

Optische Erfassung von Defekten mittels multiskaliger Mess- und Inspektionstechnik

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Herrn Dipl.-Ing. Moritz Krauß

geboren am 19.9.1979 in
Belo Horizonte / Brasilien

2015

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier
Institut für Mess- und Regelungstechnik
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
2. Referent: Prof. Dr. rer. nat. habil. Ralf B. Bergmann
Fachbereich Physik und Elektrotechnik
Universität Bremen
- Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis
Institut für Fabrikanlagen und Logistik
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Tag der Promotion: 07.11.2014

Abstract

Acquisition of Defects Using Optical Multi-Scale Inspection- and Measurement-Technologies

An improved regeneration of high-priced complex durable products, like turbine blades of aircraft engines, reduces the cost of operation and increases efficiency. In order to enhance the repair technology, the performance and durability of the part to be repaired needs to be known as well as possible. Therefore, simulations of the aerodynamics and of the endurance of the part are needed for the assessment. To achieve accurate results, these simulations need high quality input data to achieve accurate results.

High quality data for the simulations can be provided by measurement technology. But on worn surfaces it lacks in speed when the whole surface is measured. On the other hand inspection technology provides the required speed, but lacks in accuracy and resolution.

To combine the benefits of the measurement- and the inspection-technology a multi-scale measurement system is designed and set-up. It features sensors for image processing and high-precision 3D measurement. With an indicator function based on reflectance and photometry the surface is scanned for defects in high speed, while the 3D sensor only measures the faulty parts. In order to accomplish this goal, the sensors are mounted to an industrial robot and referenced with a lasertracker.

The main focus of this work lies on the processing of the input data from all sensors and actuators in order to find defects and measure them in a global coordinate system. From the measurement of the position and orientation of the sensor-head (6DOF) to the detection and evaluation of defects on a worn turbine blade surface, the whole inspection process is shown. To evaluate the accuracy of the system a geometry standard is measured and the deviations are discussed.

multi-scale measurement, 6DOF, inspection, lasertracker, 3D measurement, image processing

Zusammenfassung

Eine Verbesserung der Regeneration von Investitionsgütern, wie z.B. Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken, verringert die Kosten und kann die Effizienz steigern. Um die Reparaturtechnologie zu verbessern, müssen die Leistung und Haltbarkeit eines reparierten Bauteils bekannt sein. Daher werden Simulationen über den Betrieb und die Dauerfestigkeit des Bauteils benötigt. Diese Simulationen benötigen wiederum hochqualitative Eingangsdaten, um zuverlässigen Ergebnissen zu berechnen.

Während die traditionelle Messtechnik hochqualitative Daten erzeugen kann, ist jedoch die Dauer zur Messung einer verschlissenen Oberfläche sehr hoch. Die Inspektionstechnik kann Bauteile wesentlich schneller überprüfen, aber aufgrund der mangelnden Genauigkeit und Auflösung reicht die Datenqualität nicht für eine Simulation aus.

Um die Vorteile von Mess- und Inspektionstechnik zu kombinieren, wird ein multiskalen Messsystem ausgelegt und aufgebaut, das eine Kamera als Bildverarbeitungseinheit nutzt, um die Oberfläche mit hoher Geschwindigkeit aufzunehmen und Fehler zu detektieren. Der 3D-Sensor misst dann nur die fehlerhaften Oberflächenbereiche. Um die Sensoren zu positionieren und die Messdaten zu referenzieren wird ein Roboter in Kombination mit einem Lasertracker genutzt.

Die Verarbeitung der Daten aus allen Sensoren und Aktuatoren um Fehler zu finden und in einem Referenzkoordinatensystem zu messen und charakterisieren ist der Kern dieser Arbeit. Von der Messung der Lage des Sensorkopfes (6DOF) zur Erkennung, Messung und Bewertung von Fehlern auf Oberflächen von betriebsbeanspruchten Turbinenschaufeln wird der gesamte Inspektionsprozess aufgezeigt. Um die Genauigkeit der Messdaten zu bewerten, wird ein Geometrienormal gemessen und die Abweichungen bewertet.

Multiskalen Messtechnik, 6DOF, Inspektion, Lasertracker, 3D Messtechnik, Bildverarbeitung

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess- und Regelungstechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Große Teile dieser Dissertation sind im Rahmen des Teilprojektes A2 *Multiskalen-Geometrieerfassung* des Sonderforschungsbereiches 871 *Produkt-Regeneration* entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Reithmeier danke ich für die Möglichkeit zur Promotion an seinem Institut und für die Übernahme des Hauptberichts.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. R. B. Bergmann möchte ich für die Übernahme des zweiten Referats und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. J. Maier für die Leitung der Prüfungskommission danken.

