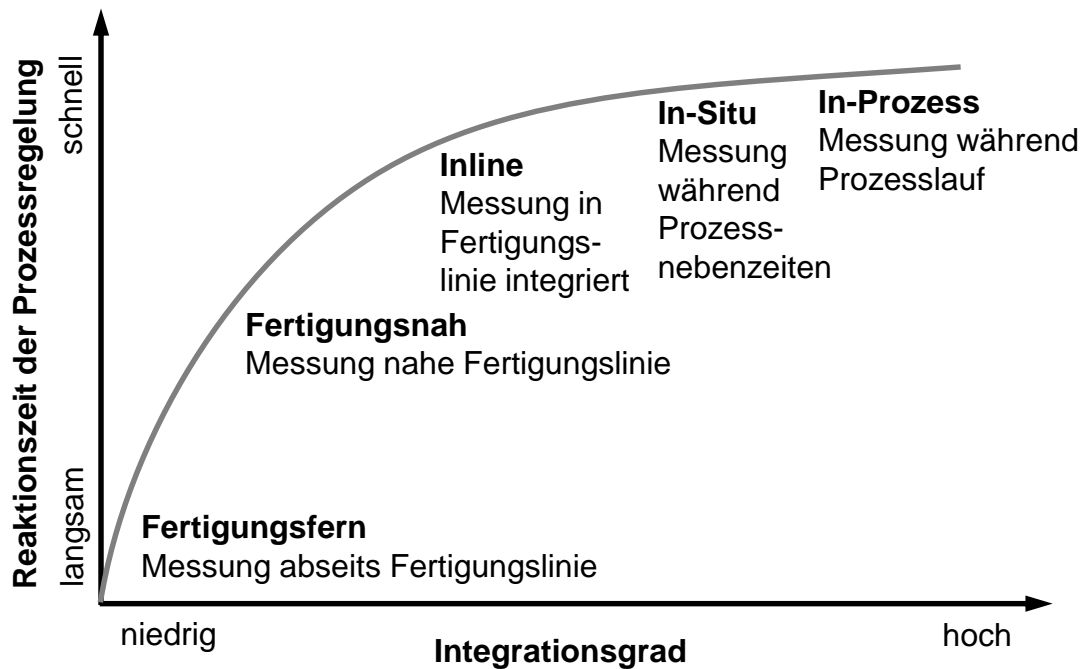


Abbildung 4: Kategorien der Prozessqualitätsbewertung nach [Schmitt und Damm 2008]

Im Gegensatz zu einer fertigungsfernen Messtechnik ermöglicht die fertigungsnahen Messtechnik meist eine 100 %-Kontrolle. Fertigungsnahen Messsysteme sind unmittelbar neben dem Fertigungsprozess platziert, jedoch nicht in den Fertigungstakt integriert. Auf diese Weise ist eine teilweise Entkopplung der Messtechnik von den direkten Einflüssen der Fertigung möglich, wobei gleichzeitig der Handhabungsaufwand deutlich minimiert wird [Schwarz 2011]. Sowohl der Integrationsgrad als auch die Reaktionszeit können durch diese Charakteristika erheblich verbessert werden. [Schmitt und Damm 2008; Schäfer 2013]

Eine Inline-Messung ist direkt in die Fertigungslinie integriert und ermöglicht eine 100 %-Kontrolle nach der Prozessdurchführung. Durch die größere Nähe zum Fertigungsprozess minimiert sich der Handhabungsaufwand weiter. Jedoch ist ein signifikant größerer Aufwand nötig, wenn die Messtechnik von den Umgebungseinflüssen entkoppelt werden soll. Integrationsgrad und Reaktionszeit verbessern sich im Vergleich zu den vorher genannten Kategorien nochmals. [Schmitt und Damm 2008]

Die beiden Kategorien In-Situ-Messung und In-Prozess-Messung bilden die Lösung mit einer sehr schnellen Reaktionszeit zur Prozessregelung, bei einem gleichzeitig

sehr hohen Integrationsgrad. In-Situ-Messungen finden während des Prozesses oder in dessen Nebenzeiten, beispielsweise bei einem Werkzeugwechsel, statt und erfassen dabei bereits bearbeitete Bauteilmerkmale. Auf Basis der Messergebnisse kann, bedingt durch die sehr schnelle Reaktionszeit, eine mögliche Nachbearbeitung des Bauteils noch in der Fertigungsmaschine erfolgen. In-Prozess-Messungen erfolgen während des Prozesses und überwachen die gerade in der Bearbeitung befindlichen Merkmale. Der Zeitverlust sowie die Ausschussrate zwischen Bearbeitung und Messdatenakquise sind bei dieser Kategorie am geringsten. Hierdurch wird eine Echtzeitüberwachung und -regelung des Prozesses möglich. [Fleischle et al. 2013; Schmitt und Damm 2008]

2.2.2 Einordnung relevanter Messverfahren

Abhängig von der Messaufgabe und der projizierten Kategorie der Prozessqualitätsbewertung sind unterschiedliche Messverfahren gebräuchlich. Eine Einordnung der entsprechend des aktuellen Standes der Technik betrachteten Messverfahren kann hinsichtlich ihrer Wechselwirkung mit dem Messobjekt während der Messdatenerfassung erfolgen und ist in Abbildung 5 veranschaulicht.

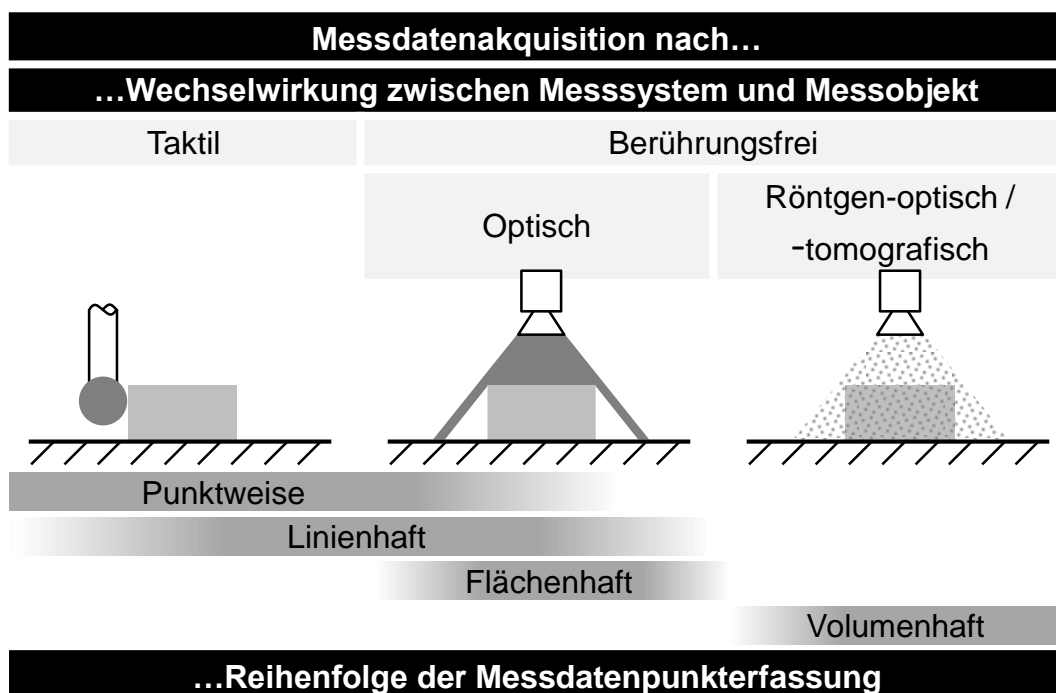


Abbildung 5: Kategorien der Messdatenakquisition

Hierbei sind die drei Hauptkategorien taktile, optische sowie Röntgen-optische oder -tomografische Messdatenerfassung zu unterscheiden. Zusätzlich ist eine Klassifizierung hinsichtlich der Reihenfolge der Messdatenakquisition möglich. Im Folgenden werden die drei Hauptkategorien - taktile, optische sowie Röntgen-tomo-

grafische Messdatenerfassung - kurz erläutert. Aufgrund der großen Variantenvielfalt und weiten Verbreitung in fertigungsnahen Anwendungsbereichen bildet hierbei das Prinzip der optischen Messdatenerfassung einen Schwerpunkt.

Prinzip der taktilen Messdatenerfassung

Die Messdatenakquisition durch taktile Messverfahren basiert auf einer mechanischen Wechselwirkung zwischen einem geometrisch definierten Tastelement und der zu erfassenden Bauteiloberfläche. Dieses Prinzip findet sich in unterschiedlicher Anwendungsweise bei taktilen Messsystemen wieder [Schuler 2014]. Ein klassisches Beispiel für das Messverfahren ist die Gruppe der taktilen Koordinatenmesssysteme. Zentraler Bestandteil derartiger Systeme ist ein Tastsystem, das über mechanische Bewegungseinrichtungen im Messvolumen mit dem Messobjekt in mechanischen Kontakt gebracht wird. Je nach Bauweise und Geräteausführung kann das Tastsystem, das Messobjekt oder beides bewegt werden. Die Art und Weise der Antastbewegung bildet wiederum ein Kriterium für die Unterteilung in verschiedene Bauformen [Weckenmann 2012, S. 70-81; DIN EN ISO 10360-1:2003-07]. Zur Erläuterung des Messverfahrens wird exemplarisch die Portalbauweise konventioneller Koordinatenmessgeräte beleuchtet. Bei diesem häufig eingesetzten Aufbau kann das Tastsystem entlang der drei Raumachsen eines kartesischen Koordinatensystems verschoben werden. In jeder Achse sind Maßstäbe integriert, welche eine Positionsbestimmung ermöglichen. Das Tastsystem wird an die zu messende Bauteiloberfläche herangefahren. Sobald ein mechanischer Kontakt zwischen Tastelement und Oberfläche stattfindet, wird die Position der drei Achsen sowie bei messenden Tastsystemen die Tastersignale gespeichert und hieraus ein Koordinatenpunkt für die Bauteiloberfläche ermittelt. [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 310-331; Dutschke 1996, S. 133-136]

Auch bei den Tastsystemen können unterschiedliche Arbeitsweisen unterschieden werden. Bei einem schaltenden Tastsystem wird beim Kontakt des Tastelements mit dem Messobjekt eine elektrische Schaltung ausgelöst, welche die Abfrage der Koordinatenwerte für die Achsen einleitet. Die Messwertaufnahme findet damit einstufig statt. Dynamische Effekte, wie die Deformation des Tasters, können nicht durch eine Kalibrierung beseitigt, sondern lediglich in Form von rechnerisch vorbestimmten Werten berücksichtigt werden. Eine Erfassung der Bauteiloberfläche findet mit diesen Tastsystemen punktwise mit Einzelpunktantastung statt. Im Gegensatz dazu sind in einem messenden Tastsystem weitere Sensoren integriert, welche die Auslenkung beziehungsweise Bewegung des Tastelements bei Kontakt mit dem Bauteil detektieren und bei Erreichen der vorgegebenen Messkraft den Koordinatenpunkt speichern. Auf diese Weise ist es nicht nur möglich eine deutlich präzisere

Angabe eines Koordinatenpunktes für die Bauteiloberfläche zu ermitteln, sondern diese kann auch im ständigen Kontakt mit dem Tastelement gehalten und dabei ein lateraler Scan durchgeführt werden. Hierdurch ist eine linienhafte Erfassung der Bauteiloberfläche möglich. [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 310-331; Weckemann 2012, S. 93-132; Pfeifer 1998, S. 244-296; DIN EN ISO 10360-1:2003-07]

Neben der Anwendung in Koordinatenmesssystemen kommt die taktile Messdatenakquisition auch in weiteren Messsystemen, wie beispielsweise Formmessgeräten oder taktilen Oberflächenmessgeräten zum Einsatz. [Pfeifer 1998, S. 244-296; Dutschke 1996, S. 187-195]

Prinzip der optischen Messdatenerfassung

Kennzeichnend für optische Messverfahren ist die Möglichkeit, Messgrößen rückwirkungsfrei, also ohne Beeinflussung des Messobjektes durch die Messung selbst, zu bestimmen [Bernstein 2014]. Zusätzlich kann in vergleichsweise kurzer Zeit eine große Anzahl an Messdaten gesammelt werden [Hehenberger 2011]. Um eine bessere Übersicht über die große Vielfalt der unterschiedlichen optischen Messsysteme zu ermöglichen, ist eine Einteilung in Gruppen sinnvoll. In Abbildung 6 wird eine Differenzierung verschiedener optischer Verfahren hinsichtlich der jeweils zugrundeliegenden Messprinzipien vorgenommen.

Messprinzipien in der optischen Koordinaten- & Oberflächenmesstechnik

Triangulation Deflektometrie Interferometrie Fokusverfahren Bildverarbeitung

Abbildung 6: Einteilung optischer 2-D- und 3-D-Messtechnik nach [Christoph und Neumann 2006]

Das Messprinzip der Triangulation beruht auf der Bestimmung von Dreieckswinkeln. Allgemein kann zwischen aktiver und passiver Triangulation unterschieden werden. Beide Prinzipien sind in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt. Bei der aktiven Triangulation wird durch eine Lichtquelle ein Lichtpunkt, eine Laserlinie oder ein Lichtmuster auf die zu messende Bauteiloberfläche projiziert. Dort wird das Licht reflektiert und von einer in einem bekannten Winkel und Abstand zur Lichtquelle angeordneten Kamera detektiert. Ändert sich der Abstand zwischen Lichtquelle und Messobjekt, wird auch das reflektierte Licht an einer anderen Position auf dem Kamerachip erfasst. Aus der Position der Abbildung auf dem Kamerachip kann der Abstand zwischen Lichtquelle und Bauteiloberfläche bestimmt werden. Als Lichtquelle kommen häufig Laser oder emittierende Elemente, wie beispielsweise Kaltlichtquellen oder *Light-Emitting Diodes* (LEDs) mit einer fokussierenden Optik, zum Einsatz. Die derzeitige Kamertechnologie nutzt meist *Charge-coupled De-*

vice(CCD)- oder *Complementary Metal Oxide Semiconductor*(CMOS)-Kamerachips. Steht ein kostengünstiger Messaufbau mit gleichzeitig weniger Fokus auf Genauigkeit im Vordergrund, werden anstelle von Kameras auch *Position Sensitive Devices* (PSDs) verwendet. [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 260-272; Hesse und Schnell 2011; Löffler-Mang 2012; Bauer 2007, S. 159-168]

Bei der passiven Triangulation wird die Lichtquelle durch eine zweite Kamera ersetzt. Um den Abstand zwischen beiden Kameras und der Bauteiloberfläche bestimmen zu können, wird die Position korrespondierender Punkte der Bauteiloberfläche auf den Kamerachips ausgewertet. Verändert sich der Abstand zwischen den Kameras und der Bauteiloberfläche, ändert sich auch die Position der korrespondierenden Punkte auf den Kamerachips. Eine derartige Abstandsbestimmung ist jedoch sehr rechenintensiv. [Hesse und Schnell 2011]

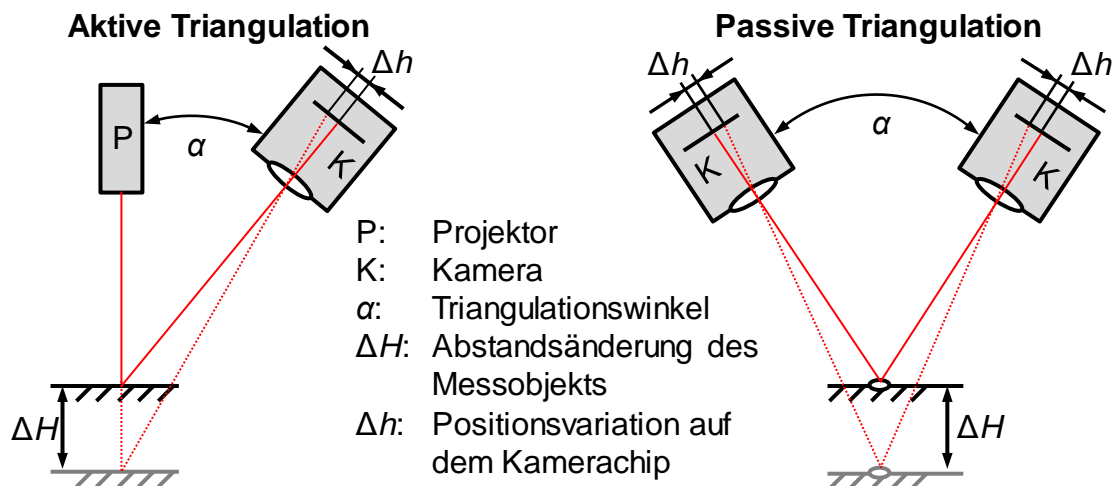


Abbildung 7: Messprinzip der aktiven und passiven Triangulation

Die interferometrische Messtechnik beruht auf dem Wellencharakter des Lichts. Für die Entfernungsermittlung eines Punktes werden zwei Wellen mit ausreichender zeitlicher und räumlicher Kohärenz überlagert. Während eine Welle dabei die Referenz darstellt, wird die andere Welle am zu messenden Punkt reflektiert und enthält die Messinformation. Die Intensität der überlagerten Wellen wird mittels eines optischen Detektors erfasst und lässt Rückschlüsse auf die Phasenlage der beiden Wellen zu. Hohe Intensitäten deuten auf eine konstruktive Interferenz und damit gleiche Phasenlage hin. Niedrige Intensitäten werden durch eine destruktive Interferenz erzeugt und entstehen bei einer Phasenverschiebung von 180° . Sind die beiden Wellen, hervorgerufen durch unterschiedliche Weglängen, zueinander phasenverschoben, kann dies anhand der Intensitätsmodulation festgestellt werden. Die zu messenden minimalen Wegdifferenzen zwischen Messwelle und Referenzwelle sind abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lichts. Wird sichtbares Licht

verwendet, das eine Wellenlänge zwischen circa 400 nm und 700 nm aufweist, können Wegdifferenzen bis in den Sub-Nanometerbereich ermittelt werden. [Jähne 2005; Poprawe 2005; Hering und Martin 2006, S. 36-56]

Fokusverfahren, wie beispielsweise die Fokusvariation, ermitteln die topographische Information der zu messenden Bauteiloberfläche aus unterschiedlichen Fokusslagen. Zentrales Prinzip ist die Bündelung des Lichts mittels Optiken auf einen Punkt. Oberflächenpunkte können aufgrund der Signaländerung bei der Fokussierung und Defokussierung detektiert werden. Durch eine schrittweise Variation der Fokusebene wird für jeden Oberflächenpunkt die entsprechende Ebene bestimmt. Diese stellen Höheninformation der Bauteiloberfläche dar. Die Lage der Punkte in Bezug auf die beiden verbleibenden Raumachsen wird über die Pixelposition auf dem Kamerachip bestimmt. Auf diese Weise können alle drei Raumkoordinaten für einen Oberflächenpunkt detektiert und durch die Kombination aller Punkte eine topographische Erfassung der Oberfläche bewerkstelligt werden. [Bauer 2007, S. 198-202; Rahlves und Seewig 2009]

Die Messwerte bildverarbeitender Messprinzipien werden direkt aus den Kameraaufnahmen des Bauteils extrahiert. Im Gegensatz zum Fokusvariationsverfahren, bei welchem eine Serie von Aufnahmen erzeugt und ausgewertet werden, ist bei den Messprinzipien der Bildverarbeitung meist nur eine Aufnahme notwendig. Nach der Bildaufnahme, bei welcher häufig CCD-, CMOS- oder im Fall von sich schnell bewegenden Bauteilen, *Time Delay Integration*(TDI)-Kameras Verwendung finden, erfolgt in der Regel eine digitale Nachbereitung. Dadurch können die gesuchten Merkmale hervorgehoben und gleichzeitig nicht gewünschte Effekte, wie beispielsweise Spiegelungen, ausgeschlossen werden. Eingesetzt werden hierbei eine Reihe von Operatoren zur Handhabung optischer Datensätze, wie etwa Filter und Transformationstechniken. Ein Überblick über diese Techniken ist in [Krystek 2009] und [Jähne 2005] aufgeführt. Beispielhafte Vertreter der bildverarbeitenden Messprinzipien sind das Durchlichtverfahren, das Schattenwurfverfahren sowie Mustererkennungsverfahren. Während bei Messungen im Bild Merkmale innerhalb einer Abbildung ausgewertet werden, wird unter Messungen am Bild verstanden, wenn die Kamera oder das Messobjekt zwischen Messungen an ausgedehnten Merkmalen bewegt wird. Den bildverarbeitenden Messprinzipien ist eine Beschränkung auf 2-D-Messungen gemein. [Christoph und Neumann 2006; Bauer 2007, S. 22-31; Pfeifer 1998, S. 178-202; Weckenmann 2012, S. 93-132]

Prinzip der Röntgen-tomografischen Messdatenerfassung

Die bisher vorgestellten Prinzipien zur Messdatenerfassung ermöglichen die dimensionelle Erfassung von Bauteiloberfläche und Bauteilmerkmalen, welche direkt im Messbereich von Detektoren, zum Beispiel dem Blickfeld von Kameras, liegen oder von Tastsystemen angetastet werden können. Hinterschneidungen, Einschlüsse unterhalb der Oberfläche sowie innenliegende Strukturen können schlecht oder nicht detektiert werden. Röntgen-tomografische Messprinzipien sind in der Lage derartige Messaufgaben zu bewältigen. [Weckenmann 2012, S. 200-216] Häufig werden Messverfahren dieser Gruppe für die zerstörungsfreie Prüfung von Werkstoffen, Bauteilen oder Verbindungselementen eingesetzt [Ilschner und Singer 2005].

Für eine volumenhafte Erfassung eines Bauteils kann auf verschiedene Messverfahren und -prinzipien zurückgegriffen werden, die sich teilweise sehr stark in Auflösung, Genauigkeit und Messbereich unterscheiden. Volumenhafte Messverfahren sind nicht immer berührungsfrei, sondern erfordern mitunter eine Platzierung des Sensors auf der Bauteiloberfläche. [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 363-406] In Tabelle 2 sind eine Reihe von Messverfahren und -prinzipien aufgeführt, welche nach [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 363-406] für eine dimensionelle Prüfung von geometrischen Merkmalparametern geeignet sind.

Tabelle 2: Eindringende dimensionelle Prüfmethode[n] [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 363-406]

Messverfahren	Messprinzip
Induktiv	Wirbelstrom
Ultraschall	Piezowandler
	Laser-Unterschall (LASUS)
	Elektromagnetischer Ultraschall (EMUS)
Durchstrahlung	Radioisotope
	Radioskopie
	Tomographie
	Synchrotronstrahlung: Absorptions- und Phasenkontrast, radioskopisch oder tomographisch

2.2.3 Taktile Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik

Die fertigungsnahen Qualitätskontrolle mittels taktile Messverfahren erfordert eine spezielle Anpassung auf die vorherrschenden Umwelteinflüsse wie auch auf die zu bewältigende Messaufgabe [Mitutoyo 2008].

Fertigungsnahen Koordinatenmessgeräte

Koordinatenmessgeräte als typische Vertreter taktile Messverfahren werden in der Regel in klimatisierten Messräumen eingesetzt. Die Messaufgaben sind meist nicht an den Produktionstakt gebunden und die Dauer einer Prüfung steht hinter den Anforderungen an die Genauigkeit. [Mitutoyo 2012; Mitutoyo 2014] Für den Einsatz im fertigungsnahen Umfeld entwickeln die Messgerätehersteller Varianten und Typen, welche auf die speziellen Anforderungen des Prüforts optimiert sind. Im Gegensatz zu Geräten in klimatisierten und kontrolliert belüfteten Messräumen müssen die Systeme robust gegenüber Staub, Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen sein. Granit, als verbreiteter Werkstoff für Messplatten von Koordinatenmessgeräten, eignet sich aufgrund seines Verhaltens, unter Feuchtigkeit aufzunehmen, nur bedingt für die Verwendung in fertigungsnahen Messsystemen. Häufig finden daher neue Werkstoffe wie beispielsweise Mineralguss Einzug in den Messgerätebau [Frick 2006]. Gelingt es nicht die Empfindlichkeit bestimmter Maschinenkomponenten gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sowie Staubpartikel ausreichend zu senken, werden oft die entsprechenden Komponenten oder das gesamte Messsystem gekapselt [Mitutoyo 2012]. Ein Koordinatenmessgerät für den fertigungsnahen Einsatz ist mit einer beispielhaften Messaufgabe in Abbildung 8 gezeigt.

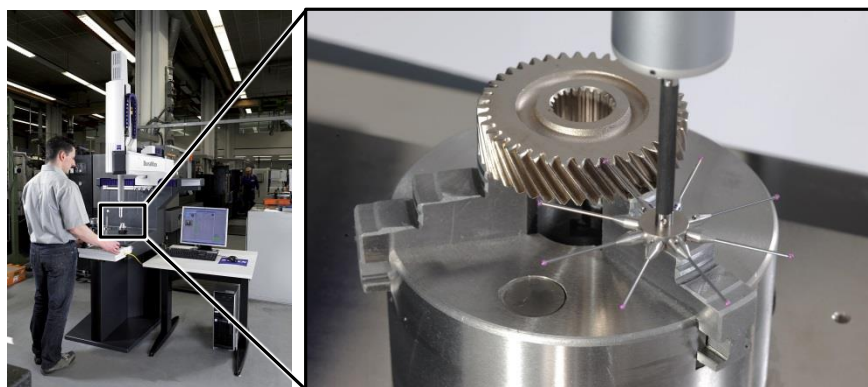


Abbildung 8: Fertigungsnahes Koordinatenmessgerät (links); Verzahnungsmessung (rechts) [Carl Zeiss 2016]

Besonders wichtig bei der Auslegung taktile Koordinatenmessgeräte für fertigungsnahen Messaufgaben ist die Optimierung der drei Parameter Messdauer, Bestückung und Flexibilität.

Die Dauer einer Messung muss an den Fertigungstakt sowie die geplante Inspektionsrate angepasst werden. Eine Möglichkeit der Messzeitverkürzung besteht in der Steigerung der Verfahrgeschwindigkeit der Koordinatenachsen. Mit einer Geschwindigkeitserhöhung gehen aber gleichzeitig höhere Fliehkräfte einher, welche ohne Kompensation die Messgenauigkeit negativ beeinflussen. Daher sind mit höheren Verfahrgeschwindigkeiten auch Maßnahmen zur Minimierung der daraus resultierenden Fliehkräfte zu treffen [Schwarz 2011]. Eine weitere Möglichkeit, die Messzeit zu verkürzen, ist die Optimierung des Messablaufs. Mit der individuellen Auslegung des Messtasters auf die Geometrie der zu prüfenden Messobjekte können eventuell notwendige Tasterwechsel wie auch Fahrwege reduziert werden. Ist noch eine weitere Minimierung der Fahrwege notwendig, kann die Installation eines Drehtisches, auf welchem das Messobjekt platziert wird, sinnvoll sein. Der zusätzliche Freiheitsgrad erlaubt eine schnellere Positionierung von Messobjekt zu Tastelement und verkürzt somit die Messzeit [Bleifuß et al. 2010; Schwarz 2011].

Besonders die Messobjekthandhabung nimmt bei fertigungsnahen Messsystemen eine wichtige Rolle ein. Die dafür benötigte Zeit fließt direkt in die Dauer des Prüftakts ein. Daher ist eine offene Bauweise vorteilhaft, welche eine einfache Zugänglichkeit sowie ein schnelles Be- und Entladen des Messgeräts ermöglicht. Die sogenannte C-Bauweise hat sich in diesem Bezug als besonders geeignet erwiesen, da sie eine Zugänglichkeit von drei Seiten erlaubt. Neben einer Bestückung des Messgeräts mittels automatisierter Greifsysteme oder Roboter ist sogar der Durchlauf eines Fließbands möglich. [Mitutoyo 2012]

Mehrstellenmessgerät als beispielhafte Sonderlösung

Neben den fertigungsnahen Koordinatenmessgeräten existieren im Bereich der produktionsnahen taktilen Messsysteme eine Vielzahl individueller Sonderkonstruktionen. Begründet ist dies durch die meist sehr produktspezifischen Anforderungen an Messgeräte. Sogenannte Mehrstellenmessgeräte bestehen aus mehreren 1-D-Tastelementen, welche entsprechend der zu messenden Merkmale in einem Sonderaufbau angeordnet sind. Neben den Tastelementen selbst nimmt insbesondere die Messobjekthandhabung eine wichtige Rolle ein, welche die Messgerätebestückung, aber auch eine ausreichende Fixierung während des Prüfprozesses sicherstellen soll [Pfeifer 1998, S. 307-323]. Ein Beispiel für ein innovatives fertigungsnahes Prüfkonzept für komplexe Messobjekte ist in [Jenoptik 2014] zu finden. Dabei wurde die Qualitätsprüfung von Nockenwellen unterschiedlicher Motoren in einem Messsystem realisiert. Herausfordernd dabei waren die variierenden Maße und Formen der Bauteile. Um alle Varianten mit einem System prüfen zu können, wurde eine auto-

matische Einspannung sowie eine, auf den Nockenwellentyp abgestimmte, Positionierung der Tastelemente realisiert. Die geforderte Genauigkeit kann trotz der fertigungsnahen Umwelteinflüsse durch eine implementierte Temperaturkompensation sowie einer Einhausung aller kritischen Maschinenkomponenten gewährleistet werden. [Jenoptik 2014]

2.2.4 Optische Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik

Ein besonderes Merkmal optischer Messverfahren ist die Möglichkeit, eine Vielzahl an Messpunkten in kurzer Zeit zu erfassen, ohne dabei das Messobjekt zu berühren. Diese Eigenschaft prädestiniert optisch messende Verfahren insbesondere für Aufgaben, die kurze Prüfzeiten und/oder große Messpunktanzahlen fordern. [Donner 2009; Bauer 2007, S. 22-31; Hehenberger 2011]

Bildauswertung

Weit verbreitet im fertigungsnahen Einsatz sind zweidimensionale, bildauswertende Verfahren. Hierbei wird vom Messobjekt eine Kameraaufnahme erzeugt, welche im Anschluss nach bestimmten Merkmalen durchsucht und ausgewertet wird. Um den Aufnahmebereich und im Speziellen die Merkmale von Interesse besonders hervorheben zu können, wird eine entsprechend abgestimmte Beleuchtung eingesetzt. [Donner 2009] Diese wiederum kann in ein Durchlicht, bei dem das Messobjekt entgegen der Aufnahmerichtung beleuchtet wird und ein Auflicht, welches das Messobjekt in der Aufnahmerichtung beleuchtet, unterschieden werden [Pfeifer 1998, S. 159-166]. Besonders wichtig sind bei Messsystemen dieses Verfahrens die verwendeten Auswertelgorithmen. Diese stellen auch den Hauptbestandteil in der Entwicklung dar. Für die Bilderzeugung und -ausleuchtung kommen meist handelsübliche Systeme zum Einsatz. [Donner 2009] Etabliert haben sich zweidimensionale, bildauswertende Verfahren in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten und Messaufgaben. Beispiele hierfür sind die hochfrequente Analyse von Laserschweißnähten [Blug et al. 2008], die Inline-Prüfung von Polymerschäumstrukturen [Hopmann und Mülder 2012] oder die Detektion von Einschlüssen während Beschichtungsprozessen [Lanza et al. 2013].

Lasertriangulation und Lichtschnittverfahren

Die dreidimensionale Gestalt des Messobjekts kann mit bildverarbeitenden Messverfahren ohne Nutzung der Schärfentiefe nicht erfasst werden. Für derartige Messaufgaben kommen häufig triangulierende Messverfahren zum Einsatz. Die Lasertriangulation ist ein weit verbreiteter Vertreter dieser Verfahren. [Donner 2009] Mittels einer nach dem Prinzip der aktiven Triangulation angeordneten Kombination aus

Lasereinheit und Detektor können Messdaten mit der Information aller drei Raumkoordinaten erhoben werden. Als Detektor werden häufig Kameras eingesetzt, welche auf der CCD- oder CMOS-Technologie basieren. [Bauer 2007, S. 214-232] Während bei der Lasertriangulation in ihrer einfachsten Form lediglich ein Laserpunkt auf die Messobjektoberfläche projiziert und dessen räumliche Position detektiert wird, kann durch eine Aufweitung des Strahls einer Lichtquelle zu einer Lichtlinie im sogenannten Lichtschnittverfahren eine Konturlinie erfasst werden. Die projizierte Lichtlinie stellt dabei einen ebenen Fächer dar, der die Oberfläche des Bauteils schneidet (Lichtschnitt) und eine beleuchtete Konturlinie entstehen lässt. Wird diese unter dem Triangulationswinkel von der Seite beobachtet, so kann aus der Form der Linie auf die Form der Konturlinie geschlossen werden. Aus der Abweichung der idealen Geraden kann die Messobjektkontur im Bereich der Lichtlinie berechnet werden. Für eine flächenhafte Oberflächenerfassung wird die Lichtlinie auf der zu detektierenden Fläche quer zu dieser entlanggeführt. Dies kann entweder durch eine Bewegung des gesamten Messsystems, eine Ablenkung des Laserlichts mittels entsprechend gestalteter Optiken oder eine Handhabung des Bauteils realisiert werden. Eine definierte Bewegung erlaubt die Fusion aller detektierten Konturlinien zu einer Oberfläche. [Bauer 2007, S. 214-232; Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 310-331]

Besonders etablieren konnte sich das Lichtschnittverfahren für Messaufgaben, in denen bereits eine kontinuierliche Bewegung des Messobjekts gegeben war. So werden Lichtschnittmesssysteme oftmals zur Qualitätskontrolle bei der Produktion von extrudierten Halbzeugen und Werkstücken eingesetzt. In [Prones 2012] wird ein Lichtschnittmesssystem für die fertigungsnahe Inspektion von Kantenbändern aus Kunststoff beschrieben. Um bei möglichen Prozessabweichungen schnell eingreifen zu können, findet die Messung direkt nach dem Materialaustritt aus Maschinen statt. Durch das „nicht berührende“ Messverfahren kann das Produkt auch im heißen Zustand erfasst werden. Dabei wird das Messsystem gegen Umwelteinflüsse, wie etwa kondensierende Dämpfe, geschützt. Um den Einfluss der Temperatur auf das Messergebnis zu mindern, kommt eine Temperaturkompensation zum Einsatz. Neben der Einsatzmöglichkeit in widriger Umgebung zeichnet sich das Lasertriangulationsverfahren auch durch eine hohe Messfrequenz aus. Liegt der Fokus auf sehr hohen Auslesegeschwindigkeiten, eignen sich als Detektoren Kameras, die auf der TDI-Technologie basieren. [Ott und Bauer 2008] Zusätzlich kann die Messfrequenz, wie in [Noll und Krauhausen 2008] angedeutet, durch eine Optimierung des Auswerteprozesses, beispielsweise mithilfe von speziellen Algorithmikprozessoren, gesteigert werden. Als weiterer Vorteil des Messverfahrens ist die Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht zu nennen. Da die häufig eingesetzten

Laserlichtquellen monochromatisch sind, kann mit Hilfe entsprechender Filter nur Licht dieser Wellenlänge zum Detektor geführt werden. [Bauer 2007, S. 214-232]

Streifenprojektion

Die Streifenprojektionstechnik arbeitet, ähnlich dem Lichtschnittverfahren, ebenfalls nach dem Prinzip der aktiven Triangulation. Dabei wird nicht nur eine Linie, sondern ein Streifenmuster auf das Messobjekt projiziert. Für die Erzeugung der Streifen kommen in heutigen Systemen meist Projektoren auf Basis der *Digital Light Processing-Technologie* (DLP) zur Anwendung. Hierbei wird Licht, ausgehend von einer LED-Lichtquelle, auf ein sogenanntes *Digital Mirror Device* (DMD) geleitet. Dieses besteht aus einer Vielzahl von Mikrospiegeln, die jeweils zwei Winkellagen einnehmen können. In der aktiven Winkellage wird das Licht durch die Optik des Projektors geleitet und auf der Oberfläche des Messobjekts ein von der Projektion und Mikrospiegelgröße abhängiges Feld beleuchtet. Dagegen nimmt das Licht in der passiven Winkellage nicht den Weg durch die Projektionsoptik, sondern wird auf eine absorbierende Fläche im Gerät geleitet. Das entsprechende Feld auf der Bauteiloberfläche bleibt damit unbeleuchtet. Auf diese Weise können mit dem *Digital Mirror Device* beliebige Beleuchtungsmuster vorzugsweise Streifen erzeugt werden. Die relative Auflösung hängt dabei von der Anzahl der Mikrospiegel ab. [Gühring 2002; GFM 2008] Das entsprechend der Oberflächentopographie des Messobjekts deformierte Streifenmuster wird von mindestens einer CCD- oder CMOS-Kamera erfasst. Mittels Auswertelgorithmen (Triangulation) kann die aufgenommene Messobjekt-oberfläche im Anschluss rekonstruiert werden. [Rahlves und Seewig 2009; Christoph und Neumann 2006]

Um eine eindeutige Zuordnung der Streifen zu ermöglichen, stehen zwei bewährte Codierungsverfahren (Binärcode- und Graycodeverfahren) bereit. Bei beiden Verfahren wird eine Sequenz von Streifen unterschiedlicher Breiten auf die Oberfläche projiziert. Für jeden Kamerabildpunkt ergibt sich eine Hell-Dunkel-Abfolge, aus der eine Zuordnung des entsprechenden Streifenmusters möglich wird. Die laterale Auflösung entspricht dabei der minimalen Streifenbreite. Mit einer Verringerung der Streifenbreite bei gleichbleibender Größe des Messbereichs steigt die Anzahl der zu erzeugenden Einzelmuster an. Das ergänzende Phasenshiftverfahren projiziert einen sinusförmigen Helligkeitsverlauf auf die Oberfläche. Dieser wird in meist vier Einzelprojektionen jeweils um einen Winkel von 90° verschoben. Für jeden Bildpunkt ergibt sich hieraus eine Abfolge von vier verschiedenen Intensitäten, wodurch die genaue Lage eines Bildpunktes innerhalb einer Phase zugeordnet werden kann

[Koch et al. 1998; Gühring 2002]. Binärcode- oder Graycodeverfahren sowie Phasenshiftverfahren werden häufig zur Steigerung der Genauigkeit in Kombination eingesetzt.

Da für eine präzise Messung eine Folge aus mehreren Aufnahmen notwendig ist, darf die Positionierung des Messobjekts, relativ zum Streifenprojektionssystem, während der Messung nicht variieren. Dies macht das Messverfahren empfindlich gegenüber Vibrationen. Zudem kann nur das sich aus dem Sichtfeld der Kameras und dem Projektionsfeld des Streifenprojektionssystems ergebende Schnittvolumen erfasst werden. Abgewandte Seiten, Hinterschneidungen oder komplexe Geometrien erfordern mehrere Messungen aus verschiedenen Lagen. Daher werden produktionsnah eingesetzte Streifenprojektionssystemen meist mit entsprechenden Handhabungseinrichtungen versehen. In [GOM 2011] und [Bertagnolli 2006] werden Aufbauten beschrieben, wie beispielhaft in Abbildung 9 gezeigt, wobei ein Streifenprojektionssensor an einem Roboterarm befestigt ist und somit unterschiedliche Messpositionen einnehmen kann. In Abbildung 9 ist der Roboterarm zusätzlich auf einer Linearachse befestigt, um einen größeren Messbereich zu realisieren. Fertigungsnahe Störeinflüsse werden weitgehend durch den Einsatz von Temperaturkompensation und Vibrationserkennung minimiert [GOM 2011].

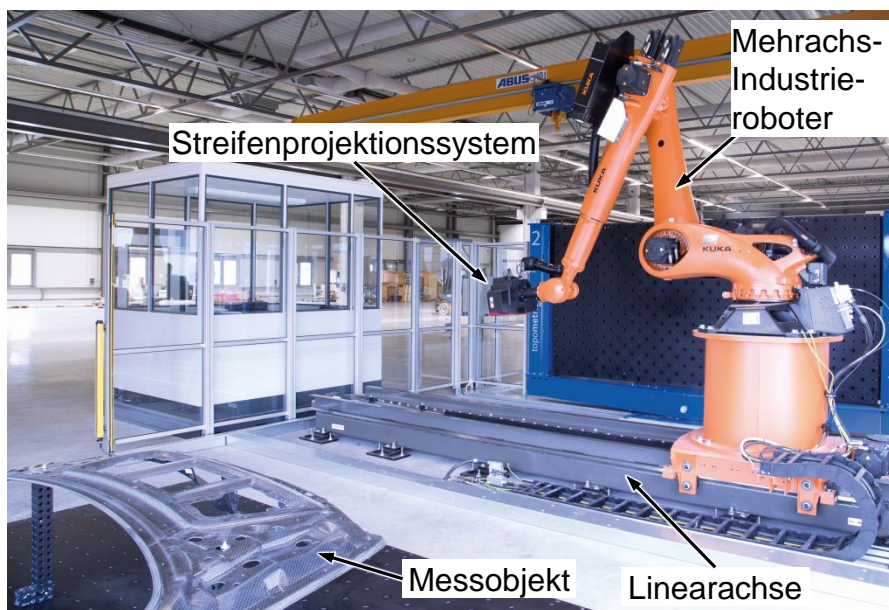


Abbildung 9: Beispielhafter Aufbau eines Streifenprojektionssystems mit zusätzlichen Handhabungseinrichtungen [Topometric 2016]

Ein ebenfalls breites Anwendungsgebiet der Streifenprojektion ist die Messung von Freiformflächen. Während in [Wolf 2004] die Inspektion großflächiger Formbauteile in der automobilen Serienproduktion beschrieben wird, wird in [Kästner et al. 2006] eine fertigungsnahe Prüfung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder vorgestellt. Für die Erfüllung von hochflexiblen Messaufgaben werden in [Driessen 2008; Ohrt et

al. 2012a] und [Ohr 2014] endoskopische Streifenprojektionssysteme beschrieben. Dabei werden die mittels DMD erzeugten Streifenmuster über Bildleiter, bestehend aus bis zu 100 000 Einzelfasern, zu einer, an den Fasern angebrachten Mikrooptik geführt und auf das Messobjekt projiziert. Die Detektion der sich einstellenden Streifenmuster erfolgt ebenfalls über einen weiteren Bildleiter mit Mikrooptik, welcher die Bildinformation auf einen CCD-Chip leitet. Durch diesen Aufbau kann der so aufgebaute Messkopf mit den beiden Bildleitern sehr flexibel und platzsparend Messdaten akquirieren.

Deflektometrie

Die Deflektometrie zählt zu den flächenhaft messenden Triangulationsverfahren und ist für die Messung von hoch reflexiven Bauteilen geeignet. Ähnlich der Streifenprojektionsmessung wird hierzu ein äquidistantes Streifenmuster verwendet, welches auf einer definierten Projektionsfläche erscheint, wie beispielsweise einem Monitor oder einer Mattscheibe. In einem definierten Abstand und Winkel ist ein Kamerasystem angebracht, welches das von der Oberfläche gespiegelte Bild des Streifenmusters erfasst. Durch eine Auswertung des Spiegelbilds kann die Oberflächengestalt des Bauteils rekonstruiert werden. Methoden zur Verbesserung der Auflösung, wie das Phasenshiftverfahren, können auch in der Deflektometrie eingesetzt werden. Es wird in einem solchen Fall von einer phasenmessenden Deflektometrie gesprochen. [Rahlves und Seewig 2009; Rapp und Stiller 2010; Seßner 2009]

Das Messverfahren wird im fertigungsnahen Umfeld insbesondere für die Inspektion großflächiger, reflexiver Bauteiloberflächen eingesetzt. Beispielhaft wird in [Olesch et al. 2014] eine Qualitätskontrolle von sphärischen Spiegelkacheln für Teleskope mittels eines deflektometrischen Messsystems beschrieben. In [Fraunhofer 2016] wird die Handhabung eines Deflektometriesystems mittels eines Industrieroboters für die Erfassung komplexer Werkstücke gezeigt.

Tiefenbildsensor

Die dreidimensionale Formerfassung durch Tiefenbildsensoren basiert auf dem Verfahren der strukturierten Beleuchtung und zählt ebenfalls zu den triangulierenden Messverfahren. Anders als Streifenprojektionssysteme benötigt eine Tiefenbildkamera keine Bildreihenfolge mit verschiedenen Mustern, sondern kann die Tiefeninformation durch ein einzelnes Muster ermitteln. Hierzu wird ein, dem Sensor bekanntes Muster, auf die Messobjektoberfläche projiziert. Eine Detektoreinheit erfasst das durch die Topologie deformierte Muster und es kann auf Basis der detektierten Mustervariation auf die Bauteilgestalt rückgerechnet werden. Da nur ein Mus-

ter für die Gewinnung der Tiefeninformation notwendig ist, kann eine dreidimensionale Echtzeitmessung realisiert werden. Derartige Systeme zur Gestenerfassung weisen in der Unterhaltungselektronik bereits ein weites Einsatzgebiet auf. [Bachfeld et al. 2011; Zhu und Donia 2013]

Im Vergleich zu anderen optischen Messverfahren besitzt die Tiefenbildtechnik ein geringeres Auflösungsvermögen, weshalb sie für dimensionelle Messaufgaben in Fertigungsnähe selten eingesetzt wird [Wujanz et al. 2011]. Jedoch eignet sich die Technik aufgrund der vergleichsweise hohen Messfrequenzen für Kontrollaufgaben, die eine geringe Genauigkeit erfordern. In [Hoffmann et al. 2011] wird die Qualitätskontrolle der Klebefuge bei der Montage von Flugzeugteilen geschildert. Abbildung 10 zeigt eine ganzheitliche Erfassung von Holzstämmen mittels einer Stereo-Kamera-Anordnung aus zwei Tiefenbildsensoren. Ebenso wird der Einsatz der Tiefenbildtechnik für eine ergonomische Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Kommunikation untersucht [Schick und Sauer 2013].

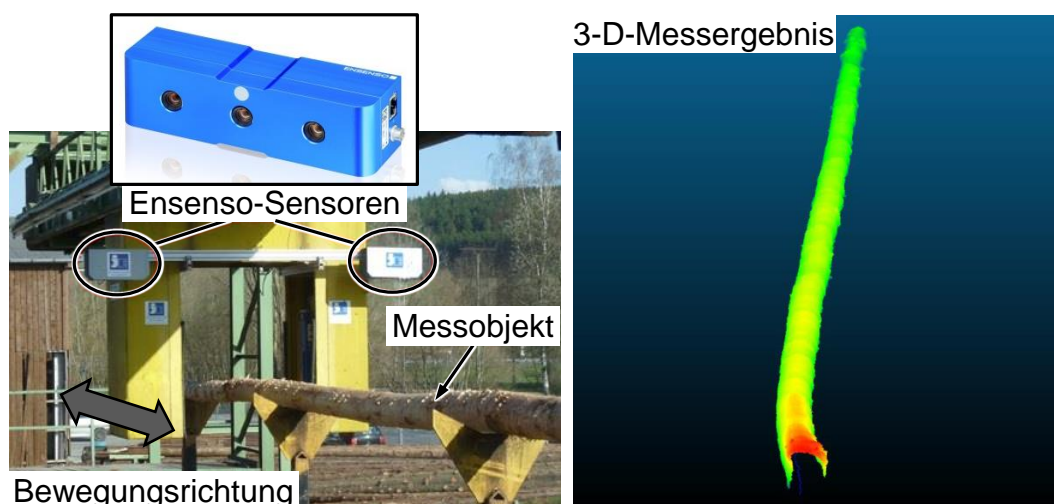


Abbildung 10: Beispielhafte Anwendung: Holzvermessung mittels Tiefenbild-Stereo-Kameras. [Ensenso 2016b]

Nahbereichsphotogrammetrie

Das Messverfahren der Photogrammetrie basiert auf dem Prinzip der passiven Triangulation. Für eine photogrammetrische Messung wird das Messobjekt von mindestens zwei Kameras aus unterschiedlichen Positionen erfasst und aus den beiden Bildern die räumliche Gestalt des Messobjekts errechnet. Eine räumliche Rekonstruktion erfordert genaue Kenntnis der äußeren Orientierung, worunter die Orientierung der Kameras zueinander sowie zum Messobjekt selbst verstanden wird. Die Orientierung kann entweder direkt durch exakte Messung der Kamerapositionen oder indirekt anhand von Referenzpunkten oder -strecken in den Aufnahmen bestimmt werden. Zusätzlich muss die innere Orientierung, welche die Lage des

Kameraprojektionszentrums in Bezug auf die Bildebene bezeichnet, bekannt sein. Mithilfe mathematischer Verfahren, wie dem sogenannten Bündelausgleich, lassen sich sowohl die innere als auch die äußere Orientierung bestimmen. Trotz der genauen Kenntnis von innerer und äußerer Orientierung ist nicht immer eine eindeutige Lösung des Korrespondenzproblems, also der fehlerfreien Identifikation korrespondierender Punktpaare in den Kameraaufnahmen möglich. Daher ist ein gängiges Verfahren zur sicheren Lösung des Korrespondenzproblems die Einbringung charakteristischer und eindeutiger Marker in den Aufnahmebereich. Hierdurch wird eine Identifikation der Marker in den Aufnahmen und damit die Bestimmung korrespondierender Punkte unterstützt. [Bauer 2007, S. 61-66; Zacher 2004]

Das aus der Geodäsie stammende Verfahren findet durch den Fortschritt in der digitalen Bildfassung und -verarbeitung zunehmend Bedeutung in Anwendungen der fertigungsnahen Messtechnik [Reulke und Döring 2006; Bauer 2007, S. 288-296]. Die Systeme der sogenannten Nahbereichsphotogrammetrie erlauben durch die geringe Anzahl notwendiger Komponenten einen sehr kompakten Aufbau, wodurch sie sich insbesondere für den mobilen Einsatz eignen. Häufig erlauben jene Messsysteme die Durchführung der Messung am Standort des Bauteils. Ein Beispiel hierfür ist die Überwachung und Kontrolle der passgenauen Montage großer Segmente, welche in [GDV 2006] beschrieben ist.

Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie nutzt zur Messdatenakquisition einen interferometrischen Aufbau sowie spektral breitbandiges Licht mit kurzer Kohärenzlänge, welches häufig mittels Halogen- oder Entladungslampen sowie LED erzeugt wird [Hering und Martin 2006, S. 233-281]. Das emittierte Weißlicht wird auf einen Strahlteiler geleitet, wo sich der Weg des Lichtes in einen Referenz- und einen Messarm teilt. Dementsprechend werden die beiden Lichtbündel auch als Referenz- und Objektstrahl bezeichnet [Bauer 2007, S. 159-168]. Am Ende des Messarms trifft der Objektstrahl auf das Messobjekt. Von dort wird das Lichtbündel wieder zurück in den Strahlteiler reflektiert [Hering und Martin 2006, S. 233-281]. Von hier aus wird der Objektstrahlengang zu einem Detektor, der häufig aus einer CCD-Kamera besteht, umgeleitet [Klocke und König 2008]. Der Referenzstrahl wird am Ende des Referenzarms von einem Referenzspiegel ebenfalls zurück in den Strahlteiler reflektiert und auf den Detektor geleitet, wo es zu einer Überlagerung des Mess- und Referenzstrahls kommt. Durch die räumliche Modulation der Objektstrahlänge, hervorgerufen durch die Oberflächenbeschaffenheit des Messobjekts, kann es dabei in Abhängigkeit von den optischen Pfadlängen zu einer Interferenz mit dem Referenz-

strahl kommen. Aufgrund der kurzen Kohärenzlänge des Weißlichts von nur wenigen Mikrometern sind Interferenzerscheinungen nur bei sehr kleinen Gangunterschieden von Mess- und Referenzstrahl sichtbar. [Rahlves und Seewig 2009]

Für eine flächenhafte Topographieerfassung wird der vertikale Abstand zwischen Messobjekt und Messsystem variiert und das Interferenzmuster für jedes Detektorpixel einzeln ausgewertet. Eine Auswertung aller Muster erlaubt einen Rückschluss auf die Oberfläche des Messobjekts. Dabei stehen verschiedene, sich in der erzielbaren Genauigkeit unterscheidende Verfahren, wie beispielsweise die Berechnung einer einhüllenden Kurve des Interferenzmusters oder die damit kombinierte Phasenauswertung, bereit. [Rahlves und Seewig 2009; Hering und Martin 2006, S. 233-281]

Der im Vergleich zu anderen Messverfahren kleine Messbereich und die dabei erreichte hohe Genauigkeit prädestinieren das Messverfahren für den Einsatz in der Inspektion von Mikrobauanteilen und -systemen. Die Weißlichtinterferometrie ist nach [Schwarz 2011] das am häufigsten eingesetzte Messverfahren für eine ganzheitliche Prüfung filigraner Bauteile und Strukturen, wie sie meist im Bereich der Elektro- und Medizintechnik zu finden sind. In [Fleischle et al. 2013] wird ein Lösungsansatz für die prozessintegrierte Inspektion von Schneidkanten an Diamantwerkzeugen vorgestellt. Auf diese Weise kann der Verschleiß detektiert und, wenn notwendig, eine Nachbearbeitung eingeleitet werden. Weit verbreitet ist die Weißlichtinterferometrie auch im Bereich der Analyse räumlicher Oberflächenkennwerte. Durch die äußerst hohe vertikale Auflösung können auch sehr feine Strukturen in vertikaler Richtung detailliert erfasst werden. [Völklein und Zetterer 2006; Hering und Martin 2006, S. 233-281].

2.2.5 Röntgen-tomografische Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik

Volumenhafte Messverfahren kommen in der fertigungsnahen Messtechnik vorwiegend bei der zerstörungsfreien Prüfung von Werkstoffen, Bauteilen oder Verbindungselementen zum Einsatz [Ilschner und Singer 2005]. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt bei der holistischen und dimensionellen Erfassung komplexer Werkstücke, für welche sich aus dem Bereich der volumenhaften Verfahren insbesondere die Röntgen-Computertomographie eignet. Daher beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf dieses Messverfahren. Detaillierte Informationen über weitere volumenhafte Verfahren im fertigungsnahen Einsatz können aus [Atzlesberger et al. 2013] sowie [Putz et al. 2013] entnommen werden.

Die Röntgen-Computertomographie hat sich aus dem Bereich der Medizin kommend zu einem Messverfahren für die industrielle Anwendung entwickelt, wobei das Grundprinzip beibehalten wird. Eine Röntgen-Quelle emittiert Strahlung, welche das

Messobjekt durchdringt. Abhängig von der lokalen Dichte und elementaren Zusammensetzung des Objektes wird ein bestimmter Teil der Röntgen-Strahlung absorbiert. Ein Matrixdetektor registriert, wie viel Strahlung nach dem Durchdringen des Messobjekts noch vorhanden ist und setzt diese Werte in Relation zur emittierten Strahlung. Hierfür werden spezielle Algorithmen zur Rekonstruktion des durchstrahlten Objektes, wie beispielsweise in [Feldkamp et al. 1984] beschrieben, eingesetzt. Für die Messung wird entweder das Emitter-Detektor-Paar um das ruhende Messobjekt oder das Messobjekt zwischen Emitter und Detektor selbst rotiert. Dadurch kann das Messobjekt aus verschiedenen Richtungen durchstrahlt und aus den Aufnahmen dreidimensionale Geometriedaten, sowohl von äußeren als auch inneren Merkmalen, des Messobjekts ermittelt werden. Dies unterscheidet die Röntgen-Computertomographie von dem konventionellen Röntgen-Verfahren. Durch die Möglichkeit, dreidimensionale Modelle zu erzeugen, können sowohl komplexe Merkmale, wie beispielsweise Hinterschneidungen, aber auch innenliegende Strukturen und Defekte, ganzheitlich erfasst und geprüft werden. [Kruth et al. 2011; Alkadhi et al. 2011, S. 4-13; Krämer 2012]

Der Einsatz der Röntgen-Computertomographie im fertigungsnahen Umfeld geht, ähnlich den optisch messenden Verfahren mit der Etablierung neuer Fertigungstechnologien und -verfahren einher. Durch die Herstellung immer komplexerer Bauteile nimmt der Bedarf einer schnellen und möglichst fertigungsnahen Qualitätsprüfung zu. Insbesondere additive Fertigungsverfahren erlauben eine große Freiheit bei der Bauteilauslegung, erfordern aber zugleich eine ganzheitliche Inspektion. Die Röntgen-Computertomographie ist in der Lage, bei derartigen Prüfaufgaben alle Merkmale, unabhängig ihrer Lage, zu detektieren und auszuwerten. [Schmitt und Isenberg 2014]

Ein Nachteil, welcher die Verwendung von Röntgen-Strahlung mit sich bringt, ist die daraus resultierende Gesundheitsgefährdung für den Menschen [Alkadhi et al. 2011, S. 198-200]. Daher müssen spezielle Schutzmaßnahmen getroffen werden, wie beispielsweise Einhausungen aus Blei, um eine Gefährdung von Personen auszuschließen. Ebenso setzt die Prüfung von Messobjekten mit verbauten elektronischen Komponenten der Röntgen-Computertomographie Grenzen. Für das vollständige Durchstrahlen des Messobjekts ist eine gewisse Mindestenergie der Strahlung notwendig. Allerdings können ab einem bestimmten Energielevel elektronische Bauteile beschädigt werden [Gevatter und Grünhaupt 2006, S. 363-406]. Bewegt sich dieses Energielevel unterhalb der Mindeststrahlungsenergie, ist es nicht möglich ein vollständiges Volumenmodell des Bauteils zu generieren. Zudem ist die Prüffähigkeit eines Bauteils vom verwendeten Werkstoff anhängig. Je dichter der

Werkstoff und je voluminöser das Bauteil, desto mehr Leistung ist von einer Computertomographie-Anlage erforderlich, um ein vollständiges dreidimensionales Abbild generieren zu können.

2.2.6 Multisensor-Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik

Der Trend, die immer komplexer werdenden Bauteile ganzheitlich und möglichst nahe am Entstehungsort zu prüfen, bringt konventionelle Messverfahren mitunter an deren Leistungsgrenze. Werden die vielfältigen Einzelmessaufgaben zu einer Gesamtinspektion zusammengefasst, kann es mitunter zu gegenläufigen Anforderungen an die Messtechnik kommen. Beispielsweise können eine hohe Auflösung und ein großer Messbereich bei gleichzeitig stark variierenden Reflexionseigenschaften gefordert sein. Ein einzelnes Messsystem erfüllt alle Anforderungen nur teilweise und somit kann es zu Kompromisslösungen kommen. Multisensor-Messsysteme treten in diesen Fällen an, um derartige Kompromisse zu vermeiden. Hierbei werden die Einzelmessaufgaben betrachtet und für jede davon der am besten passende Sensor ausgewählt. Durch eine Kombination der für die Einzelprüfung bestgeeigneten Sensoren können im Gesamtprüfumfang scheinbar widersprechende Anforderungen umgangen und eine für die Erfüllung jeder Einzelmessaufgabe geeignete Ideallösung entwickelt werden. [Krämer et al. 2011; Weckenmann und Krämer 2012; Hocken und Pereira 2012]

Die Beispiele für Lösungsansätze zur fertigungsnahen Qualitätsprüfung mittels Multisensor-Systemen sind so vielfältig und unterschiedlich, wie die zu prüfenden Produkte und Merkmale. In [Effenberger et al. 2013] wird ein Konzept für ein Inline-Messsystem zur Inspektion von Faserverbundbauteilen beschrieben. Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle helfen, die gegenüber konventionellen Stahlkonstruktionen um ein Vielfaches höhere Herstellungskosten, durch eine Reduktion des Ausschusses zu senken. Hierfür wird ein Laserschnittverfahren mit verschiedenen Röntgen-tomografischen Verfahren kombiniert. Dabei übernimmt das optische Triangulationsmessverfahren die schnelle äußere Inspektion bei allen gefertigten Bauteilen. Werden Abweichungen oder Hinweise auf strukturelle Defekte erkannt oder sind bestimmte Segmente des Bauteils beispielsweise wegen stark reflektierenden Klarlackschichten optischen nicht zu erfassen, wird die Prüfung mit weiteren Verfahren eingeleitet. Wirbelstromverfahren werden typischerweise für die Erfassung der Faserorientierung sowie Faserbrüchen eingesetzt, während Ultraschallverfahren Risse und Delaminationen detektieren. Durch die Röntgen-Computertomographie als volumenhaftes dimensionelles Messverfahren kann das Faserverbundbau-

teil ganzheitlich erfasst und einer prozessintegrierten, qualitativen Prüfung unterzogen werden, um damit mögliche innenliegende Defekte in ihrer Größe, Form und Position zu bestimmen.

Ähnlich hierzu wird in [Lanza et al. 2013] der Wandel der Messtechnik, weg aus den Standardlösungen, hin zu einer bauteilangepassten mehrskaligen Multisensor-Prüfung beschrieben. [Keck et al. 2014] erläutert ein flexibles, multisensorisches wie auch multiskaliges Messsystem für eine ganzheitliche dreidimensionale Inspektion von Bauteilen aus Kleinserienproduktionen. Eine Entwicklung und Realisierung eines Inline-Messsystems, bestehend aus dem Lichtschnittverfahren, wie auch dem Schattenwurfverfahren zur Prüfung von extrudierten Halbzeugen, wird in [Bernstein 2011] beschrieben.

Die Herausforderung bei fertigungsnahen Messungen mittels Multisensor-Systemen ist die große Datenmenge, welche schnell erfasst, die Daten in Beziehung zueinander gesetzt und ausgewertet werden müssen [Effenberger et al. 2013].

2.3 Verbesserungspotenziale für holistische Messungen

Ausgehend von den präsentierten messtechnischen Grundlagen und aktuellen Entwicklungen können weitere Verbesserungspotenziale für eine ganzheitliche messtechnische Inspektion blechmassivumgeformter Bauteile abgeleitet werden. Hierzu werden die Anforderungen der Blechmassivumformung mit den Möglichkeiten etablierter Messsystemlösungen verglichen.

In der Regel sind die Messobjekteigenschaften wie beispielsweise die Oberflächenbeschaffenheit bekannt, da die Messobjekte mittels bereits erforschter Fertigungstechnologien gefertigt werden. Diese Messobjekteigenschaften können bei der Auslegung von Messsystemen für den fertigungsnahen oder fertigungsintegrierten Einsatz berücksichtigt werden. Im Gegensatz hierzu sind die Eigenschaften blechmassivumgeformter Bauteile Gegenstand aktueller Forschungen und daher noch nicht in vollem Umfang bekannt. Eine optimale Auslegung von Messsystemen auf Messaufgaben ist nur durch eine detaillierte Kenntnis der messtechnisch relevanten Eigenschaften der Messobjekte möglich.

Zudem stellen die neuen Möglichkeiten der Blechmassivumformung hinsichtlich der Bauteilgestaltung die Messtechnik vor neue Herausforderungen. Bauteile mit Merkmalen variierender Größe erfordern eine Inspektion aller relevanten Merkmale mit einer, den Merkmalsgrößen angepassten, Messsystemauflösungen. Darüber hinaus ist eine hohe Flexibilität der eingesetzten Messsysteme notwendig, um der großen Variantenvielfalt zu entsprechen. Optische wie auch Röntgen-tomografische

Messverfahren zeichnen sich durch eine die Akquise einer Vielzahl von Messpunkten in kurzer Zeit aus, ohne dabei in mechanische Wechselwirkung mit dem Messobjekt zu treten. Für die Inspektion der Makrogestalt blechmassivumgeformter Bauteile sind Messsysteme mit ausreichendem Messbereich und Auflösungsvermögen verfügbar und bereits für ähnliche Messaufgaben im fertigungsnahen Bereich etabliert. Jedoch weist kein am Markt verfügbares System, basierend auf optischen oder Röntgen-tomografischen Verfahren, das geforderte Auflösungsvermögen bei dem gleichzeitig notwendigen Messbereich auf, um neben der Makrogestalt auch die Anforderungen an die fertigungsnahen Inspektion der Nebenformelemente zu erfüllen. Im Bereich der optischen Messverfahren existieren bereits Lösungen für die Kombination mehrerer Messsysteme, um damit den Messbereich bei gleichbleibend hoher Auflösung zu erweitern und dabei mögliche Abschattungen zu beseitigen. Jedoch stellen diese Systeme nach derzeitigem Stand keine adäquate Messsystemlösung dar, da diese nur für vordefinierte Bauteile mit wenig divergierenden Merkmalskategorien verwendet werden können. Die erreichbare Flexibilität ist noch erheblich eingeschränkt.

Ausgewählte Messsysteme aus dem Bereich der berührenden Messverfahren, wie beispielsweise taktile Koordinatenmessgeräte, erfüllen die Anforderungen an Auflösungsvermögen, Messbereich und Flexibilität. Allerdings erfordern diese Messsysteme verfahrensbedingt durch die punktweise Messdatenakquisition in Einzelpunkt- und Scanmessungen längere Prüfzeiten, als optische Messverfahren. Für die Optimierung der Prüfzeit ist eine Anpassung des Messsystems auf die Messaufgabe erforderlich, wie am Beispiel von Mehrstellenmessgeräten gezeigt werden kann. Eine derartige Auslegung schränkt wiederum die Flexibilität des Messsystems ein.

Mit Multisensor-Messgeräten kann ein Ausgleich der Defizite unterschiedlicher Messsysteme und -verfahren durch Kombination sich ergänzender Sensoren erreicht werden. Für die Konzeption eines flexibel einsetzbaren Multisensor-Messgeräts zur ganzheitlichen und fertigungsnahen Messung blechmassivumgeformter Bauteile existiert noch nicht das Grundlagenwissen.

3 Ziele und wissenschaftlicher Ansatz

Die beschriebenen Verbesserungspotenziale bilden die Grundlage für die Zielstellung der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit. Im Weiteren werden der entwickelte methodische Ansatz als grundsätzliches Vorgehen für die Erreichung der Zielstellung sowie die bestehenden wissenschaftlichen Aufgaben erläutert.

3.1 Zielsetzung

Neu- und weiterentwickelte Fertigungstechnologien zeichnen sich meist durch eine Kombination von Verfahrensschritten aus, um in verkürzten Prozessketten Bauteile mit unterschiedlichen Merkmalen variierender Komplexität zu erzeugen. Für eine sichere Qualitätskontrolle und -regelung können hierbei keine Zwischenerzeugnisse untersucht werden. Vielmehr sind die Bauteile nach Abschluss des Herstellungsprozesses ganzheitlich zu erfassen. Herausfordernd sind hierbei die gesteigerten Prüfumfänge bei gleichzeitig erhöhter Variantenvielfalt und meist ähnlichen Prüfzeiten.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit war und ist daher die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen zur Auslegung von Messsystemen für derartig komplexe neu- und weiterentwickelte Fertigungstechnologien. Mit einer, auf die Charakteristika von Herstellungsprozessen wie auch -erzeugnissen angepassten holistischen Messdatenakquisition wurde die Basis für eine sichere Prozess- und Bauteilcharakterisierung gelegt. Wesentlich hierfür ist der Einsatz von mehreren, jeweils für bestimmte Bauteilmerkmale adäquaten Sensoren in einem sogenannten Multisensor-Messsystem. Die zentrale wissenschaftliche Herausforderung für die Kombination und Fusion der Messdaten unterschiedlicher Sensoren mit variierenden Messbereichen und -auflösungen war die Entwicklung eines geeigneten Kalibrierverfahrens. Eine Bündelung der geschaffenen Grundlagen erfolgte in Form der Entwicklung und Realisierung eines prototypischen Messsystems. Aufgrund des erheblichen konstruktiven Aufwands einer Inline-, In-Situ- oder In-Prozess-Auslegung des Messsystems ohne gleichzeitige Generierung neuer grundlagenwissenschaftlicher Erkenntnisse wurde hiervon abgesehen und eine fertigungsnahe Auslegung bevorzugt. Gleichwohl waren auch in dieser Auslegungsform die relevanten Anforderungen prozessnäherer Bauformen zu berücksichtigen, um eine gute Übertragbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die Realisierung der Zielsetzung wurde am Beispiel der neuen Fertigungstechnologie der Blechmassivumformung erarbeitet. Im Fokus der Messungen stehen dabei

die für die Blechmassivumformung charakteristischen und für die Messtechnik besonders herausfordernden Nebenformelemente. Für die Erfassung der Bauteilgrobgestalt konnten bewährte Sensoren verwendet werden. Hauptgründe für die herausfordernde Inspektion der Nebenformelemente sind einerseits der in den weiteren Verbesserungspotenzialen identifizierte Mangel an bewährten Messsystemen, andererseits die Wichtigkeit dieser funktionstragenden Merkmalsklasse für die korrekte Erfüllung der Bauteilfunktion. Zentrale Aufgabe der entwickelten Messverfahren ist die Erfassung dimensioneller Merkmale, wobei eine Erweiterbarkeit um zusätzliche Sensoren, beispielsweise für die Erfassung der Topographie und davon abgeleiteter Parameter, vorzusehen war. Die globale Zielstellung untergliedert sich in mehrere Teilziele:

- Definition relevanter Bauteilmerkmale und Festlegung der Messaufgabe.
- Analyse der für die Messtechnik relevanten Eigenschaften blechmassivumgeformter Bauteile und Auswahl geeigneter Kenngrößen zur Beschreibung.
- Auswahl geeigneter Sensoren und Entwicklung eines fertigungsnahen Messaufbaus entsprechend der Anforderungen der Blechmassivumformung unter Beachtung der Flexibilität wie auch Erweiterbarkeit.
- Erarbeitung eines Kalibrierverfahrens für Multisensor-Messungen zur sicheren und robusten Identifikation der Sensorausrichtung und Berechnung notwendiger Transformationsmatrizen für eine Fusion multisensorieller Datensätze.
- Praktischer Nachweis der Funktionsfähigkeit des mehrskaligen Multisensor-Messsystems und Nachweis der damit erzielten Vorteile gegenüber konventionellen Messungen mit Einzelsensoren.

3.2 Methodischer Ansatz und wissenschaftliche Aufgaben

Zur systematischen und strukturierten Entwicklung von Lösungen kommt der in Abbildung 11 oben dargestellte und speziell für die vorliegende Zielstellung ausgearbeitete methodische Ansatz zum Einsatz. Als Basis hierfür dient die Norm [VDI 2221:1993-05], welche seit Beginn der 1990er Jahre häufig im Bereich der Softwareentwicklung eingesetzt und sich mittlerweile auch im Maschinenbau etabliert hat, um ein methodisches Vorgehen zu unterstützen [Feldhusen und Grote 2013; Holzbaur 2007]. Wissenschaftliche Fragestellungen bezogen auf die Zielstellung, welche es durch den methodischen Ansatz zu beantworten gilt, sind in Abbildung 11 unten aufgeführt.

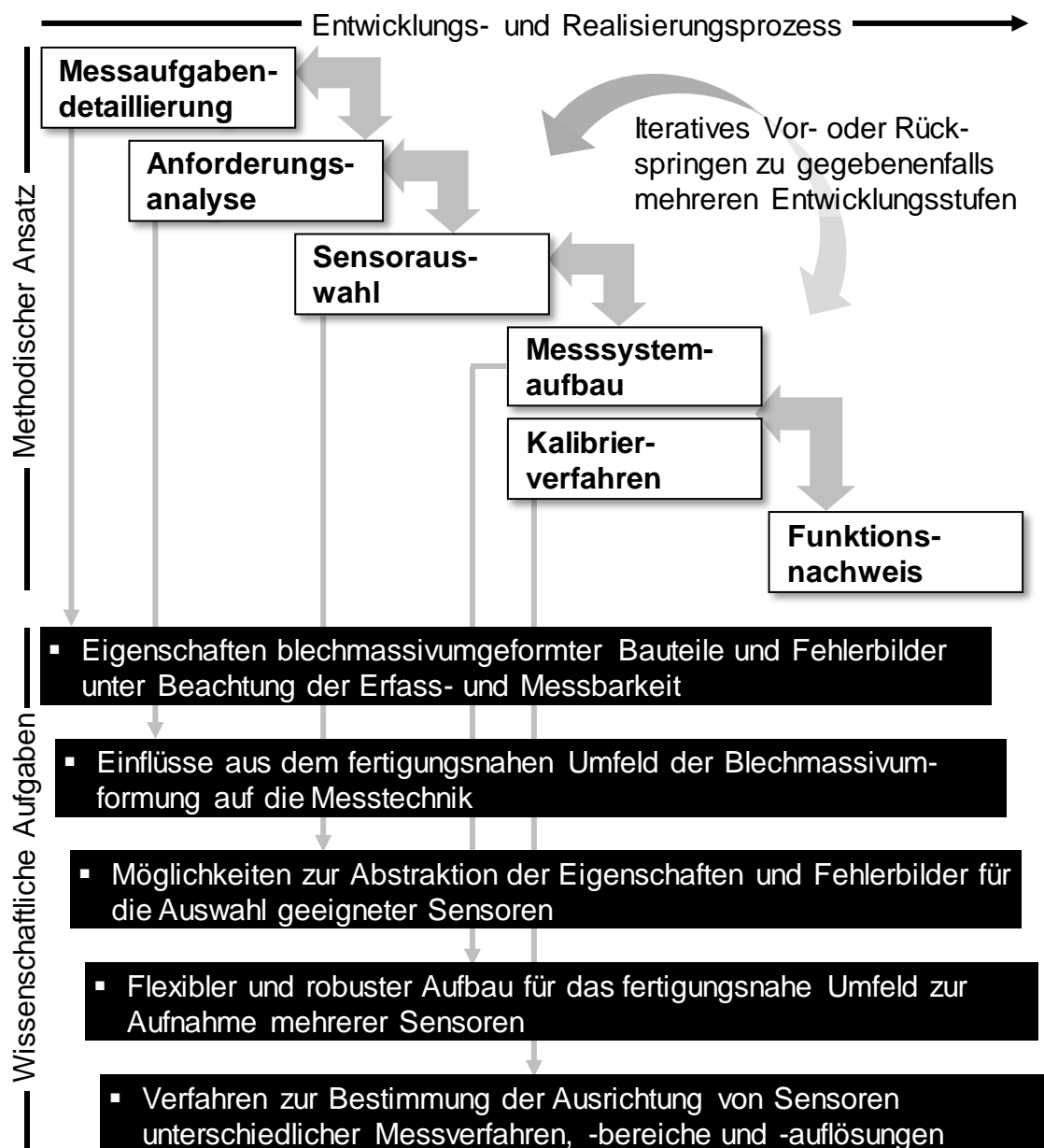


Abbildung 11: Methodischer Ansatz und wissenschaftliche Aufgaben

In einem ersten Schritt wurden die durch die Blechmassivumformung motivierten Messaufgaben detailliert. Ausgehend von der Begriffsklärung einer holistischen Messung konnten Anforderungen für deren Durchführung abgeleitet werden. Eine durchgeführte eingehende Analyse blechmassivumgeformter Bauteile beinhaltet die Identifikation typischer Merkmalstypen und -größen der zu messenden Merkmale, charakteristische Fehlerbilder der Fertigungstechnologie sowie die Oberflächeneigenschaften der Bauteile. Aus diesen Informationen konnten Messaufgaben abgeleitet werden, welche durch die entwickelte Messsystemlösung zu erfüllen sind. Zusätzlich konnte ein adäquates Normal ausgewählt werden, welches vergleichbare Messungen, wie an den blechmassivumgeformten Bauteilen erlaubt, um messtechnische Lösungen an bekannten und kalibrierten Merkmalen evaluieren zu

können. Die ermittelten Messaufgaben bildeten zusammen mit einer eingehenden Untersuchung des fertigungsnahen Umfelds die Grundlage für die im zweiten Schritt erfolgte Anforderungsanalyse, die Grundlage für die Erarbeitung von Lösungsvarianten ist.

Neben der in einem dritten Schritt durchgeführten Sensorauswahl für die prototypische Realisierung stand insbesondere die Entwicklung eines flexiblen, erweiterbaren, aber auch robusten, an die Einflüsse der Fertigungsumgebung angepassten Aufbaus im vierten Schritt im Fokus. Zusätzlich zum Aufbau der Hardware des Messsystems war die Entwicklung eines angepassten Kalibrierverfahrens zur Bestimmung der Sensorausrichtungen in einem einheitlichen Koordinatensystem im fünften Schritt die wichtigste Entwicklungsstufe. Ohne ein derartiges Verfahren können die mehrskaligen Messdaten nur getrennt ausgewertet werden.

In abschließenden Messreihen wurde in einem letzten Schritt sowohl die Funktionsfähigkeit der Teillösungen aufgezeigt als auch mehrskalige Messungen verschiedener Merkmale durchgeführt. Als wissenschaftliches Ergebnis dieser Arbeit liegen neben einem prototypischen Messsystem für die holistische Erfassung blechmassivumgeformter Bauteile unter fertigungsnahen Bedingungen die theoretischen Erkenntnisse für die Lösung derartiger Messaufgaben vor. Diese Erkenntnisse können als Grundlage für die Weiterentwicklung von Messeinrichtungen für den industriellen Einsatz genutzt werden.

Der methodische Ansatz sieht Iterationen zwischen den Entwicklungsstufen vor, wenn Modifikationen oder Optimierungen erforderlich sind. Um Messinformationen einheitlich zu speichern und damit fehleranfällige Redundanzen wie auch mögliche Schnittstellenfehler zu vermeiden, wurde für diese Arbeit für die Speicherung von Messdaten das STL-Format als Standard festgelegt. Für die Handhabung und Auswertung von Messdatensätzen wird auf das Softwarepaket PolyWorks 2014 mit dem Unterprogramm IMInspect V14 der kanadischen Firma InnovMetric Software Inc. zurückgegriffen. Im Sinne der Durchgängigkeit der Lösungen wurde für Sensoren, die firmenspezifische Dateiformate nutzen, eine Dateikonvertierung vorgesehen und der Gebrauch der proprietären Software der Gerätehersteller auf ein nötiges Minimum reduziert.

4 Spezifikation von Messaufgaben an blechmassivumgeformten Bauteilen

Die Klärung der zu erfüllenden Messaufgaben und Rahmenbedingungen war der initiale Schritt bei der Entwicklung der neuen Messsystemlösung. Daher wurden allgemeine Rahmenbedingungen für eine holistische und fertigungsnahe Messung blechmassivumgeformter Bauteile festgelegt.

4.1 Definition der „holistischen Messung“

Die Bedeutung des Adjektivs „holistisch“ wird nach [Duden 2006, S. 511; Stichwort Holismus] als „ganzheitlich“ beschrieben. Unter diesem Wort wiederum wird verstanden, etwas auf eine Ganzheit (ein gesamtes Wesen), über einzelne Fächer oder Ähnliches hinweg zu beziehen, so dass ein größerer Zusammenhang dargestellt werden kann [Duden 2006, S. 431; Stichwort ganzheitlich].

Ausgehend von diesen Begriffsbedeutungen wird in der Messtechnik von „holistischen Messungen“ gesprochen, wenn die Gestalt eines Messobjektes im Gesamten (oder eben ganzheitlich) erfasst wird. Da dies mit nur einem Messsystem häufig nicht in ausreichend kurzer Zeit oder in adäquater Qualität möglich ist, geht mit der Begrifflichkeit zumeist eine Sensor- und Informationsfusion einher, welche einen Teilaspekt „holistischer Messungen“ abdeckt. Es wird angenommen, jedes an der Messung beteiligte System erfasst prinzipbedingt nur einen Teil der gesamten Messobjektmerkmale, von denen auf damit verbundene Prozesseigenschaften geschlossen werden kann. Durch eine Fusion aller erhobenen Messdaten kann somit mehr Wissen über das Messobjekt und den zugrundeliegenden Fertigungsprozess gewonnen werden, als dies mit einem Messsystem möglich wäre. [Imkamp und Berthold 2012; Heizmann et al. 2009]

Durch die Nutzung verschiedenartiger Informationsquellen beziehungsweise Messsysteme wird auf diese Weise ein präziseres Wissen über Messobjekte und beteiligte Prozesse gewonnen, oft in kürzerer Zeit und zu geringeren Kosten. Die Summe der gewonnenen Informationen aus den fusionierten Daten übersteigt dabei zumeist die Leistungsfähigkeit von einzelnen Messsystemen. [Ruser und Puente León 2006]

Weiterreichende, relevante Definitionen und Beschreibungen holistischer oder ganzheitlicher Messungen sind in der aktuellen Literatur nicht verfügbar. Ebenfalls findet diese Thematik in Normen und Richtlinien bisher keine Erwähnung. Daher wird, unter Berücksichtigung der aufgeführten Literaturquellen, die Beschreibung einer holistischen Messung, angepasst an blechmassivumgeformte Bauteile, wie nachfolgend vorgenommen:

- Eine holistische Messung blechmassivumgeformter Bauteile liegt vor, wenn ausreichend viele Datenpunkte für die vollständige Beschreibung aller betrachteten Merkmale vorhanden sind. Eine Übersicht über die empfohlene Mindestanzahl an Messpunkte für ausgewählte Merkmale kann aus [BS 7172:1989-07] sowie [Weckenmann 2012, S. 253-286] entnommen werden.

Zudem gilt es für holistische Messungen die Strukturauflösung zu berücksichtigen. Diese ist definiert als kleinste Struktur, die noch dimensionell gemessen werden kann und ergibt sich aus der Merkmalsgröße [Fleißner et al. 2015]. Darüber hinaus sind die Grenzwellenlängen zur Trennung von Form, Welligkeit und Rauheit zu berücksichtigen. Eine ausreichende Messpunktanzahl muss auch nach der Aufspaltung der Messinformation in die verschiedenen Gestaltabweichungsarten vorhanden sein.

- Als „Lücken“ im Messdatensatz werden Abschnitte bezeichnet, welche keine ausreichende Messpunktanzahl für die korrekte Beschreibung des jeweiligen Merkmals aufweisen. Eine Mindestdichte an Messpunkten wird vorausgesetzt.
- Unter Informationsfusion wird die Zusammenführung von Messdatensätzen unterschiedlicher Systeme und der darin enthaltenen Messinformationen verstanden. Wenngleich eine derartige Fusion nicht für alle Messaufgaben zwingend erforderlich ist, sind dennoch entsprechende Abläufe vorzusehen und optional ausführbar.

4.2 Eigenschaften blechmassivumgeformter Bauteile

Ziel einer ganzheitlichen Messung blechmassivumgeformter Bauteile ist die Erfassung aller betrachteten Merkmale. Für die Untersuchung messtechnisch relevanter Bauteileigenschaften steht die Oberflächenbeschaffenheit des zu messenden Merkmals im Fokus.

Bei Umformprozessen der Blechmassivumformung findet in ihrer aktuellen Entwicklungsstufe teilweise eine manuelle Schmiermittelzugabe statt, wodurch eine Unterstützung des Materialflusses durch veränderte Reibeigenschaften erreicht werden kann [Landkammer et al. 2015]. Menge und Art des Schmiermittelauftrags sind Gegenstand aktueller Forschung. Sichere Informationen für die Auslegung der Messtechnik können hierzu nicht herangezogen werden. Daher wurden bisher nur die Eigenschaften trockener, nicht mit Schmiermittel behafteter Bauteile in die Entwicklung einer messtechnischen Lösung einbezogen.

4.2.1 Parameterauswahl

Für die Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit werden die, in [DIN EN ISO 25178-2:2012-09] aufgeführten Flächenparameter herangezogen. Diese lassen sich, wie in Abbildung 12, in fünf Kategorien einteilen. Handlungsempfehlungen, für welche Aufgaben die Parameter der jeweiligen Kategorien einzusetzen sind, werden in der Norm nicht gegeben [Seewig et al. 2011]. In der Fachliteratur finden sich verschiedene Beispiele, in welchen die Parameter sowie deren mögliche Anwendungsgebiete diskutiert werden. Exemplarisch können hier [Hartmann 2015; Seewig et al. 2011] und [Michigan Metrology 2014] genannt werden.

DIN EN ISO 25178-2:2012-09				
Höhenparameter	Räumliche Parameter	Hybridparameter	Funktionen mit zusammenhängenden Parametern	Mischparameter

Abbildung 12: Parametereinteilung nach [DIN EN ISO 25178-2:2012-09]

Eine bereits bewährte Verwendung bestimmter Parameter für eine Aufgabe, ähnlich der Vorliegenden ist jedoch auch in der Fachliteratur nicht beschrieben. Daher fand auf Grundlage empirischer Vorversuche die Bewertung der Oberflächeneigenschaften mit ausgewählten Höhenparametern statt. Für die nachfolgend, auf Basis der [DIN EN ISO 25178-2:2012-09] genannten Kennwerte stellt der Parameter A den Definitionsbereich dar, während z für die jeweils gemessenen Höhenwerte steht.

S_a : Mittlere arithmetische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| \, dx \, dy \quad (4.1)$$

S_a stellt eine flächenhafte Erweiterung des häufig verwendeten linienhaften R_a -Kennwerts dar. In der Praxis wird S_a meist für die Bewertung maschinell bearbeiteter Oberflächen eingesetzt, weshalb der Kennwert für die Betrachtung ausgewählt wird [Michigan Metrology 2014].

S_q : Mittlere quadratische Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) \, dx \, dy} \quad (4.2)$$

Der Kennwert S_q ähnelt in der Statistik der Standardabweichung und ist dadurch ein genereller wie auch weit verbreiteter Parameter [Blunt und Jiang 2003]. Häufig wird S_q für die Charakterisierung optischer Oberflächen eingesetzt [Michigan Metrology 2014].

Eine in [Lechthaler und Bauer 2006] durchgeführte Korrelationsanalyse zwischen den in [DIN EN ISO 25178-2:2012-09] definierten Flächenparametern weist für die Korrelation zwischen S_a und S_q einen Korrelationskoeffizienten 1,00 auf. Hochkorrelierende Parameter liefern demnach die gleiche statistische Aussage und können als Stellvertreter oder Referenz zueinander angesehen werden. Folglich liefern zwar S_a und S_q unterschiedliche Ergebnisse, jedoch werden keine Vorteile bei Betrachtung beider Parameter hinsichtlich der Interpretierbarkeit der Daten generiert. Der Parameter S_q wird daher nicht weiter in die Untersuchungen einbezogen.

S_z : Höhe der skalenbegrenzten Oberfläche

$$S_z = S_p + (-S_v) \quad (4.3)$$

Mit: S_p : größter Wert der Spitzenhöhe

S_v : größter Wert der Senkenhöhe

Der Kennwert S_z gibt den maximalen Höhenunterschied im betrachteten Messdatensatz wieder. Hierzu wird die Differenz zwischen dem „tiefsten Tal“ S_v und der „höchsten Höhe“ S_p des Datensatzes ermittelt. Im Gegensatz zu S_a unterliegt S_z einer hohen Empfindlichkeit gegenüber Ausreißern. Der Korrelationskoeffizient zwischen S_z und S_a beträgt nach [Lechthaler und Bauer 2006] 0,57. Somit kann durch Hinzuziehen von S_z ein Informationsgewinn generiert werden.

Die Vielzahl an gemessenen Höhenparametern werden noch durch weitere mathematische Kennwerte zur einfacheren Interpretation aufbereitet. Mit der Bestimmung des 5. Perzentils und 95. Perzentils einer Messreihe wird die Betrachtung eines Intervalls ermöglicht, das sich über 90 % aller Messwerte erstreckt und gleichzeitig Ausreißer ausschließt. Ähnlich hierzu weist der Interquartilbereich IQR üblicherweise das Intervall zwischen dem 2. Quartil (entspricht dem 25. Perzentil) und dem 3. Quartil (entspricht dem 75. Perzentil) einer Messreihe aus. In dieser Spanne sind 50 % aller Messwerte zu finden sowie der Median, der den Wert mit der größten Häufigkeit einer Messreihe wiedergibt. Durch den Vergleich der Interquartilbereiche mit gleichzeitiger Betrachtung der 5. und 95. Perzentile kann auf die Messwertstreuung geschlossen werden. Gleichzeitig sind diese Parameter für alle Datenverteilungen valide. Im Gegensatz dazu erfordert die Standardabweichung sowie der Mittelwert normalverteilte Daten, um valide Aussagen zu ermöglichen.

4.2.2 Oberflächeneigenschaften

Bei augenscheinlicher Betrachtung blechmassivumgeformter Bauteile können, wie aus Abbildung 13 ersichtlich, unterschiedliche Zonen auf Basis des Reflexionsverhaltens festgestellt werden. Diese sind auf den Umformprozess und den damit ver-

bundenen Effekten wie lokale Oberflächenglättungen zurückzuführen. Durch visuelle Analyse einer Vielzahl von Bauteilen können vier, für die optische Messtechnik relevante Zonen definiert werden. [Loderer et al. 2015]

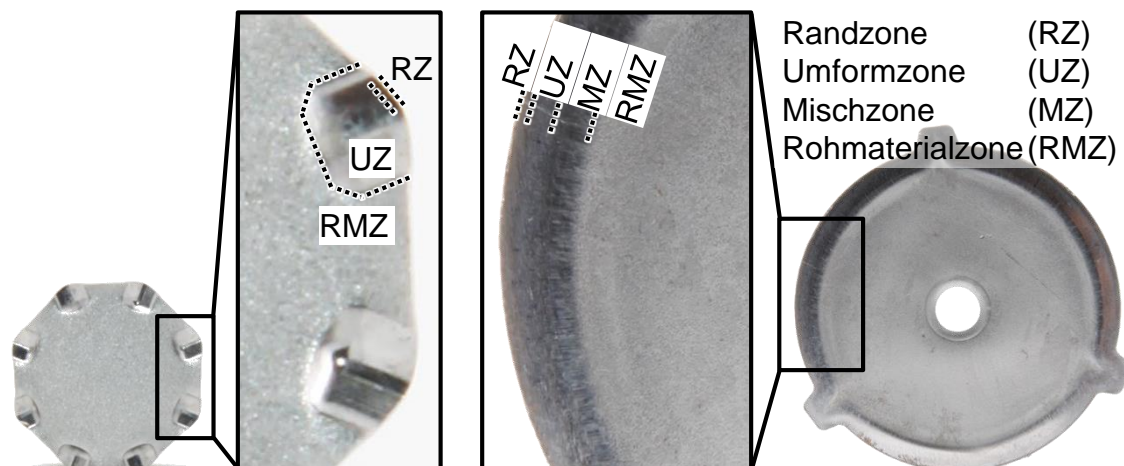


Abbildung 13: Oberflächen blechmassivumgeformter Bauteile

Für eine detaillierte Untersuchung wurden die Höhenparameter S_a und S_z an Bauteilen aus den Werkstoffen DC04 und DP600 durch insgesamt 376 Messfelder mithilfe eines TalySurf CCI1000 Weißlichtinterferometers der Taylor Hobson Ltd. ermittelt. Dabei beträgt die Messfeldgröße $0,91 \times 0,91 \text{ mm}^2$ mit einer lateralen Ortsauflösung von $0,89 \mu\text{m}$ und einer vertikalen Ortsauflösung von etwa $1,0 \text{ nm}$. Die visuellen Eindrücke der Zonen zusammen mit den in Tabelle 3 dargestellten Ergebnissen der Weißlichtinterferometrie-Messungen ermöglichen eine fundierte Interpretation der messtechnisch relevanten Eigenschaften blechmassivumgeformter Oberflächen.

Mit einem durchgeführten Anderson-Darling-Test (Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$) wurden die Einzelwerte der unterschiedlichen Messreihen auf eine Normalverteilung der Daten geprüft. Da nicht alle Messreihen einer Normalverteilung folgen, ist ein Vergleich über Mittelwert und Standardabweichung nicht zulässig und es wird auf die Kennwerte 5. und 95. Perzentil, Median und Interquartilbereich zurückgegriffen.

Die Randzonen blechmassivumgeformter Bauteile markieren den äußersten Bereich der umgeformten Areale und enthalten mindestens eine Bauteilkante. Je nach Auslegung des Umformprozesses, zum Beispiel durch eine Begrenzung des seitlichen Materialflusses mit entsprechend gestalteten Umformwerkzeugen, ergibt sich eine große Varianz an möglichen Randzonen. Dies spiegelt auch die vergleichsweise große Differenz zwischen dem 5. Perzentil und 95. Perzentil sowie den größten Interquartilbereichen beider Höhenparameter wider. Alle Kennwerte sind für die Randzone am größten. Der erkennbare Unterschied zwischen den Interquartilbereichen der Randzone von Bauteilen aus DC04 und aus DP600 ist insbesondere mit

den unterschiedlichen Gratbildungen zu begründen. Dies kann auf die Unterschiede im Werkstoff oder auf geänderte Parameter des Umformprozesses zurückgeführt werden. Für die Auslegung der Messtechnik ist dies jedoch irrelevant.

Tabelle 3: Analyse der Höhenparameter in den verschiedenen Oberflächenzonen
(N = Grundgesamtheit; IQR = Interquartile Range)

		Bauteile aus DC04				Bauteile aus DP600			
		Randzone ($N = 13$)	Umformzone ($N = 78$)	Mischzone ($N = 44$)	Rohmaterial- zone ($N = 103$)	Randzone ($N = 12$)	Umformzone ($N = 23$)	Mischzone ($N = 28$)	Rohmaterial- zone ($N = 75$)
S_a in μm	5. Perzentil	0,52	0,18	0,68	1,09	0,53	0,24	0,52	0,98
	Median	1,58	0,32	1,18	1,78	1,38	0,31	0,95	1,08
	95. Perzentil	9,93	0,62	2,36	1,95	2,76	0,47	1,12	1,19
	IQR	4,80	0,16	0,79	0,23	1,20	0,13	0,30	0,11
S_z in μm	5. Perzentil	12,26	5,49	7,59	9,70	8,08	6,43	7,18	7,93
	Median	24,16	11,30	16,06	14,40	13,28	8,19	9,30	10,57
	95. Perzentil	99,83	19,86	30,62	20,63	20,58	10,51	12,29	19,23
	IQR	51,01	6,02	7,03	4,97	6,36	2,32	1,41	5,27

Im Gegensatz zu den mathematischen Kennwerten der Randzone nehmen diese in der Umformzone die geringsten Werte ein. Dies weist auf die glatteste aller vier Zonen hin. Die Position der Umformzone ist abhängig von der Auslegung des Umformprozesses und damit lokal variabel. Für die Entwicklung messtechnischer Lösungen ist die Umformzone von besonderer Bedeutung, da in diesen, bedingt durch den Umformprozess, die charakteristischen Nebenformelemente realisiert werden.

Ebenso ist die Einstellung einer Mischzone zwischen Umformzone und Rohmaterialzone nach dem Umformprozess von dessen Auslegung abhängig und daher nicht bei jedem Bauteil zu beobachten. In dieser Zone sind die Kenngrößen der Höhenparameter größer als in der Umformzone. Für S_a befindet das 5. Perzentil in einem Bereich, in welchem das 95. Perzentil der Umformzone liegt. Das Intervall bis zum 95. Perzentil erstreckt sich für DC04-Bauteile über das 95. Perzentil der Rohmaterialzone hinaus, für Bauteile aus DP600 liegen beide 95. Perzentile in einem ähnlichen Bereich. Zudem unterscheidet sich der Interquartilbereich für S_a von den Interquartilbereichen der Umformzone und Rohmaterialzone. Hierdurch grenzt sich die Mischzone von den benachbarten Zonen ab.