Meinen Kollegen, und im speziellen Herrn Dr.-Ing. Dipl. Phys. Markus Kästner, möchte für die nette Zusammenarbeit und konstruktive Kritik über die letzten Jahre danken. Nach vier Jahren und fünf Monaten in einem Büro möchte ich auch besonders Andreas Pösch für Inspiration, für Kritik, für Aufmunterungen, für Dämpfer und damit für umfassende Unterstützung danken.

Der gesamten Open Source-, Open Hardware- und Maker-Bewegung, sowie den Wikipedia Autoren, möchte ich für die, zum großen Teil anonyme, Hilfe bei Aufbau und Durchführung der Versuche danken. Ohne die gute Dokumentation und die hohe Qualität des Quellcodes von *Python*, *Numpy*, *Scipy* und *OpenCV* hätte es viele Inhalte dieser Arbeit nicht geben können.

Zudem möchte ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Forschung danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Produktregeneration	2
1.2	Wissenschaftlicher Beitrag	3
1.3	Gliederung der Arbeit	4
2	Aufgabenstellung	7
2.1	Mess- und Inspektionstechnik für die Produkt-Regeneration	7
2.2	Multiskalen-Messtechnik	8
2.3	Zieldefinition	8
3	Stand der Technik	11
3.1	Erkennung von Defekten	11
3.1.1	Geometrische Defekte	12
3.1.2	Struktur und chemische Defekte	12
3.1.3	Mustererkennung und Klassifikation	12
3.2	Interaktion Licht - Oberfläche	14
3.2.1	Reflexions Modelle	15
3.3	Photogrammetrie	16
3.3.1	Die geometrische Abbildung	17
3.3.2	Telezentrische Objektive und Schärfe	18
3.3.3	Intensitätsabbildung	18
3.3.4	Algorithmen der Bildverarbeitung	19
3.3.5	Kalibrierung der Abbildung	22
3.3.6	Stereo-Photogrammetrie	22
3.4	Streifenprojektion	23

3.5	Registrierung	24
3.5.1	Datenstrukturen für 3D Daten	24
3.5.2	Registrierung	26
3.5.3	Fusion von 3D Messungen	29
3.6	Multiskalen-Messtechnik	30
3.7	Automatisierungstechnik	32
3.7.1	Robotik	32
4	Konzeption	35
4.1	Messstrategie	36
4.2	Systemkomponenten	38
4.2.1	Aktorik	38
4.2.2	Sensorik	39
4.2.3	Referenzierung	41
4.3	Zieldefinition	41
4.4	Angestrebte Messstrategie	43
4.4.1	Bildverarbeitung	43
4.4.2	Streifenprojektion	44
4.4.3	Zusammenfassung der Multiskalen-Strategie	45
5	Modellierung	47
5.1	Sensormodelle	48
5.1.1	Kameramodell	48
5.1.2	Streifenprojektion	49
5.2	Referenzierung	50
5.2.1	Roboter	50
5.2.2	Lasertracker	51
5.2.3	6DOF-Messung	57
5.2.4	Registrierung	59
6	Realisierung	61
6.1	Komponenten	62
6.1.1	Aktorik	62
6.1.2	Referenzierung	63

6.1.3	Bildverarbeitungseinheit	64
6.1.4	Streifenprojektionssensor GFM μ CAD premium	65
6.2	Datenverarbeitung	65
6.2.1	Anschluss der Systemkomponenten	65
6.2.2	Datenvorverarbeitung	65
6.3	Fehlerdetektion	68
6.3.1	Schadendetektion unter variierender Beleuchtung	69
6.3.2	Schadendetektion aus dem Tiefenbild	73
6.3.3	Synthese einer Geometrie ohne lokale Schäden	77
6.4	Datenreduktion	78
6.4.1	Reduktion durch Filterung im Tiefenbild	79
6.4.2	Iterative Reduktion	79
6.4.3	Reduktion durch Approximation mit linearen Splines	80
6.5	Messung konkaver Bereiche	80
6.5.1	Komplexität der Problems	81
6.5.2	Entwicklung eines Qualitätsmaßes	81
6.5.3	Vermeidung von Reflexionen	84
6.6	Referenzierung	85
6.7	Entwicklung der Lagebestimmung	86
6.7.1	Entwicklung eines Ellipsengetriebes	87
6.7.2	Berechnung der Lage aus den Ellipsenpunkten	88
6.7.3	Fähigkeitsuntersuchung	89
6.7.4	Vergleich mit herkömmlichen Methoden	90
6.8	Kalibrierung	91
6.8.1	Kalibrierkörper	91
6.8.2	Datenverarbeitung für die Kalibrierkörper	92
6.8.3	Bestimmung der Transformationen	94
6.8.4	Ergebnisse	95
6.9	Datenfusion	95
7	Ergebnisse	97
7.1	Messung eines Konturnormals	97
7.1.1	Einzelmessung	97