Die Rohmaterialzone stellt den Bereich eines Bauteils dar, in welchem die Höhenparameter nach dem Umformprozess nicht signifikant von den Höhenparametern noch nicht umgeformter Blechenden abweichen. Dieses Kriterium schließt eine Umformung des Werkstoffs nicht aus, wodurch diese Zone für die Auslegung der Messtechnik ebenfalls zu berücksichtigen ist.

4.3 Ableiten von Messaufgaben

Die möglichen und zu berücksichtigenden Messaufgaben für die zu entwerfende ganzheitliche und fertigungsnahe Messung blechmassivumgeformter Bauteile werden über eine Bauteil- und Fehleranalyse abgeleitet. Hierfür werden einerseits vorgesehene Soll-Geometrien berücksichtigt, andererseits potenzielle, sich bei der Ausformung ergebende Fehlerbilder. Ziel dabei ist die Auswahl eines, an die Charakteristika der Blechmassivumformung angelehnten Normals.

4.3.1 Bauteilanalyse

Wie bereits in der eingangs erfolgten Beschreibung der neuen Fertigungstechnologie sind am fiktiven Bauteildemonstrator des gesamten „Sonderforschungsbe- reich/Transregio 73“ repräsentative wie auch herausfordernde Merkmale der Blechmassivumformung realisiert. Die messtechnische Herausforderung bei der holistischen Prüfung liegt in der gleichzeitigen Erfassung kleiner, filigraner wie auch großer Bereiche. Als Maß hierfür kann das Verhältnis zwischen dem Außenradius der Grobgestalt von 40 mm, als eines der größten Merkmale und den Fußkreisradien der Verzahnung mit 0,2 mm, als eines der kleinsten Merkmale herangezogen werden. Bei den betrachteten Merkmalen beträgt dieses Verhältnis 1:200. Werden lediglich Merkmale der Nebenformelemente herangezogen, liegt das Verhältnis bei Betrachtung der Fußkreisradien und der Laschenlängen bei 1:75, zwischen kleinsten und größten Radien an den Nebenformelementen noch bei 1:10. Diese Berechnung kann mit den in Abbildung 14 dargestellten, ausgewählten Maßen der verschiedenen Nebenformelemente beliebig fortgeführt werden.

Werden die Aufgaben zur Prüfung der in Abbildung 14 gezeigten Nebenformelemente abstrahiert, können folgende Hauptmessaufgaben abgeleitet werden:

- Radiusmessungen für Merkmale zwischen 0,2 mm und 2 mm
- Winkelmessungen für Merkmale zwischen 30° und 90°
- Abstandmessungen für Merkmale zwischen 0,9 mm und 15 mm.

Für Letztere wird jeweils der kleinste und größte Abstand zwischen zwei Merkmalen herangezogen. Diese werden einerseits durch den Abstand zwischen Kopf- und

Fußkreisradius zweier benachbarter Zähne und andererseits durch Laschenlänge verkörpert.

Die angegebenen Merkmalsintervallbereiche lassen sich noch beliebig erweitern. Beispielsweise ist eine Abstandsmessung zwischen ersten und letztem Kopfkreisradius einer Verzahnung möglich, oder die Ermittlung verschiedener weiterer Winkel. Für die Auslegung der Messtechnik werden jedoch die ausgewählten und am häufigsten angewendeten Merkmalintervallbereiche berücksichtigt.

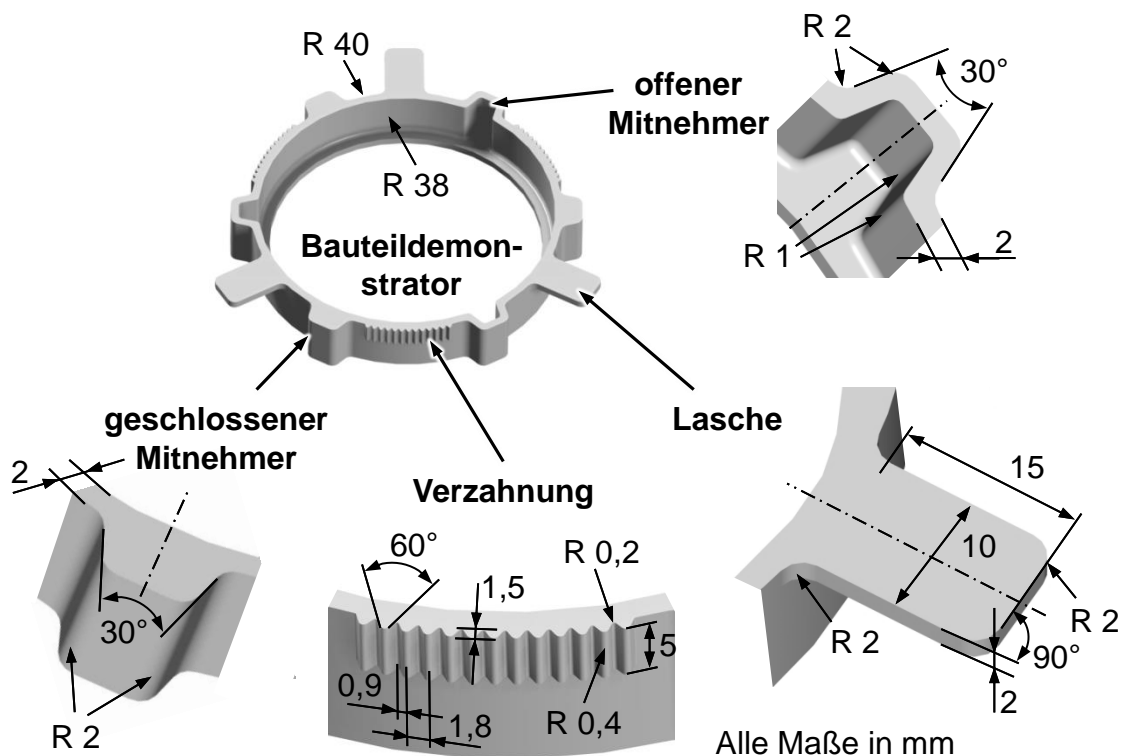


Abbildung 14: Ausgewählte dimensionelle Größen an Nebenformelementen

4.3.2 Fehleranalyse

In den betrachteten Prozessen der Blechmassivumformung kommen Metallronden der Werkstoffe DC04 und DP600 mit einer Stärke von 1 mm bis maximal 10 mm zum Einsatz, wobei sich ein, für die Massivumformprozesse typischer, kontrollierter dreidimensionaler Materialfluss einstellt. Das Verhältnis von Oberfläche zur Stärke des Ausgangsmaterials ist damit jedoch um ein Vielfaches größer als bei den wesentlich massiveren Bauteilen der Massivumformung. Mit zunehmender Kontaktfläche zwischen Halbzeug und Werkzeug nehmen die erforderlichen Prozesskräfte zu, da ein Großteil der aufzubringenden Umformkraft aus der zu überwindenden Reibkraft zwischen Umformgut und -werkzeug besteht [Behrens und Doege 2007, S. 221-226]. Die hohen, bei Prozessen der Blechmassivumformung erforderlichen Prozesskräfte bewirken lokal stark variierende zwei- und dreidimensionale Spannungszustände im Werkstoff, die bei fehlerhafter Prozessführung zu Abweichungen

von der Sollgeometrie des Bauteiles führen können. Zusätzlich haben Effekte wie die zyklische Werkstoffbelastung, Verfestigungsmechanismen und Anisotropie des Werkstoffs potenzielle Auswirkung auf die Entstehung von Geometrieabweichungen [Merklein et al. 2012a].



Abbildung 15: Messtechnisch relevante Fehlerbilder blechmassivumgeformter Bauteile

Auf Basis verfügbarer blechmassivumgeformter Bauteile können eine Reihe verschiedener, für die Fertigungstechnologie charakteristische Fehlerbilder identifiziert werden. Diese lassen sich, wie in Abbildung 15 gezeigt, in fünf unterschiedliche und für die Messtechnik relevante Fehlerklassen einteilen [Loderer et al. 2013a; Loderer et al. 2014].

Aus [Tschätsch 2005] sind für die Gebiete der Massiv- und Blechumformung zusätzliche Bauteilfehler in Form von Faltenbildung, Oberflächeninnenrisse bei großen Oberflächen, Materialeinrisse im Bereich der Kanten, Bodenecken und Weitere genannt. Diese gilt es bei der Auslegung der messtechnischen Erfassung blechmassivumgeformter Bauteile ebenfalls zu berücksichtigen.

Im Unterschied zur Bauteilanalyse können die typischen Fehlerbilder nicht zu bestimmten Hauptmessaufgaben an geometrischen Merkmalen abstrahiert werden. Vielmehr rückt die Berücksichtigung relevanter Kenngrößen in den Mittelpunkt. Die

aufgezeigten Abweichungen von der Idealgeometrie können klein und lokal begrenzt sein. Um diese Fehlerbilder sicher detektieren zu können, ist eine flächenhafte Merkmalerfassung mit einer ausreichenden Genauigkeit und hohen Messpunktdichte wichtig.

4.3.3 Normalauswahl

Mit der Bauteilanalyse des Demonstrators der Blechmassivumformung konnten die Merkmale Winkel, Radius und Abstand als häufig zu ermittelnde dimensionelle Größen identifiziert werden. Durch die Analyse relevanter Fehlerbilder wurden die zu berücksichtigenden Auswertekenngrößen bestimmt. Für die Auslegung der Messtechnik ist ein Normal erforderlich, dessen geometrische Form einerseits hochgenau bestimmt ist und welches andererseits zu den betrachteten Bauteilen ähnlich ist. Die Ähnlichkeit gilt sowohl für die Merkmale und deren Größen als auch in Bezug auf die, für die optische Messtechnik relevanten, Oberflächeneigenschaften.

Mit dem PTB-Mikrokonturnormal steht ein präzises, durch Drahterodieren gefertigtes Normal zur Verfügung, welches die im Fokus stehenden Merkmale, Radius, Winkel und Abstand in unterschiedlichen Größen bereithält [PTB 2006]. Abbildung 16 stellt das Mikrokonturnormal sowie dessen Merkmale im Profil dar und gibt über deren Gestalt Auskunft. Neben den bereits vorhandenen Abstandsmerkmalen in Form von Stufenhöhen ist zudem die Berücksichtigung weiterer Abstände, beispielsweise durch die Ermittlung der Distanz zwischen zwei Radien unterschiedlicher Bereiche, möglich. Das Mikrokonturnormal erlaubt durch dessen Gestalt eine Abstraktion der charakteristischen Merkmale der Blechmassivumformung auf ein kalibriertes Normal.

Neben der Vergleichbarkeit der Gestalt ist für eine vollständige Merkmalsabstraktion auch eine Ähnlichkeit der Oberflächeneigenschaften zwischen dem Mikrokonturnormal und blechmassivumgeformten Bauteilen erforderlich. Um diese zu untersuchen werden wiederum die Höhenparameter S_a und S_z an der Oberfläche des Mikrokonturnormals mithilfe des TalySurf CC11000 Weißlichtinterferometers ermittelt und mit den Ergebnissen an blechmassivumgeformten Oberflächen verglichen. An 36 unterschiedlichen Messpunkten am Mikrokonturnormal wurden dieselben Einstellungen zur Messung wie für die Charakterisierung blechmassivumgeformter Bauteile verwendet. Die Messfeldgröße beträgt $0,91 \times 0,91 \text{ mm}^2$ mit einer Ortsauflösung von lateral $0,89 \text{ }\mu\text{m}$ und vertikal circa $1,0 \text{ nm}$. Ein Anderson-Darling-Test konnte mit einem Signifikanzniveau α von 5 % bei keiner Datenreihe der zwei Höhenparameter eine Normalverteilung bestätigen. Damit sind Vergleiche über Mittelwerte und Standardabweichungen nicht valide. In Abbildung 17 unten rechts sind

aus diesem Grund die Messreihen mit den Kenngrößen 5. und 95. Perzentil, Median sowie Interquartilbereich beschrieben.

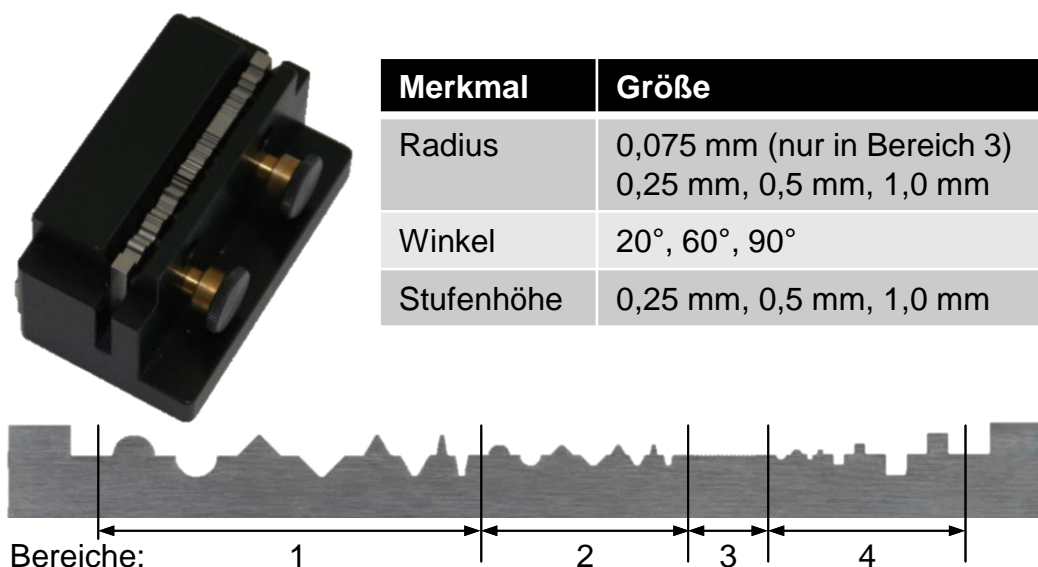


Abbildung 16: PTB-Mikrokonturnormal

Der quantitative Vergleich der Ergebnisse des Mikrokonturnormals aus der Tabelle in Abbildung 17 unten rechts, mit den Resultaten blechmassivumgeformter Bauteile aus Tabelle 3 wird durch eine grafische Aufbereitung unterstützt. Die Werte für beide Höhenparameter werden über sogenannte Boxplots visualisiert, deren Aufbau im unteren linken Bereich erläutert ist. Neben den Resultaten für das Mikrokonturnormal werden die Werte der Umformzone und Mischzone für Bauteile aus DC04 und DP600 dargestellt. Aufgrund der deutlich höheren Werte für die Randzone und Rohmaterialzone sowie deren geringe Auftretenswahrscheinlichkeit an umgeformten Nebenformelementen sind diese beiden Zonen nicht dargestellt.

Wie aus den Ergebniswerten und den Boxplots ersichtlich wird, liegen die Werte des Höhenparameters S_a in den Mischzonen beider Werkstoffe oberhalb derer für das Mikrokonturnormal und weisen zudem eine größere Streuung auf. Ersichtlich ist dies an den größeren Interquartilbereichen und den Differenzen zwischen 5. und 95. Perzentil. Eine Ähnlichkeit zwischen dem Höhenparameter S_z der Mischzone an DC04-Bauteilen mit der Mikrokonturnormaloberfläche ist damit nicht zu erkennen.

Um diese visuellen und quantitativen Vergleiche durch statistische Methoden zu untermauern, wurde ein Moods-Median-Test durchgeführt. Dieses Testverfahren zählt zu den Hypothesentests, die keine normalverteilten Daten erfordern und errechnet für die zugrundeliegende Nullhypothese H_0 (alle geprüften Gruppenmediane sind gleich groß) einen sogenannten p-Wert. Liegt dieser Wert oberhalb des zuvor festgelegten Signifikanzniveaus α , kann die Nullhypothese angenommen werden. Ist

der p-Wert unterhalb des Signifikanzniveaus α , gilt die Nullhypothese H_0 als widerlegt und die Alternativhypothese H_A (alle geprüften Gruppenmediane sind nicht gleich) wird angenommen. [Toutenburg und Knöfel 2008]

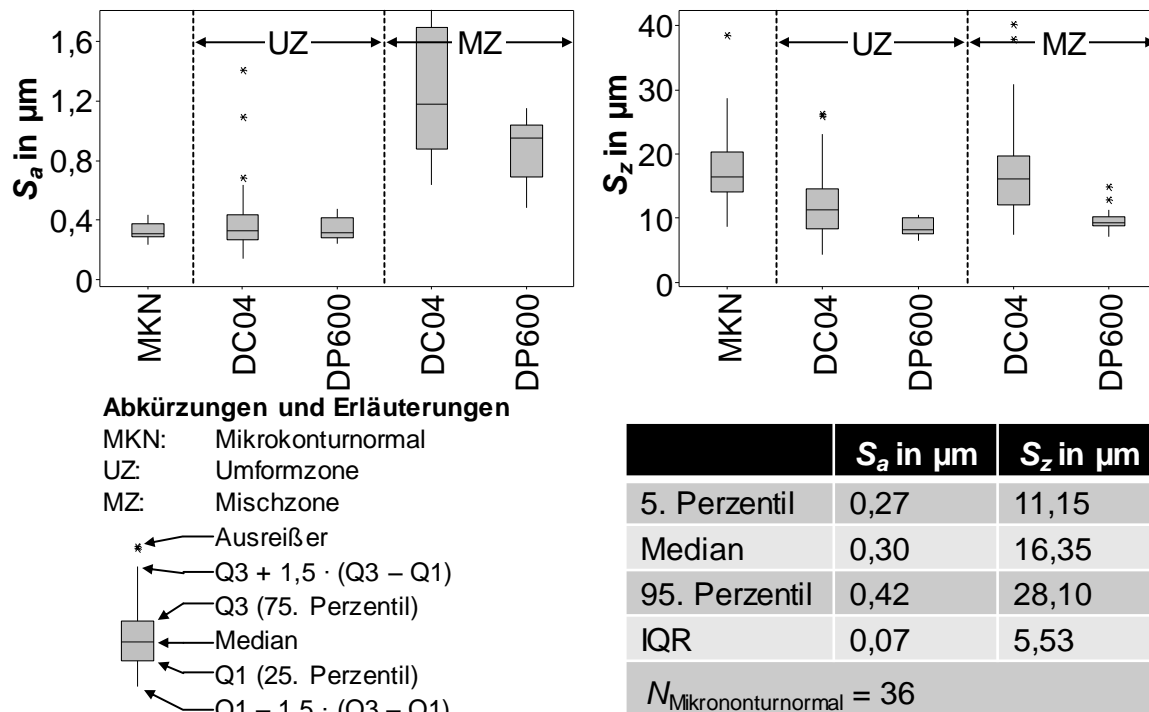


Abbildung 17: Vergleich der Oberflächenzonen mit der Mikrokonturnormal-Oberfläche

Für einen statistischen Vergleich der Höhenparameter S_a und S_z wird jeweils der Gruppenmedian für einen Parameter des Mikrokonturnormals mit dem Gruppenmedian des korrespondierenden Parameters aus einer Zone eines Werkstoffs verglichen. Damit sind für die beiden Werkstoffe mit den jeweils vier Zonen und zwei betrachteten Parametern 16 Moods-Median-Tests notwendig. In Tabelle 4 sind die dabei ermittelten p-Werte aufgetragen.

Tabelle 4: p-Werte für Moods-Median Test (H_0 = Nullhypothese; N = Grundgesamtheit; α = Signifikanzniveau; IQR = Interquartile Range)

	Bauteile aus DC04				Bauteile aus DP600			
	Randzone ($N = 13$)	Umformzone ($N = 78$)	Mischzone ($N = 44$)	Rohmaterial- zone ($N = 103$)	Randzone ($N = 12$)	Umformzone ($N = 23$)	Mischzone ($N = 28$)	Rohmaterial- zone ($N = 75$)
S_a	0,000	0,227	0,000	0,000	0,000	0,365	0,000	0,000
S_z	0,040	0,000	0,653	0,072	0,182	0,000	0,000	0,000

H_0 : „Alle Gruppenmediane sind gleich“; $\alpha = 5 \%$; $N_{\text{Mikrokonturnormal}} = 36$

Bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ wurden die Nullhypothesen für die Höhenparameter S_a der Umformzonen für beide Werkstoffe verifiziert. Es ist somit kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppenmedianen der Höhenparameter der Umformzone an blechmassivumgeformten Bauteilen und dem Mikrokonturnormal gegeben. Für den Höhenparameter S_z wurde die H_0 für die Umformzonen mit p-Werten unterhalb des Signifikanzniveaus nicht bestätigt. Die Gruppenmediane für diese Parameter unterscheiden sich statistisch signifikant. Die p-Werte für die Gruppenmediane der Randzone an Bauteilen aus DP600 und für die Mischzone sowie Rohmaterialzone aus DC04-Bauteilen sind oberhalb von α und bestätigen somit die Nullhypothese. Da der Höhenparameter S_z stark durch Ausreißer beeinflussbar ist und damit die Ergebnisse nur bedingt für eine Vergleichbarkeit herangezogen werden können, werden für die Ergebnisse Moods-Median-Tests diese Untersuchung nicht weiter betrachtet.

Durch den grafischen, qualitativen Vergleich, die quantitative Gegenüberstellung der ermittelten Werte in Tabellenform sowie den statistischen Vergleich, konnte eine Ähnlichkeit zwischen dem Mikrokonturnormal und den blechmassivumgeformten Bauteilen aufgezeigt werden. Die Oberflächenparameter (Höhenparameter S_a und S_z) weisen in den Umformzonen, die als besonders relevante Bereiche gelten, sowie am Mikrokonturnormal vergleichbare Werte auf.

Die Merkmale des Mikrokonturnormals bilden zudem die wichtigen Merkmale blechmassivumgeformter Bauteile in Größe und Form ab. Somit steht mit dem Mikrokonturnormal ein kalibriertes Normal zur Verfügung, welches für die Auslegung wie auch Optimierung messtechnischer Lösungen zur Erfassung von Nebenformelementen an blechmassivumgeformten Bauteilen herangezogen werden kann.

5 Multisensor-Messsystemaufbau

Die Entwicklung eines Messsystemaufbaus für das Multisensor-Prinzip, ausgelegt auf eine fertigungsnahe und ganzheitliche Messung blechmassivumgeformter Bauteile, gliederte sich in drei Abschnitte. Ausgehend von einer detaillierten Anforderungsanalyse an den Messsystemaufbau schloss sich eine Auswahl von geeigneten Sensoren an, deren Integration in den Aufbau für die Erfüllung der Messaufgabe später erfolgte. Abschließend wurden Teilfunktionen für den Messsystemaufbau definiert, eine Lösung hierfür konzipiert und der Gesamtaufbau realisiert.

5.1 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen an den Messsystemaufbau ergeben sich aus den zu messenden Bauteilen und den damit verbundenen Messaufgaben sowie den Umwelteinflüssen. Aufgrund der allgemeineren Auslegung der [VDI/VDE 2627-1:2015-12] wird zur Unterstützung des methodischen Vorgehens die Analyse des fertigungsnahen Umfelds am Beispiel der [VDI/VDE 2627-1:1998-08] vorgenommen.

5.1.1 Analyse des fertigungsnahen Umfelds

In [VDI/VDE 2627-1:1998-08] werden als Umgebungseinflüsse auf Messergebnisse die Faktoren Temperatur, Schwingung, Staub, Luftfeuchte, Strahlung sowie elektrische Störungen genannt und für die unterschiedlichen Güteklassen von Messräumen Grenzwerte festgelegt. Elektrische Störungen können für die Auslegung des mechanischen Messsystemaufbaus außer Acht gelassen werden, da die zum Einsatz kommenden Sensoren seitens des Herstellers bereits auf die elektromagnetische Verträglichkeit hin überprüft wurden.

Auf eine quantitative Bestimmung der Reinraumklasse und der damit einhergehenden Staubbelastung des Messraums wird verzichtet, da in [VDI/VDE 2627-1:1998-08] für die Kategorien „Fertigungsmessplatz“ sowie „Messraum mit besonderen Anforderungen“ keine Festlegung getroffen ist. Lediglich für die Kategorie „Fertigungsnaher Messraum“ wird eine bestimmte Filterklasse vorgesehen. Bei einer qualitativen Untersuchung der fertigungsnahen Umgebung konnte keine erhöhte Staubbelastung festgestellt werden. Eine beständige, wenn auch minimale Ablagerung von Staub auf beweglichen Elementen, kann jedoch zu Störungen deren Funktionalität führen. Dies ist bei der Auslegung des mechanischen Aufbaus des Multisensor-Messsystems zu berücksichtigen, um eine möglichst wartungsfreie Sensorpositionierung zu gewährleisten.

Als Luftfeuchte wird der Wasserdampfgehalt in der Luft bezeichnet. Die relative Luftfeuchte F_{rel} wird durch die absolute Luftfeuchte F_{abs} , die der Masse an Wasserdampf m_w in einem bestimmten Volumen V_{ges} entspricht, in Bezug zur maximalen absoluten Luftfeuchte F_s (Sättigung) angegeben [VDI/VDE 2627-1:1998-08]. Diese wird auch Sättigungsfeuchte oder Taupunkt genannt und bezeichnet das Verhältnis aus der maximal möglichen Masse an Wasserdampf $m_{w,s}$ in einem Volumen V_{ges} .

$$F_{\text{rel}} = \frac{F_{\text{abs}}}{F_s} \cdot 100 \% = \frac{\frac{m_w}{V_{\text{ges}}}}{\frac{m_{w,s}}{V_{\text{ges}}}} \cdot 100 \% \quad (5.1)$$

Nach [VDI/VDE 2627-1:1998-08] sollte die relative Luftfeuchte in Messräumen zwischen 30 % und 60 % liegen. Nach [Pfeifer und Schmitt 2010] begünstigt eine zu geringe Luftfeuchtigkeit in Innenräumen die Entwicklung von Stäuben und erhöht die Verwirbelungsintensität. Zusätzlich wird die Gefahr einer elektrostatischen Aufladung erhöht, die im Zeitverlauf zu Anhaftungen von Staubpartikeln oder Schmutz an Normalen, Messgeräten oder Messobjekten führen kann. Eine ausreichend hohe Luftfeuchtigkeit über 30 % sorgt hingegen für eine Umschließung von Staub in der Luft durch einen Wasserfilm. Durch das erhöhte Gewicht fällt dieser zu Boden und kann durch Reinigungsmaßnahmen aufgenommen werden. Wasserunlösliche Staubteilchen sind allerdings hiervon ausgenommen. Bei Überschreitung der 60 % relativer Luftfeuchte ist die Gefahr einer Korrosion von Metallen stark erhöht. Zudem können Kunststoffe oder andere organische Stoffe, wie Holz oder Textilien, aufquellen und auf diese Weise beschädigt werden. [Pfeifer und Schmitt 2010] Weitere Risiken in Bezug auf eine fertigungsnahe Messung ergeben sich durch das begünstigte Wachstum von Schimmelpilzen oder dem Ausfall elektronischer Geräte durch die erhöhte Gefahr von Kriechströmen oder Kurzschlüssen [Hering und Schönfelder 2010].

Die Temperatur stellt in der Messtechnik eine zentral zu beachtende Einflussgröße dar. Schwankungen, die nach [VDI/VDE 2627-1:1998-08] in zeitliche und räumliche Temperaturänderungen unterschieden werden, induzieren thermische Materialdehnungen und -schrumpfungen, wodurch sich Messgerät sowie Messobjekt verändern können. Um eine Vergleichbarkeit von Messergebnissen sicherzustellen, muss der Einfluss der Temperatur möglichst minimiert werden. Dies kann einerseits durch die Festlegung von Bezugstemperaturen (z. B. nach ISO 1) und zulässigen Abweichungen erfolgen. Andererseits sind eine Erfassung der vorherrschenden Temperatur und eine eventuell notwendige Korrektur des Messergebnisses möglich. [VDI/VDE 2627-1:1998-08]

Der Einfluss der räumlichen Temperaturvariation wird als gering bewertet und daher nicht betrachtet. Die offene Bauart sowie die Luftzirkulation, hervorgerufen durch aktive Sensorkühlungen, verhindern die Ausbildung lokal divergierender Wärmeschichtungen, die den vergleichsweise kleinen Messsystemaufbau signifikant beeinflussen könnten. Im Gegensatz dazu ist die zeitliche Veränderung der Temperatur aufgrund fehlender Vorrichtungen zur aktiven Temperierung des gesamten Messraums eine wichtige Größe. Mit dem Temperatur- und Feuchtlogger Testo 177-H1 wurden die Bedingungen einer typischen Produktionsumgebung, wie sie bei Prozessen der Blechmassivumformung zu finden ist, über einen Zeitraum von 12 Tagen (14. - 25. Februar 2014) mit einem Aufzeichnungsintervall von einer Minute dokumentiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

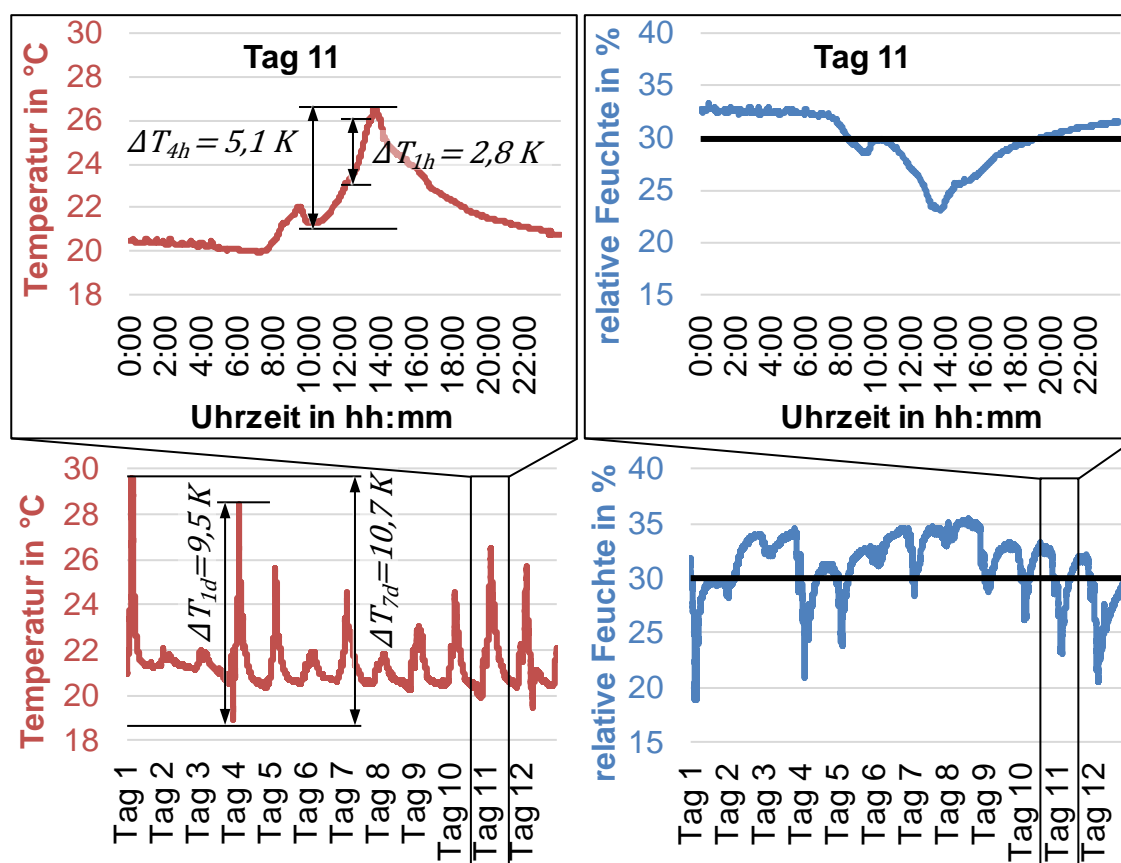


Abbildung 18: Analyse der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit in einer beispielhaften Produktionsumgebung

Deutlich ersichtlich wird die bekannte indirekte Proportionalität der relativen Luftfeuchtigkeit zur Temperatur. In Tabelle 5 ist ein Auszug der Anforderungen an die Messraumkategorien „Fertigungsnaher Messraum“, „Fertigungsnaher Messplatz“ und „Sondermessraum“ nach [VDI/VDE 2627-1:1998-08] aufgeführt. Mit den detektierten zeitlichen Temperaturänderungen werden die Vorgaben der Richtlinie für den fertigungsnahen Messraum, wie auch Messplatz, in allen definierten Zeitintervallen überschritten. Für präzise Messungen im fertigungsnahen Umfeld sind diese

Schwankungen entweder durch konstruktive Maßnahmen zu minimieren oder bei der Ermittlung und Korrektur der Messergebnisse rechnerisch zu berücksichtigen.

Tabelle 5: Anforderungen an Messraumkategorien nach [VDI/VDE 2627-1:1998-08]

		Fertigungsnaher Messraum	Fertigungsnaher Messplatz	Sonder- messraum
Grundtemperatur		Je nach Festlegung	Keine Anforderungen	Je nach Festlegung
Zeitliche Änderungen von ΔT während	15 min	-	-	
	60 min	2,0 K	2,0 K	
	4 h	3,0 K	3,0 K	
	12 h	-	-	
	1 d	3,0 K	6,0 K	
	7 d	4,0 K	8,0 K	
Räumliche Unterschiede ΔT		1,0 K	2,0 K	
Zulässige zeitliche Änderungen und örtliche Unterschiede ΔF_{rel} der relativen Luftfeuchte		30 %	offen	

Bei der Auslegung von Messsystemen für das fertigungsnaher Umfeld ist die Möglichkeit der schwingungsinduzierten Beeinflussungen von Messergebnissen zu berücksichtigen. Schwingungen, die beispielsweise von Bearbeitungsmaschinen oder Logistikprozessen ausgehen, werden über Böden und Fundamente übertragen und bilden dadurch eine, bei der Auslegung von Messtechnik zu berücksichtigende Störgröße [Pfeifer und Schmitt 2010]. Häufig wird bereits bei der Auslegung von Produktionsstätten diesem Faktor Rechnung getragen, indem schwingungsanfällige Maschinen auf separaten, schwingungsentkoppelten Fundamenten installiert werden. Dies trifft auch auf die Umformmaschine des betrachteten Blechmassivumformprozesses zu. Jedoch treten mit dem Separieren dieser Art von Schwingungsquellen die alternativen Schwingungserzeuger wie fahrbare Transportsysteme oder laufende Menschen, die sich im schwingungsentkoppelten Bereich bewegen, als dominante Beeinflussung der Messergebnisse in den Vordergrund. Daher sind bei der Auslegung des Messsystemaufbaus Maßnahmen vorzusehen, die eine Reduktion der auf das Messsystem einwirkenden Schwingungen ermöglichen.

Fremdlicht ist im Bereich der optischen Messtechnologien eine relevante Störgröße und beeinflusst das Messergebnis. Hersteller von optischen Messsystemen geben

deshalb zusätzlich die Empfindlichkeit der Systeme auf Fremdlicht sowie die diesbezüglichen zulässigen Einsatzbedingungen an. Häufig wird dabei versucht, durch entsprechende wellenlängenselektive Filter vor dem Detektor nur das Licht des Messprozesses zu erfassen und die Beeinflussung durch andere Lichtquellen auf diese Weise zu minimieren. [Bauer 2007, S. 22-31] Um eine ausreichende Flexibilität des entwickelten Messaufbaus sowie die Austauschbarkeit und Erweiterbarkeit hinsichtlich weiterer Sensoren zu gewährleisten, ist die optionale Anbringung von partiellen Abschirmungen gegenüber Fremdlicht vorgesehen. Hierdurch können Störeinflüsse durch fremdlichtinduzierte Reflexionen am Messobjekt wie auch am Messaufbau selbst bei Bedarf unterbunden werden.

5.1.2 Analyse der Messaufgabe

Während bei der Anforderungsanalyse aus dem fertigungsnahen Umfeld, insbesondere Einflüsse aus der Umwelt von Bedeutung sind, resultieren bei der Analyse der Messaufgabe die Einflüsse aus der Form und Beschaffenheit des Bauteils oder des Prozesses. Eine zentrale Rolle nimmt dabei die große Variabilität der Blechmassivumformung hinsichtlich der Gestaltung von Bauteilmerkmalen ein, welche stark in Größe und Form variieren können. Ein Großteil der blechmassivumgeformten Bauteile ist rotationssymmetrisch ausgelegt, weshalb im Rahmen dieser Arbeit eine derartige Bauteilgestalt mit einem Bauteildurchmesser zwischen 30 mm und 100 mm sowie einer Bauteilhöhe zwischen 1 mm und 10 mm im Fokus stand. Für die sichere Erfüllung aller sich daraus ergebender Messaufgaben zur Bestimmung von geometrischen Merkmalen wurde ein modularer Aufbau der Messanordnung und -objekthalterung vorgesehen. Hierdurch kann für verschiedene Bauteilgrößen und -formen eine entsprechend dimensionierte Halterung bereitgestellt werden, wobei stets Auflagedurchmesser der Messobjekthalterung den Bauteildurchmesser nicht überschreiten sollte. Eine Anordnung der optischen Sensoren wird erleichtert, wenn Merkmale im Bauteilrandbereich aus unterschiedlichen Richtungen erfasst werden können. Ragt das Messobjekt über die Auflage hinaus, wie in Abbildung 19 rechts schematisch dargestellt, ergibt sich eine größere Flexibilität wie auch Zugänglichkeit. Im Gegensatz dazu ergeben sich für Merkmale, welche nicht über die Auflage hinausragen (Abbildung 19 links), Einschränkungen hinsichtlich des zulässigen Messwinkels.

Die Flexibilität wird weiter erhöht, wenn zusätzlich eine Handhabung des Messobjekts möglich ist. Durch die Fokussierung auf rotationssymmetrische ausgelegte Bauteile ist für den Messsystemaufbau eine gesteuerte Rotation des Bauteils um die Hochachse erforderlich.

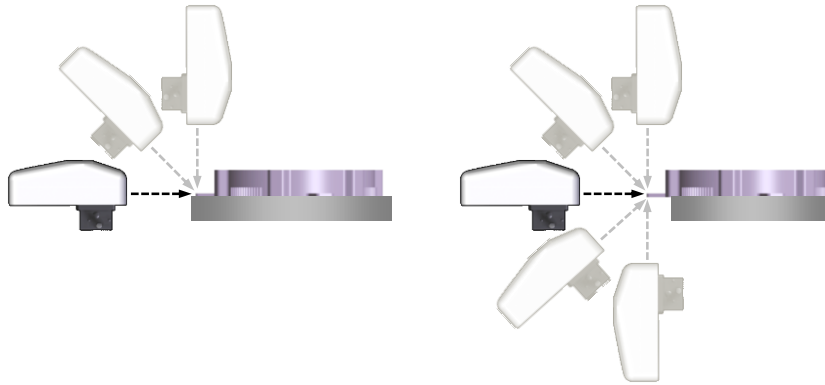


Abbildung 19: Einfluss der Auflagenbreite auf den möglichen Messwinkel

Ferner ist für die Erfüllung der Messaufgaben eine sichere und stabile Fixierung des Messobjekts zu gewährleisten. Kraftschlüssige Fixierungen, wie sie beispielsweise durch Einspannvorrichtungen realisiert werden, sind hierbei zu vermeiden. Die auf diese Weise eingebrachten Kräfte führen zu einer mechanischen Deformation des Bauteils, wodurch wiederum Messergebnisse beeinflusst werden können [Weickmann 2011]. Vielmehr kann durch eine Fixierung mittels einer Messobjektauflage eine kraftinduzierte Bauteildeformation verhindert werden. Durch einen teilelastischen, rutschhemmenden Belag ist für das Messobjekt ein sicherer Halt gegen Beschleunigungen zu realisieren, wie sie aus Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Stößen oder der gesteuerten Rotationsachse einwirken können. Der rutschhemmende Belag sollte möglichst lichtabsorbierend sein, um die Gefahr von Streureflexionen und die damit verbundenen Beeinflussungen des Messergebnisses gering zu halten. Zudem ist eine Verträglichkeit des Belags mit dem in der Blechmassivumformung verwendeten Schmierstoff Beruforge BF 150 DL sicherzustellen.

5.1.3 Lastenheft

Aus den dargestellten Anforderungen an den Aufbau des Multisensor-Messsystems wurde ein Lastenheft erstellt, das die Grundlage für die nachfolgend dargestellten Arbeiten bildete. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen aus dem Lastenheft ist in Tabelle 6 gezeigt.

Tabelle 6: Auszug wichtiger Anforderungen aus dem Lastenheft**Sensorhaltung**

Sensoranzahl	6 berührungslose Sensoren
Positionierung	Präzise und reproduzierbar Positionsfixierung
Freiheitsgrade	Unabhängiges Einstellen aller Bewegungsachsen
Handhabung	Einfach, schnell und intuitiv bedienbar Kein Zusatzwerkzeug erforderlich Gute Zugänglichkeit und jederzeit einsehbar Geringe Störanfälligkeit
Flexibilität	Einfacher Austausch von Sensoren und Erweiterung mit zusätzlichen Sensoren

Messobjekthalterung

Bauteilfixierung	Teilelastische, rutschhemmende, ölresistente Auflage
Materialien der zu messenden Bauteile	Kaltgewalztes Feinblech DC04 Dualphasenstahl DP600
Handhabung	Bauteilrotation erforderlich
Gewicht	Maximale Traglast der Rotationseinheit nicht überschreiten
Bauteilabmessungen	Rotationssymmetrische Bauteile Durchmesser: 30 mm – 100 mm Höhe: 1 mm – 10 mm

5.2 Sensorauswahl

Die Auswahl geeigneter Messsysteme für die spätere Integration in einen Multi-sensor-Aufbau bedient sich des nachfolgend beschriebenen theoretischen Selektionsverfahrens. Durch eine empirische, auf verschiedenen Quellen und Expertenwissen beruhende Bewertung konnten nicht geeignete Messverfahren und darauf aufbauende Sensoren ausgeschlossen werden. In einer anschließenden zweiten Bewertung fand ein Vergleich bestehender und für die Untersuchung verfügbarer Sensoren auf Basis deren technischer Spezifikationen statt. Bewertungsmaßstab bildeten die blechmassivumformungstypischen Messaufgaben.

5.2.1 Verfahrensauswahl

Für eine systematische wie auch methodische Vorgehensweise wurde eine multi-kriterielle Bewertung relevanter optischer Messverfahren durchgeführt und in Tabelle 7 dargestellt. Die zeilenweise aufgeführten Messverfahren werden gemäß der, als relevant für die Erfüllung der Messaufgabe erachteten, spaltenweise aufgetragenen Beurteilungskriterien bewertet. In Einzelbewertungen (b_i) wird zunächst beschrieben, mit welcher Güte ein Messverfahren das jeweilige Beurteilungskriterium erfüllt. Es folgt eine Multiplikation mit den kriterienspezifischen Gewichtungsfaktoren (g_i). Abschließend wird die Wertungszahl (w), wie in Formel 5.2 dargestellt, durch eine Aufsummierung der Produkte aus b_i und g_i berechnet, anhand derer ein Ranking der zu bevorzugenden Verfahren aufgestellt werden kann.

$$w = \sum (b_i \cdot g_j) \quad (5.2)$$

Die multikriterielle Bewertung erfolgte dabei einerseits auf Wissen von Experten aus den Bereichen Blechmassivumformung und Messtechnik, andererseits auf Basis der Literaturquellen [Bauer 2007, S. 22-31; Bauer 2007, S. 61-66; Bauer 2007, S. 159-168; Bauer 2007, S. 198-202; Bauer 2007, S. 214-232; Bauer 2007, S. 288-296; Bernstein 2011; Christoph und Neumann 2006; Fraunhofer 2014; Rahlves und Seewig 2009; Shaw 2013]. Mit dieser Vorgehensweise wird die intersubjektive Einschätzung durch die Expertenrunde zum publizierten Fachwissen ergänzt und gestützt.

Gewichtungen und Bewertungen wurden in drei Stufen vorgenommen und zur besseren Übersichtlichkeit für die Gewichtungsfaktoren Zahlen, für die Bewertungen qualitative Symbole verwendet. Für die Multiplikation von Einzelbewertungen mit den Gewichtungsfaktoren, sind die Symbole mit einer Wertigkeit besetzt.

Die Bewertungskriterien „Akzeptanzwinkel“, „Messdauer“ sowie die Fähigkeit unterschiedlich raue Oberflächen erfassen zu können („var. Oberflächenrauheit“) wurden am höchsten für die Erfüllung einer ganzheitlichen Messung im fertigungsnahen Umfeld bewertet. Im Gegensatz dazu wurden die Kriterien „Auflösung“ und „Messbereich“ mit mittlerer beziehungsweise geringer Gewichtung versehen, da durch die projektierte Multisensor-Auslegung des Messsystems beide Kriterien mit der Verwendung zusätzlicher Sensoren ausgeglichen werden können.

Das Messverfahren der strukturierten Beleuchtung wurde, als das am besten Geeignete zur Erfüllung der zugrundeliegenden Messaufgaben angesehen. Nahe verwandt mit diesem Messverfahren sind das Lichtschnittverfahren, die Photogrammetrie und die Deflektometrie, die auf den Rängen zwei bis vier folgenden. Ebenfalls auf Rang vier sind die beiden koaxial antastenden Verfahren der Fokusvariation und

der konfokalen Mikroskopie. Den letzten Platz in der Bewertung nimmt die Weißlichtinterferometrie ein.

Tabelle 7: Multikriterielle Bewertung von optischen Messverfahren

Verfahren	Bewertungskriterien (b_i)						Wertungszahl w	Rangfolge
	Akzeptanzwinkel	var. Oberflächrauheit	Auflösung	Messbereich	Messdauer			
Konfokale Mikroskopie	+	++	++	o	+	28	4	
Fokusvariation	++	++	++	o	o	28	4	
Weißlichtinterferometrie	o	o	++	o	o	16	7	
Deflektometrie	+	+	+	++	++	28	4	
Lichtschnittverfahren	++	++	++	+	+	32	2	
Photogrammetrie	++	+	+	++	++	31	3	
Strukturierte Beleuchtung	++	+	++	++	++	33	1	
Gewichtung (g_j)	3	3	2	1	3			

Gewichtung: 1: gering; 2: mittel; 3: hoch
 Bewertung: o: geeignet; +: gut geeignet; ++: sehr gut geeignet
 Wertigkeit: o = 1; + = 2; ++ = 3

5.2.2 Sensorauswahl

Auf Basis der multikriteriellen Bewertung werden in Tabelle 8 die, für die vorliegende Arbeit verfügbaren Sensoren, basierend auf den beiden bestplatzierten Prinzipien, der strukturierten Beleuchtung sowie der Photogrammetrie ausgewählt. Sensoren, beruhend auf dem Messverfahren der Deflektometrie, standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. Für eine weitergehende theoretische Evaluation und der darauf aufbauenden Auswahl von Sensortypen bilden die technischen Daten der verfügbaren Sensoren die Grundlage. Diese stammten aus den Sensor-Handbüchern [GFM 2007; GFM 2008; GFM 2009; GOM 2012; GOM 2014; Ensensio 2016a] sowie den Publikationen [Hartmann et al. 2012; Hausotte et al. 2012; Ohrt et al. 2012a; Ohrt et al. 2012b]. Als wichtige Vergleichskriterien für die Erfüllung der abgeleiteten Messaufgaben wurden die Parameter Messbereich, Messleistung und Geschwindigkeit angenommen. Die Größe des Messbereichs bestimmt die Anzahl der mit einer Messung erfassbaren Merkmale und korreliert daher positiv mit dem

Anspruch einer holistischen, ganzheitlichen Inspektion. Ein Vergleich der Messleistung erfolgte durch die laterale und vertikale Auflösung.

Tabelle 8: Eigenschaften der relevanten, verfügbaren Messsysteme

		Baujahr	Betriebssystem	Messbereich in mm ³ (Länge x Breite x Höhe)	Auflösung		Geschwindigkeit	Geeignet für
					Lateral in µm	Vertikal in µm		
1-Kamera-Streifen-	MicroCAD 0,3	2009	Win XP	4,4 x 2,8 x 1	2,5	0,3	+	NF
	MicroCAD 1,0	2009	Win XP	12,4 x 7,9 x 4,4	17	1	+	NF
	MicroCAD 16	1998	Win XP	41 x 31 x 10	25	3	0	NF&GG
2-Kamera-Streifenprojektion	GOM ATOS Compact Scan 2M	2012	Win 8	115 x 88 x 92	75	75	0	GG
	GOM ATOS Core 200	2014	Win 8	195 x 143 x 158	80	80	+	GG
	TopoCam 50	2008	Win XP	100 x 80 x 50	48	2	--	GG
	TopoCam 90	2010	Win XP	180 x 150 x 120	90	5	--	GG
Photogrammetrie	Ensensio N10 304-18	2013	Win 10	543 x 399 x 1851	833	1043	++	
	Ensensio N10 810-18	2013	Win 10	123 x 93 x 107	195	132	++	
	Ensensio N10 1610-18	2013	Win 10	58 x 42 x 23	89	65	++	

--: > 60 Sek.; -: < 45 Sek.; o: < 30 Sek.; +: < 15 Sek.; ++: < 5 Sek.

NF: Nebenformelemente; GG: Grobgestalt

Relevant für einen auf die holistische und fertigungsnahe Messung blechmassivumgeformter Bauteile spezialisierten Multisensor-Aufbau, ist die Kombination von hochauflösenden Sensoren mit weiteren Sensoren, die über einen großen Messbereich verfügen. Hierdurch kann die Grobgestalt eines Bauteils erfasst und, wo erforderlich, durch hochauflösende Messungen detailliert werden. Die Festlegung der

Eignung von Sensoren für die Erfassung von Nebenformelementen beziehungsweise der Bauteilgrobgestalt erfolgte durch deren technische Spezifikationen sowie durch Expertenwissen aus vergleichbaren Messaufgaben. Zudem wurde die Bewertung der Messgeschwindigkeit, unter der die Zeit zur Messdatenakquisition verstanden wird, ebenso auf Basis vergleichbarer Messaufgaben qualitativ vorgenommen. Für jeden Sensor sind zudem das Baujahr und das höchstmögliche Windows-Betriebssystem angegeben, unter welchem der volle Funktionsumfang verfügbar ist.

Die Streifenprojektionssensoren mit einer Kamera zeichnen sich durch gute Auflösungsvermögen und hohe Messgeschwindigkeiten aus. Alle drei Sensoren sind für die Erfassung von Nebenformelementen qualifiziert. Der MicroCAD 16 Sensor kann auch zur Erfassung der Grobgestalt kleiner Bauteile eingesetzt werden. Für die spätere Integration in einen Multisensor-Aufbau wurden die Sensoren MicroCAD 0,3 und MicroCAD 1,0 ausgewählt. Ausschlaggebend waren die im Vergleich besseren technischen Spezifikationen als die des MicroCAD 16 Sensor sowie das neuere Baujahr.

Die Streifenprojektionssensoren mit zwei Kameras in diesem Vergleich sind zur Erfassung der Grobgestalt geeignet. Obwohl der TopoCam 50 Sensor das beste Auflösungsvermögen in dieser Sensorgattung aufweist, wurde er für eine Integration nicht herangezogen. Wichtig für die Detektion der Grobgestalt ist ein Kompromiss zwischen einem ausreichend großen Messbereich, einer adäquaten Auflösung und einer schnellen Messdatenakquisition. Dieser Kompromiss wird durch die beiden Sensoren GOM ATOS Compact Scan 2M sowie GOM ATOS Core 200 besser erreicht. Da beide Sensoren über das gleiche Halterungssystem verfügen, können die Sensoren durch dieselben hardwaretechnischen Maßnahmen integriert werden.

Die verfügbaren photogrammetrischen Systeme weisen zwar sehr große Messbereiche und schnelle Messgeschwindigkeiten auf, sind jedoch mit den zu geringen Auflösungsvermögen nur für die Erfassung der Grobgestalt geeignet. Daher werden auch diese Systeme nicht für einen experimentellen Bereich verwendet.

5.3 Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus

Ausgehend von der Hauptfunktion des Messsystemaufbaus, der holistischen und fertigungsnahen Erfassung blechmassivumgeformter Bauteile, wurden auf Grundlage des Lastenheftes zwei wesentliche Teilfunktionen identifiziert:

- Sensorhalterung und –positionierung
- Handhabung von Messobjekten

Für die Teilfunktionen wurden unter Zuhilfenahme verschiedener Methoden aus dem Bereich der konstruktiven Lösungsfindung erste Lösungsprinzipien erarbeitet, diese miteinander verglichen und die favorisierten Ansätze weiter detailliert [Holzbaur 2007]. Auf eine ausführliche Darstellung der Lösungsfindung und -realisierung wurde im Folgenden aus Gründen der Fokussierung auf das Messsystem und dessen Funktionserfüllung verzichtet. Aus Abbildung 20 ist eine Einordnung der Teilfunktionen in die Gesamtstruktur des Messsystemaufbaus ersichtlich. Zusätzlich sind, für die Realisierung der Teilfunktionen notwendige Baugruppen aufgeführt.

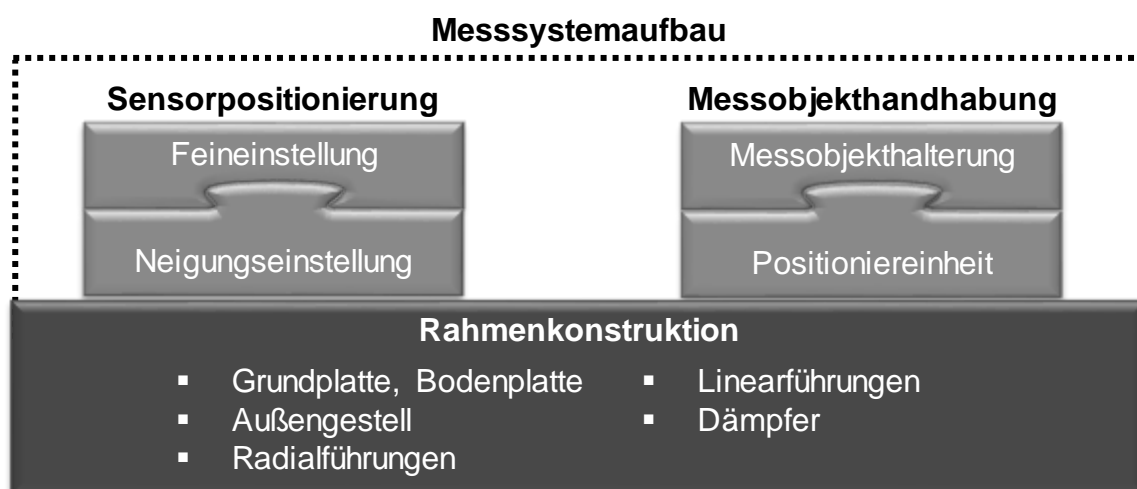


Abbildung 20: Baugruppen des mechanischen Messsystemaufbaus

Durch eine Untergliederung des Messsystemaufbaus in verschiedene Baugruppen kann eine hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit gewährleistet werden. Zugleich wird hierdurch der Konstruktions- und Realisierungsaufwand minimiert. Das prototypische Multisensor-Messsystem bietet somit ein weites Versuchsspektrum und erlaubt zudem die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf prozessnähere Auslegungsvarianten.

5.3.1 Rahmenkonstruktion

Die Rahmenkonstruktion ist die verbindende Baugruppe des Messsystemaufbaus, dargestellt in Abbildung 21. Eine Grundplatte aus Granit stellt den Unterbau des Messsystemaufbaus dar. Darauf ist eine Bodenplatte aus Edelstahl positioniert, an deren Unterseite spezielle passive Schwingungsdämpfer angebracht sind. Auf der Bodenplatte ist ein käfigartiges Außengestell aus Aluminiumprofilen installiert. Über diese massive Konstruktion, bestehend aus Grundplatte, Bodenplatte, Dämpfungssystemen sowie dem Außengestell kann die notwendige Robustheit und Stabilität des Systems gewährleistet werden. Zudem erlauben die in der Bodenplatte eingebrachten Gewindebohrungen eine sichere Positionierung von Baugruppen. In Verbindung mit dem magnetischen Werkstoff ist eine flexible Erweiterung des Aufbaus

möglich. Beispielsweise erlauben Magnetfußhalterungen ein einfaches, schnelles aber stabiles Abbringen weiterer Sensoren.

Innerhalb des Außengestells sind an Unter- und Oberseite zwei kreisrunde Bogenführungssysteme spiegelbildlich angeordnet. Die Führungssysteme bestehen jeweils aus einer Bogenschiene sowie drei darauf montierten Laufwägen mit integrierten Backenbremsen. Ein speziell geformtes V-Profil der Führungsschiene unterstützt in Kombination mit dem Gegenprofil der Führungsrollen an den Laufwägen das Abgleiten von Verschmutzungen, wie sie aus der Umgebungsluft, beispielsweise aus Staubpartikeln, resultieren. Ein Zusetzen der Führungselemente durch Schmutz soll hiermit verhindert werden und auf diese Weise ein Einsatz im fertigungsnahen Umfeld ermöglichen.

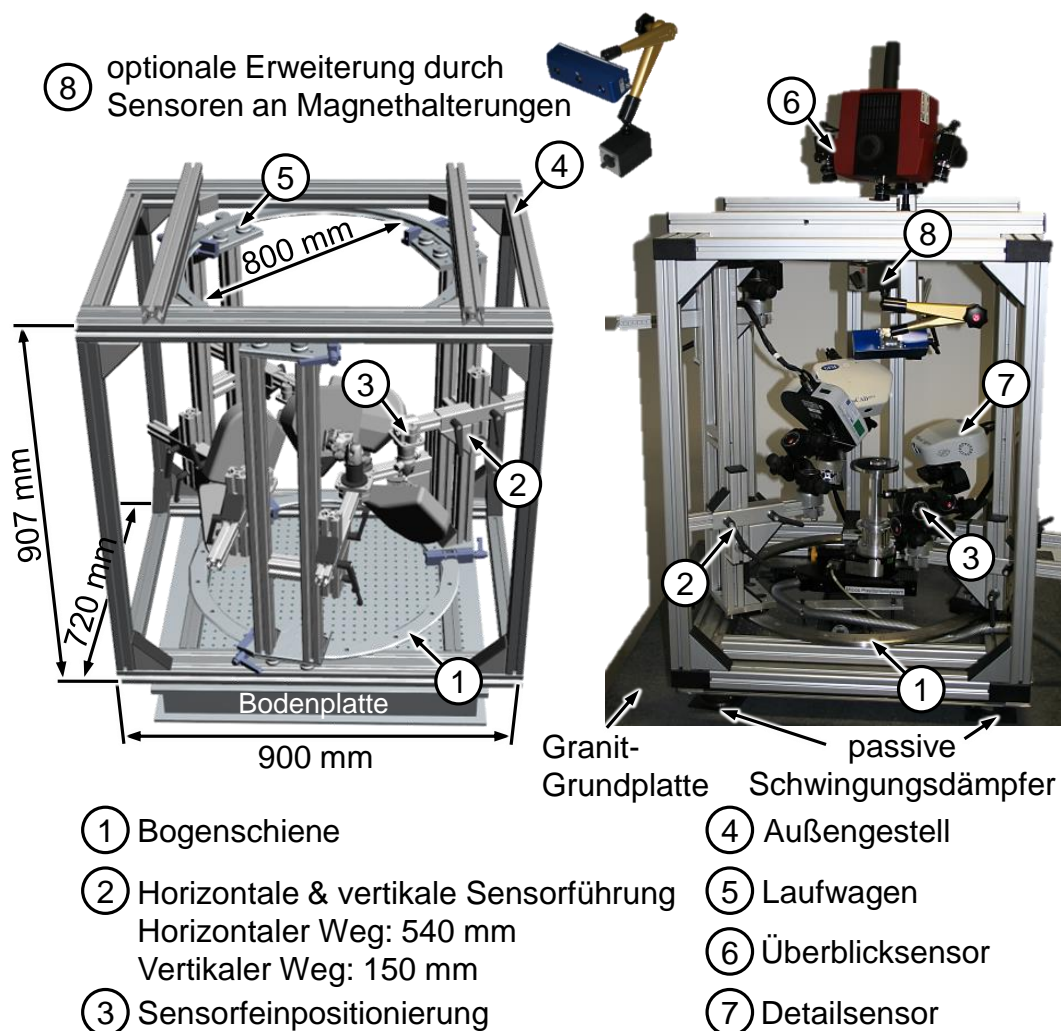


Abbildung 21: Konzipierter (links) und realisierter (rechts) Messsystemaufbau

Auf einem Laufwagen sind zwei Linearführungen für Sensoren montiert. Hierbei kann zwischen einer vertikalen und einer horizontalen linear geführten Bewegung unterschieden werden. Für die vertikale Linearverschiebung ist eine doppelte Gleitschlittenführung entlang eines Aluminiumprofils vorgesehen. Hierdurch wird ein

spielfreier Lauf entlang der Profilnut und durch die integrierte Schlittenklemmung eine ausreichend hohe Haltekraft für eine sichere Arretierung in der gewünschten Position ermöglicht. Die horizontale Linearführung wird durch ein, an der Schlittenklemmung der Vertikalführung installiertes Teleskopprofil realisiert, das über zwei Klemmhebel fixiert werden kann. Auf das vertikal verschiebbare Teleskopprofil wird die Einheit für die Sensorpositionierung montiert.

In Abbildung 21 ist links der konzipierte Messsystemaufbau dargestellt. Zur besseren Erkennbarkeit der Rahmenkonstruktion sind nur wenige Detailsensoren sowie keine Komponenten der Messobjekthandhabung dargestellt. Rechts ist der realisierte Messsystemaufbau mit dem Überblicksensor GOM ATOS Compact Scan 2M, drei Detailsensoren der MicroCAD-Baureihe sowie einem Ensensio-Sensor auf einer Magnethalterung zur Demonstration der Erweiterbarkeit abgebildet. Im realisierten Aufbau sind die mittig angeordneten Komponenten der Messobjekthandhabung zu erkennen.

5.3.2 Sensorpositionierung

Eine Grobausrichtung der Sensoren kann über die in der Rahmenkonstruktion integrierte Kinematik bereits gewährleistet werden. Allerdings sind hiermit nicht alle Translationen und Rotationen feinfühlig zu kontrollieren, um die Sensormessbereiche ausreichend genau auf das zu messende Merkmal einzustellen. Zudem erfordern die Messobjekte der Blechmassivumformung Vorkehrungen für eine Feineinstellung der Sensormessbereiche im Submillimeterbereich.

Zusätzliche Rotationen für eine ausreichend flexible Sensorausrichtung können durch den Einsatz von Dreiwege-Getriebeneigern ermöglicht werden. Diese werden häufig in der Fotografie als Stativköpfe eingesetzt und ermöglichen durch einen integrierten Zahntrieb eine präzise wie auch voneinander unabhängige Einstellung aller drei Neigungsachsen. Sie gewährleisten zudem eine sichere Arretierung in der jeweiligen Position. Die eingestellte Sensorausrichtung lässt sich mithilfe der angebrachten Winkelskalen dokumentieren und reproduzierbar einstellen.

Optische Sensoren weisen häufig entlang der optischen Achse die höchste Ortsauflösung und damit oft einhergehend die geringste Ausdehnung des Messbereichs auf. Um eine ausreichend genaue Positionierung des Messbereichs in dieser Richtung zu ermöglichen, ist eine zusätzliche Präzisionslinearachse auf dem Getriebeneiger angebracht, auf welchem der Sensor montiert ist. Dadurch kann stets eine exakte Justierung des Messbereichs entlang der optischen Achse, unabhängig der anderen Bewegungsachsen, erfolgen. Die durch die Komponenten realisierte Vorrichtung zur Sensorfeinpositionierung ist in Abbildung 22 dargestellt.

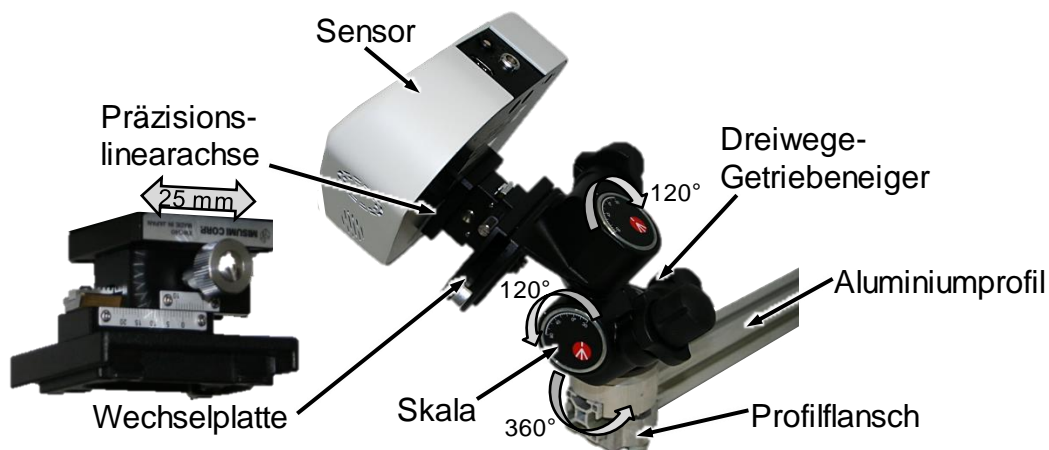


Abbildung 22: Sensorfeinpositionierung mittels Getriebeneiger und Präzisionslinearachse

5.3.3 Messobjekthandhabung

Für die Handhabung der zu messenden Bauteile sind in Tabelle 6 eine Reihe von Anforderungen definiert, die durch eine Aufteilung auf die beiden Komponenten Messobjekthalterung sowie Positioniereinheit realisiert wurden. Die Positioniereinheit, deren technische Daten in Tabelle 9 aufgeführt sind, besteht aus zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Präzisionslinearachsen MT-90 100 sowie einer Präzisionsrotationseinheit PRS-110. Durch eine derartige Anordnung kann eine hochgenaue laterale Translation entlang beider Raumachsen wie auch eine präzise Rotation um die Bauteilhochachse erfolgen.

Tabelle 9: Technische Daten der Positioniereinheit

PRS-110 Rotations- einheit	Motortyp	ZSS43 Schrittmotor
	Rotationsweite	360°
	Genauigkeit über 360°	±0,02°
	Wiederholgenauigkeit unidirektional	±0,002°
MT-90 100 Translations- einheit	Motortyp	ZSS42-1 Schrittmotor
	Verfahrweg	100 mm
	Genauigkeit über 50 mm	±5 µm
	Wiederholgenauigkeit bidirektional	±2 µm

Um die Möglichkeiten der flexiblen Sensorpositionierung und der damit verbundenen großen Anzahl an Freiheitsgraden im vollen Umfang nutzen zu können, ist eine entsprechende Auslegung der Messobjekthalterung notwendig. Das zu messende Bauteil ist möglichst leicht oberhalb des Zentrums des Außengestells zu platzieren,

um die optischen Sensoren sowohl unterhalb als auch oberhalb des Bauteils anordnen zu können. Die Messobjekthalterung besteht daher aus einem zweiteiligen Montageadapter, welcher die Verbindung mit der Positioniereinheit herstellt, einem langen Zwischenstück und einem runden Messtisch. Letzterer ist auswechselbar gestaltet und steht in den Durchmesservarianten 50 mm, 70 mm und 100 mm bereit. Hierdurch ist eine Anpassung an die unterschiedlichen Größen der betrachteten rotationssymmetrischen Bauteile möglich. Für kleine Bauteildurchmesser dient die Oberseite des Zwischenstücks als Messtisch. Eine Fixierung des Bauteils wird durch einen rutschhemmenden, teilelastischen und ölresistenten Belag des Messtisches sowie zusätzlich durch unterhalb des Messtisches installierte Magnete garantiert. Für eine sichere und robuste Montage der Komponenten Montageadapter, Zwischenstück und Messtisch sind die jeweiligen Verbindungselemente mit Zentrierpassungen versehen. Die Anordnung der Komponenten für die Messobjekthandhabung ist in Abbildung 23 dargestellt.

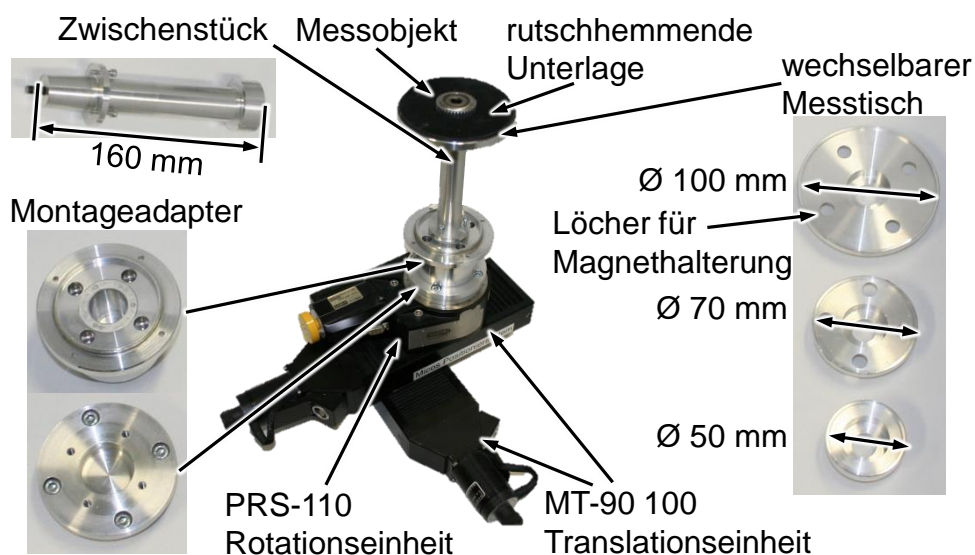


Abbildung 23: Komponenten für die Messobjekthandhabung

6 Multisensor-Kalibrierung

Mehrskalige Multisensor-Messungen erlauben die Erfassung verschiedener Merkmale von variierender Größe und Form mit jeweils einem hierfür geeigneten Sensor. Nach den Messungen liegen die Messdaten in den Koordinatensystemen der jeweiligen Sensoren vor. Werden die Datensätze in ein Programm zur Auswertung geladen, wie das in dieser Arbeit standardmäßig eingesetzte IMInspect V14 aus dem Softwarepaket PolyWorks 2014, liegen die Datensätze daher nicht in einem gemeinsamen Koordinatensystem vor und sind somit auch nicht zueinander ausgerichtet. Um die Messdatensätze miteinander in Verbindung bringen zu können, ist deren Registrierung in ein gemeinsames Koordinatensystem erforderlich. Hierzu ist die Bestimmung der Position und Ausrichtung der Sensoren zueinander beziehungsweise in Bezug auf ein einheitliches Koordinatensystem notwendig. Durch eine Kalibrierung der beteiligten Sensoren können diese Informationen ermittelt und die Sensordatensätze korrekt ausgerichtet werden (Abbildung 24).

Koordinatensysteme:

X_1 - Y_1 - Z_1 **Sensor 1**
 X_2 - Y_2 - Z_2 **Sensor 2**
 x - y - z **Auswertesoftware**

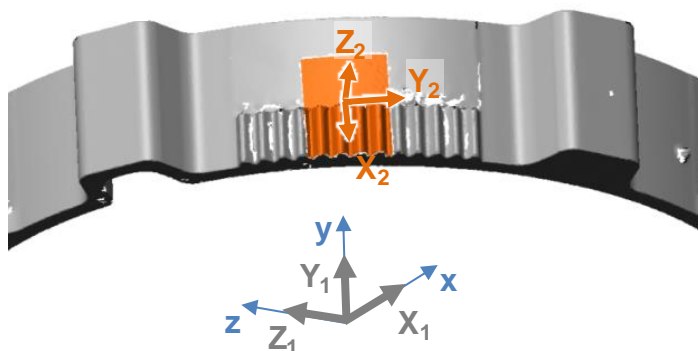


Abbildung 24: Ausrichtung mehrerer Datensätze in einem gemeinsamen Koordinatensystem

Kalibrierungen werden notwendig, sobald eine Veränderung im Messprozess eine Variation der Sensorausrichtung zueinander hervorruft. Dies kann einerseits gezielt erfolgen, wenn beispielsweise Messbereiche neu positioniert oder weitere Sensoren hinzugezogen werden. Andererseits kann eine Veränderung auch zufällig erfolgen, beispielsweise durch Schwingungen, mechanischem Versagen von Haltevorrichtungen oder großen Temperaturänderungen. [Loderer und Hausotte 2016]

Die Entwicklung einer, an den Aufbau und die Anforderungen des mehrskaligen Multisensor-Messsystems angepassten Kalibriermethodik, ist essenziell für die korrekte Funktionsweise des prototypischen Messsystems und stellt somit den zentralen Kernpunkt der wissenschaftlichen Arbeit dar. Einleitend werden hierzu einige Grundlagen vorgestellt, bevor im Weiteren zwischen der Detektion der Sensorausrichtungen und -positionen sowie der Einbeziehung, der aus der Messobjekthandhabung durch das Positioniersystem resultierenden Bewegung unterschieden wird.

In einem abschließenden Modell zum Datenfluss wird aufgezeigt, wie die Informationen aus den Messungen mithilfe der Kalibrierung in eine mehrskalige Multisensor-Messung münden.

6.1 Grundlagen der Messdatenregistrierung

Ziel der Messdatenregistrierung ist die Überführung der Sensormessdatensätze, die zu Beginn im jeweiligen Sensorkoordinatensystem vorliegen, in ein gemeinsames Koordinatensystem. Derartige Manipulationen von Messdaten werden häufig in eine Grob- und eine Feinregistrierung unterteilt, die beide auf denselben mathematischen Grundlagen aufbauen. [Shaw 2013]

Für die betrachteten Problemstellungen liegen die Messinformationen der verwendeten Messgeräte jeweils in kartesischen Koordinatensystemen vor, weshalb diese im Fokus der Betrachtungen stehen.

6.1.1 Mathematische Operationen zur Messdatenhandhabung

Für die Handhabung von digitalen Datensätzen werden sogenannte „geometrische Transformationen“ verwendet. Nach [Schiele 2012] können diese in die Operationen Translation, Skalierung, Scherung, Spiegelung sowie Rotation unterteilt werden. Rotationen untergliedern sich nochmals in Drehungen um Koordinatenachsen sowie um beliebige Achsen. Die mathematischen Grundlagen sind in [Fetzer und Fränkel 2008; Schiele 2012; Virag 2012] und [Hoschek und Lasser 1989] ausführlich beschrieben.

Messdatensätze optisch flächenhaft messender Sensoren, im Rahmen dieser Arbeit im STL-Format gespeichert, beinhalten die Information der Messobjektoberfläche. Darin enthalten sind die zu detektierenden Merkmale wie beispielsweise Winkel, Radien oder Abstände. Für eine unverfälschte Handhabung von Messdatensätzen sind lediglich die Operationen Rotation und Translation geeignet. Mit diesen beiden geometrischen Transformationen werden die Datensätze in kartesischen Koordinatensystemen bewegt beziehungsweise rotiert. Eine Manipulation hinsichtlich der in den Daten enthaltenen Informationen findet dabei für alle Datenpunkte in gleichem Maße statt. Im Gegensatz dazu werden mit den Transformationen Scherung, Skalierung und Spiegelung enthaltene Informationen innerhalb der Messdatensätze unterschiedlich manipuliert. Die Parameter für diese Transformationen werden für jeden Sensor einzeln durch die herstellerseitig festgelegten Kalibrierverfahren berechnet und fließen bei der Messdatensatzerzeugung automatisiert mit ein. Eine Betrachtung der Transformationen im Rahmen der Multisensor-Kalibrierung ist daher nicht mehr erforderlich.

Durch sogenannte Transformationsmatrizen können Messdatensätze manipuliert werden. In diesen 4 x 4 Matrizen sind alle geometrischen Transformationen enthalten. Bei der Berechnung der Matrixelemente fließen an einigen Positionen die Inputgrößen mehrerer Operationen mit ein. Durch die Fokussierung auf die Operationen Rotation und Translation findet keine derartige Überlagerung statt, was eine einfache Interpretation der Matrixelemente ermöglicht. Eine Transformationsmatrix in ihrer allgemeinen Form ist in der Abbildung 25 oben dargestellt. Hieraus ist die Trennung zwischen Rotation und Translation ersichtlich. Findet fälschlicherweise eine Skalierung der Messdaten statt, kann dies an den entsprechenden Matrixelementen erkannt werden, die dann nicht den Wert null annehmen. In der Abbildung 25 unten ist eine beispielhafte Transformationsmatrix für das Softwarepaket PolyWorks gezeigt. Um von der Software als solche Matrix erkannt zu werden, ist eine programmeigene Syntax vor den eigentlichen Daten erforderlich.

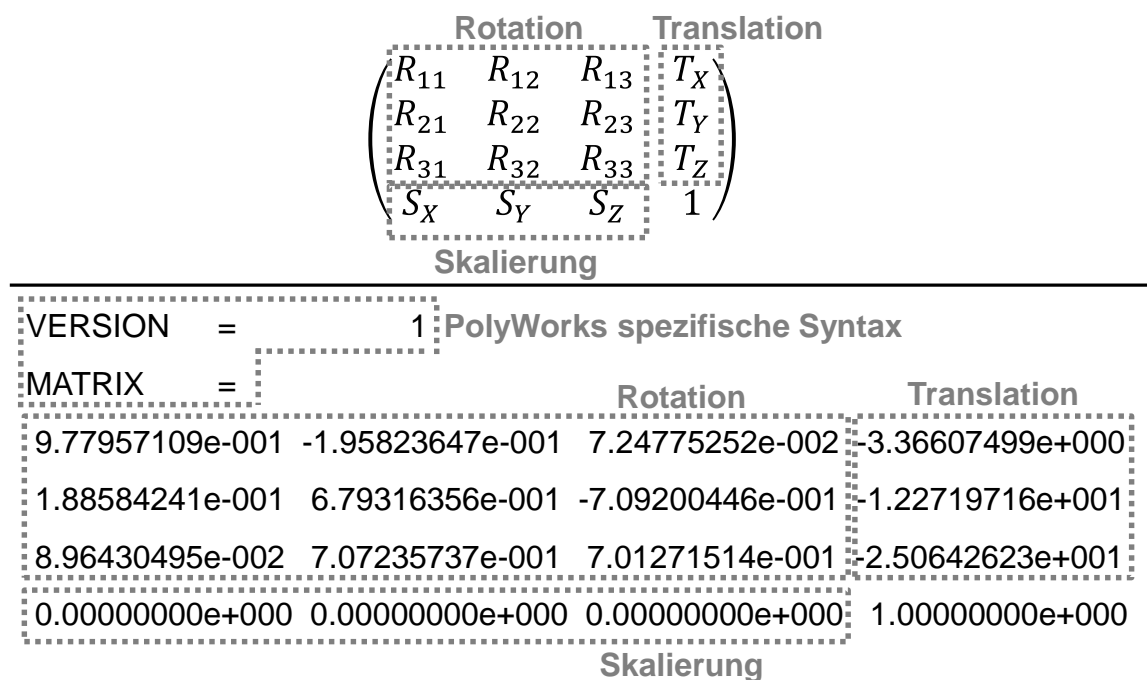


Abbildung 25: Allgemeine Transformationsmatrix (oben); beispielhafte Transformationsmatrix im PolyWorks Format (unten).

6.1.2 Grobregistrierung

Für die Grob- und Feinregistrierung mehrerer Datensätze kommen numerische Verfahren zum Einsatz, welche die bestmögliche Ausrichtung zueinander durch mathematische Algorithmen unterstützen. Das Ziel der Grobregistrierung ist dabei die näherungsweise Berechnung der Transformationen für die Datensätze, um diese damit so genau auszurichten, dass nachgeschaltete Verfahren der Feinregistrie-

rung darauf aufbauend die exakten Transformationen ermitteln können. [Ritter 1996; Zacher 2004] In [Zacher 2004] werden hierzu einige etablierte Verfahren vorgestellt.

In PolyWorks 2014 ist eine interaktive Grobregistrierung implementiert. Hierbei werden durch den Bediener homologe (korrespondierende) Punkte, die in beiden Datensätzen vorhanden sind, manuell ausgewählt. Dies kann einerseits durch überlappende Bereiche in den Datensätzen ermöglicht werden, wie in Abbildung 26 beispielhaft gezeigt. Sind keine derartigen Bereiche vorhanden, können die Datensätze andererseits an einem CAD-Modell ausgerichtet werden. Auf Basis der Punkteauswahl werden die Transformationen errechnet, die einen minimalen Abstand aller korrespondierenden Punkte darstellen. Für eine mathematische Lösung der Transformationsberechnung ist mindestens die Auswahl von drei korrespondierenden Punkten erforderlich. Jedoch kann die Genauigkeit des Verfahrens durch eine Erhöhung der ausgewählten korrespondierenden Punkte gesteigert werden. Aufgrund der Kombination zwischen manueller Punkteauswahl und automatischer Transformationsberechnung gehört dieses Verfahren zu den halbautomatischen Grobregistrieremethoden. [Shaw 2013]

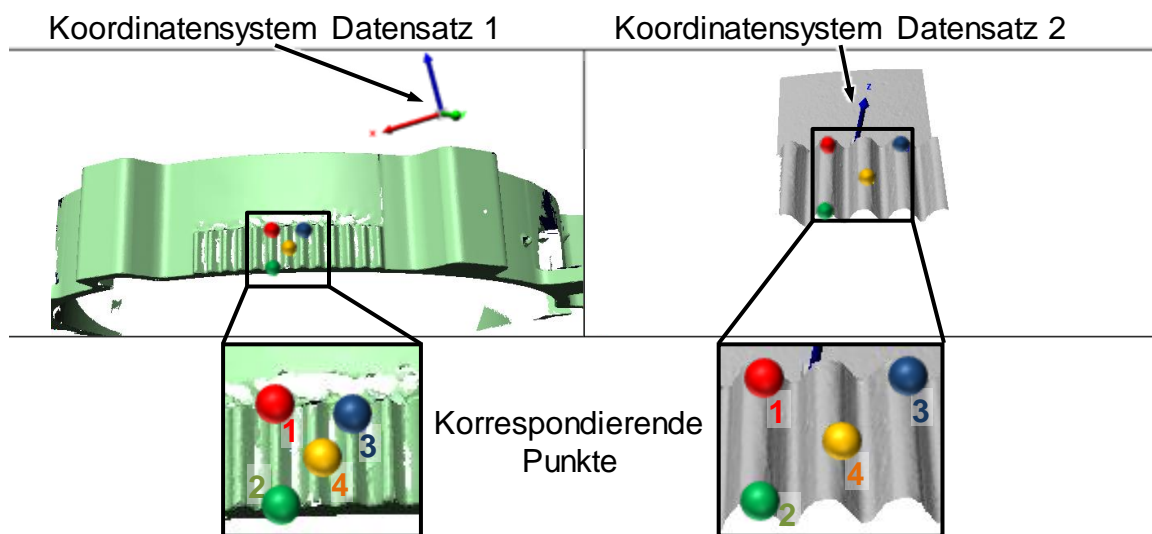


Abbildung 26: Interaktive Grobregistrierung in PolyWorks IMInspect V14

6.1.3 Feinregistrierung

Um eine weitere Detaillierung der Ausrichtung zu erreichen, schließt sich häufig an die Grobregistrierung ein Verfahren der Feinregistrierung an. Als grundlegende Standardverfahren haben sich in diesem Bereich die Iterative-Closest-Point-Algorithmen (ICP) bewährt, welche meist in softwarespezifischen Abwandlungen in Pro-

grammen zur Datenregistrierung zum Einsatz kommt, so auch in PolyWorks. Umfassende Erläuterungen zur allgemeinen Funktionsweise können aus [Besl und McKay 1992; Zacher 2004; Shaw 2013] entnommen werden.

Während die halbautomatische Grobregistrieremethode von PolyWorks die Transformationen lediglich auf Basis der ausgewählten korrespondierenden Punkte errechnet und deren Abstand minimiert, werden bei Methoden der Feinregistrierung, auch „Best-Fit“-Ausrichtung genannt, alle zur Verfügung stehenden Datenpunkte berücksichtigt. Das Vorgehen für die Durchführung einer „Best-Fit“-Ausrichtung ist in Abbildung 27 veranschaulicht und verlangt bereits vorausgerichtete Datensätze.

In Abbildung 27 ist eine deutliche Abweichung zwischen den beiden Datensätzen zu erkennen, resultierend aus einer zu ungenauen Grobregistrierung. Für die Feinregistrierung ist ein Datensatz als Referenzdatensatz festzulegen, dessen Position und Koordinatensystem beibehalten wird. Die weiteren Datensätze werden an diese Referenz angefitet. In einem zweiten Schritt werden die, dem „Best-Fit“-Algorithmus zugrundeliegenden Parameter definiert. Hierzu zählen neben Parametern für die Ausrichtung, wie beispielsweise der maximal zu berücksichtigende Winkel oder Abstand zwischen den Datensätzen, auch Parameter für den Abbruch des iterativen Algorithmus. Dabei gibt das Konvergenzziel einen bestimmten Wert an, bei dessen Erreichen die Ausrichtung für den Bediener als genau genug eingestuft und der Algorithmus beendet wird. Um zu verhindern, dass bei einem zu klein gewählten Wert, welcher nicht erreicht werden kann, PolyWorks in eine endlose Iterationsschleife verfällt, ist zusätzlich eine maximale Anzahl an Iterationen anzugeben. Auf Basis der gewählten Parameter wird der „Best-Fit“-Algorithmus so lange ausgeführt, bis eine der Abbruchbedingungen erfüllt ist. Im dargestellten Beispiel (Abbildung 27) kann eine deutliche Verbesserung der Ausrichtung erkannt werden. [InnovMetric 2014, S. 253-386]

ICP-Algorithmen errechnen stets eine mathematische Lösung für die Ausrichtung von Datensätzen. Jedoch gilt es durch den Bediener sicherzustellen, dass es sich dabei auch um ein sinnvolles und verwertbares Resultat handelt. Werden Parameter falsch gesetzt oder ist die Grobregistrierung zu ungenau, kann es zu erheblichen Abweichungen kommen. Am Beispiel der in Abbildung 27 dargestellten Verzahnung ist das Szenario einer Grobausrichtung vorstellbar, die beispielsweise um eineinhalb Zahnabstände verschoben ist. Die Zahnkonturen des Detailsensor-Datensatzes würden sich dann zwischen den Zahnkonturen des Referenzdatensatzes befinden. Der „Best-Fit“-Algorithmus würde in diesem Fall den Detailsensor-Datensatz um einen halben Zahnabstand verschieben und somit die Zahnkonturen in Übereinstimmung bringen. Jedoch wäre der Detailsensor-Datensatz immer noch um einen

Zahnabstand falsch. Derartige Problemstellungen müssen bei der Anwendung von ICP-Algorithmen bedacht und durch entsprechend genaue Vorausrichtungen verhindert werden.

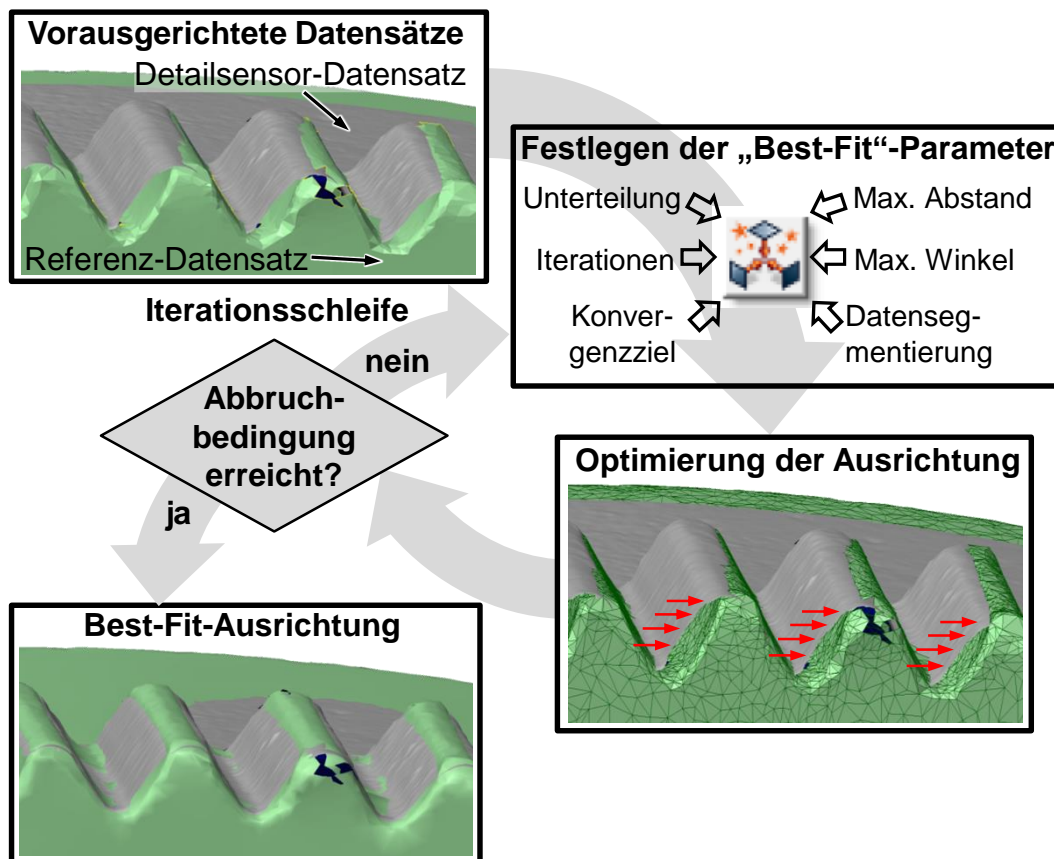


Abbildung 27: „Best-Fit“-Feinregistrierung in PolyWorks IMInspect V14

6.2 Konzept zur Detektion der Sensorausrichtungen

Für die Ermittlung der exakten Ausrichtungen, der an der Messung beteiligten Sensoren, wurde ein angepasstes Verfahren nach dem Prinzip der Ausrichtung an einer Referenz entwickelt: Ein Kalibrierkörper, dessen Oberfläche durch eine einmalige Struktur codiert ist, wird so angeordnet, dass durch alle Sensoren ein Teil der Oberfläche erfasst werden kann. Anschließend werden mit jedem Sensor die in den jeweiligen Messbereichen befindlichen Oberflächensegmente des Kalibrierkörpers detektiert. Die entstehenden Datensätze können nun durch die einmalige Oberflächenstruktur des Kalibrierkörpers an einem digitalen Referenzmodell korrekt zugeordnet und angefittet werden. Sind alle Datensätze an der richtigen Position, erfolgt für jeden Sensor eine Berechnung der Transformationsmatrix. Dadurch ist die Ausrichtung der Sensoren in einem gemeinsamen Koordinatensystem, das dem Koordinatensystem des Referenzmodells entspricht, bestimmt.

6.2.1 Entwicklung eines flexiblen Kalibrierkörpers

Auf Basis dieser Grundidee galt es einen Kalibrierkörper zu entwerfen, der über eine flexibel variierbare Gestalt verfügt und dessen Oberfläche einerseits durch optische Messverfahren gut zu erfassen ist, andererseits eine eindeutig identifizierbare Struktur aufweist.

Ergebnis ist das in Abbildung 28 gezeigte Konzept eines flexiblen Kalibrierkörpers, dessen Hauptbestandteile die sogenannten Kalibrierzylinder darstellen. Diese Zylinder verfügen über eine einmalig vorhandene, dreidimensionale Oberflächenstruktur, bestehend aus Großbuchstaben an der Mantelfläche und aus Zahlen an der Oberseite. Auf diese Weise ist eine eindeutige Lokalisierung von Messbereichen auf den Oberflächen von Kalibrierzylindern möglich. Um die Zylinder flexibel anordnen und damit den variantenreichen Messobjekten der Blechmassivumformung entsprechen zu können, ist jeder Kalibrierzylinder auf einem Positionierarm montiert, der selbst wiederum an einer Grundplatte befestigt ist.

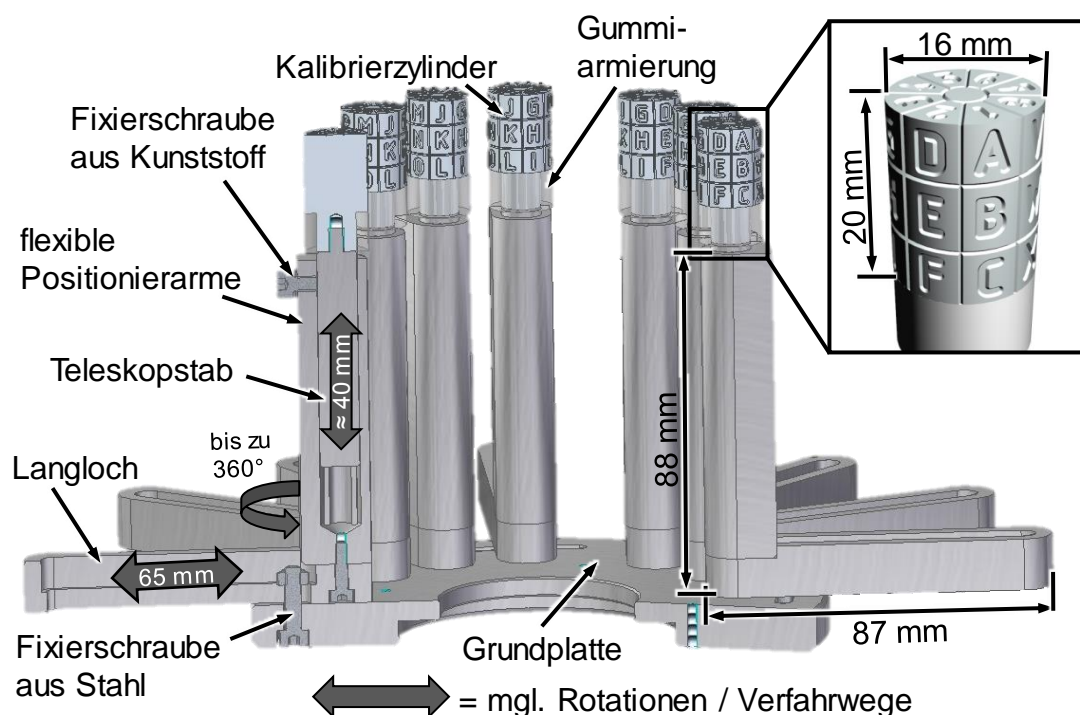


Abbildung 28: Konzept des flexiblen Kalibrierkörpers

Ein Positionierarm besteht aus einer Befestigung mit einem Langloch und einem Teleskopstab, wodurch der darauf montierte Kalibrierzylinder frei im Raum positioniert werden kann. Die Positionssicherungen werden durch das Reibschluss-Prinzip realisiert. Während die lateralen Positionen über Schrauben und Muttern aus Edelstahl geklemmt werden, sind für die vertikalen Sicherungen Kunststoffschrauben vorgesehen, welche den Reibschluss durch direkten Druck auf die Verlängerung

des Kalibrierzylinders herstellen. Daher müssen diese Schrauben aus einem weichen Material bestehen, um Beschädigungen der Führungen zu verhindern. Eine Gummiarmierung unterhalb der Kalibrierzylinder dient als Griffstück und erlaubt eine vertikale Positionierung der Zylinder, ohne die Mantelfläche berühren zu müssen. Auf diese Weise kann einer Verschmutzung der Oberflächenstruktur durch Schweiß und Fett entgegengewirkt werden.