7.1.2	Vollständige Messung	97
7.1.3	Vollständige Messung	101
7.2	Messung während der Regeneration	102
7.3	Messung einer Turbinenschaufel aus einem Versuchsstand	103
7.4	Messung einer Turbinenschaufeln	104
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
8.1	Mess- und Inspektionstechnik für die Produktregeneration	107
8.2	Ausblick	109
8.2.1	Analyse der Mikrogeometrie	109
8.2.2	Holistisches Modell des Bauteilzustandes	109
A	Anhang	111
A.1	Turbinen- und Verdichterschaufeln	111

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schema eines Flugtriebwerkes; Triebwerksinstandhaltung ¹	3
3.1	ROC-Diagramm	14
3.2	Die BRDF stellt den Zusammenhang zwischen einfallendem und reflektiertem Licht her	15
3.3	Tiefenschärfenormal	18
3.4	Modell der Streifenprojektion mit Triangulationswinkel β	23
3.5	Lagebestimmung mit zwei telezentrischen Objektiven [49]	27
3.6	Registrierung mit verschiedenen ICP-Methoden	29
3.7	Erweiterung der Messung durch Multiskalen-Methoden über die Indikatorfunktion	30
3.8	Direkte Berechnung der inversen Kinematik	34
4.1	Oberflächenzustände bei Eingangsprüfung und während und nach der Reparatur	36
4.2	Aufnahme eines 1 Cent-Stückes	40
4.3	CAD-Modell des geplanten Sensorkopfes	42
4.4	Datenverarbeitungskonzept für die Bildverarbeitung	43
4.5	Datenverarbeitungskonzept für die Streifenprojektion	44
5.1	Gliederung des Einflüsse auf das Messergebnis nach Ishikawa	47
5.2	Szene aus Sicht einer telezentrischen Kamera	48
5.3	Wechselwirkung in projizierten Mustern	49
5.4	Orientierungsänderung bei der Erwärmung des Roboters	51
5.5	Messprinzip eines Lasertrackers	52
5.6	Abweichungen vom Mittelwert der Positionsmessung	53
5.7	Die Daten aus Abb.: 5.6 in Kugelkoordinaten	54

5.8	Wiederholmessung mit dem Lasertracker in ruhiger Umgebung	55
5.9	Wiederholmessung mit Abriss des Lasers nach jeder Messung	56
5.10	Wiederholmessung mit dem Lasertracker mit den größten Schwankungen	58
6.1	Das aufgebaute Multiskalen-Messsystem	61
6.2	Roboter: Stäubli TX90 [96]	62
6.3	Übersicht über den Anschluß der Versuchstandskomponenten	66
6.4	Abweichung der Kalibrierkörpergeometrie	67
6.5	Messung und Modell der Reflexionsverteilung	71
6.6	Vergleich zu künstlichen Bildern	72
6.7	Segmentierte Oberfläche	72
6.8	Erkennung von Defekten durch Anlernen des Algorithmus nach den Referenzdaten	73
6.9	Krümmungsfiter	76
6.10	ROC zur Schadensdetektion (nach Flächenanteilen)	77
6.11	ROC zur Schadensdetektion (nach "Hit or Miss")	78
6.12	Abfolge der Schachbrettmuster	82
6.13	Indirekte Beleuchtung durch Reflexion	83
6.14	Auswirkung des Qualitätsmaßes	83
6.15	Rekombination der Geometrie aus vier Messungen	84
6.16	Überblick zu den verwendeten Koordinatensystemen	85
6.17	Kreis und Ellipse zur Definition eines Koordinatensystems	87
6.18	Realisiertes Räderumlaufgetriebe mit zwei Retroreflektoren	87
6.19	Mögliche Führungsgetriebe für Ellipsenbahnen	88
6.20	Wiederholungsmessung der Positionsabweichung	89
6.21	Wiederholungsmessung der Orientierungsabweichung	90
6.22	Festlegung des Koordinatensystems durch den Kalibrierkörper	91
6.23	Rohdaten der Streifenprojektionsmessung	92
6.24	Automatisch erkannte Marken in den Messdaten (Volumen in $10^3 \mu m^3$)	93
6.25	Schema: Auswertung der Kalibrierkörpermessung	93
6.26	Kalibrierkörper: Ebenen 15°	94
6.27	Histogramm der Restabweichungen nach der Kalibrierung	95
6.28	Fusion von Messfeldern eines Zylinderabschnitts	96