Um eine Montage des Kalibrierkörpers auf der Positioniereinheit zu ermöglichen, ist auf eine Einhaltung deren maximaler Traglast zu achten. Für die Grundplatte sowie die Positionierarme wurde deshalb Aluminium als Werkstoff verwendet, das mit einer Dichte von $2,7 \text{ g/cm}^3$ für ein geringes Gesamtgewicht sorgt [Fischer et al. 2008].

Bei der Materialauswahl der Kalibrierzylinder galt es ebenfalls das Gesamtgewicht möglichst gering zu halten. Zudem wurde auf niedrige Fertigungskosten, eine gute optische Erfassbarkeit, eine ausreichend hohe Qualität der resultierenden Muster sowie eine Sicherstellung eines möglichst robusten und wenig störanfälligen Ablaufs des Kalibrierprozesses geachtet. Verschiedene Arten von Kunststoffen erfüllen die Anforderungen hinsichtlich der optischen Erfassbarkeit und, mit einer Masendichte zwischen $0,8 \text{ g/cm}^3$ und $2,2 \text{ g/cm}^3$, auch die Vorgaben hinsichtlich eines geringen Gewichts [Briehl 2014]. Die Herstellung eines qualitativ hochwertigen Musters über formgebende Verfahren wie beispielsweise Spritzgießprozessen wurde aufgrund hoher Kosten für die Bereitstellung einer entsprechenden Kavität außer Acht gelassen. Spanende Bearbeitungsprozesse erzielen bei Kunststoffwerkstoffen eine ausreichend hohe Qualität, um die Oberflächenstrukturierung ebenfalls realisieren zu können. Durch die, im Vergleich zu Aluminium geringere Formstabilität und nachteiligen chemischen Alterungsprozessen, wurde von einer Verwendung von Kunststoffen abgesehen und ein metallischer Werkstoff für die Herstellung der Kalibrierzylinder ausgewählt. Aluminium weist auf spanend bearbeiteten und damit meist hoch reflektiven Oberflächen allerdings eine schlechte Erfassbarkeit durch optische Messgeräte, die eine diffuse Reflexion erfordern, auf. Eine an die Fertigung angeschlossene Oberflächenbehandlung wird dadurch erforderlich.

6.2.2 Fertigungsverfahren und Oberflächenbehandlung

Die Fertigung der Kalibrierzylinder mit den eingebrachten Mustern erfordert ein hochgenaues Fertigungsverfahren. Erodierverfahren entsprechen zwar dieser Forderung, wurden aber aufgrund der hohen Herstellungskosten ausgeschlossen. Ebenso wurde die Fertigung der Muster mittels Laserbeschriftung nicht weiter betrachtet, da für deren Anwendung auf die Geometrie der Kalibrierzylinder ein komplexes Fünffachssystem mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit notwendig

wäre, um den Laserstrahl im benötigten Betriebsabstand und -winkel zu halten. Derartige Systeme sind jedoch noch nicht im großflächigen Einsatz und unterliegen damit einer gewissen Verfügbarkeitsbeschränkung. Im Gegensatz dazu sind Fünfachsfräsmaschinen bereits weit verbreitet und erfüllen zudem die geforderten Genauigkeitsanforderungen. Der 90°-Spitzkopffräser wird für die Einarbeitung des Musters mit einer sehr geringen Umdrehungsgeschwindigkeit beaufschlagt, welche den Fräser im realen Betrieb nahezu stillstehen lässt. Durch den resultierenden Gravurprozess kann eine präzise Mustererzeugung in dem vergleichsweise weichen Aluminium garantiert werden.

Die Rückstände der mechanischen Bearbeitung, wie beispielsweise Grate, müssen im Zuge der nachgelagerten Oberflächenbehandlung entfernt werden. Für die Auswahl einer geeigneten Oberflächenbehandlung, um sowohl die Entfernung der Bearbeitungsrückstände als auch die Schaffung einer optisch kooperativen Oberfläche zu garantieren, ist in Tabelle 10 eine Bewertung verschiedener Verfahren empirisch auf Basis von Expertenwissen sowie Vergleichsmessungen vorgenommen. Die Bewertungsskala reicht von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut).

Tabelle 10: Bewertungsmatrix (1: sehr schlecht; 5: sehr gut) für verschiedene Oberflächenbehandlungen zur Schaffung einer optisch kooperativen Oberfläche

	Aluminium, unbehandelt	Glasstrahlen	Kreidespray	Lackieren	Sand- strahlen
Herstellungskosten	5	3	4	3	3
Optische Erfassbarkeit	1	5	5	4	5
Qualität des Musters	4	5	4	3	3
Robuster Kalibrierprozess	1	5	1	5	5
Summe	11	18	14	15	16

Die schlechte Erfassbarkeit von Körpern mit unbehandelten, spanend bearbeiteten Aluminiumoberflächen mittels optischer Messgeräte konnte in Vergleichsmessungen bestätigt werden. Durch gerichtete Reflexionen und dadurch erzeugte partielle Überbelichtungen resultieren Fehlstellen im Messdatensatz. Ein robuster Kalibrierprozess ist damit nicht gewährleistet.

Eine einfach zu realisierende Nachbehandlung besteht im Einsprühen der Oberfläche mit einem Kreidespray (oft auch „Anti-Glare-Spray“ oder „Mattierspray“ genannt). Dieses schafft eine mattierte, optisch kooperative Oberfläche und wird häufig im Bereich der optischen Messtechnik eingesetzt. Ein robuster Ablauf für die Kalibrierung erfordert eine homogene Kreideschicht auf der gesamten zu erfassenden Oberfläche. Dies kann durch einen manuellen Einsprühprozess nicht gewährleistet werden. Zudem beeinflussen bereits leichte Berührungen der Schicht deren Haltbarkeit wie auch die Qualität der Messdatenerfassung.

Eine Alternative zum temporären Einsprühen mit speziellen Sprays ist eine dauerhafte Lackierung der Kalibrierkörperoberfläche. Untersuchungen zeigen jedoch eine partielle Überdeckung der Oberflächenkonturen durch die Lackierung. Im direkten Vergleich mit den in Tabelle 10 alternativ aufgeführten Oberflächenbehandlungen ergibt sich, für lackierte Oberflächen hinsichtlich der Erfassbarkeit durch optische Messsysteme, damit ein Nachteil.

Sandstrahlen und Glasstrahlen oder auch Glasperlenstrahlen gehören nach [DIN 8200:1982-10] zu den Verfahren des Strahlspanens und unterliegen demselben Wirkprinzip. Ein Strahlmittel wird mit hoher kinetischer Energie auf ein Werkstück geleitet. Beim Auftreffen kommt es in Abhängigkeit des verwendeten Strahlmittels sowie des Werkstückwerkstoffs zu teilweise unterschiedlichen Wechselwirkungen. Während für den betrachteten Werkstoff Aluminium Sand als Strahlmittel eine abrasive Wirkung hat und es dadurch zu einem Materialabtrag am Werkstück kommt, bewirken Glasperlen eine mechanische Deformation der Werkstückoberfläche. Die dadurch eingebrachten Mikrodellen mattieren die Oberfläche gleichmäßig. Im Gegensatz zum Sandstrahlen, welches die Oberflächengravuren teilweise beschädigen kann, werden diese durch das Glasstrahlen nicht in ihrer Qualität gemindert. Dennoch findet ein Abtrag vorhandener Grate statt. In Vergleichsmessungen wiesen glasgestrahlte Oberflächen die beste Erfassbarkeit bei gleichzeitig höchster Oberflächenqualität auf. Das Glasstrahlen wurde deshalb als Nachbehandlungsverfahren ausgewählt. Somit kann ein robuster Kalibrierprozess gewährleistet werden.

Für eine Untersuchung der Rauheitsparameter S_a und S_z an den gefertigten Kalibrierkörpern wurden an 30 unterschiedlichen Messpunkten mithilfe des TalySurf CCI1000 Weißlichtinterferometers (Messfeldgröße: 0,91 x 0,91 mm²; lateralen Schrittabstand: 0,89 µm; vertikalen Schrittabstand: 1,0 nm) die Oberflächen aufgenommen. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse ist in Abbildung 29 oben ein Vergleich der Parameter mit denen der Mischzonen und Rohmaterialzonen blechmassivumgeformter Bauteile über Boxplots dargestellt. Ein durchgeführter Anderson-Darling-Test (Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$) detektiert nicht bei allen Messreihen

normalverteilte Daten, wodurch Vergleiche über Mittelwerte und Standardabweichungen nicht valide sind. Aus diesem Grund sind in Abbildung 29 unten rechts die Messreihen an den Kalibrierkörpern mit den Kenngrößen 5. und 95. Perzentil, Median sowie Interquartilbereich beschrieben.

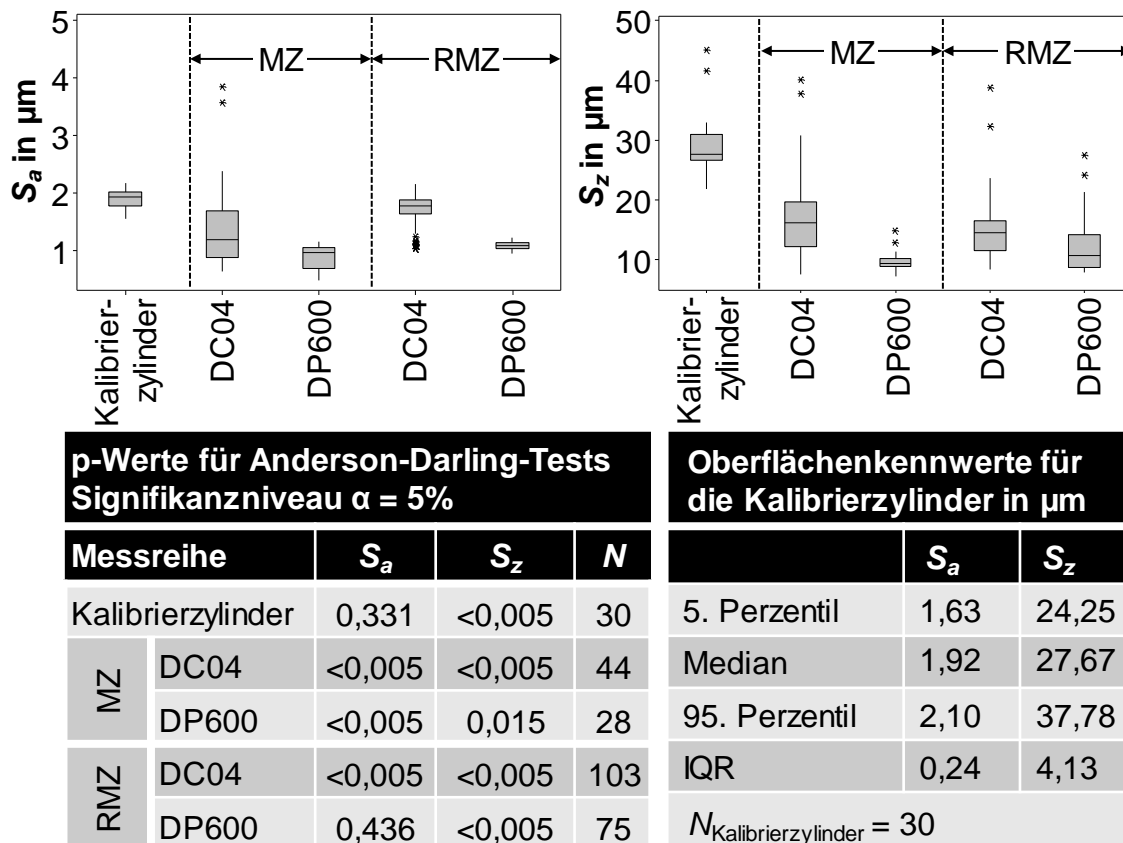


Abbildung 29: Vergleich der Oberflächenzonen blechmassivumgeformter Bauteile mit den Oberflächen der Kalibrierartefakte

Mit den gewählten Fertigungs- und Nachbehandlungsverfahren können Oberflächen auf den Kalibrierkörpern erzeugt werden, die ähnliche, vielmals höhere Resultate für beide Rauheitsparameter liefern, als für Bauteile der Blechmassivumformung. Damit wird eine noch bessere Erfassbarkeit durch Sensoren optischer Messverfahren geschaffen, als diese ohnehin schon in den Rohmaterialzonen der beiden Werkstoffe gegeben ist.

6.2.3 Konzeptioneller Kalibrier- und Messablauf

Auf Basis der eingangs beschriebenen Grundidee für die Detektion der Sensorausrichtungen wurde der in Abbildung 30 veranschaulichte Kalibrier- und Messablauf entwickelt. Dabei wird zuerst das Messobjekt auf der Messobjekthalterung platziert und die Sensormessbereiche auf die zu messenden Merkmale ausgerichtet. Sind die Sensoren in der vorgesehenen Position, wird das Messobjekt sowie die Grund-

platte der Halterung entfernt und der flexible Kalibrierkörper aufgesetzt. Anschließend werden die Kalibrierzylinder in die Messbereiche der Sensoren positioniert und fixiert. Jeder verwendete Sensor erfasst daraufhin die in den Messbereichen befindlichen Oberflächen der Kalibrierzylinder. Hierdurch werden partielle Polygonmodelle der Kalibrierzylinder ermittelt. Nach der Auslösung einer Messung bei jedem verwendeten Sensor wird vom gesamten Kalibrierkörper durch ein weiteres optisches Messsystem ein Polygonreferenzmodell erstellt. Hierbei ist besonders darauf zu achten, einerseits die Positionen der Kalibrierzylinder konstant zu halten und andererseits die Zylinder ganzheitlich zu erfassen. An das Polygonreferenzmodell des Kalibrierkörpers werden in der anschließenden Grob- und Feinregistrierung die partiellen Polygonmodelle angefügt. Während die Grobregistrierung manuell durchzuführen ist, kann bei der Feinregistrierung auf bewährte ICP-Algorithmen zurückgegriffen werden. Sind die partiellen Polygonmodelle an das Referenzmodell angepasst, kann für jeden Datensatz und damit für jeden Sensor eine entsprechende Transformationsmatrix ausgegeben werden. In den Matrizen sind die sensorspezifischen Ausrichtungen zueinander in einem gemeinsamen Koordinatensystem beschrieben.

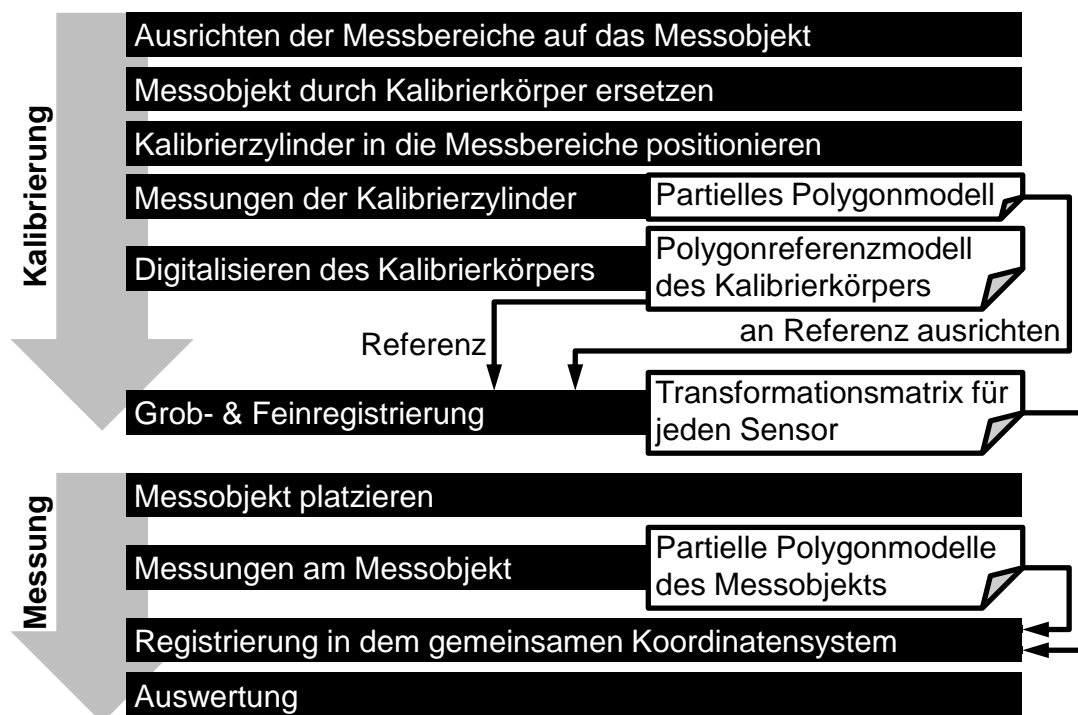


Abbildung 30: Kalibrier- und Messprozess auf Basis des flexiblen Kalibrierkonzepts [Loderer und Hausotte 2016]

Dem Kalibrierprozess angeschlossen ist ein automatisierter Messablauf, für welchen die Transformationsmatrizen die Grundlage bilden. Nach dem Entfernen des Kalibrierkörpers und dem Anbringen der Grundplatte der Messobjekthalterung star-

tet die Messung mit der Platzierung des Messobjekts, wie zu Beginn des Kalibrierprozesses. Ist die Ausrichtung des Messobjektes wie vorhergesehen, werden mit den Sensoren die Messdatensätze erhoben. Mithilfe der Transformationsmatrizen können die Messdatensätze korrekt zueinander ausgerichtet werden. Hierdurch werden im letzten Schritt Messdatenauswertungen unter Einbeziehung mehrerer Datensätze ermöglicht. Der Messablauf ist ein iterativer Prozess, der nach dem Wechsel des Messobjekts mehrfach ausgeführt werden kann. [Loderer und Hausotte 2016]

6.3 Implementierung einer Messobjekthandhabung

Mit dem aufgezeigten Kalibrierablauf auf Basis des flexiblen Kalibrierkörpers ist eine Ermittlung der Sensorausrichtung im stationären Fall möglich. Dabei ist die relative Ausrichtung zwischen Sensoren und Messobjekt konstant zu halten. Eine Bewegung des Messobjektes ist nicht möglich. Da das einheitliche Koordinatensystem K_0 nicht mit dem Koordinatensystem der Positioniereinheit K_p übereinstimmt, können deren Rotations- und Translationsbewegungen nicht auf die berechneten Transformationsmatrizen der Sensoren übertragen werden. Um eine Einbindung der Messobjekthandhabung zu ermöglichen und damit die Flexibilität zu steigern, ist daher das Kalibrierverfahren für den dynamischen Fall zu erweitern.

6.3.1 Prinzip der erweiterten Kalibrierung

Diese Erweiterung beruht auf drei grundlegenden Voraussetzungen:

- Durch die Kalibriermethode mit dem flexiblen Kalibrierkörper lassen sich bereits einzelne Sensorausrichtungen in einem gemeinsamen Koordinatensystem beschreiben.
- Eine definierte Ansteuerung und Bewegung der Messobjekthalterung durch die Positioniereinheit mit der Ausgabe des entsprechenden Fahrweges sowie des Rotationswinkels ist gewährleistet.
- Positioniereinheit und Messobjekthalterung stehen in einem direkten kinematischen Zusammenhang. Die Ausgabe des Fahrweges und Rotationswinkels entspricht daher den real durchgeführten Bewegungen der Messobjekthalterung relativ zu den Sensoren.

Sind diese drei Punkte erfüllt, können die Sensorpositionen stets in Abhängigkeit zu der Ausrichtung der Positioniereinheit beschrieben werden. Die zugrundeliegende Idee basiert dabei auf der zusätzlichen Bestimmung des Koordinatensystems der Positioniereinheit und des damit bewegten Kalibrierkörpers. Wird ein Sensormessdatensatz eines Kalibrierzylinders an das digitale Referenzmodell des gesamten

Kalibrierkörpers gefittet, beschreibt die dabei entstandene Transformationsmatrix die Position des Sensorkoordinatensystems in Bezug zum Koordinatensystem des Referenzmodells. Bewegungen der Positioniereinheit können jedoch nur eingebunden werden, wenn eine Relation der Achsen und damit des Koordinatensystems der Positioniereinheit zum Koordinatensystem des Referenzmodells und somit zum Sensorkoordinatensystem bekannt ist. Hierfür werden mehrere Messdatensätze von Kalibrierzylindern mit einem Sensor erhoben, wobei zwischen den Messungen alle Achsen der Positioniereinheit gezielt bewegt werden. Aus jedem Messdatensatz werden nun Transformationsmatrizen berechnet, die, bedingt durch die Positionsvariation, variierende Werte aufweisen. Die Kombination der Matrizen mit den bekannten Verfahr- und Rotationsbewegungen der Positioniereinheit ermöglicht eine Bestimmung des Koordinatensystems der Positioniereinheit.

6.3.2 Mathematische Realisierung

Die mathematischen Grundlagen der Koordinatentransformation für die Umsetzung der beschriebenen Idee sind in [Virag 2012] und [Hoschek und Lasser 1989] beschrieben. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird das Koordinatensystem der Positioniereinheit K_P in das Zentrum der Drehachse gelegt. Hierbei entsprechen x- sowie z-Achse den beiden horizontal angeordneten translatorischen Achsen, während die y-Achse vertikal nach oben gerichtet ist. Ausgehend von einer Matrix, welche die Transformation in das Koordinatensystem K_P beschreibt, werden die zwölf unbekanntes Indizes nach der Rotation und Translation aufgeteilt:

$$K_P = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{yx} & r_{zx} & t_x \\ r_{xy} & r_{yy} & r_{zy} & t_y \\ r_{xz} & r_{yz} & r_{zz} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{e}_{x_P} & \vec{e}_{y_P} & \vec{e}_{z_P} & T_{K_P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

Dabei lassen sich die drei Einheitsvektoren zu R_{K_P} zusammenfassen.

$$R_{K_P} = \begin{pmatrix} \vec{e}_{x_P} & \vec{e}_{y_P} & \vec{e}_{z_P} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

Somit gilt es vier unbekanntes Vektoren aufzulösen:

- Rotationsvektor um die x-Achse (r_{xx}, r_{xy}, r_{xz})
- Rotationsvektor um die y-Achse (r_{yx}, r_{yy}, r_{yz})
- Rotationsvektor um die z-Achse (r_{zx}, r_{zy}, r_{zz})
- Translationsvektor (t_x, t_y, t_z)

Für eine mathematisch eindeutige Lösung von vier unbekanntes Vektoren sind vier Gleichungen notwendig. Diese können durch die vier Transformationsmatrizen M_0 , M_1 , M_2 und M_3 gewonnen werden. Hierbei werden, wie in Abbildung 32 auf Seite 81

gezeigt, die Matrizen M_1 und M_2 , ausgehend von der ursprünglichen Lage M_0 , jeweils durch Translation beider Achsen der Positioniereinheit sowie durch anschließende Registrierung der gemessenen Datensätze am digitalen Referenzmodell generiert. Um eine Verschiebung in x- und z-Richtung ausgehend von der Ausgangslage zu ermitteln wird der in Gleichung 6.3 gezeigte Ansatz gewählt. Die Verschiebungen x_1 und z_1 müssen als zusätzliche Information durch den Bediener bereitgestellt werden.

$$R_{KP} * \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ z_1 \end{pmatrix} = (T_{M_1} - T_{M_0}) \quad (6.3)$$

Eine Verschiebung entlang der y-Achse kann aufgrund der fehlenden translatorischen Achse, wie aus Abbildung 31 zu entnehmen ist, ausgeschlossen werden. Es wird zudem angenommen, dass es bei der Translation entlang der Achsen zu minimalen Abweichungen zwischen dem idealen, angezeigten und realisierten, durch Umwelteinflüsse fehlerbehafteten Verfahrensweg kommt. Deshalb wird sowohl der Vektor der Verschiebungen als auch der Translationsvektor aus den beiden Matrizen normiert, indem diese durch ihren Betrag geteilt werden. Zudem kann es zu Abweichungen aufgrund der Verletzung des Abbe'schen Komparatorprinzips kommen. Dieses empfiehlt den Messapparat stets so anzuordnen, dass die zu messende Strecke die geradlinige Fortsetzung des Maßstabs bildet [Abbe 1890]. Durch die vertikal aufbauende Anordnung aus Achsen und Kalibrierkörper ist diese Vorgabe nicht erfüllt und es kommt zu Abweichungen der 1. Ordnung.

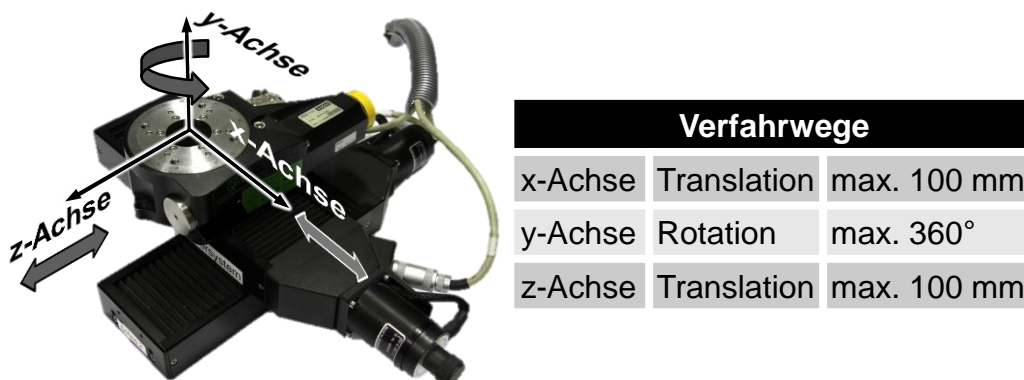


Abbildung 31: Achszuordnung und mögliche Verfahrenwege der Positioniereinheit

$$R_{KP} * \frac{\begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ z_1 \end{pmatrix}}{\left\| \begin{pmatrix} x_1 \\ 0 \\ z_1 \end{pmatrix} \right\|} = \frac{(T_{M_1} - T_{M_0})}{\| (T_{M_1} - T_{M_0}) \|} \quad (6.4)$$

Dem Vorgehen bei der Matrix M_1 folgend wird für die Matrix M_2 ein ähnlicher Ansatz gewählt:

$$R_{K_P} * \frac{\begin{pmatrix} x_2 \\ 0 \\ z_2 \end{pmatrix}}{\left\| \begin{pmatrix} x_2 \\ 0 \\ z_2 \end{pmatrix} \right\|} = \frac{(T_{M_2} - T_{M_0})}{\|(T_{M_2} - T_{M_0})\|} \quad (6.5)$$

Gleichung 6.4 und Gleichung 6.5 können nun nach den Einheitsvektoren \vec{e}_{x_P} und \vec{e}_{z_P} des gesuchten Koordinatensystems, die in Gleichung 6.6 und Gleichung 6.7 aufgeführt sind, aufgelöst werden:

$$\vec{e}_{x_P} = \frac{(T_{M_x} - T_{M_0})}{\|(T_{M_x} - T_{M_0})\|} \quad (6.6)$$

$$\vec{e}_{z_P} = \frac{(T_{M_z} - T_{M_0})}{\|(T_{M_z} - T_{M_0})\|} \quad (6.7)$$

Bei den Einheitsvektoren werden lediglich Verschiebungen entlang einer Achse betrachtet. Die Verschiebung ist dabei parallel zu der beobachteten Translation von M_0 zu M_x beziehungsweise von M_0 zu M_z .

Aus Gleichung 6.6 und Gleichung 6.7 ergeben sich die beiden Achsen der Matrix K_P . Da es sich um ein kartesisches Koordinatensystem handelt, kann der Einheitsvektor der dritten Achse aus dem Kreuzprodukt von \vec{e}_{x_P} und \vec{e}_{z_P} ermittelt werden. Voraussetzung hierfür ist eine orthogonale Ausrichtung der Achsen zueinander. Durch die seitens des Herstellers vorgesehene Befestigung der Achsen in einer derartigen Anordnung mittels Präzisionsbohrungen kann diese Voraussetzung als gegeben angesehen werden. Diese Anordnung konnte in Verifizierungsmessungen bestätigt werden. Aus dem Kreuzprodukt der Einheitsvektoren ist die Rotationsmatrix R_{K_P} des Koordinatensystems der Positioniereinheit vollständig erschlossen:

$$\vec{e}_{y_P} = \vec{e}_{z_P} \times \vec{e}_{x_P} = \begin{pmatrix} r_{yx} \\ r_{yy} \\ r_{yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{zy} * r_{xz} - r_{zz} * r_{xy} \\ r_{zz} * r_{xx} - r_{zx} * r_{xz} \\ r_{zx} * r_{xy} - r_{zy} * r_{xx} \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

Für die Berechnung von T_{K_P} soll die Möglichkeit bestehen, auch Translationen der Positioniereinheit bei der Ermittlung des Mittelpunktes in die Berechnung einfließen zu lassen. Um aus M_0 die Matrix M_3 zu berechnen, wird zunächst die Translation (x_3, z_3) im Koordinatensystem berücksichtigt:

$$M_3(x, 0, z) = R_{K_P} * \begin{pmatrix} x_3 \\ 0 \\ z_3 \end{pmatrix} * M_0 \quad (6.9)$$

Die berechnete Matrix erlaubt eine Platzierung des Datensatzes im Koordinatensystem der Positioniereinheit an die entsprechende Position, in der lediglich noch eine Rotation um dem Winkel φ um die y-Achse von K_P notwendig ist. Daraus resultiert schließlich die gesuchte Matrix $M_3(x, \varphi, z)$:

$$M_3(x, \varphi, z) = K_P * M_{R_y}(\varphi) * K_P^{-1} * M_3(x, 0, z) \quad (6.10)$$

Gleichung 6.9 und Gleichung 6.10 können aufgelöst werden, wodurch sich die Translationskomponente T_{K_P} berechnen lässt. Damit ist das gesamte Koordinatensystem K_P und die Ausrichtung des betrachteten Sensors darin vollständig definiert.

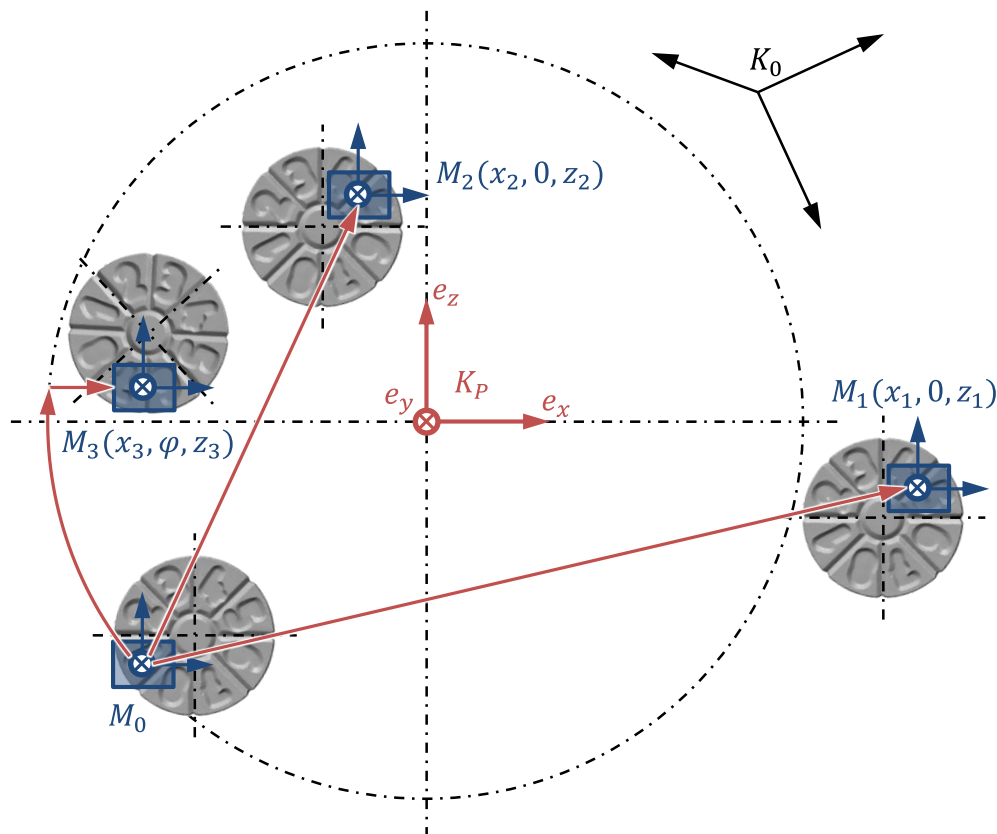


Abbildung 32: Beispielhafte Messpositionen für die mathematische Bestimmung der Sensorausrichtung in einem gemeinsamen Koordinatensystem

Die beiden letztgenannten Gleichungen können auch genutzt werden, um neben dem Hauptsensor die Ausrichtung weiterer Sensoren im Koordinatensystem der Positioniereinheit zu ermitteln. Hierzu wird ein Messdatensatz eines Kalibrierzylinders an das digitale Referenzmodell gefittet und die daraus errechnete Matrix $M(x, \varphi, z)$ auf die Matrix M_0 zurückgerechnet. Die Parameter (x, φ, z) geben hierbei wiederum die Position der Positioniereinheit zum Zeitpunkt der Messung an. Die Matrix $M(x, \varphi, z)$ wird zunächst wieder in das Koordinatensystem K_P durch dessen Inverse K_P^{-1} transformiert. Anschließend erfolgt eine Drehung um den negativen Winkel und eine Transformation zurück in das Koordinatensystem des digitalen Referenzmodells K_P :

$$M(x, 0, z) = K_P * M_{R_y}(-\varphi) * K_P^{-1} * M(x, \varphi, z) \quad (6.11)$$

Durch eine Umkehrung der Translationen aus Gleichung 6.9 ist eine Berechnung der Matrix für die korrekte Transformation des Messdatensatzes möglich. Dementsprechend entsteht die Matrix M_0 :

$$M_0 = R_{K_P} * \begin{pmatrix} -x \\ 0 \\ -z \end{pmatrix} * M(x, 0, z) \quad (6.12)$$

Mit diesem Vorgehen kann eine beliebige Anzahl weiterer Sensoren in ein gemeinsames Koordinatensystem integriert werden. Ausgehend von der Matrix M_0 des jeweiligen Sensors kann, wie beschrieben, die Transformationsmatrix bei jeder anderen Ausrichtung der Positioniereinheit bestimmt werden.

Für eine Unterstützung des Bedieners beim Ausführen des Kalibrierablaufs wird auf die Programmierumgebung MATLAB zurückgegriffen und das dargestellte mathematische Vorgehen in ein entsprechendes MATLAB-Programm implementiert.

Der beschriebene Kalibrier- und Messablauf ist in Abbildung 33 schrittweise dargestellt. Dabei sind die im Vergleich zu einem Kalibrier- und Messablauf ohne Berücksichtigung der Werkstückhandhabung, wie in Abbildung 30 gezeigt, neu hinzugekommenen Prozessschritte grau hinterlegt.

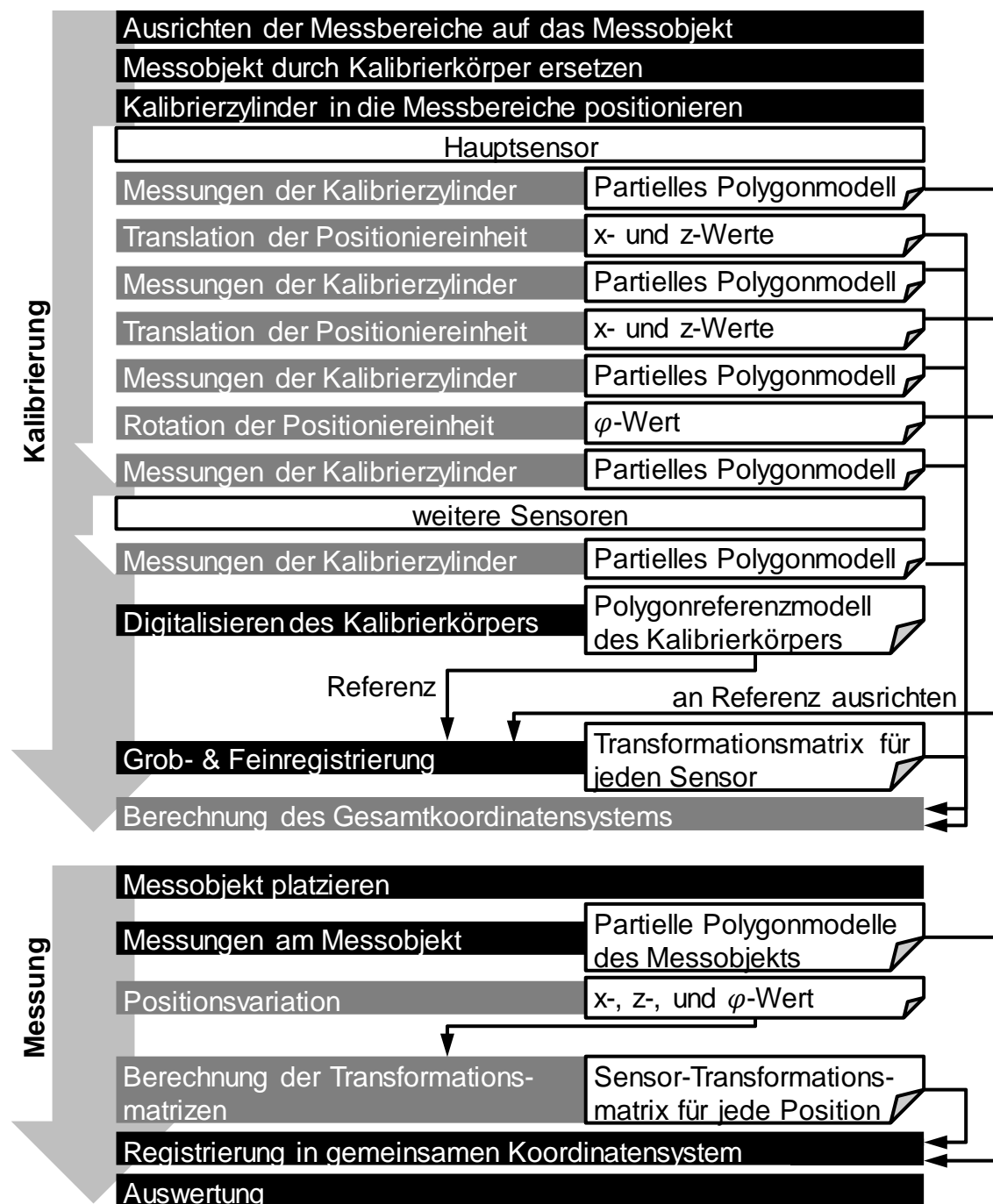


Abbildung 33: Kalibrier- und Messprozess mit integrierter Messobjekthandhabung

6.4 Datenflussmodell für multisensorielle Messungen

Das entwickelte mehrskalige Multisensor-Messsystem setzt sich aus unterschiedlichen Einzelsensoren zusammen, die außerhalb des Aufbaus auch als vollwertige Messsysteme betrieben werden können. Diese Eigenschaft wird für die Integration in ein gemeinsames Multisensor-System genutzt, indem die Systeme teilautonom

betrieben und mittels einer Vernetzung gesteuert werden. Wie in Abbildung 34 gezeigt, sind die Messsysteme mit ihren jeweiligen Steuerungscomputern verbunden, welche über die notwendigen Software- und Hardwarekomponenten für den Betrieb der Systeme verfügen.

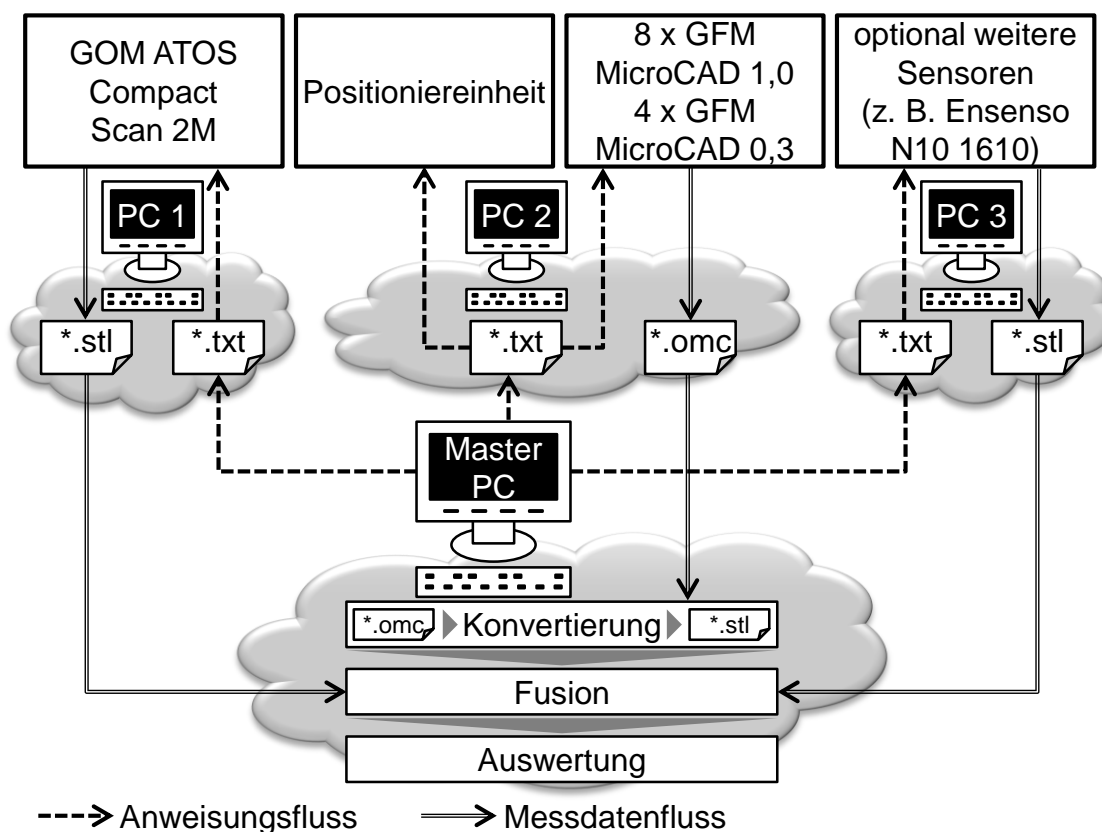


Abbildung 34: Schematisches Modell zur Visualisierung des Steuerungs- und Messdatenflusses

Während als Übersichtssensor der GOM ATOS Compact Scan 2M mit einem eigenen Steuerungscomputer verwendet wird, wie dies auch im Betrieb als Einzelsystem der Fall ist, sind die Streifenprojektionssensoren der MicroCAD-Reihe an einem PC zusammengefasst. Zusätzlich übernimmt dieser Computer auch die Steuerung der Positioniereinheit. Anweisungen über verwendete Sensoren, Messreihenfolge und Steuerung der Positioniereinheit werden in einer zentralen „Master“-Steuerungssoftware, installiert auf einem sogenannten „Master“-PC, festgelegt. Die in der „Master“-Software getroffenen Anweisungen, werden über eine Datenverbindung als TXT-Datei an die jeweiligen PCs übertragen, welche die Anweisungen entsprechend ausführen. Hierfür wird ebenfalls eine selbst entwickelte Software verwendet, die eine „Client“-Variante der Steuerungssoftware darstellt.

Die mit den Messsystemen generierten Messdaten werden zunächst auf den jeweiligen Steuerungscomputern gespeichert und dann über eine Datenverbindung an den „Master“-PC übertragen, wo eine Weiterverarbeitung der Daten stattfindet. Im

Fall der MicroCAD-Messdaten beginnt diese mit einer Konvertierung vom firmenspezifischen OMC-Format ins STL-Format, während das GOM ATOS Compact Scan 2M System bereits die Messdaten im STL-Format an den „Master“-PC weiterleitet. Die Messdatenfusion und –auswertung schließen das Datenflussmodell ab.

Eine Auslegung des Datenflusses nach dem „Master-Client“-Prinzip verleiht dem Multisensor-Messsystem eine große Flexibilität. Neben der örtlichen Unabhängigkeit des „Master“-PCs, welche eine dezentrale Steuerung und Auswertung erlaubt, ist eine nahezu beliebige Erweiterung des Messsystems möglich. Voraussetzung ist lediglich die Bestimmbarkeit der Sensorausrichtungen mit dem entwickelten Kalibrierverfahren.

In Abbildung 34 ist eine beispielhafte Erweiterung durch den Sensor Ensensio N10 1610 gezeigt. Dieser Sensor wird über einen dritten Steuerungscomputer mit installierter „Client“-Version der Steuerungssoftware eingebunden. Hierdurch können die mittels TXT-Datei bereitgestellten Messanweisungen ausgeführt und die generierten Messdaten, welche bereits im STL-Format vorliegen, dann dem „Master“-PC zur Verfügung gestellt werden. Weitere Sensoren können auf dieselbe Weise hinzugefügt werden.

Der letzte Schritt im Datenflussmodell ist die Datenfusion. Dabei ist bei mehrskaligen Multisensor-Messdaten zu berücksichtigen, dass teilweise Überlappungsbereiche von Datensätzen unterschiedlicher Messunsicherheiten entstehen. Für diese Bereiche wurden die beiden grundsätzlichen, in Abbildung 35 gezeigten Fusionsstrategien erarbeitet. Im dargestellten Beispiel ist die Messunsicherheit von Sensor 1 größer, die daraus resultierende Messpunktstreuung höher und der Messbereich größer als bei Sensor 2. Mit einer Fusion der beiden Datensätze soll eine Detaillierung des betrachteten Radiusmerkmals im oberen Bereich erzielt werden. Durch eine holistische Fusion werden alle Messdatenpunkte der beiden Datensätze kombiniert. Die Merkmalsauswertung wird damit von den Messpunktstreuungen beider Sensoren beeinflusst. Im Gegensatz dazu wird mit einer selektiven Fusion der Bereich des höher auflösenden Datensatzes von Sensor 2 aus dem geringer auflösenden Datensatz von Sensor 1 ausgeschnitten. Um eine Überlappung der Datenpunkte zu vermeiden, muss beim Ausschneiden eine sogenannte „Cut off“-Distanz festgelegt werden. Die Beeinflussung der Merkmalsauswertung durch die Messdatenpunktstreuungen beider Sensoren wird mit einer selektiven Fusion deutlich minimiert und kann durch eine entsprechend große „Cut off“-Distanz sogar ausgeschlossen werden.

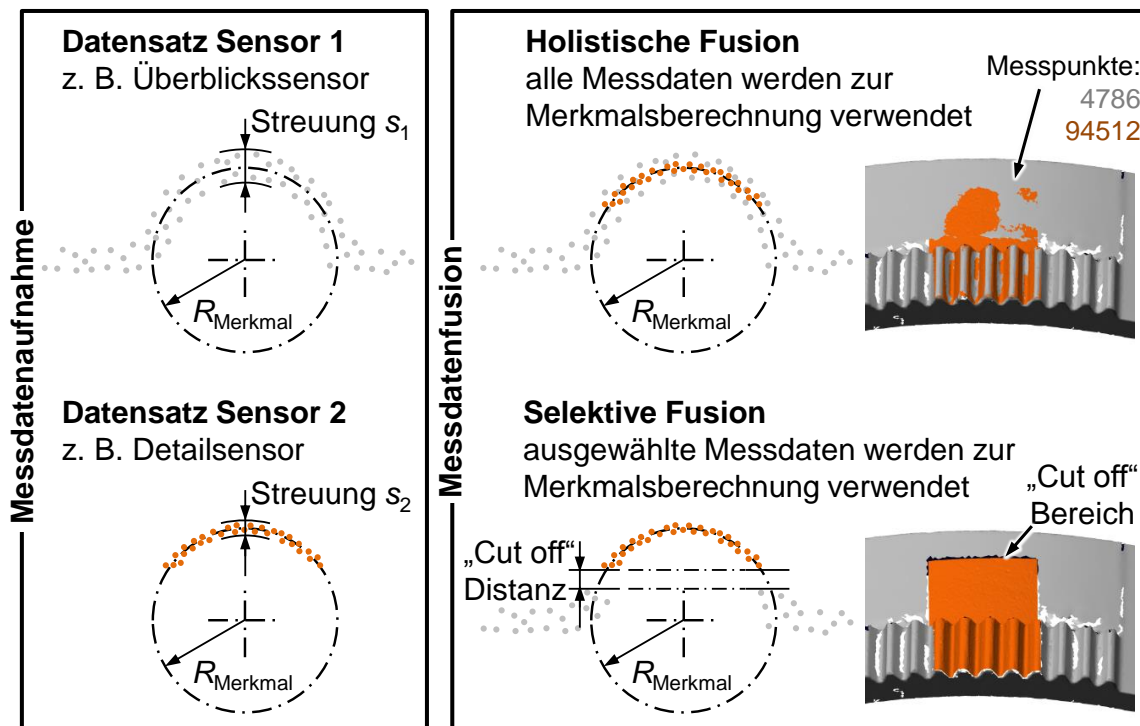


Abbildung 35: Strategien zur Fusion mehrskaliger Datensätze

Neben der Fusionsstrategie muss auch die Anzahl der Messdatenpunkte pro Fläche berücksichtigt werden. Der in Abbildung 35 rechts dargestellte Vergleich der Messpunktanzahlen weist 94512 Messdatenpunkte für den Datensatz des höher auflösenden Sensors 2 auf. Auf derselben Fläche beinhaltet der Datensatz des geringer auflösenden Sensors 1 nur 4786 Messdatenpunkte. Dies bedeutet, auf 19 Messpunkte von Sensor 2 kommt rechnerisch etwa ein Messpunkt von Sensor 1, wodurch die im Datensatz des Sensors 2 enthaltenen Messinformationen eine deutlich höhere Gewichtung finden. Der in diesem Beispiel zu erwartende Unterschied zwischen der holistischen und selektiven Fusion fällt damit gering aus. Die deutlich aufwendigere „Cut“-Methode ist daher insbesondere sinnvoll, wenn sich zwar die Messpunktstreuungen verschiedener Sensoren unterscheiden, die jeweilige Anzahl der Messpunkte in den Datensätzen jedoch in einem ähnlichen Größenbereich liegen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird stets die holistische Messdatenfusion angewendet. Weitere Untersuchungen zu den unterschiedlichen Fusionsmethoden wurden bereits in [Loderer et al. 2014] gezeigt. Informationen über die Messdatenauswertung mittels PolyWorks 2014 sind in [InnovMetric 2014, S. 389-566] aufgeführt.

7 Evaluation der Leistung des prototypischen mehrskaligen Multisensor-Messsystems

Abschließend gilt es, die Funktionalität des entwickelten mehrskaligen Multisensor-Messsystems nachzuweisen. Hierfür wird in einem ersten Schritt die Genauigkeit des entwickelten Kalibrierverfahrens überprüft, bevor mittels einer beispielhaften Messung die Vorteile des mehrskaligen Multisensor-Prinzips aufgezeigt werden. Eine beispielhafte Betrachtung der Messunsicherheit sowie die Bewertung des Nutzens mehrskaliger Multisensor-Messungen schließen das Kapitel ab.

7.1 Untersuchung der Multisensor-Kalibrierung

Wie im Auflaufdiagramm des Kalibrier- und Messprozesses in Abbildung 33 auf Seite 83 dargestellt, beeinflussen drei Faktoren den Multisensor-Kalibrierablauf wesentlich:

- die Genauigkeit der Positioniereinheit,
- die Genauigkeit des Sensors für die Digitalisierung des Kalibrierkörpers,
- die Robustheit der manuellen Grob- und automatischen Feinausrichtung.

Diese drei Faktoren gilt es im Einzelnen zu betrachten, bevor eine abschließende Beurteilung der Multisensor-Kalibrierungsgenauigkeit vorgenommen werden kann.

7.1.1 Positioniergenauigkeit

Zur Untersuchung der Genauigkeit der Positioniereinheit wird der in Abbildung 36 dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Hierbei erfasst ein MicroCAD 1,0-Streifenprojektionssensor eine Zylinderform des PTB Mikrokonturnormals mit einem Radius von einem Millimeter. In Vorversuchen hat sich die Kombination aus Sensor und Merkmal als am besten für die Messaufgabe herausgestellt. Der Sensor bietet eine hohe Auflösung bei gleichzeitig ausreichend großem Messbereich für eine sichere Merkmalerfassung. Ebenso hat sich ein Messwinkel von 45° in den Voruntersuchungen bewährt. Dieser ist einerseits der vorteilhaften Erfassbarkeit des Messobjekts unter diesem Winkel geschuldet, andererseits reduzierte diese Anordnung die Messergebnisstreuungen der Messreihe. Durch den Messwinkel von 45° beeinflussen sowohl die laterale als auch die vertikale Auflösung die Messdatenerhebung signifikant. Das Mikrokonturnormal befindet sich während der Messung in der Mitte des Verfahrensbereichs und wird anschließend entsprechend der Verfahrenwege in Abbildung 36 bewegt und gedreht. Die acht verschiedenen Verfahrenwege werden dreimal durchlaufen, so dass sich eine Grundgesamtheit von 24 Messungen des Radius

ergibt. Mit einer zusätzlichen Messung wird ein Datensatz aufgenommen, der als Referenz für die Auswertung verwendet wird.

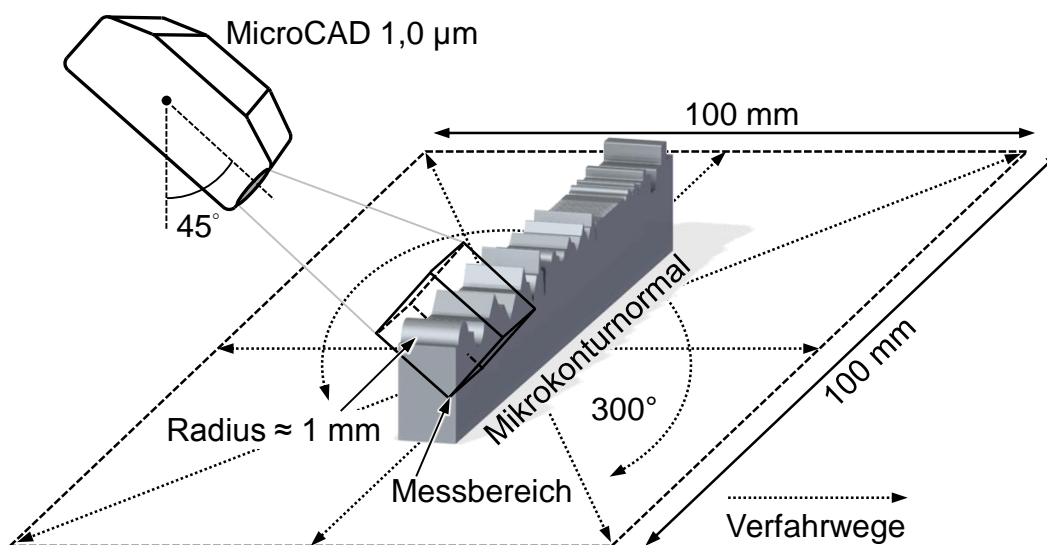


Abbildung 36: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Genauigkeit der Positioniereinheit

In jedem aufgenommenen Datensatz wird bei der Auswertung ein Zylinder mittels PolyWorks IMInspect V14 eingepasst. Ausgehend vom Zylinder des Referenzdatensatzes werden die Abstände der Zylindermittelpunkte sowie die Winkelabweichungen der Zylinderachsen bestimmt. Hierbei ergeben sich die in Abbildung 37 als Histogramme dargestellten Werte. Die Ergebnisse sind im Bereich der, für die Positioniereinheit in Tabelle 9 auf Seite 63 angegebenen translatorischen Wiederholgenauigkeiten in zwei Richtungen (bis zu $\pm 2 \mu\text{m}$), jedoch etwas über der rotatorischen Genauigkeit (bis zu $\pm 1,2'$). Letzteres Ergebnis wird insbesondere durch die vergleichsweise kurzen Zylinderlängen negativ beeinflusst.

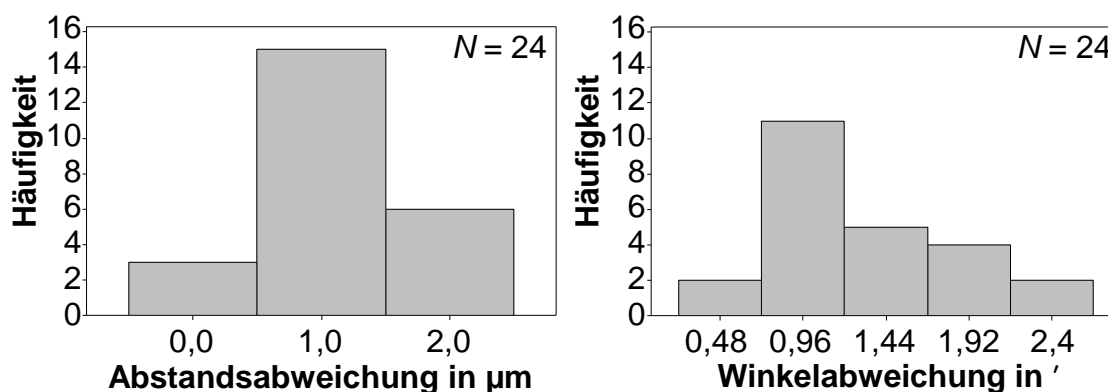


Abbildung 37: Abweichungen der gefitteten Zylinder zum Referenzzylinder

Unter Berücksichtigung der Auflösung des MicroCAD 1,0-Sensors von lateral $17 \mu\text{m}$ und vertikal $1,0 \mu\text{m}$ befinden sich die ermittelten Werte im Bereich des Messsignalrauschens. Zudem sind die Ergebniswerte unterhalb der in [Ohr et al. 2012a] für den genaueren Detailsensor MicroCAD 0,3 ermittelten Unsicherheiten für derartige

Messaufgaben ($U_{\text{Durchmesser}} = 7 \mu\text{m}$; $U_{\text{Winkel}} = 43'$). Damit kann die Genauigkeit der Positioniereinheit als ausreichend angesehen werden.

7.1.2 Digitalisierungsgenauigkeit

Für die Ermittlung der Genauigkeit des Sensors zur Digitalisierung der Kalibrierkörper wurden Wiederholmessungen einer beispielhaften Konfiguration aus fünf Kalibrierzylindern, dargestellt in Abbildung 38 links, durchgeführt. Der Kalibrierkörper wurde durch den Streifenprojektionssensor GOM ATOS Compact Scan 2M in 15 Wiederholmessungen digitalisiert, wobei der Kalibrierkörper nach jeder Messung neu im Messbereich ausgerichtet wurde.

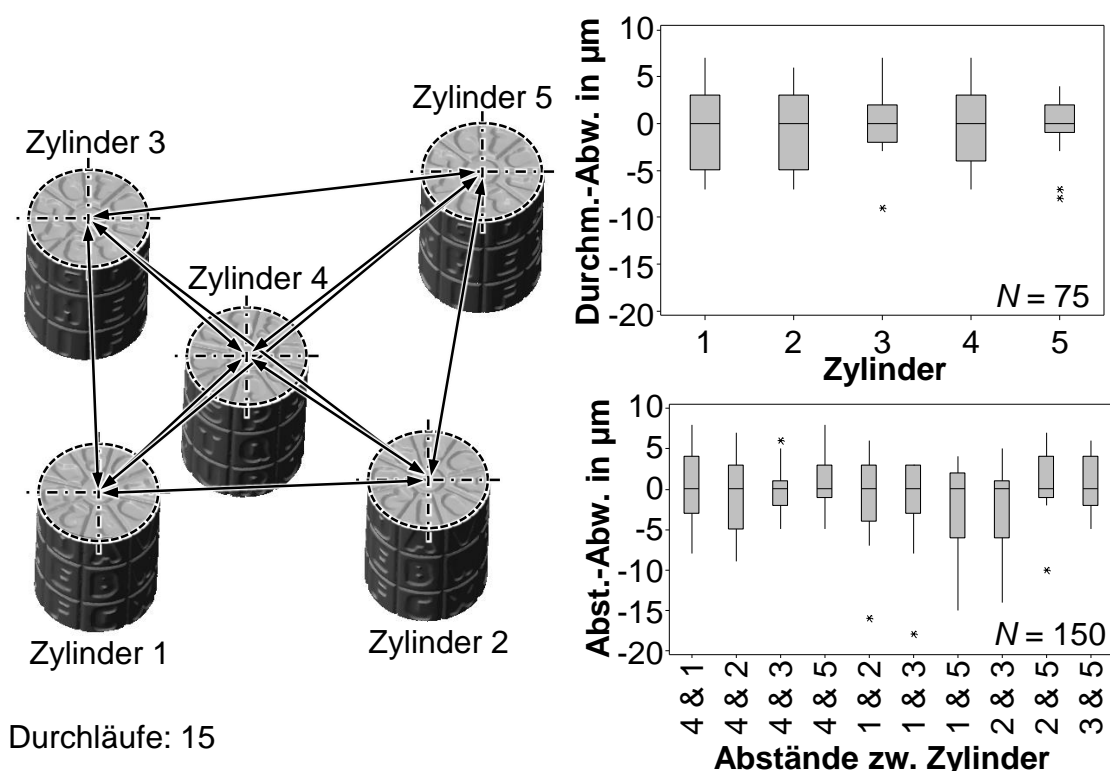


Abbildung 38: Kalibrierzylinderanordnung (links); Versuchsergebnisse (rechts)

Relevant für den Multisensor-Kalibrierablauf sind eine präzise Erfassung jeder Zylindergestalt, deren Durchmesser und die Abstände zwischen den Kalibrierzylindern. Daher wurden diese beiden Parameter in Auswertung der Messreihen verwendet. In die erfassten Kalibrierzylinder werden jeweils ein Zylindermerkmal mittels PolyWorks IMInspect V14 eingefittet und die Abstände zueinander ermittelt. Da mittels eines Anderson-Darling-Tests (Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$) keine Normalverteilung der Ergebniswerte nachgewiesen werden konnte, wurden für den Vergleich die Medianwerte herangezogen. Die Medianwerte für den Zylinderdurchmesser und die Zylinderabstände sind die Referenzwerte, für welche die Abweichungen der beiden Parameter errechnet wurden.

Die ermittelten, in Abbildung 38 rechts aufgeführten Werte für die Abweichungen der Zylinderdurchmesser vom Medianwert liegen in einem Bereich von etwa $\pm 10 \mu\text{m}$. Minimal größer sind die Abweichungen der Zylinderabstände vom Medianwert, welche circa bei $\pm 15 \mu\text{m}$ liegen. Beide Abweichungen sind damit deutlich unterhalb des mittleren Punktabstands des Streifenprojektionssensors von $75 \mu\text{m}$. Hieraus lässt sich eine stabile und robuste Erfassung der Zylinderdurchmesser und deren Abstände ableiten. Divergierende Größen der Interquartilbereiche können aufgrund des kleinen Unterschieds im Vergleich zum mittleren Punktabstand durch Messwertrauschen in Kombination mit minimal unterschiedlichen Messpositionen und damit einhergehender Effekte wie beispielsweise einer partiellen Abschattung begründet werden.

7.1.3 Wiederholpräzision der Ausrichtung

Der letzte der drei wesentlichen Einflussfaktoren auf den Multisensor-Kalibrierablauf ist die Wiederholpräzision der manuellen Grob- und anschließenden automatischen Feinausrichtung. Die beiden Ausrichteschritte führen bei Wiederholungen idealerweise zu immer gleichen Transformationsmatrizen. Um dies zu überprüfen, wurden drei Datensätze von MicroCAD 1,0-Detailsensoren am Datensatz eines Kalibrierzylinders, aufgenommen mit einem GOM ATOS Compact Scan 2M, ausgerichtet. Zur Berücksichtigung variierender Ausrichtebedingungen wurden die Detaildatensätze aus drei unterschiedlichen Positionen aufgenommen, wie aus Abbildung 39 oben links hervorgeht. Zudem wurde für die manuelle Grobausrichtung eine unterschiedliche Anzahl an korrespondierenden Punkten gewählt. Die Variation in der anschließenden Feinausrichtung ergab sich aus unterschiedlichen Parametern im Best-Fit-Algorithmus, wie in Abbildung 39 oben rechts dargestellt. Insgesamt ergaben sich durch diese Faktorvariationen 48 Versuchsdurchläufe.

Sowohl nach der manuellen Grobausrichtung als auch nach der automatischen Feinausrichtung wurde die jeweils errechnete Transformationsmatrix ausgegeben, welche die Translationen in allen drei sowie die Rotationen um alle drei Koordinatenachsen enthält. Da die für die Auswertung betrachteten Werte keiner Normalverteilung folgten (Anderson-Darling-Test; Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$), wurden in der anschließenden Auswertung wiederum Medianwerte eingesetzt. Für jeden der sechs Parameter wurde zu den ermittelten Medianen die relative Abweichung jeder einzelnen Ausrichtung bestimmt. Zur übersichtlichen Darstellung der Abweichungen wurden die Beträge der drei Rotationsabweichungen kumuliert und aus den drei Translationsabweichungen die Länge des Translationsabweichungsvektors berechnet. Auf diese Weise können die zu betrachtenden Parameter von sechs auf zwei reduziert werden.

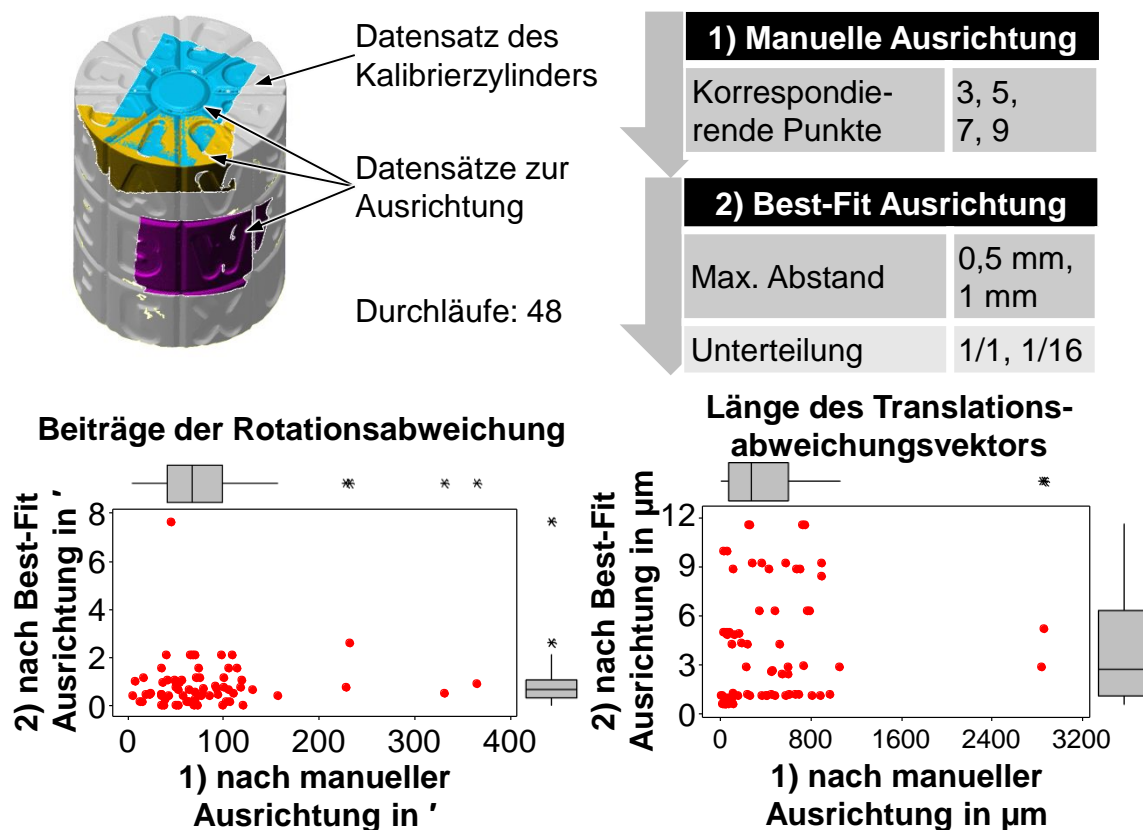


Abbildung 39: Beschreibung der Versuchsreihe (oben); Resultate (unten)

Wie aus den Streudiagrammen aus Abbildung 39 unten hervorgeht, sind nach der manuellen Ausrichtung die Beträge der Rotationsabweichungen und die Längen der Translationsabweichungsvektoren sehr groß. Diese liegen im Median bei 68' (1,1°) rotatorischer und 278 µm translatorischer Abweichung. Die Ausrichtungen bilden die Basis für die im nächsten Schritt erfolgte Feinausrichtung mittels des Best-Fit-Algorithmus. Durch diesen reduziert sich der Median für die rotatorischen Abweichungen auf 0,7' (0,01°), der Median für die Länge des Translationsabweichungsvektors auf 1 µm. Ebenso deutlich werden die Spannweiten der Werte verkleinert. Damit kann die manuelle Grob- und automatische Feinausrichtung unter variierenden Bedingungen als wiederholpräzise angesehen werden.

7.1.4 Verifizierung

Zur Zusammenfassung der vorab analysierten Teilschritte sowie für eine Validierung der entwickelten Multisensor-Kalibrierung wurde in einer abschließenden Versuchsreihe exemplarisch ein MicroCAD 1,0-Detailsensor zur Positioniereinheit kalibriert. Die Ergebnisse lassen sich aufgrund des übereinstimmenden Ablaufs auf beliebig viele weitere Sensoren übertragen.

Die Versuchsreihe untergliedert sich in Kalibriermessungen, in welchen die notwendigen Messungen für die Bestimmung der Ausrichtung zwischen Positioniereinheit

und Sensor erfolgen, sowie in Verifizierungsmessungen, die zur Überprüfung der Kalibrierung dienen. Für die Bestimmung der Ausrichtung beider Komponenten zueinander sind vier Messungen notwendig, wie in Abbildung 40 links dargestellt ist: eine Messung in Ausgangsposition (1) sowie Messungen für zwei translatorisch (2 und 3) und eine rotatorisch veränderte Position (4).

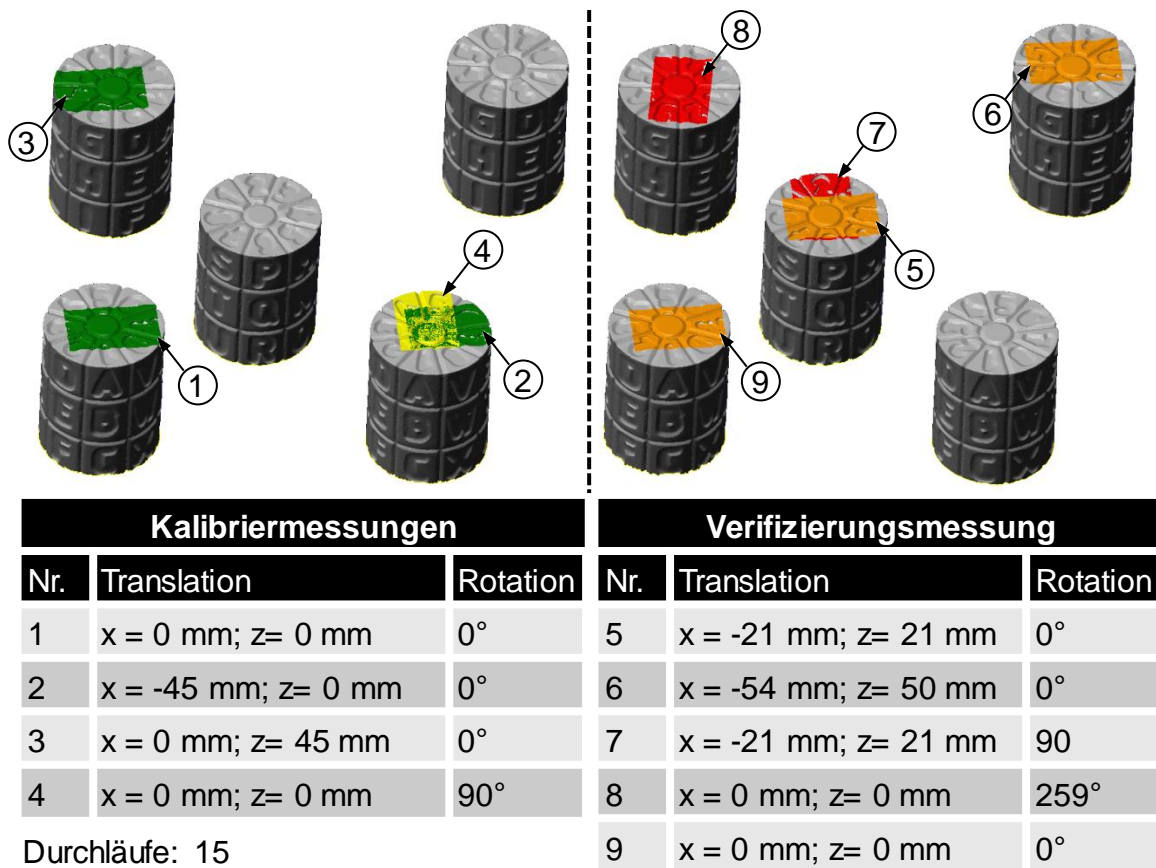


Abbildung 40: Aufbau und Kenndaten der Kalibrier- und Verifizierungsmessungen

In den anschließenden Verifizierungsmessungen werden ebenfalls variierende Messpositionen verwendet. Während die Verfahrswege der Messungen 5 und 7 jeweils kleiner oder gleich den Verfahrswegen der Kalibriermessungen sind, weisen die Verfahrswege der Messungen 6 und 8 größere Strecken auf. Zur Bestimmung der Transformationsmatrizen muss bei kleineren Wegen zwischen den Kalibriermessungen, die als Stützstellen dienen, interpoliert werden. Bei größeren Verfahrswegen ist eine Extrapolation erforderlich. Mit der Festlegung der Messpositionen für die Verifizierungsmessungen, wie aus Abbildung 40 rechts hervorgeht, ist die Berücksichtigung dieser Unterscheidung möglich. Mit Verifizierungsmessung 9 wurde die Ausgangslage angefahren, die ebenfalls als Messung in Ausgangsposition für die Kalibrierung verwendet wurde. Die Abfolge aus Kalibrier- und Verifizierungsmessungen wurde in 15 Durchläufen ausgeführt. Dabei entsprach die Anordnung

der Kalibrierzylinder jener Ausrichtung, wie sie auch zur Überprüfung der Digitalisierungsgenauigkeit verwendet wurde.

Zur Auswertung der Verifizierungsmessungen wurden die Datensätze von Messung 5 bis 9 entsprechend den mittels der Datensätze der Kalibriermessungen errechneten Transformationsmatrizen ausgerichtet. Anschließend wurden die Datensätze der Verifizierungsmessungen über den Best-Fit-Algorithmus an den Kalibrierzylinderdatensatz, aufgenommen mit dem GOM ATOS Compact Scan 2M System, angefitet. Aus den sich dabei ergebenden Best-Fit-Transformationsmatrizen zusammen mit den durch die Kalibrierung erzeugten Transformationsmatrizen, können die Rotationen um und Translationen in alle drei Raumachsen bestimmt werden. Diese sind notwendig, um den gemessenen Datensatz an das Modell der Kalibrierzylinder anzupassen. In Abbildung 41 sind die benötigten Rotationen sowie die Translationsabweichungsvektoren aufgetragen.

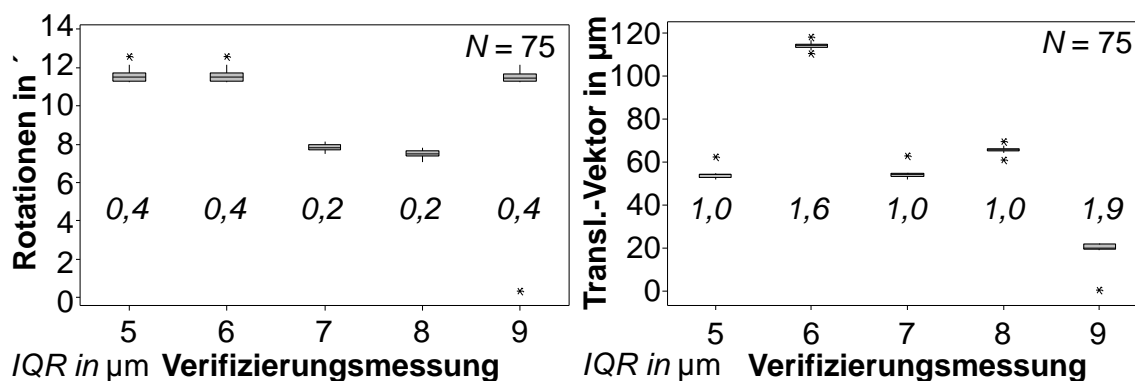


Abbildung 41: Rotatorische und translatorische Abweichungen der Verifizierungsmessungen

Auf Basis der Darstellung ist eine Aufspaltung der Abweichungen in einen zufälligen und einen systematischen Anteil möglich. Dabei spiegelt die vertikale Ausdehnung der Boxplots die Variation der Transformationsmatrizen aus der Kalibrierung wider und kann damit dem zufälligen Anteil zugerechnet werden. Die in Abbildung 41 angegebenen Interquartilbereiche, die 50 % der Werte um einen Median repräsentieren, sind in einer vergleichbaren Größenordnung wie die Genauigkeit der Positioniereinheit, wodurch die zufällige Abweichung der Messwerte erklärt werden kann. Dagegen entspricht die Lage der Boxplots dem systematischen Abweichungsanteil. Die Medianunterschiede der verschiedenen Messpositionen sind erkennbar größer als die Variation der Messwerte. Aus der zur ersten Kalibrierposition kongruenten Messposition 9 kann die Länge des Translationsabweichungsvektors von etwa $20 \mu\text{m}$ und eine rotatorische Abweichung von etwa $12'$ abgelesen werden. Unter Berücksichtigung der Digitalisierungsgenauigkeit des Kalibrierkörpers in Kombination mit der Abweichung aus der Datensatzausrichtung sind derartige systematische

Abweichungen erklärbar. Zudem ist ein Einfluss der Messpositionen und der damit einhergehenden Verfahrenswege auf die betrachteten Kenngrößen erkennbar.

Um diesen Einfluss der Messpositionen detaillierter zu klären, wurden die Abweichungsursachen im Kalibrierablauf unter den Gesichtspunkten des Abbe'schen Komparatorprinzips betrachtet [Abbe 1890]. Als Grundlagen der Kalibrierung dienen die an den Skalen der Positioniereinheit ermittelten Verfahrenswege sowie die Transformationsmatrizen der gemessenen und dann „angefitteten“ Datensätze der Kalibrierzylinder. Ein Befolgen des Abbe'schen Komparatorprinzips würde erfordern, Skalen und Kalibrierzylinder auf derselben Ebene zu positionieren. Aufgrund von Bauraumrestriktionen ist dies nicht möglich.

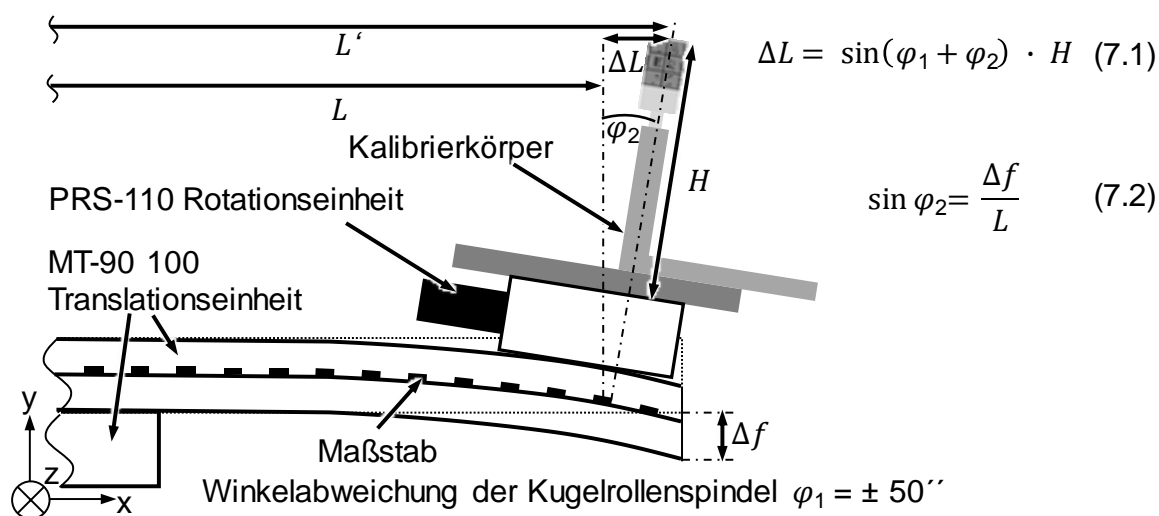


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Abweichungen 1. Ordnung

In Abbildung 42 ist schematisch dargestellt, wie es durch eine gewichtskraftinduzierte Biegung einer Positionierachse zu Abweichungen zwischen dem mittels eines Maßstabs detektierten Verfahrensweg L und dem in der Kalibrierung gemessenen Verfahrensweg L' an den Positionierzylindern kommt. Die daraus resultierenden Abweichungen 1. Ordnung ΔL werden zudem von Winkelabweichungen der Kugelrollenspindeln der Positionierachsen beeinflusst. Aufgrund von experimentell ermittelten geringen Biegewegen Δf von maximal $20 \mu\text{m}$ wurde auf eine vollständige Herleitung von ΔL nach den Gesetzen der technischen Mechanik verzichtet. Stattdessen wurde der vereinfachte Zusammenhang in Gleichung 7.1 zur Berechnung der maximalen Abweichungen 1. Ordnung verwendet.

Durch eine Parametervariation von L , H , Δf sowie φ_1 konnten die in Abbildung 43 dargestellten Abweichungen 1. Ordnung ΔL berechnet werden. Aus 5000 durchgeführten Parametervariationen ergab sich im Median eine Abweichung von $33 \mu\text{m}$.

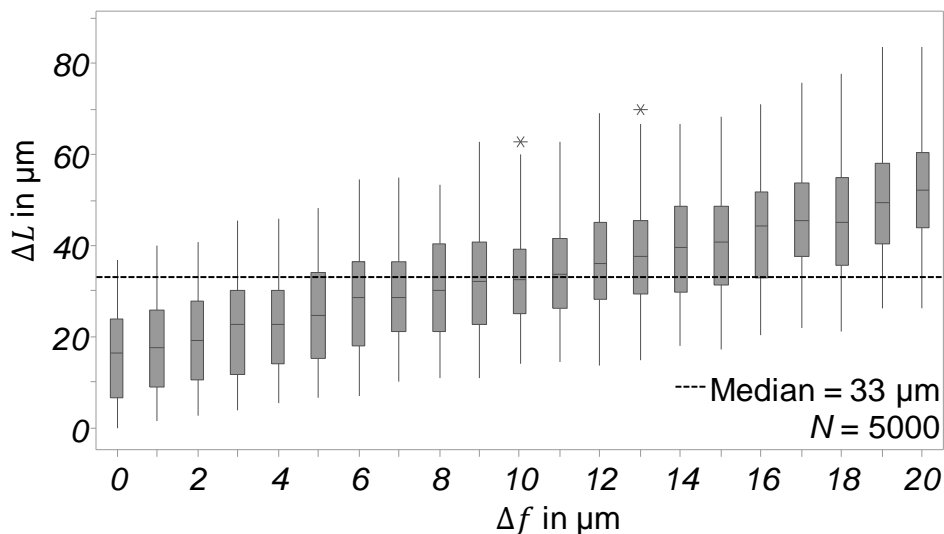


Abbildung 43: Ergebnisse der Parametervariation zur Abschätzung von ΔL

Die in Abbildung 41 aufgeführten systematischen translatorischen Abweichungen entsprechen in etwa der Größenordnung der Abweichungen 1. Ordnung. Die Abweichungen nach dem Abbe’schen Komparatorprinzips werden daher als hauptsächlich für die Abweichungen im Kalibrierprozess angenommen.

Eine statistisch valide Aussage über die Zusammenhänge zwischen den in Abbildung 44 genannten Eingangsgrößen liefert je eine Regressionsanalyse für beide Ausgangsgrößen.

Dabei ergaben sich für die Ergebnisgrößen die beiden Regressionsgleichungen (7.3) und (7.4).

$$TR_{\text{vektor}} = (21,3 + 8,01 \cdot TR_{\text{Achse1}} - 6,8 \cdot TR_{\text{Achse2}} + 0,161 \cdot RO_{\text{Achse3}}) \mu m \quad (7.3)$$

$$RO_{\text{Abw}} = (11,2 - 0,0159 \cdot RO_{\text{Achse3}} + 0,564 \cdot TR_{\text{Achse1}} - 0,601 \cdot TR_{\text{Achse2}}) ' \quad (7.4)$$

Eingangsgrößen			Ergebnisgrößen		
Abkürz.	Beschreibung	Einheit	Abkürz.	Beschreibung	Einheit
TR_{Achse1}	Translation von Achse 1	mm	TR_{vektor}	Länge des Translationsabweichungsvektors	μm
TR_{Achse2}	Translation von Achse 2	mm	RO_{Abw}	Rotationsabweichungen	'
RO_{Achse3}	Rotation von Achse 3	°			

Abbildung 44: Parameter für die Regressionsanalysen

Zusätzlich sind für die Interpretation der Gleichungen die in Abbildung 45 aufgeführten Streuungen der Regressionsanalysen zu berücksichtigen. Die Streuung gibt die Güte des Modells, ausgedrückt durch die Regressionsgleichung, an. Dabei werden

die Residuenstreuungen der Eingangsgrößen mit der Modellgleichung verglichen. Je genauer die Gleichung den Verlauf der Streuung einer Eingangsgröße abbildet, desto besser wird das Modell durch diese Größe erklärt. Der Residuenfehler indes gibt den Anteil der nicht durch das Modell erklärbaren Streuungen an. [Toutenburg und Knöfel 2008]

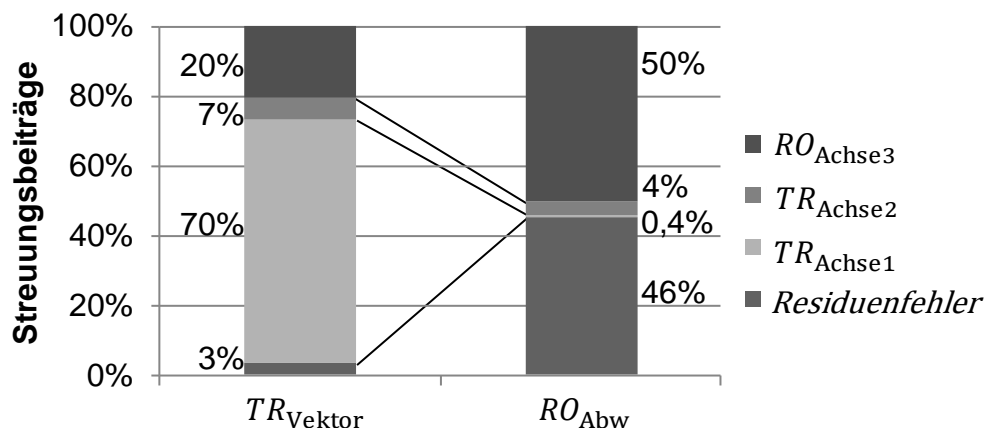


Abbildung 45: Aufgliederung der Streuung der Regressionsanalysen

Während der Residuenfehler für die Gleichung (7.3) mit 3 % sehr gering ausfällt und die Regressionsgleichung damit 97 % die Variation der Eingangsgrößen erklärt, kann Gleichung (7.4) nur 54 % der Variation begründen. 46 % der Variation sind nicht durch die betrachteten Eingangsgrößen erklärbar. Damit kann mit Gleichung (7.3) eine statistisch genaue Vorhersage der Länge des Translationsvektors TR_{Vektor} durchgeführt werden. Eine sichere präventive Angabe der kumulierten Rotationsabweichung RO_{Abw} ist mithilfe der ermittelten Regressionsgleichung (7.4) nicht möglich.

Aus den Ergebnissen kann auf einen präzisen und reproduzierbaren Multisensor-Kalibrierablauf geschlossen werden. Die Abweichungen bewegen sich im Rahmen der Genauigkeiten der zur Verfügung stehenden Komponenten. Es ist anzunehmen, dass mit einer Verbesserung der Digitalisierungs- wie auch der Positioniergenauigkeit sowie einer Reduzierung der Abweichungen nach dem Abbe'schen Komparatorprinzips eine weitere Minimierung der Kalibrierabweichungen erreicht werden kann.

7.2 Durchführung einer beispielhaften mehrskaligen Multisensor-Messung

Abschließend wurde die Leistung des mehrskaligen Multisensor-Messsystems an einer beispielhaften Messreihe untersucht. Diese bildet die Basis für eine Potenzialbewertung mehrskaliger Messungen mit mehreren Sensoren.

7.2.1 Beschreibung der Messreihe

Für die beispielhafte Messreihe wurde das PTB-Mikrokonturnormal als Messobjekt verwendet, wodurch ein Vergleich der Messwerte zu Kalibrierwerten und gleichzeitig ein Rückschluss auf die Eignung für die ganzheitliche Erfassung blechmassiv-umgeformter Bauteile möglich war. Gemessen wurden die in Abbildung 46 aufgeführten Merkmale. Diese lassen sich in Radien, Winkel, Stufenhöhen und Abstände zwischen Radien untergliedern. In Abstimmung mit Experten der Blechmassivumformung sowie der Messtechnik wurden die nach außen gerichteten (Außen-)Radien der Größen 1 mm, 0,5 mm sowie 0,25 mm, die beiden Winkel von 90° sowie die nach außen gerichteten Stufenhöhen 1 mm und 0,5 mm als relevante, zu messende Merkmale ausgewählt. Um eine größere Bandbreite von Abständen betrachten zu können, wurden hierfür zusätzlich die nach innen gerichteten (Innen-)Radien erfasst.

Zur Merkmalerfassung wurde ein GOM ATOS Compact Scan 2M als Übersichtsensor verwendet, der senkrecht von oben das Messobjekt erfasst. Für eine Detaillierung der Messinformationen wurden jeweils ein Sensor des Typs MicroCAD 1,0 und MicroCAD 0,3 eingesetzt. Deren Messrichtungen sind ebenfalls der Senkrechten angenähert, um möglichst vergleichbare Bedingungen zu schaffen. Die Messrichtungen können die Senkrechte aufgrund von Messfeldbeeinträchtigungen des Überblickssensors jedoch nicht vollständig einnehmen.

Die Messreihe besteht aus 25 Durchläufen, vor denen im Vorfeld eine Multisensor-Kalibrierung durchgeführt wurde. Durch die konstant bleibenden Transformationsmatrizen konnten die im vorherigen Abschnitt detektierten Schwankungen des Kalibrierablaufs ausgeschlossen werden. Abweichungen aus der Kalibrierung gingen vielmehr als Offset-Werte in alle Messergebnisse ein. Ein Durchlauf gilt als abgeschlossen, sobald jedes Merkmal einmal erfasst wurde.

Die Auswertung untergliedert sich in verschiedene Auswertereihen und erfolgte mit PolyWorks IMInspect 2014 V14. Ausgehend von der Auswertung der Messdatensätze jedes einzelnen Sensors wurden die Datensätze der beiden Detailsensoren zu einer Auswertereihe zusammengefasst und im letzten Schritt alle Sensoren in einer gemeinsamen Auswertereihe betrachtet. Hierzu wurden die einzelnen Messdatensätze über die Transformationsmatrizen der entsprechenden Sensoren in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Die Berechnung der Ersatzmerkmale erfolgte auf Basis aller verfügbaren Messinformationen. Lediglich die in PolyWorks IMInspect 2014 V14 voreingestellte Ausreißerfilterung fand vor der Merkmalsberechnung statt.

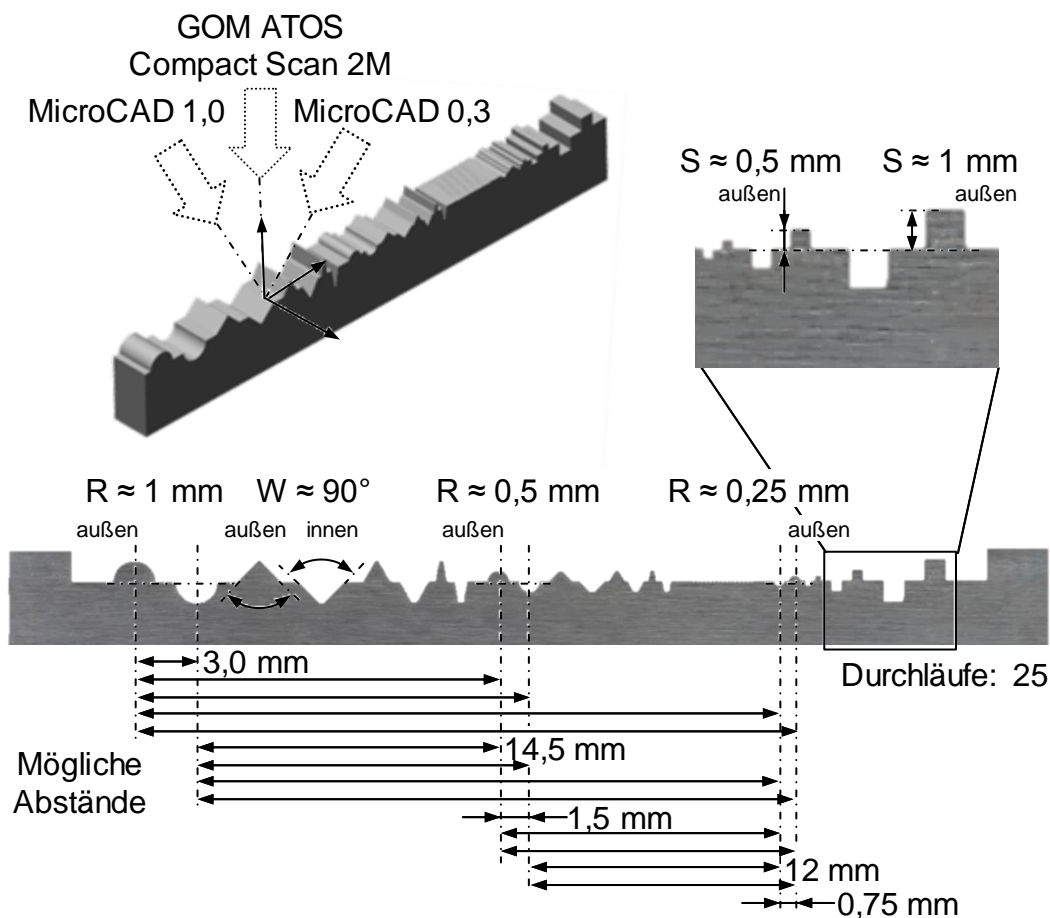


Abbildung 46: Sensoranordnung und zu messende Merkmale der Messreihe

Durch die in Form und Größe verschiedenartigen Merkmale bildet die Messreihe die Möglichkeiten der Blechmassivumformung sowie der darin möglichen Messaufgaben adäquat ab. Auf Grundlage der in Abschnitt 4.3.3 aufgezeigten Ähnlichkeit zwischen dem Normal und Bauteilen der Blechmassivumformung wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse als zulässig angesehen.

7.2.2 Ergebnisse der Messungen an Radien, Winkeln und Stufenhöhen

Zur Ergebnisinterpretation werden die Abweichungen zwischen den gemessenen Ist-Werten und den Kalibrierwerten des Mikrokonturnormals betrachtet. Diese sind in Abbildung 47, Abbildung 48 und Abbildung 49 auf der linken Ordinate aufgetragen. Da die Ergebnisse nicht für alle Messreihen normalverteilt sind (Anderson-Darling-Test; Signifikanzniveau $\alpha = 5\%$), werden jeweils die Mediane sowie die Streubreiten zwischen 5. und 95. Perzentil, dargestellt über die Fehlerindikatoren, verglichen. Auf den rechten Ordinaten sind die prozentualen Anteile der nicht messbaren Durchläufe aufgetragen.

In Abbildung 47 sind die Abweichungen aus den Messungen an den nach außen gerichteten Radien aufgetragen. Der Compact Scan generiert mit Medianen

von $-99 \mu\text{m}$ („Radius 1 mm“) und $-93 \mu\text{m}$ („Radius 0,5 mm“) deutlich größere Abweichungen als die übrigen Sensoren. Zudem können in den 25 Messdurchläufen am „Radius 0,5 mm“ in 84 % der Fälle (21 Messungen), am „Radius 0,25 mm“ in 100 % der Fälle, keine Ersatzelemente berechnet werden, was auf zu wenige detektierte Messpunkte zurückzuführen ist.

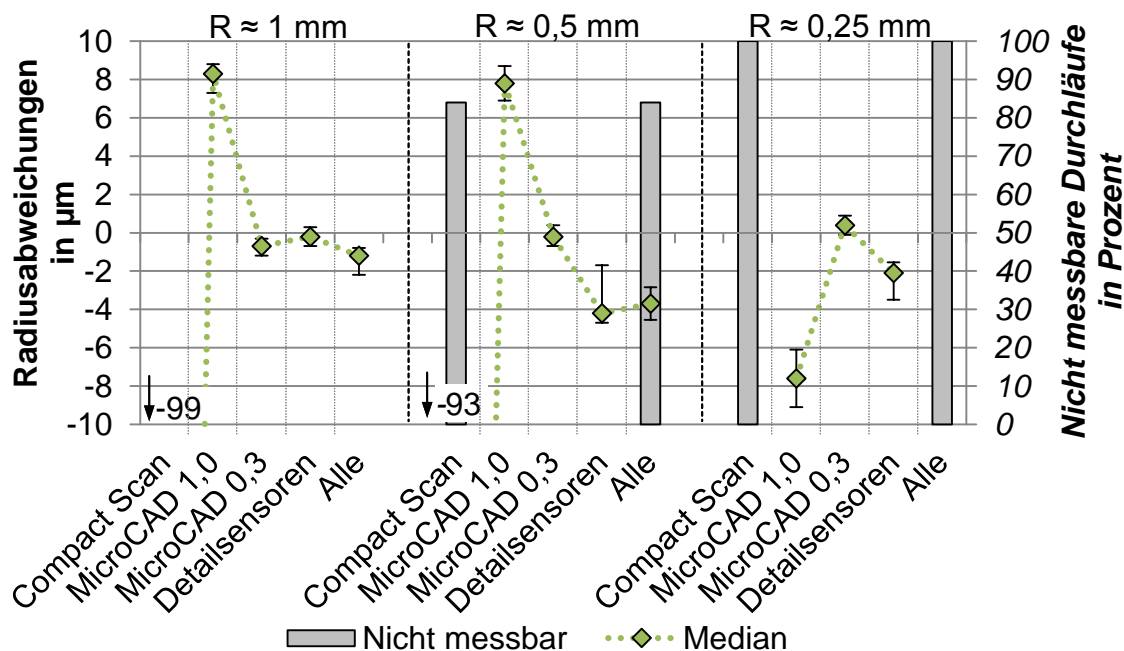


Abbildung 47: Ergebnisse für die Radienmerkmale

Beide Detailsensoren hingegen können in jedem Messdurchlauf ausreichend viele Punkte detektieren und weisen zudem deutlich geringere Abweichungen auf. Der MicroCAD 1,0 weicht jedoch bei allen drei Radiengrößen mehr vom Kalibrierwert ab, als der MicroCAD 0,3. Dieser liefert mit Medianen von $-1 \mu\text{m}$ („Radius 1 mm“) sowie $0,2 \mu\text{m}$ beziehungsweise $0,4 \mu\text{m}$ („Radius 0,5 mm“ und „Radius 0,25 mm“) jeweils die genauesten Werte für die Einzelsensoren.

Die Streubreiten der Einzelsensoren sind ähnlich gestaffelt wie die Abweichungen. Auch hier liefert der Überblickssensor Compact Scan ($6 \mu\text{m}$ für „Radius 1 mm“; $3 \mu\text{m}$ für „Radius 0,5 mm“) die größten Werte vor dem höher auslösenden MicroCAD 1,0 und dem am höchsten auflösenden MicroCAD 0,3.

Eine gemeinsame Auswertung der Detailsensoren-Datensätze für den „Radius 1 mm“ führt im Median zu einer Abweichung von $0 \mu\text{m}$ und damit zur geringsten von allen betrachteten Auswertekombinationen für diese Radiusgröße. Im Gegensatz dazu sind für den „Radius 0,5 mm“ sowie den „Radius 0,25 mm“ sowohl die Abweichungen im Median als auch die Streubreiten größer als beim MicroCAD 0,3. Bei gemeinsamer Betrachtung aller Datensätze werden die großen Streubreiten des

Überblicksensors fast vollständig ausgeglichen, was auf die, im Vergleich, viel größere Anzahl genauerer Messdatenpunkte bei beiden Detailsensoren zurückzuführen ist. Beispielsweise stehen für die Berechnung des Ersatzelements für den „Radius 1 mm“ im Mittel 386 Messdatenpunkte des Compact Scan, 4819 Punkte des MicroCAD 1,0 und 28275 Datenpunkte des MicroCAD 0,3 zur Verfügung. Daher sind die Streubreiten fusionierter Datensätze größer als die Streubreite des genauesten Einzelsensors. Aufgrund der fehlenden Datensätze des Überblicksensors für den „Radius 0,25 mm“ kann keine Auswertung unter Zuhilfenahme aller Sensoren erfolgen.

Für die genaue Berechnung eines zylindrischen Ersatzelements auf Basis der Messdaten mehrerer Sensoren ist eine präzise laterale und vertikale Ausrichtung der Datensätze zueinander erforderlich. Die Positionsabweichung der Datensätze geht in die Berechnung des Ersatzelementes ein, wodurch es zu einer zusätzlichen Abweichung des errechneten Radius gegenüber dem Kalibrierwert kommt. Daher sind die größeren Streubreiten der kombinierten Datensätze gegenüber dem hochgenauen MicroCAD 0,3 durch minimale Abweichungen der Sensorausrichtungen zu erklären. Diese Abweichungen ergeben sich aus der Multisensor-Kalibrierung.

Mittels Moods-Median-Tests wurden die Mediane der verschiedenen Auswertereihen miteinander verglichen und auf statistisch belegbare Unterschiede überprüft. Mit dem gewählten Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ kann die Nullhypothese H_0 (alle geprüften Gruppenmediane sind gleich groß) für die Vergleiche verworfen werden. Die Unterschiede zwischen den Medianen der Auswertereihen gelten damit als statistisch belegt.

Abbildung 48 zeigt auf der linken Ordinate die Winkelabweichungen in Winkelminuten. Bei den Messungen der Winkel können in allen Durchläufen die nötigen Ersatzelemente errechnet und damit Abweichungen gegenüber den Kalibrierwerten bestimmt werden.

Die Mediane der Abweichungen für den „Winkel 90° innen“ bewegen sich in einem Bereich von -8' für den Compact Scan bis 7' bei Auswertung aller Datensätze. Auffällig ist dabei die große Streubreite beim Compact Scan von circa 63', die die Streubänder von einigen Winkelminuten der übrigen Auswertereihen deutlich übersteigt. Im Gegensatz zur nach innen gerichteten Merkmalsausprägung zeigen sich für den „Winkel 90° außen“ in den Medianen größere Abweichungen bei allen Auswertereihen. Während sich die Streubreiten des Compact Scans auf circa 28' reduzieren, bleiben die übrigen Streubreiten nahezu konstant.

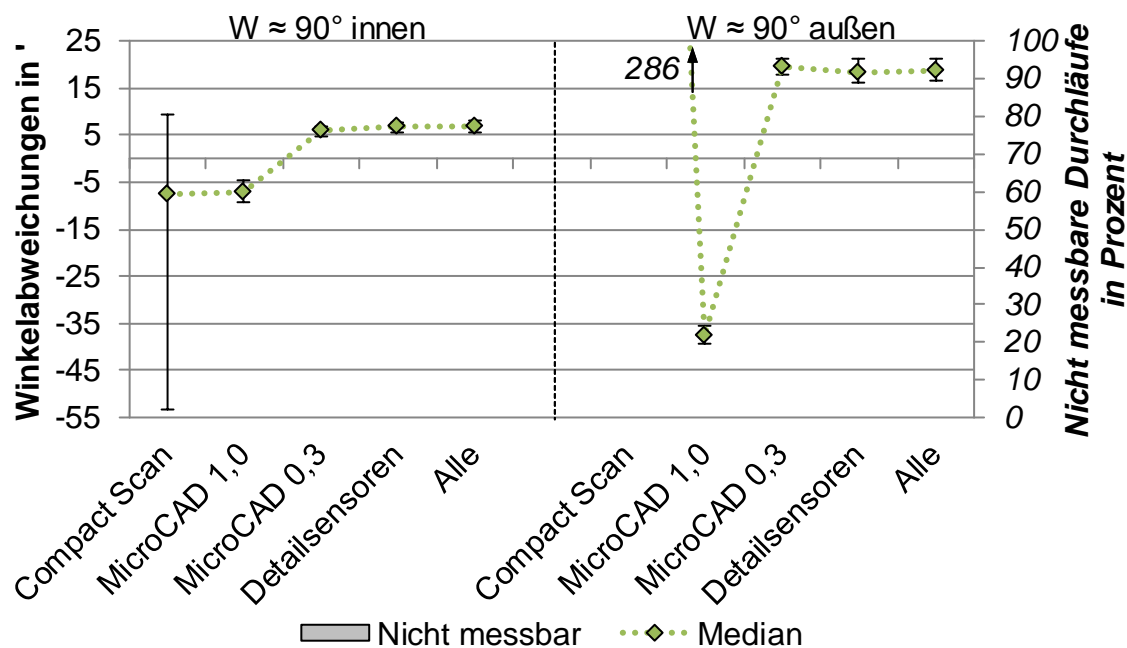


Abbildung 48: Ergebnisse für die Winkelmerkmale

Durch eine Fusion der Datensätze kann für beide Winkelmerkmale wiederum eine Kompensation der großen Streubreite des Überblicksensors erzielt werden. Zur Bestimmung der Winkelabweichungen aus mehreren Messdatensätzen ist deren präzise Ausrichtung um alle drei Rotationsachsen erforderlich. Anders als bei den Radiusmerkmalen spielt die vertikale und laterale Ausrichtung eine untergeordnete Rolle. Die Streubreitenreduktion bei den Auswertereihen mit mehreren Datensätzen kann erneut durch das Verhältnis der Messdatenpunkte zugunsten der hochauflösenden Detailsensoren begründet werden.

Die Unterschiede zwischen den Medianen der Auswertereihen wurden mittels Moods-Median-Tests (Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$) geprüft. Für den „Winkel 90° innen“ sind die Unterschiede zwischen der Auswertereihe des Compact Scan und des MicroCAD 1,0 sowie zwischen der Auswertereihe für die Detailsensoren und allen Datensätzen statistisch nicht belegbar. Ebenso ist für den „Winkel 90° außen“ kein signifikanter Unterschied der Mediane zwischen den Auswertereihen mit allen Datensätzen und denen der Sensoren MicroCAD 0,3 sowie den Detailsensoren zu erkennen.

Die linke Ordinate in Abbildung 49 zeigt die Abweichungen für die Messungen an den nach außen gerichteten Stufenhöhen. Wie aus den Werten für die rechte Ordinate zu entnehmen ist, kann aufgrund des zu kleinen Messbereichs die „Stufenhöhe 1 mm“ vom MicroCAD 0,3 nicht gemessen werden. Hierdurch ist auch keine Auswertung der Detailsensoren möglich. Die Auswertereihe mit allen Datensätzen enthält daher nur die Messinformationen des Compact Scans und des MicroCAD 1,0.

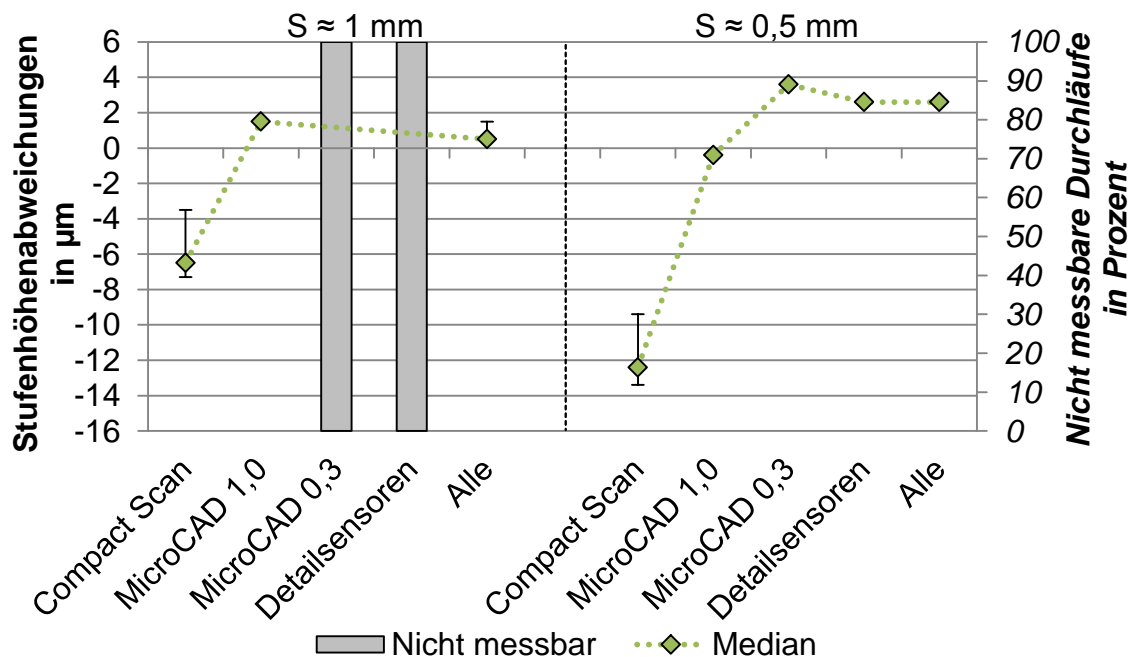


Abbildung 49: Ergebnisse für die Stufenhöhenmerkmale

Mit Medianen von $-6 \mu\text{m}$ („Stufenhöhe 1 mm“) und $-12 \mu\text{m}$ („Stufenhöhe 0,5 mm“) ergaben sich für den Überblickssensor Compact Scan abermals die größten Abweichungen. Ebenso sind die Streubreiten von jeweils circa $4 \mu\text{m}$ größer als bei den anderen Auswertereihen.

Die Unterschiede der Gruppenmediane konnten wiederum durch Moods-Median-Tests (Signifikanzniveau $\alpha = 5 \%$) belegt werden. Lediglich zwischen den Medianen der Detailsensoren sowie aller Datensätze, ist die Durchführung eines derartigen Tests nicht möglich, da alle Abweichungswerte dieselben Werte besitzen.

Bei einer gemeinsamen Auswertung mehrerer Datensätze für Stufenhöhen ist lediglich die vertikale Sensorausrichtung relevant. Hierdurch lassen sich die geringen Unterschiede zwischen den Abweichungen der Einzelsensoren und der gemeinsamen Auswertereihen erklären.

7.2.3 Ergebnisse der Abstandsmessungen

Für die Abstandsmessungen wurden neben den nach außen gerichteten Radien zusätzlich die nach innen gerichteten Radien am Mikrokonturnormal erfasst. Aus den sechs Radien unterschiedlicher Größen ergeben sich 15 Abstände zwischen $0,75 \text{ mm}$ und $31,75 \text{ mm}$. Hierbei entspricht das Verhältnis zwischen kleinstem und größtem Merkmal 1:42. Mit der Blechmassivumformung ist projektiert, Merkmalsverhältnisse für Nebenformelemente zwischen 1:10 und 1:75 realisieren zu können. Damit entsprechen die ausgewählten Merkmale den Größenordnungen der neuen Fertigungstechnologie.

In Abbildung 50 sind die Abweichungen zwischen dem gemessenen Abstand und dem Kalibrierwert auf der linken Ordinate aufgetragen. Betrachtet wurden hierzu die Mediane sowie das 5. und das 95. Perzentil einer Auswertereihe.

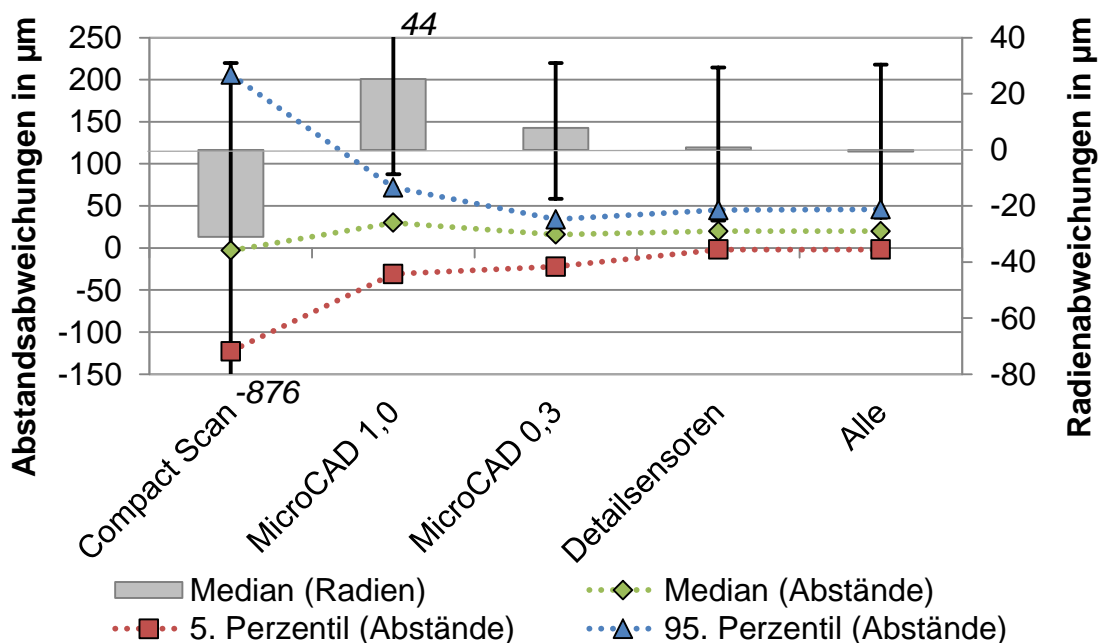


Abbildung 50: Ergebnisse für die Abstandsmerkmale

Die Abstandsabweichungen hängen von Größe und Position der berechneten zylindrischen Ersatzelemente und damit von den Radienabweichungen ab. Letztere sind auf der rechten Ordinate im Median für die unterschiedlichen Auswertereihe aufgetragen. Die Streubreiten in Form des 5. und 95. Perzentils werden als Abweichungsindikatoren dargestellt. Median und Streubreite einer Auswertereihe berechnen sich aus den Ergebnissen für die Abweichungen aller Radiengrößen und Ausprägungen. Daher variieren die Ergebnisse im Vergleich zu Abbildung 47. Dies gilt es bei der Interpretation der Radienabweichungen zu beachten.

Der Überblickssensor Compact Scan weist bei den Radienabweichungen und den Abstandsabweichungen die größten Streubreiten auf. Im Gegensatz zu den beiden Detailsensoren ist der Messbereich des Überblickssensors groß genug, um alle Abstände aus einer Messung berechnen zu können. Für die Detailsensoren ist die Bestimmung der Abstände durch die Betrachtung mehrerer, durch Transformationsmatrizen entsprechend ausgerichteter Datensätze notwendig. Eine Minimierung der Streubreiten für Abstandsmessungen wird daher durch die Genauigkeit der Multisensor-Kalibrierung begrenzt. Die Streubreiten von circa 50 µm der Auswertereihe für die Detailsensoren sowie für die kombinierten Datensätze aller Sensoren liegen

in derselben Größenordnung wie die Translationsvektorenlängen für die Verifizierungsmessungen der Multisensor-Kalibrierung in Abbildung 41 für Messungen innerhalb des kalibrierten Bereichs.

Hierzu passen die Ergebnisse der Moods-Median-Tests, die bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ keine statistisch belegbaren Unterschiede zwischen den Medianen der Abstandsabweichungen für die Auswertereien der Detailsensoren und aller Datensätze aufweisen. Begründet durch die großen Streubreiten können auch bei den Medianen für die Radienabweichungen keine Unterschiede zwischen den Auswertereien MicroCAD 0,3, Detailsensoren und allen Datensätzen statistisch belegt werden.

7.3 Betrachtung der Messunsicherheit

Nach dem internationalen Wörterbuch der Metrologie umfasst ein vollständiges Messergebnis neben dem Messwert unter anderem die Angabe der messaufgabenspezifischen Messunsicherheit [JCGM 2012]. Um einen Vergleich des prototypischen mehrskaligen Multisensor-Messsystems mit anderen Messsystemen zu ermöglichen, wurde die Messunsicherheit für eine beispielhafte, in Abbildung 51 dargestellte Messaufgabe betrachtet.

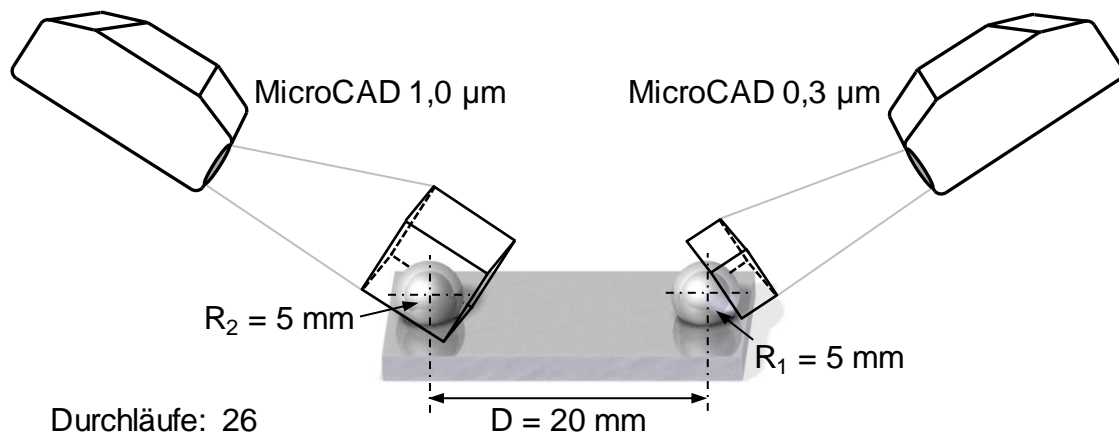


Abbildung 51: Aufbau zur Messunsicherheitsermittlung ohne Positioniereinheit

Hierbei waren an einem, einer Kugelhantel ähnlichen Messobjekt die Radien zweier Kugeln sowie deren Mittelpunktabstand zu ermitteln. Als Sensoren wurden je ein Detailsensor vom Typ MicroCAD 0,3 und MicroCAD 1,0 eingesetzt. Da deren Messbereiche zu klein sind, um beide Kugeln in einer Aufnahme zu detektieren, erfasst ein Sensor nur jeweils eine Kugeloberfläche. Die Messaufgabe spiegelte dabei die Grundidee mehrskaliger Multisensor-Messungen wider, Merkmale, deren Größe den Messbereich eines Sensors überschreiten, durch Kombination der Datensätze

zu erfassen. Um die Messaufgabe einerseits an die Gegebenheiten der Blechmasivumformung anzulehnen und gleichzeitig das prototypische Messsystem an den Herausforderungen der aktuellen Messtechnik zu testen, waren die Kugeln aus hochglänzendem Stahl. Derartige Oberflächen stellen konventionelle Streifenprojektionssysteme vor große Herausforderungen und können ohne zusätzliche Oberflächenmattierung meist nur zeitaufwendig durch mehrere Messungen aus verschiedenen Positionen erfasst werden. Das Messobjekt wurde zwischen den Messungen in der Position variiert und, soweit dies die kleinen Messbereiche zuließen, aus unterschiedlichen Richtungen gemessen. Als Vergleichsmesssystem wurde der GOM ATOS Compact Scan 2M-Sensor verwendet. Dessen Messbereich ist groß genug, um beide Kugeln mit nur einer Messung zu erfassen.

Die Auslegung der Messaufgabe sowie die darauf aufbauende Ermittlung der Messunsicherheit orientierte sich an dem in [DIN EN ISO 15530-3:2012-01] erläuterten Vorgehen zur Unsicherheitsermittlung an einem kalibrierten Normal (Substitutionsmessung). Das experimentelle Verfahren stellt einen vereinfachten Ansatz zur Messunsicherheitsbestimmung für Koordinatenmessgeräte dar. Die erweiterte Messunsicherheit U wird dabei wie folgt berechnet:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{p}}^2 + u_{\text{b}}^2 + u_{\text{w}}^2} \quad (7.5)$$

Dabei stellt k den Erweiterungsfaktor dar. Die Standardunsicherheit der Kalibrierung u_{cal} errechnet sich aus der Unsicherheit der Kalibrierung U_{cal} und dem Erweiterungsfaktor k_{cal} der Kalibrierung:

$$u_{\text{cal}} = \frac{U_{\text{cal}}}{k_{\text{cal}}} \quad (7.6)$$

Die Standardunsicherheit des Messverfahrens u_{p} entspricht der Standardabweichung der Messwerte:

$$u_{\text{p}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (7.7)$$

Die Ermittlung der Standardunsicherheit der systematischen Abweichung u_{b} beschränkt sich auf die Berechnung der Standardmessunsicherheit des Temperatureinflusses u_{temp} . Dieser stellt sich nach einer Prozessanalyse als einziger nicht zu vernachlässigender Einfluss für systematische Abweichungen dar. Nach [Keferstein und Marxer 2015] ist der Temperatureinfluss eine rechteckverteilte Größe und errechnet sich aus der Größe des zu messenden Merkmals l , dem Längenausdehnungskoeffizienten α_{w} (nach [Fischer et al. 2008]: Stahlkugeln: $\alpha_{\text{w}} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$;

Glaskeramikträger: $\alpha_w = 9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$) und der zu erwartenden Temperaturschwankung ΔT . Letztere wurde aufgrund der kurzen Messzeiten als gering angenommen ($\Delta T = 1 K$).

$$u_b = u_{\text{temp}} = \frac{l \cdot \alpha_w \cdot \Delta T}{\sqrt{3}} \quad (7.8)$$

Aussagen über vorhandene Werkstoff- und Produktionsstreuungen konnten im Bereich der Blechmassivumformung aufgrund fehlender Standardproduktionsprozesse noch nicht getroffen werden. Die Standardunsicherheit aus Werkstoff- und Produktionsstreuungen u_w wurden daher vernachlässigt.

Zusätzlich wird im Rahmen der Unsicherheitsermittlung die systematische Abweichung b betrachtet, welche die Differenz zwischen dem Mittelwert \bar{y} und dem Kalibrierwert x_{cal} darstellt. Nach [DIN EN ISO 15530-3:2012-01] erfolgt die Darstellung des Messergebnisses Y als Angabe des Einzelmesswertes y und der beigefügten systematischen Abweichung b sowie der erweiterten Messunsicherheit U .

$$Y = y - b \pm U \quad (7.9)$$

Im Rahmen, der in Abbildung 52 dargestellten Messaufgabe konnten die gesuchten Kennwerte allein durch eine Transformation der Sensordatensätze in ein einheitliches Koordinatensystem und eine gemeinsame Auswertung der transformierten Datensätze ermittelt werden. Abweichungen aus der Kalibrierung gehen stets in jedes Messergebnis gleich ein.

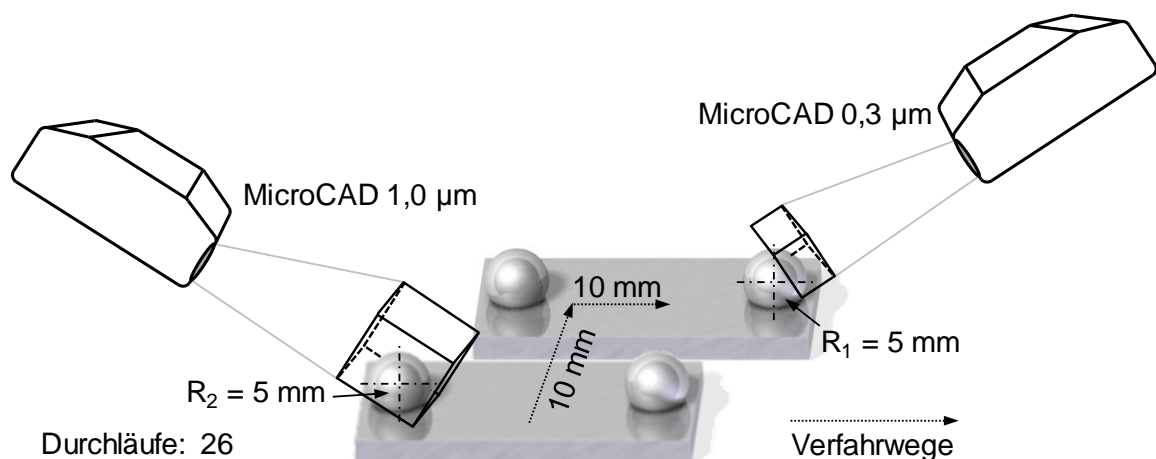


Abbildung 52: Aufbau zur Messunsicherheitsermittlung mit Positioniereinheit

Durch die fehlende Einbindung der Positioniereinheit besteht der Messkreis aus Sensor, Sensorhalterung, Rahmenkonstruktion und Messobjekthalterung, die als quasi-starre Verlängerung die Positioniereinheit mit umfasst. Solange sich die Ausrichtung der Sensoren relativ zueinander nicht ändert, gehen Abweichungen nicht in die Ergebniskalkulation ein. Um zusätzlich den Einfluss der Positioniereinheit auf

die Messunsicherheit zu bestimmen, wurde zusätzlich die in Abbildung 52 gezeigte Messaufgabe durchgeführt. Hierbei sind die Messbereiche der Detailsensoren so weit versetzt, dass beide Kugeln nicht gleichzeitig gemessen werden konnten. Stattdessen ist eine translatorische Bewegung des Messobjekts notwendig. Für die Bestimmung des Mittelpunktabstands der beiden Kugeln müssen diese Bewegungen herausgerechnet werden. Die Positioniereinheit wird durch diese Konfiguration von einer quasi-starren Verlängerung der Messobjekthalterung zu einer eigenständigen Komponente im Messkreis. Abweichungen einer, im Messkreis eingehaltenen Komponente gehen somit vollständig in die Ergebniskalkulation ein.

Der Term zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit wurde in Anlehnung an [JCGM 2008] und [Keferstein und Marxer 2015] entsprechend der zusätzlich zu berücksichtigenden Unsicherheiten erweitert:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{\text{cal}}^2 + u_{\text{p}}^2 + u_{\text{b}}^2 + u_{\text{w}}^2 + u_{\text{Abbe}}^2 + u_{\text{Pos}}^2} \quad (7.10)$$

Wiederum wurde die Standardunsicherheit aus Werkstoff- und Produktionsstreuungen u_{w} als vernachlässigbar angesehen.

Für die Ermittlung der Standardunsicherheit der systematischen Abweichung u_{b} sind neben den temperaturbedingten, systematischen Abweichungen des Messobjekts noch weitere thermisch induzierte Abweichungen zu beachten. Die Messobjekthalterung (Höhe $h_{\text{Halt.}} = 140 \text{ mm}$; Werkstoff: Aluminium, $\alpha_{\text{w, Halt.}} = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ nach [Fischer et al. 2008]), bestehend aus Zwischenstück und wechselbarem Messstisch sowie der rutschhemmenden Messobjektaufgabe (Höhe $h_{\text{Aufl.}} = 5 \text{ mm}$; Werkstoff: Gummi, $\alpha_{\text{w, Aufl.}} = 9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$ nach [Chemie 2016]), führen bei Temperaturschwankungen ($\Delta T = 1 \text{ K}$) ebenfalls zu systematischen Abweichungen.

$$\begin{aligned} u_{\text{b}} &= u_{\text{temp, Messobjekt}} + u_{\text{temp, Halterung}} + u_{\text{temp, Auflage}} = \\ &= \frac{(l \cdot \alpha_{\text{w, Mess.}} \cdot \Delta T) + (h_{\text{Halt.}} \cdot \alpha_{\text{w, Halt.}} \cdot \Delta T) + (h_{\text{Aufl.}} \cdot \alpha_{\text{w, Aufl.}} \cdot \Delta T)}{\sqrt{3}} \quad (7.11) \end{aligned}$$

Zur Abschätzung des Unsicherheitsbeitrags aus den Abweichungen 1. Ordnung aus der Verletzung des Abbe'schen Komparatorprinzips u_{Abbe} wird der in Abbildung 42 auf Seite 94 dargestellte Zusammenhang zwischen dem Biegeweg Δf und den Abweichungen ΔL genutzt. Für Letztere wird eine Rechteckverteilung angenommen.

$$u_{\text{Abbe}} = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}} \quad (7.12)$$

Der Unsicherheitsbeitrag aus der Positioniereinheit u_{Pos} wird angenommen als kombinierte Unsicherheit aus den Abweichungen ($\Delta_{\text{Pos.}}$) ($\Delta_{\text{Pos.min.}} = 0 \text{ }\mu\text{m}$; $\Delta_{\text{Pos.max.}} = 2 \text{ }\mu\text{m}$) sowie der thermischen Dehnung der Positionierachsen:

$$u_{\text{Pos}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{Pos.max.}} - \Delta_{\text{Pos.min.}}}{2}\right)^2 + (s \cdot \alpha_w \cdot \Delta T)^2} \quad (7.13)$$

Hierbei entspricht s der Länge des Translationsvektors ($s = 14,14 \text{ mm}$). Für den Längenausdehnungskoeffizienten α_w wurde vereinfacht der Kennwert für den Werkstoff Stahl ($\alpha_w = 12 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$) angenommen. Die zu erwartende Temperaturschwankung ΔT wurden wiederum mit $\Delta T = 1 \text{ K}$ abgeschätzt.

Mit der Bestimmung der E_N -Werte (Normalized Error Ratio) wurde abschließend eine Bewertung der Messergebnisse in Bezug auf die Messunsicherheiten vorgenommen. Nach [Pesch 2003] liegen optimale E_N -Werte in einem Bereich von $\pm 0,5$. In einem Bereich bis ± 1 sind die Werte noch akzeptabel. Allerdings ist zu überprüfen, ob die Messunsicherheiten für die durchgeführte Messaufgabe korrekt ermittelt sowie keine fehlerhaften Messergebnisse in die Berechnung einbezogen wurden. Sind die E_N -Werte größer als ± 1 kann von einer fehlerhaften Messung oder inkorrekten Messunsicherheitsermittlung ausgegangen werden. In Tabelle 11 sind die E_N -Werte im Mittel für die verschiedenen Merkmale angegeben.

$$E_N = \frac{(\text{Messwert}_{\text{Messung}} - \text{Messwert}_{\text{Kalibrierung}})}{\sqrt{U_{\text{Messung}}^2 + U_{\text{Kalibrierung}}^2}} \quad (7.14)$$

Aus den in Tabelle 11 aufgeführten Ergebnissen für die Messunsicherheitsermittlungen kann die Überlegenheit mehrskaliger Multisensor-Messungen gegenüber den Messungen des konventionellen Streifenprojektionssensor GOM ATOS Compact Scan 2M abgelesen werden. Die hohen Messunsicherheiten für den Compact Scan-Sensor sind durch die schwere Erfassbarkeit der hochglänzenden Kugeln zu erklären. Die kombinierte Erfassung der Kugeln durch zwei Detailsensoren liefert erheblich geringere Messunsicherheiten. Wird die Messaufgabe um die Positionierereinheit erweitert, steigen die Messunsicherheiten hierbei wegen der zusätzlichen Unsicherheitsbeiträge an, sind jedoch immer noch deutlich unterhalb der ermittelten Werte für den Compact Scan. Zu berücksichtigen sind jedoch die im Vergleich zu den Unsicherheiten der Detailsensoren hohen systematischen Abweichungen.

Die in Tabelle 11 aufgeführten Messunsicherheiten für mehrskalige Multisensor-Messungen ohne Positioniereinheit sind vergleichbar mit den in [Ohrt et al. 2012a] für diesen Sensortyp ausgewiesenen Unsicherheiten für die Messung von Radien. Allerdings gilt es bei diesem Vergleich zu berücksichtigen, dass letztere Unsicherheiten gemäß der [VDI/VDE 2617-8:2006-07] ermittelt und die systematischen Abweichungen bereits in der Messunsicherheit berücksichtigt wurden. Durch eine separate Betrachtung von Unsicherheit und systematischer Abweichung ist eine Vergleichbarkeit gegeben.

Tabelle 11: Ergebnisse der Messunsicherheitsermittlungen

		R₁	R₂	D
Angaben für alle Messreihen gültig	k	2	2	2
	U_{cal}	3 μm	3 μm	1,3 μm
	u_{cal}	1,5 μm	1,5 μm	0,7 μm
	x_{cal}	2,5008 mm	2,5029 mm	20,0019 mm
	u_w	vernachlässigbar		
Messreihe mit Compact Scan, ohne Positioniereinheit	u_p	206,7 μm	542,5 μm	81,1 μm
	\bar{y}	2,248 mm	1,963 mm	20,068 mm
	b	-253 μm	-540 μm	66 μm
	u_b	0,03 μm	0,03 μm	0,21 μm
	U	413,4 μm	1085,0 μm	162,2 μm
	\bar{E}_N	-0,4	-0,3	-0,3
Mehrskalige Multisensor- Messungen ohne Positioniereinheit	u_p	2,5 μm	1,6 μm	6,3 μm
	\bar{y}	2,492 mm	2,556 mm	19,960 mm
	b	-9 μm	53 μm	-42 μm
	u_b	0,03 μm	0,03 μm	0,21 μm
	U	5,8 μm	4,4 μm	12,7 μm
	\bar{E}_N	-0,6	0,9	-0,8
Mehrskalige Multisensor- Messungen mit Positioniereinheit.	u_p	1,4 μm	20,6 μm	16,5 μm
	\bar{y}	2,473 mm	2,501 mm	19,994 mm
	b	-28 μm	-2 μm	-8 μm
	u_{Abbe}	5,7 μm		
	u_{Pos}	1,1 μm		
	u_b	4,8 μm	4,8 μm	5,0 μm
	U	15,7 μm	44,0 μm	36,5 μm
	\bar{E}_N	-0,6	-0,1	-0,2

7.4 Bewertung des mehrskaligen Multisensor-Ansatzes und praktische Implikation

Die Messung komplexer Geometrien, bestehend aus verschiedenartigen Merkmalen divergierender Größen, wie sie beispielsweise durch moderne Fertigungstechnologien an einem Bauteil realisiert werden können, stellt die Messtechnik meist vor einen Zielkonflikt. Herkömmliche Messsysteme weisen entweder einen ausreichend großen Messbereich für die gleichzeitige Erfassung aller Merkmale auf oder die Auflösung ist ausreichend hoch zur adäquaten Messung auch kleiner Merkmale. Im ersten Fall sind die Systeme in ihrer maximalen Auflösung limitiert und können nicht alle Merkmale in einer angepassten Auflösung detektieren. Im zweiten Fall können durch den begrenzten Messbereich nicht alle Merkmale simultan aufgenommen werden.

Am Beispiel einer Messreihe am PTB-Mikrokonturnormal wurde eine derartige, komplexe Messaufgabe nachgestellt und die Anwendung der mehrskaligen Multisensor-Messungen und die damit zu erreichenden Ergebnisse aufgezeigt. Dabei wurde für die Merkmalstypen Radius, Winkel, Stufenhöhe und Abstand gezeigt, welche Sensordatensätze für welches Merkmal welcher Größe die geringsten Abweichungen vom Kalibrierwert und die geringste Streubreite aufweisen. Wurden mehrere Datensätze kombiniert, konnte meist eine Reduktion der Abweichungen und Streubreiten gegenüber Einzelsensoren erreicht werden. Die Einzelsensoren waren dabei durch einen ausreichend großen Messbereich charakterisiert, um alle zu messenden Merkmale in einer Messung erfassen zu können. Mit dem mehrskaligen Multisensor-Ansatz ist es somit möglich, für jedes zu messende Merkmal den am besten geeigneten Sensor oder Kombinationen aus Sensoren zu verwenden.

Wie am Beispiel der Abstandmessungen verdeutlicht wurde, konnten darüber hinaus mit dem mehrskaligen Multisensor-Ansatz Merkmale, die über den Messbereich eines Sensors hinausgehen, erfasst und ausgewertet werden. Hierfür wurde mittels der Multisensor-Kalibrierung die Ausrichtung der Sensoren zueinander erfasst. Dies ermöglicht die Transformation der Datensätze in ein gemeinsames Koordinatensystem und das Auswerten von Merkmalen, die größer als der Messbereich eines Einzelsensors sind.

Der Kalibrierablauf sieht ebenfalls die Einbeziehung von Systemen zur Messobjekthandhabung entlang zweier translatorischer und einer rotatorischen Achse vor. Die mit der Multisensor-Kalibrierung erreichbare Genauigkeit hängt dabei, neben der Positioniergenauigkeit des Messobjekthandhabungssystems, maßgeblich von der Genauigkeit der Kalibrierkörperdigitalisierung ab. Zudem kommt es durch die sys-

tembedingte Nichteinhaltung des Abbe'schen Komparatorprinzips zu Abweichungen 1. Ordnung, welche ebenfalls die Genauigkeit der Kalibrierung und späteren Messdatenfusion negativ beeinflusst. Bei der Auswertung kombinierter Datensätze ist die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Genauigkeit der Sensorausrichtung zu beachten. Je nach Merkmalstyp sind hierbei verschiedene Freiheitsgrade der Ausrichtung relevant.

Ausgehend von den hier aufgezeigten Vorteilen mehrskaliger Multisensor-Messungen konnte der Ansatz bereits an blechmassivumgeformten Bauteilen mit einfachen Geometrien angewendet werden. In Abbildung 53 oben links ist das zu erfassende Bauteil dargestellt. Einerseits ist die eingebrachte Verzahnung aufgrund der hohen Umformkräfte stark reflektierend und erfordert mehrere Messungen aus unterschiedlichen Winkeln. Andererseits ist die Größe der betrachteten Merkmale zu klein für die Auflösung des, als Überblicksensor verwendeten, GOM ATOS Compact Scan 2M. Dies führt im Datensatz des Sensors zu Messlücken, die der genauen Ermittlung der in Abbildung 53 unten links dargestellten Messaufgabe entgegenstehen. Durch eine Detaillierung des Datensatzes nach dem mehrskaligen Multisensor-Ansatz mit Messungen der Detailsensoren MicroCAD 1,0 und MicroCAD 0,3 konnten die Lücken geschlossen werden. Exemplarisch wird dies in Abbildung 53 an einem Verzahnungselement gezeigt. Auf diese Weise wurde die Erfassung aller Merkmale in einer angepassten Auflösung möglich. [Matthias et al. 2016]

Die Erfassung von Merkmalen unterschiedlicher Größen in angepassten Auflösungen schöpft durch die Ausnutzung von Wirkzusammenhängen das volle Potenzial mehrskaliger Multisensor-Messungen aus. In [Merklein et al. 2015; Gröbel et al. 2014] und [Schneider und Merklein 2013] konnten bereits Zusammenhänge zwischen der Ausprägung unterschiedlicher Merkmale variierender Größe belegt werden. Mit mehrskaligen Multisensor-Messungen wird im Bereich der Technologieentwicklung und -optimierung durch die nahezu simultane Erfassung mehrerer Merkmale in angepassten Detaillierungsgraden zusammen mit relevanten Umweltfaktoren die Grundlage für die Detektion von Wirkzusammenhängen gelegt. Im Bereich der Prozess- und Qualitätsüberwachung erlauben statistisch valide Wirkzusammenhänge die Prüfung weniger Merkmale, aus deren Ergebnissen Rückschlüsse auf andere Merkmale möglich sind. Größe und Komplexität der zu überwachenden Merkmale können mit mehrskaligen Multisensor-Messsystemen durch die Kombinationsmöglichkeiten von Sensoren unterschiedlicher Messbereiche und Auflösungen nahezu beliebig variieren.

Die im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit angewandte Methodik kann auf Neuentwicklungen und Anpassungen von Messsystemen für die Qualitätskontrolle

komplexer Bauteile von hochintegrierten Prozessen angewendet werden. Durch eine Fokussierung auf die zu messenden Bauteile und deren Charakteristika, wie etwa Oberflächenbeschaffenheit, mögliche Geometrien und typische Fehlerbilder, wird die Grundlage für eine methodische Anforderungsanalyse bereitgestellt. Unter gleichzeitiger Berücksichtigung externer Einflüsse ist die Entwicklung eines Messsystemaufbaus, angepasst an die Eigenschaften neuer Fertigungstechnologien, möglich.

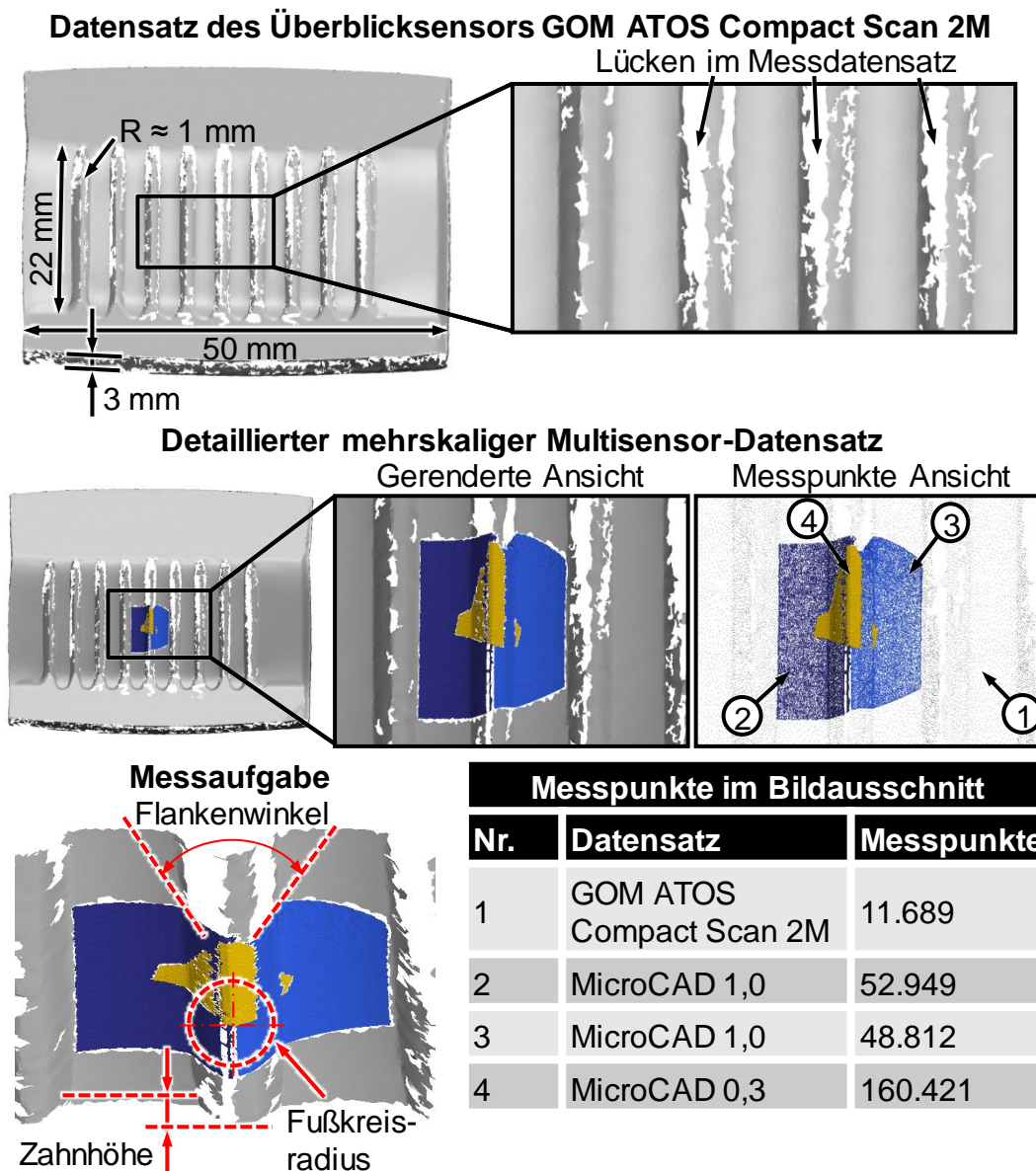


Abbildung 53: Anwendung mehrskaliger Multisensor-Messungen am Beispiel eines blechmassivumgeformten Bauteils [Matthias et al. 2016]

Erst mit dem Multisensor-Kalibrierverfahren, welches das Kernstück dieser Arbeit darstellt, werden mehrskalige Multisensor-Messungen auch ohne überlappende Sensormessbereiche und integrierter Messobjekthandhabung überhaupt möglich.

Sofern das Verfahren an den prototypischen Messsystemaufbau und die Charakteristika der neuen Fertigungstechnologie anpasst wird, kann es ohne Änderungen für vergleichbare optische Multisensor-Messsysteme übernommen werden. Die Einbindung einer Positioniereinheit für die Messobjekthandhabung ist mit bis zu zwei translatorischen und einer rotatorischen Achsen gewährleistet. Weitere Positionierachsen erfordern eine entsprechende Modifikation des zugrundeliegenden mathematischen Grundgerüsts.

Das Prinzip des als Basis für Kalibriermessungen dienenden flexiblen Kalibrierkörpers mit in lateraler und vertikaler Richtung frei positionierbaren Kalibrierzylindern ist in seiner derzeitigen Ausführung für ein breites Spektrum optischer Messverfahren einsetzbar. In seiner derzeitigen Auslegung ist die Bestimmung der Sensorausrichtung in einem Kalibrierfeld von circa 15 000 mm³ möglich. Eine Auslegung des Kalibrierkörpers für Messaufgaben anderer Fertigungstechnologien ist über die angewandte Methodik ebenfalls zielführend.

Durch eine Untergliederung des realisierten Messsystemaufbaus in verschiedene Baugruppen konnte eine hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit bei gleichzeitig minimiertem Konstruktions- und Realisierungsaufwand erreicht werden. Somit erlaubt das prototypische Multisensor-Messsystem ein großes Versuchsspektrum. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Auslegung zukünftiger Messsysteme zur Überwachung der Produktqualität mit einer prozessnäheren In-line-, In-Situ- oder In-Prozess-Integration verwendet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel moderner Fertigungstechnologien mit einer hohen Integrationstiefe besteht in der Herstellung hochkomplexer Werkstücke bei einem gleichzeitig reduzierten Ressourcen- und Zeitbedarf. Um Produktqualität und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit sicherzustellen, sind Regelkreise zur Prozesslenkung erforderlich. Grundlage hierfür bilden valide Messdaten, die es erlauben, das Prozessverhalten zu abstrahieren und somit den Prozess auf die gewünschten Qualitätsanforderungen einzustellen. Eine Verkürzung der Reaktionszeit zwischen Messdatenakquisition und Prozesslenkung wird durch eine Verlagerung der Produktprüfung weg von einer dezentralen Stichprobenmessung und hin zu einer möglichst prozessintegrierten Messung erreicht. Für die Prozessregelung mehrstufig sequenziell verketteter Prozesse ist es möglich, einzelne Merkmale an Zwischenprodukten nach den unterschiedlichen Prozessstufen zu prüfen, auf die Prozessparameter der vorherigen Stufe zu schließen und Lenkungsentscheidungen abzuleiten. Herausfordernd bei hochintegrierten mehrstufigen Prozessen ist der Wegfall von Zwischenproduktkontrollen. Die Produktprüfung muss an allen relevanten Merkmalen nach dem komplett durchlaufenen Prozess erfolgen und die erhobenen Messdaten sind mit den Prozessparametern aller Stufen in Verbindung zu bringen.

Eine sichere Prozessregelung ist nur durch eine Weiterentwicklung der zum Einsatz kommenden Messtechnik möglich. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die wissenschaftlichen Grundlagen für eine holistische Messung mittels mehrerer Sensoren am Beispiel komplexer Bauteile der Blechmassivumformung als Vertreter von hochintegrierten, neu entwickelten Fertigungstechnologien geschaffen. In einer eingehenden Untersuchung der messtechnisch relevanten Bauteileigenschaften konnten charakteristische und für die Messtechnik herausfordernde Oberflächeneigenschaften wie auch Merkmale bestimmt werden. Mit dem PTB-Mikrokonturnormal stand ein kalibriertes Normal zur Verfügung, das die Charakteristika blechmassivumgeformter Bauteile in adäquater Weise abbildet und für die Auslegung und Überprüfung messtechnischer Lösungen genutzt werden konnte.

Neben der Messobjektbetrachtung bildete die Untersuchung möglicher Umwelteinflüsse die Basis einer detaillierten Anforderungsanalyse für die Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus. Dabei gliedert sich der Messsystemaufbau in eine Rahmenkonstruktion sowie jeweils eine Einheit zur Sensorpositionierung und zur Messobjekthandhabung. Eine Evaluation geeigneter Messverfahren und darauf aufbauender Sensoren lieferte die für eine Integration vorzusehenden Sensoren. Für die Erarbeitung grundlagenwissenschaftlicher Ergebnisse stand eine flexible Auslegung des Messaufbaus im Vordergrund.

Die Realisierung der Kombination von Sensordatensätzen, ohne hierbei auf eine Überlappung der Sensormessbereiche angewiesen zu sein, gelang mit der Entwicklung eines Multisensor-Kalibrierverfahrens. Hauptbestandteil ist hierbei ein Kalibrierkörper, der aus flexibel positionierbaren Kalibrierzylindern besteht. Diese Kalibrierzylinder besitzen eine eindeutige Oberflächenstruktur, realisiert durch eingebrachte Buchstaben und Zahlen. Herausfordernd bei der Herstellung der Zylinder war die Auswahl eines Fertigungsverfahrens und einer anschließenden Oberflächenbehandlung, die eine präzise Struktur und gleichzeitig eine gute Erfassbarkeit mittels optischer Messsysteme ermöglicht. Für die entwickelte mehrskalige Multisensor-Kalibrierung werden zuerst die Sensormessbereiche am Messobjekt ausgerichtet. Anschließend wird das Messobjekt gegen den Kalibrierkörper getauscht, die Kalibrierzylinder in die Messbereiche positioniert und eine Messung an jedem Sensor ausgelöst. Durch eine Digitalisierung des Kalibrierkörpers können die Datensätze der Sensoren an dem digitalen Modell ausgerichtet und für jeden Sensor eine Transformationsmatrix berechnet werden. Soll zusätzlich die Messobjekthandhabung in Form der Positioniereinheit berücksichtigt werden, sind mehrere Messungen der Sensoren mit jeweils variierten Verfahren notwendig.

Eine detaillierte experimentelle Evaluation der Multisensor-Kalibrierung bestätigte die korrekte Funktionsweise des Verfahrens. Die erreichbare Genauigkeit hängt dabei von dem Messsystem zur Erzeugung des digitalen Kalibrierkörper-Referenzdatensatzes ab. Zudem konnten die verfahrenwegabhängigen, systematischen Abweichungen mit den Abweichungen, die aus den Abweichungen 1. Ordnung bei Verletzung des Abbe'schen Komparatorprinzips resultieren, in Verbindung gebracht werden. In anschließend durchgeführten beispielhaften Messreihen am PTB-Mikrokonturnormal konnten die Vorteile mehrskaliger Multisensor-Messungen gegenüber konventionellen Messaufbauten für die Merkmale Winkel, Stufenhöhe, Radius sowie Abstand nachgewiesen werden. Insbesondere letzteres Merkmal belegt die Möglichkeiten mehrskaliger Multisensor-Messungen, Merkmale, deren Abmaße größer als die Sensormessbereiche sind, präzise zu erfassen.

Eine Gegenüberstellung der Messunsicherheiten bei der Radien- und Abstandsmessung an zwei hochglänzenden Stahlkugeln mit einem konventionellen und einem mehrskaligen Multisensor-Messaufbau bestätigten die ermittelten Vorteile. Trotz der für optische Messsysteme herausfordernden Oberflächenbeschaffenheiten der Stahlkugeln lagen die ermittelten Messunsicherheiten in einer vergleichbaren Größenordnung mit den besser zu messenden Merkmalen des PTB-Mikrokonturnormals.

Die Evaluation der Leistung des prototypischen Messsystems schließt mit einer Bewertung des mehrskaligen Messansatzes. Hierbei wurde auf bereits durchgeführte Messungen an blechmassivumgeformten Bauteilen eingegangen und die Vorteile des Ansatzes an realen Messaufgaben aufgezeigt und bestätigt.

Die mit dieser Arbeit geschaffenen Grundlagen bilden die wissenschaftliche Basis für die Auslegung zukünftiger Messsysteme. Wie Abbildung 54 veranschaulicht, kann mit dem prototypischen mehrskaligen Multisensor-Messsystem die Untersuchung von Wirkungszusammenhängen zwischen Parametern von Blechmassivumformprozessen unterstützt werden. Diese Wirkungszusammenhänge erlauben eine Weiterentwicklung der Fertigungstechnologie hin zu Serienprozessen. Wird die Technologie der Blechmassivumformung in der Serienfertigung eingesetzt, können aufbauend auf dem hier präsentierten Grundlagenwissen in Kombination mit den weiter detaillierten Wirkungszusammenhängen inline- oder in-situ-fähige Messsysteme zur Qualitätskontrolle der Serienprozesse methodisch entwickelt werden.

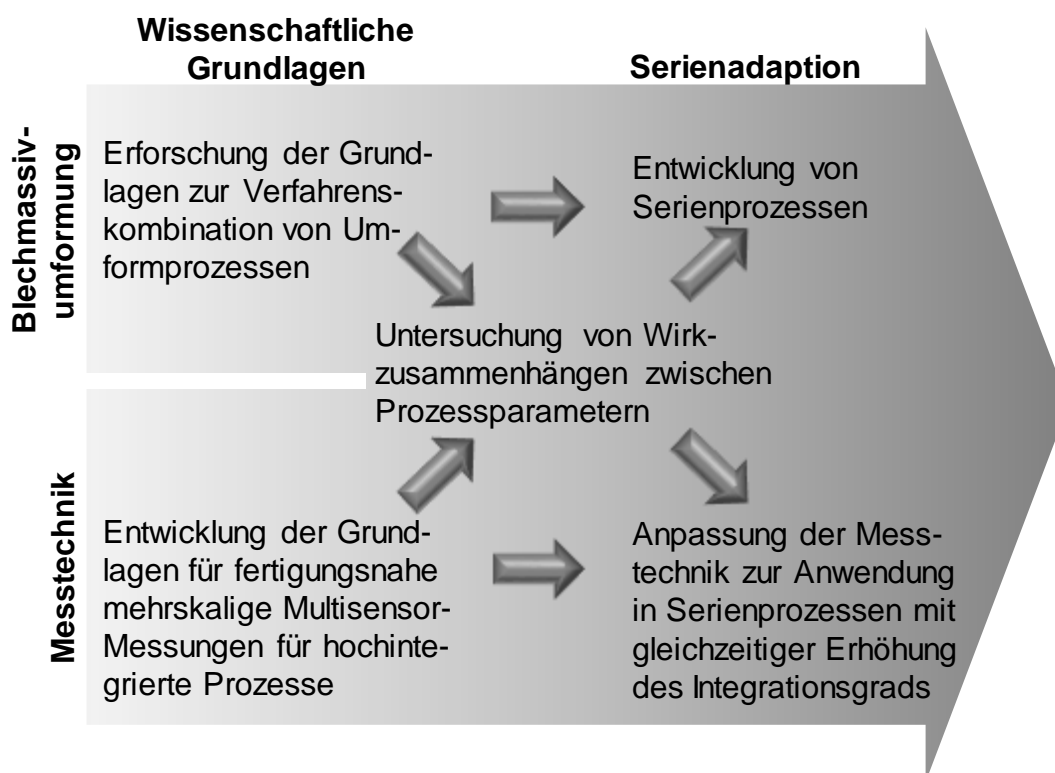


Abbildung 54: Evolution von Fertigungstechnologie und Messtechnik

9 Schrifttum

Abbe, E., 1890. *Messapparate für Physiker*. Zeitschrift für Instrumentenkunde, Nr. 10, S. 446-448.

Alkadhi, H., Leschka, S., Stolzmann, P., Scheffel, H., 2011. *Wie funktioniert CT? - Eine Einführung in Physik, Funktionsweise und klinische Anwendungen der Computertomographie*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Atzlesberger, J., Zagar, B. G., Cihal, R., Reisinger, P., 2013. *Sub-surface defect detection in a steel sheet*. Measurement Science and Technology MST 24, Nr. 8, Artikelnr. 084003.

Bachfeld, D., König, P., Zota, V., 2011. *Kopieren in 3D - Räumlich scannen mit Digitalkamera, Kinect oder Laser-Scanner*. Magazin für Computer und Technik c't, Nr. 11, S. 86-101.

Bauer, N. (Hrsg.), 2007. *Handbuch zur Industriellen Bilderverarbeitung – Qualitätssicherung in der Praxis*. 1. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB.

Behrens, B.-A., Doege, E., 2007. *Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Berndt, G., Hultsch, E., Weinhold, H., 1968. *Funktionstoleranz und Meßunsicherheit*. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 17, Nr. 2, 1968, S. 465-471.

Bernstein, J., 2011. *Optisches Multi-Sensor-Messverfahren zur dimensionellen in-line Messung von Strangprofilen im Fertigungsprozess*. In: Weckenmann, A. (Hrsg.): Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg. Band 23. Aachen: Shaker.

Bernstein, H., 2014. *Messelektronik und Sensoren - Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. S. 257-273.

Bertagnolli, F., 2006. *Roboter gestützte automatische Digitalisierung von Werkstückgeometrien mittels optischer Streifenprojektion*. Aachen: Shaker.

Besl, P. J., McKay, N. D., 1992. *A method for registration of 3-D shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14, Nr. 2, S. 239-256.

Biermann, D., Merklein, M., Engel, U., Tillmann, W., Surmann, T., Hense, R., Herper, J., Koch, J., Krebs, E., Vierzigmann, U., 2011. *Umformwerkzeuge in der Blechmassivumformung*. In: Merklein, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Erlanger Workshop Blechmassivumformung 2011, Bamberg: Meisenbach, S. 119-138.

Bleifuß, K., Buschhoff, K., Groß R., 2010. *Besonderheiten sind Standard - Koordinatenmessgerät misst Zahnräder in Fertigungsnähe*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 55, Nr. 1, S. 44-45.

Blug, A., Carl, D., Höfler, H., Abt, F., Geese, M., Tetzlaff, R., 2008. *Pixelparallele Bildverarbeitung mit CNN zur Regelung von Laserschweißprozessen*. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2011. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 13-22.

Blunt, L., Jiang, X., 2003. *Numerical Parameters for Characterisation of Topography*. In: Blunt, L., Jiang, X. (Hrsg.): *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography - Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "Surf-stand"*. London: Kogan Page Science, S. 17-41.

Briehl, H., 2014. *Chemie der Werkstoffe*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 130-236.

BS 7172:1989-07. *Guide to assessment of position, size and departure from nominal form of geometric features*. - Norm.

Carl Zeiss AG, 2016. *Pressebilder industrieller Messtechnik*. - Internet: http://www.zeiss.de/corporate/de_de/medienforum/pressebilder/produkte/industrielle-messtechnik.html, aufgerufen am 31.10.2016.

Chemie.de Information Service GmbH, 2016. *Ausdehnungskoeffizient*. - Internet: <http://www.chemie.de/lexikon/Ausdehnungskoeffizient.html>, aufgerufen am 31.10.2016.

Christoph, R., Neumann, H. J., 2006. *Multisensor-Koordinatenmesstechnik - Maß-, Form-, Lage- und Rauheitsmessung - optisch, taktil und röntgentomografisch*. 3. Auflage München: SV Corporate Media.

Dietlmaier, A. S., 2012. *Der quantifizierte Nutzen eines Messergebnisses – Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Messeinrichtungen*. Erlangen, Universität, Dissertation.

DIN 8200:1982-10. *Strahlverfahrenstechnik - Begriffe, Einordnung der Strahlverfahren*. - Norm.

DIN 8580:2003-09. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. - Norm.

DIN EN ISO 10360-1:2003-07. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) - Teil 1: Begriffe*. - Norm.

DIN EN ISO 15530-3:2012-01. *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen.* - Norm.

DIN EN ISO 25178-2:2012-09. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen.* - Norm.

Donner, K., 2009. *Zwei- oder dreidimensional? - Optische Inline-Erfassung der Form und Lage von Bauteilen.* Qualität und Zuverlässigkeit QZ 54, Nr. 1, S. 34-37.

Driessen, S. H., 2008. *Faseroptisches Streifenprojektionssystem zur Inline-Erfassung von 3D-Oberflächengeometrien für die Mikromontage.* In: Klocke, F., Schuh, G., Brecher, C., Schmitt, R. (Hrsg.): *Ergebnisse aus der Produktionstechnik.* Aachen: Apprimus.

Dudenredaktion, 2006. *Duden – Die deutsche Rechtschreibung.* Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag.

Dutschke, W., 1996. *Fertigungsmesstechnik.* 3. Auflage. Stuttgart: Teubner.

Effenberger, I., Martinez, H. V., Schloske, A., Klieber, A., 2013. *Kombination etablierter und neuer Methoden - Messen und Prüfen von Faserverbundbauteilen.* Qualität und Zuverlässigkeit QZ 58, Nr. 10, S. 38-41.

Ensenso GmbH, 2016a. *Kameramodelle.* - Internet: <http://www.ensenso.com/support/modellisting/?lang=de>, aufgerufen am 31.10.2016.

Ensenso GmbH, 2016b. *Holzvermessung mit Ensenso N20 Stereo-3D-Kameras.* - Internet: http://www.ensenso.com/wp-content/uploads/2015/06/IDS_CaseStudy_Wood_Measuring_DE.pdf, aufgerufen am 31.10.2016.

Feldhusen, J., Grote, K.-H. (Hrsg.), 2013. *Pahl/Beitz - Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung.* 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 11-23.

Feldkamp, L., Davis, L., Kress, J., 1984. *Practical cone-beam algorithm.* Journal of the Optical Society of America A 1, Nr. 6, S. 612-619.

Fetzer, A., Fränkel, H., 2008. *Mathematik 1 - Lehrbuch für ingenieurwissenschaftliche Studiengänge.* 10. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. S. 294-338.

Fischer, U., Heinzler, M., Näher, F., Paetzold, H., Gomeringer, R., Kilgus, R., Oesterle, S., Stephan, A., 2008. *Tabellenbuch Metall.* 44., neu bearbeitete Auflage. Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, S. 116.

Fleischle, D., Lyda, W., Gronle, M., Mauch, F., Körner, K., Osten, W., 2013. *Herausforderungen und Lösungsansätze für die fertigungsnahen Qualitätskontrolle mittels optischer 3D-Messtechnik*. Technisches Messen tm 80, Nr. 1, S. 3-8.

Fleißner, M., Blauhöfer, M., Helmecke, E., Staude, A., Hausotte, T., 2015. CT measurements of microparts: Numerical uncertainty determination and structural resolution. In: AMA Service GmbH (Hrsg.): AMA Conferences 2015 - SENSOR 2015 and IRS² 2015, S. 483-488.

Fraunhofer-Institut für Optronik, 2016. Systemtechnik und Bildauswertung: *Glänzende Einsichten – Deflektometrie zur Inspektion spiegelnder Oberflächen*. - Internet: http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/4698/Produktblatt_Deflektometrie.pdf?command=downloadContent&filename=Produktblatt_Deflektometrie.pdf, aufgerufen am 31.10.2016.

Frick, W., 2006. *Linientreu - Die Prozesskette lebt: Inline-Messen ist "In"*. Fertigung, Nr. 9, S. 64-68.

GDV Systems GmbH, 2006. *Hoch flexible Messtechnik bei AIRBUS - Messen in jeder Lage*. Quality Engineering QE, Nr. 11, S. 22.

Gevatter, H.-J., Grünhaupt, U. (Hrsg.), 2006. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

GF Messtechnik GmbH (Hrsg.), 2007. *Handbuch - Optisches 3D-Messgerät - TopoCAM*. Teltow: GF Messtechnik GmbH - Firmenschrift.

GF Messtechnik GmbH (Hrsg.), 2008. *Handbuch für das optische 3D Messgerät MikroCAD*. Teltow: GF Messtechnik GmbH - Firmenschrift.

GF Messtechnik GmbH (Hrsg.), 2009. *Handbucherergänzung zum ODSCAD 6.0 Handbuch*. Teltow: GF Messtechnik GmbH - Firmenschrift.

GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, 2011. *Die Zukunft der Messtechnik im Fahrzeugbau: Optisch – automatisiert - standardisiert*. Quality Engineering QE, Nr. 2, S. 38.

GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, 2012. *ATOS Compact Scan - Benutzerhandbuch - Hardware*. Braunschweig: GOM mbH - Firmenschrift.

GOM Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH, 2014. *ATOS Core – Benutzerhandbuch - Hardware*. Braunschweig: GOM mbH - Firmenschrift.

- Gröbel, D., Koch, J., Vierzigmann, H. U., Engel, U., Merklein, M.,** 2014. *Investigations and Approaches on Material Flow of Non-uniform Arranged Cavities in Sheet Bulk Metal Forming Processes*. Procedia Engineering, Nr. 81, S. 401-406.
- Gühning, J.,** 2002. *3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion*. Stuttgart, Universität, Dissertation.
- Hartmann, W., Hausotte, T., Drummer, D., Wudy, K.,** 2012. *Anforderungen und Randbedingungen für den Einsatz optischer Messsysteme zur In-Line-Prüfung additiv gefertigter Bauteile*. In: RTEjournal - Forum für Rapid Technologie, Nr. 9, Artikelnr. 3327.
- Hartmann, W.,** 2015. *Mess- und Auswertestrategien zur modellbasierten Bewertung funktionaler Eigenschaften mikrostrukturierter Oberflächen*. In: Weckenmann, A. (Hrsg.): *Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg*. Band 30. Aachen: Shaker.
- Hausotte, T., Hartmann, W., Timmermann, M., Galovskyi, B.,** 2012. *Optische Messsysteme zur In-Line-Prüfung im additiven Fertigungsprozess*. In: Drummer, D. (Hrsg.): *Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 - Additive Fertigung - Zukunft individuell gestalten*, Nürnberg, S. 67-85.
- Hehenberger, P.,** 2011. *Computerunterstützte Fertigung - Eine kompakte Einführung*. 1. Auflage. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, S. 231-244.
- Heizmann, M., Beyerer, J., Puente León, F.,** 2009. *Mehr Wissen durch Fusion von Sensordaten - Roadmap Fertigungsmesstechnik 2020 (Teil 2)*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 54, Nr. 6, S. 35-39.
- Hering, E., Martin, R.** (Hrsg.), 2006. *Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung*. 1. Auflage Berlin: Springer.
- Hering, E., Schönfelder, G.** (Hrsg.), 2010. *Sensoren in Wissenschaft und Technik - Funktionsweise und Einsatzgebiete*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 493-297.
- Hesse, S., Schnell, G.,** 2011. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation – Funktion – Ausführung – Anwendung*. 5. korrigierte und verbesserte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 296-300.
- Hetzner, H., Koch, J., Tremmel, S., Wartzack, S., Merklein, M.,** 2011. *Improved Sheet Bulk Metal Forming Processes by Local Adjustment of Tribological Properties*. Journal of Manufacturing Science and Engineering 133, Nr. 6, S. 061011-1 - 061011-10.

- Hetzner, H.**, 2014. *Systematische Entwicklung amorpher Kohlenstoffschichten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Blechmassivumformung*. Erlangen, Universität, Dissertation.
- Hocken, R. J., Pereira, P. H.** (Hrsg.), 2012: *Coordinate Measuring Machines and Systems*. 2. Auflage. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Hoffmann, F., Nierobisch, T., Bertram, T., Castrillon, M., Apmann H.**, 2011. *Hybride bildbasierte Regelung mit strukturiertem Licht*. In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2011. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 23-32.
- Holzbaur, U.**, 2007. *Entwicklungsmanagement - Mit hervorragenden Produkten zum Markterfolg*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Hopmann, C., Mülder, C.**, 2012. *Kontinuierliche Überwachung - Inline-Prüfung von Polymerschaum*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 57, Nr. 9, S. 46-49.
- Hoschek, J., Lasser, D.**, 1989. *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. 1. Auflage. Stuttgart: B. G. Teubner, S. 1-17.
- Ilschner, B., Singer, R.**, 2005. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik - Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 357-373.
- Imkamp, D., Berthold, J.**, 2012. *Blick in die Zukunft: Die VDI/VDE-GMA Technologieroadmap Fertigungsmesstechnik 2020*. In: AMA Service GmbH (Hrsg.): Tagungsband der 16. GMA/ITG-Fachtagung "Sensoren und Messsysteme 2012" (22.-23.05.2012, Nürnberg), Wunstorf, S. 368-373.
- Imkamp, D., Schmitt, R., Berthold, J.**, 2012. *Blick in die Zukunft der Fertigungsmesstechnik*. Technisches Messen tm 79, Nr. 10, S. 433-439.
- InnovMetric Software Inc.** (Hrsg.), 2014. *IMInspect™ Measurement and Verification Software - Reference Guide*. Quebec, Kanada: InnovMetric Software Inc., 2014 - Firmenschrift.
- Jähne, B.**, 2005. *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. S. 227-254.
- Jenoptik AG**, 2014. *Eine Messmaschine für mehrere Ausführungen - Qualitätskontrolle von LKW-Nockenwellen*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 59, Nr. 1, S. 52.
- Joint Comittee for Guides in Metrology (JCGM)**, 2008. *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. - Internet: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>, aufgerufen am 31.10.2016.

Joint Comittee for Guides in Metrology (JCGM), 2012. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*. - Internet: <http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>, aufgerufen am 31.10.2016.

Kästner, M., Seewig, J., Reithmeier, E., 2006. *Geometriefehlern auf der Spur - Fertigungsnahe Prüfung präzisionsgeschmiedeter Zahnräder*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 51, Nr. 10, S. 64-67.

Kästner, M., Hausotte, T., Reithmeier, E., Loderer, A., Ohrt, C., Sieczkarek, P., 2013. *Fertigungsnahe Qualitätskontrolle von Werkzeug und Werkstück*. In: Merklein, M., Behrens, B.-A., Tekkaya, A. E. (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Erlanger Workshop Blechmassivumformung 2013, Bamberg: Meisenbach, S. 101-118.

Keck, A., Böhm, M., Knierim, K. L., Sawodny, O., Gronle, M., Lyda, W., Osten, W., 2014. *Multisensorisches Messsystem zur dreidimensionalen Inspektion technischer Oberflächen*. Technisches Messen tm 81, Nr. 6, S. 280-288.

Keferstein, C. P., Marxer, W., 2015. *Fertigungsmesstechnik - Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 8. Auflage. Wiesbaden: Teubner. S. 36-55.

Klocke, F., König, W., 2006. *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006. S. 218-222.

Klocke, F., König, W., 2008. *Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer. S. 30-32.

Koch, A. W., Ruprecht, M. W., Toedter, O., Häusler, G., 1998. *Optische Meßtechnik an technischen Oberflächen - Praxisorientierte Lasergestützte Verfahren zur Untersuchung technischer Objekte hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung*. 1. Auflage Renningen-Malmsheim: Expert. S. 122-128.

Krämer, P., Hausotte, T., Weckenmann, A., 2011. *Multisensor-Koordinatenmesstechnik: schnell, flexibel, genau*. Ingenieurspiegel, Nr. 3, S. 43-46.

Krämer, P., 2012. *Simulationsgestützte Abschätzung der Genauigkeit von Messungen mit Röntgen-Computertomographie*. In: Weckenmann, A. (Hrsg.): Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg. Band 26. Aachen: Shaker.

Kruth, J.-P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., 2011. *Computed Tomography for Dimensional Metrology*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 60, Nr. 2, S. 821-842.

Krystek, M. P., 2009. *ISO-Filter für die Fertigungsmesstechnik*. Technisches Messen tm 76, Nr. 3, S. 133-159.

- Landkammer, P., Söhngen, B., Loderer, A., Krebs, E., Steinmann, P., Willner, K., Hausotte, T., Kersting, P., Biermann, D., 2015.** *Experimentelle Verifizierung eines Benchmark-Umformprozesses*. In: Tekkaya, A. E., Liewald, M., Merklein, M., Behrens, B.-A. (Hrsg.): Tagungsband zum 18. Workshop Simulation in der Umformtechnik & 3. Industriekolloquium Blechmassivumformung 2015 - DFG Transregio 73, (2015), Aachen: Shaker, S. 91-110.
- Lanza, G., Brabandt, D., Kölmel, A., Häfner, B., 2013.** *Im Wechselspiel mit den Anforderungen - Trends in der Fertigungsmesstechnik*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 58, Nr. 11, S. 44-47.
- Lechthaler, M., Bauer, W., 2006.** *Rauigkeit und Topografie – ein Vergleich unterschiedlicher Messverfahren*. Wochenblatt für Papierfabrikation, Nr. 21, S. 1227-1234.
- Loderer, A., Galovskyi, B., Hartmann, W., Hausotte, T., 2013a.** *Measurement strategy for a production-related multi-scale inspection of formed work pieces*. In: Seliger, G. (Hrsg.): Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Innovative Solutions. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, S. 143-148.
- Loderer, A., Galovskyi, B., Hartmann, W., Hausotte, T., 2013b.** *Qualifying measuring systems by using Six Sigma*. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Measurement and Quality Control - 11th ISMQC (11.-13.9.2013, Krakau/Kielce, Polen), Artikelnr. ID128.
- Loderer, A., Hausotte, T., Steinmann, P., Merklein, M., Landkammer, P., Hildenbrand, P., Schneider, T., 2014.** *Development of a feature adapted measurement evaluation strategy*. In: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Hrsg.): PTB open access repository (MacroScale 2014 - Recent developments in traceable dimensional measurements, Wien, Österreich, 28.-30.10.2014).
- Loderer, A., Timmermann, M., Matthias, S., Kästner, M., Schneider, T., Hausotte, T., Reithmeier, E., 2015.** *Measuring systems for sheet-bulk metal forming*. Key Engineering Materials 639, Schweiz: Trans Tech Publications, S. 291-298.
- Loderer, A., Hausotte, T., 2016.** *Qualification concept for optical multi-scale multi-sensor systems*. Journal of Sensors and Sensor Systems JSSS 5, Nr. 1, S. 1-8.
- Löffler-Mang, M., 2012.** *Optische Sensorik - Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 173-177.
- Matthias, S., Loderer, A., Koch, S., Gröne, M., Kästner, M., Hübner, S., Krimm, R., Reithmeier, E., Hausotte, T., Behrens, B.-A., 2016.** *Metrological solutions for*

an adapted inspection of parts and tools of a sheet-bulk metal forming process. Production Engineering 10, Nr. 1, S. 51-61.

Merklein, M., Opel, S., Schneider, T., 2010. *Herstellung funktionaler Blechkomponenten.* wt Werkstattstechnik online 11, Düsseldorf: Springer, S. 910-915.

Merklein, M., Behrens, B.-A., Plettke, R., Krimm, R., Opel, S., Schneider, T., Matthias, T., Salfeld, V., 2011a. *Integrierte Fertigung von tiefgezogenen Blechbauteilen mit Verzahnungselementen unter Einsatz von prozessangepassten Halbzeugen.* In: Merklein, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 1. Erlanger Workshop Blechmassivumformung 2011, Bamberg: Meisenbach, S. 159-180.

Merklein, M., Tekkaya, A. E., Brosius, A., Opel, S., Koch, J., 2011b. *Overview on sheet-bulk metal forming processes.* In: Hirt, G., Tekkaya, A.E. (Hrsg.): Proceedings ICTP 2011, Aachen, S. 1109-1114.

Merklein, M., Tekkaya, A. E., Brosius, A., Opel, S., Kwiatkowski, L., Plugge, B., Schunck, S., 2011c. *Machines and Tools for Sheet-Bulk Metal Forming.* Key Engineering Materials 473, Schweiz: Trans Tech Publications, S. 91-98.

Merklein, M., Allwood, J. M., Behrens, B.-A., Brosius, A., Hagenah, H., Kuzman, K., Mori, K., Tekkaya, A. E., Weckenmann, A., 2012a. *Bulk forming of sheet metal.* Annals of the CIRP 2, Nr. 61, Amsterdam: Elsevier, S. 725-745.

Merklein, M., Opel, S., Schneider, T., Koch, J., 2012b. *Überblick der Blechmassivumformung.* Umformtechnik 1, Nr. 3, Bamberg, Meisenbach, S. 42-43.

Merklein, M., Löffler, M., Schneider, T., 2015. *Plastic flow and its control in sheet-bulk metal forming of thin-walled functional component.* CIRP Annals – Manufacturing Technology 64, Nr. 1, S. 245-248.

Michigan Metrology LLC, 2014. *Glossary of Texture Parameters.* - Internet: http://www.michmet.com/Texture_parameters.htm, aufgerufen am 31.10.2016.

Mitutoyo Messgeräte GmbH, 2008. *Es gibt keine Einheitslösung – Auswahlkriterien fertigungsnaher und -integrierter Messsysteme.* Qualität und Zuverlässigkeit QZ 53, Nr. 1, S. 36-37.

Mitutoyo Messgeräte GmbH, 2012. *Voraussetzungen für eine effiziente Inline-Messung Geschwindigkeit ist längst nicht alles.* Quality Engineering QE, Nr. 2, S. 36.

Mitutoyo Messgeräte GmbH, 2014. *Wenn Raum und Zeit knapp sind - Schnelle Inline-Messung mit Koordinatenmessgeräten.* Qualität und Zuverlässigkeit QZ 59, Nr. 1, S. 58-59.

- Noll, R., Krauhausen, M.,** 2008. *Online Lasermesssysteme für die Stahl- und Automobilindustrie.* In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2011. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 3-12.
- Ohrt, C., Kästner, M., Reithmeier, E., Weckenmann, A., Weickmann, J.,** 2012a. *Optische Inspektion von Blechmassivumformteilen und -werkzeugen mit feinen Nebenformelementen.* Technisches Messen tm 79, Nr. 2, S. 95-102.
- Ohrt, C., Matthias, S., Kästner, M., Reithmeier, E.,** 2012b. *Fast Endoscopic Geometry Measurement with Fiber-Based Fringe Projection for Inner Geometries.* Journal of the CMSC 7, Nr. 2, Autumn, S. 10-14.
- Ohrt, C.,** 2014. *Development of a Measuring Endoscope for the In-Line Quality Control of Filigree Form Elements in Forming Production Lines.* In: Reithmeier, E. (Hrsg.): Berichte aus dem imr. Band 01/2014. Hannover: Tewiss.
- Olesch, E., Häusler, G., Wörnlein, A., Stinzing, F., van Eldik, C.,** 2014. *Deflectometric measurement of large mirrors.* Advanced Optical Technologies 3, Nr. 3, S. 335-343.
- Ott, P., Bauer, A.,** 2008. *Ein rotationssymmetrischer, optischer Triangulations-sensor zur robusten und genauen Abstandsmessung.* In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2011. Düsseldorf: VDI Verlag, S. 409-418.
- Pesch, B.,** 2003. *Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM.* 1. Auflage. Nordstedt: Books on Demand, S. 233-307.
- Pfeifer, T.,** 1998. *Fertigungsmesstechnik.* 1. Auflage. München: Oldenbourg, 1998.
- Pfeifer, T., Schmitt, R.** (Hrsg.), 2007. *Masing - Handbuch Qualitätsmanagement.* 5. Auflage. München: Cal Hanser Verlag, S. 645-654.
- Pfeifer, T., Schmitt, R.,** 2010. *Fertigungsmesstechnik.* 3. Auflage. München: Oldenbourg, S. 69-72.
- Poprawe, R.,** 2005. *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur.* 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 399-411.
- Prones Automation GmbH,** 2012. *Zeitnahe Ergebnisse - Inline-Messsystem in der Kunststoff-Extrusion.* Qualität und Zuverlässigkeit QZ 57, Nr. 9, S. 52-53.
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),** 2006. *Small world: microartifacts.* PTB news 06, Nr. 2, S. 3.

- Putz, V., Burzic, I., Maier, F., Zagar, B. G.**, 2013. *Adaptation of in-line ultrasonic velocimetry to melt flow measurement in polymer extrusion*. Measurement Science and Technology MST 24, Nr. 10, Artikelnr. 107002.
- Rahves, M., Seewig, J.** (Hrsg.), 2009. *Optisches Messen technischer Oberflächen - Messprinzipien und Begriffe*. 1. Auflage. Berlin, Wien, Zürich: Beuth.
- Rapp, H., Stiller, C.**, 2010. *Deflektometrische Methoden zur Sichtprüfung und 3D-Vermessung voll reflektierender Freiformflächen*. In: Puente León, F., Heizmann, M. (Hrsg.): Forum Bildverarbeitung. Regensburg: KIT Scientific Publishing, S. 217-228.
- Reulke, R., Döring, T.**, 2006. *Computer Vision im Kontext von Photographie und Photogrammetrie*. In: Reisig, W., Freytag, J.-Ch. (Hrsg.): Informatik - Aktuelle Themen im historischen Kontext. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 315-328.
- Ritter, D.**, 1996. *Merkmalsorientierte Objekterkennung und -lokalisierung im 3D-Raum aus einem einzelnen 2D-Grauwertbild und Referenzmodellvermessung mit optischen 3D-Sensoren*. Erlangen, Universität, Dissertation.
- Ruser, H., Puente León, F.**, 2006. *Methoden der Informationsfusion - Überblick und Taxonomie*. In: Beyerer, J., Puente León, F., Sommer, K.-D. (Hrsg.): Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, S. 1-20.
- Schäfer, R.**, 2013. *Integrierte Messtechnik beschleunigt Produktionsablauf*. Maschinenmarkt EMO Journal, Nr. 220, S. 82-83.
- Schaper, M., Lizunkova, Y., Vucetic, M., Cahyono, T., Hetzner, H., Opel, S., Schneider, T., Koch, J., Plugge, B.**, 2011. *Sheet-bulk Metal Forming a New Process for the Production of Sheet Metal Parts with Functional Components*. Metallurgical and Mining Industry 3, Nr. 7, S. 53-58.
- Schick, A., Sauer, O.**, 2013. *Zeig mir den Fehler! - Berührungslose Gesteninteraktion in der Fertigung*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 58, Nr. 11, S. 48-50.
- Schiele, H.-G.**, 2012. *Computergrafik für Ingenieure - Eine anwendungsorientierte Einführung*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 79-97.
- Schmitt, R., Damm, B. E.**, 2008. *Prüfen und Messen im Takt - Wie Sie mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren*. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 53, Nr. 9, S. 57-59.
- Schmitt, R., Isenberg, C.**, 2014. *Computertomografie für industrielle dimensionelle Messtechnik*. Technisches Messen tm 81, Nr. 5, S. 201-208.

Schneider, T., Merklein, M., 2013. *Manufacturing of geared sheet metal components by a single-stage Sheet-bulk metal forming process.* In: Dimitrov, D., Schutte, C. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing, S. 177-182.

Schuler, C. A., 2014. *Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische Sensornachführung unter Anwendung nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung.* In: Weckenmann, A. (Hrsg.): Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg. Band 29. Aachen: Shaker.

Schwarz, J., 2011. *Carl Zeiss in Oberkochen beschleunigt die Qualitätssicherung - Messtechnik darf nicht zum Nadelöhr werden.* Industrieanzeiger, Nr. 15, S. 30.

Seewig, J., Wiehr, C., Gröger, S., 2011. *Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen - Stand der Oberflächenmesstechnik heute.* In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): VDI-Berichte 2133 (4. Fachtagung "Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011", Erlangen, 25.-26. Oktober 2011). Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 159-172.

Seßner, R., 2009. *Richtungscodierte Deflektometrie durch Telezentrie.* Erlangen, Universität, Dissertation.

Shaw, L., 2013. *Methode zur automatischen Registrierung und Fusion von Multi-sensordaten zur Charakterisierung von mehrskaligen Werkstücken.* In: Weckenmann, A. (Hrsg.): Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg. Band 28. Aachen: Shaker.

Sieczkarek, P., Kwiatkowski, L., Tekkaya, A. E., Krebs, E., Kersting, P., Tillmann, W., Herper, J., 2013a. *Innovative tools to improve incremental bulk forming processes.* Key Engineering Materials, 554, Schweiz: Trans Tech Publications, S. 1490-1497.

Sieczkarek, P., Kwiatkowski, L., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., 2013b. *Novel five-axis forming press for the incremental sheet-bulk metal forming.* Key Engineering Materials, 554, Schweiz: Trans Tech Publications, S. 1478-1483.

Topometric GmbH, 2016. *Pressebilder optischer Messsensoren im fertigungsnahen Einsatz.* Göppingen: Topometric GmbH - Firmenschrift.

Toutenburg, H., Knöfel, P., 2008. *Six Sigma - Methoden und Statistik für die Praxis.* 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 156-193.

- Tschätsch, H.**, 2005. *Praxis der Umformtechnik - Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge*. 8. aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 167-169.
- VDI 2221:1993-05**. *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. - Richtlinie.
- VDI/VDE 2617-8:2006-07**. *Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten - Kenngrößen und deren Prüfung - Prüfprozesseignung von Messungen mit Koordinatenmessgeräten*. - Richtlinie.
- VDI/VDE 2627-1:1998-08**. *Meßräume. Blatt 1: Klassifizierung und Kenngrößen - Planung und Ausführung*. - Richtlinie.
- VDI/VDE 2627-1:2015-12**. *Meßräume. Blatt 1: Klassifizierung und Kenngrößen - Planung und Ausführung*. - Richtlinie.
- Vierzigmann, H. U., Merklein, M., Engel, U.**, 2011. *Friction Conditions in Sheet-Bulk Metal Forming*. *Procedia Engineering*, Nr. 19, S. 377-382.
- Virag, G.**, 2012. *Grundlagen der 3D-Programmierung - Mathematik und Praxis mit OpenGL*. 1. Auflage. München: Open Source Press, S. 37-70.
- Völklein, F., Zetterer, T.**, 2006. *Praxiswissen Mikrosystemtechnik - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg, S. 59-65.
- Watson, R., Nakicenovic, N., Messner, D., Rosenthal, E., Goldemberg, J., Srivastava, L., Jiang, K.**, 2015. *Die Herausforderungen des Klimawandels bewältigen. Ein kurzfristig umsetzbares Aktionsprogramm zum Übergang in eine klimaverträgliche Weltwirtschaft*. *Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik* 8, Nr. 1, S. 91-125.
- Weckenmann, A.** (Hrsg.), 2012. *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. 2. vollständig überarbeitete Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Weckenmann, A., Krämer, P.**, 2012. *Trends in der Koordinatenmesstechnik – Multisensorik*. *Management und Qualität* 8, Nr. 1-2, S. 30-32.
- Weickmann, J.**, 2011. *Assistenzsystem für die Prüfung von Blechbauteilen mit Mehrkomponenten-Streifenprojektionssystemen unter Anwendung der „virtuellen Rückdeformation“*. In: Weckenmann, A. (Hrsg.): *Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Universität Erlangen-Nürnberg*. Band 20. Aachen: Shaker.

Wolf, T., 2004. *Streifenprojektion zur Inspektion großflächiger Bauteile in der Formteil-Serienproduktion*. In: Denkena, B. (Hrsg.): Berichte aus dem IFW. Band 01/2004. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH.

Wujanz, D., Weisbrich, S., Neitzel, F., 2011. *3D-Mapping mit dem Microsoft® Kinect Sensor – erste Untersuchungsergebnisse*. In: Luhmann, T., Müller, C. (Hrsg.): Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Heidelberg: Wichmann - VDE Verlag, S. 274-283.

Zacher, M., 2004. *Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen*. In: Eversheim, W., Klocke, F., Pfeifer, T., Schuh, G., Weck, M. (Hrsg.): Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker.

Zhu, Z., Donia, S., 2013. *Spatial and visual data fusion for capturing, retrieval, and modeling of as-built building geometry and features*. Visualization in Engineering, Nr. 1:10 - Internet: <http://www.viejournal.com/content/1/1/10>, aufgerufen am 31.10.2016.