7.1	Konturnormal Typ KN 8	98
7.2	Abweichung der Messdaten vom Konturnormal mit $\sigma = 15,8\mu m$ (ohne Fusion)	99
7.3	Schweissnaht auf Flachprobe; Reparaturschweissnaht an Turbinenschaufel tip	102
7.4	Turbinenschaufel für einen Luftturbinenprüfstand	103
7.5	Messung der Luftturbinenschaufel mit einer Geometrieabweichung von ca. 0,1 mm am Kopf	104
7.6	Betriebsbeanspruchte Turbinenschaufel mit Defekten in der Leitkante .	104
7.7	Geometrieabweichung einer verschlissenen Schaufel	105
7.8	Segmentierung eines lokalen Schadens	106
A.1	Bereiche auf einer Turbinenschaufel	111

Kapitel 1

Einleitung

Die Alterung und der Verschleiß setzt allen technischen Einrichtungen zu. Gerade in der Energietechnik werden hochpreisige Komponenten verwendet, die einer enormen Belastung unterliegen und somit in regelmäßigen Zyklen gewartet werden müssen. Während der Wartung muss entschieden werden, ob ein Bauteil noch in Ordnung ist, repariert werden muss oder vollständig zu ersetzen ist. Der Zustand des einzelnen Teiles muss möglichst genau erfasst werden, um diese Entscheidung objektiv treffen zu können.

Im Gegensatz zur Neuteilfertigung ist die Inspektion und Reparatur heute noch großteils von Handarbeit und subjektiven Entscheidungen geprägt. Der Sonderforschungsbereich 871 "Produkt-Regeneration"[60] nimmt die gesamte Inspektions- und Reparaturprozesskette unter die Lupe und entwickelt eine beispielhafte Prozesskette, die es ermöglicht, schon vor der Reparatur alle Möglichkeiten zu bewerten und damit eine Kosten-/Nutzenanalyse aller Maßnahmen durchzuführen. Der Kern der neuen Herangehensweise ist eine virtuelle Reparatur- und Funktionsanalyse, aufgrund derer die verschiedenen Maßnahmen technisch und wirtschaftlich bewertet werden können.

Während in der Funktionssimulation die Aerolastik [4], das Schwingungsverhalten [43], das Risswachstum und die Dauerfestigkeit [44] simuliert werden, so stehen in der Reparatursimulation die Konturabweichungen beim Zerspanen [10] und das Kristallwachstum an technischen Einkristallen beim Laserauftragsschweißen [87] im Mittelpunkt.

Die Aussagefähigkeit der Simulationen hängt stark von der Qualität der Eingangsdaten über den Zustand des Bauteils ab. Neben Strukturschäden und chemischen Veränderungen ist auch besonders die Geometrie entscheidend. Die Merkmale für die Re-

paraturbedürftigkeit können von den geometrischen Ausmaßen her stark variieren, und hängen davon ab, ob das Bauteil im Ganzen verzogen ist oder kleine lokale Einkerbungen aufweist. Für die Simulationen müssen alle relevanten Änderungen der Bauteilgeometrie und des Bauteilzustandes bekannt sein, damit belastbare Ergebnisse möglich sind.

1.1 Mess- und Inspektionstechnik für die Produkt-Regeneration

Die Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken (siehe Abb.: 1.1) stehen im Fokus des Sonderforschungsbereiches *Produkt-Regeneration* und sind somit auch für diese Arbeit von zentraler Bedeutung. Das Flugtriebwerk besteht aus drei Baugruppen, dem Verdichter, der Brennkammer und der Turbine. Während der Verdichter den Druck des Luftstromes erhöht, wird in der Brennkammer chemische Energie in Wärme umgewandelt, um die Energie des Stromes weiter zu erhöhen. In der Turbine wird der unter hohem Druck stehende, heiße Abgasstrom in Drehmoment auf die Welle umgewandelt. Aufgrund der hohen Temperaturen des Abgasstroms müssen für die Turbinen spezielle Hochtemperaturlegierungen verwendet werden. Da der Unterschied zwischen Neupreis und Reparaturkosten dieser Hochtemperaturbauteile sehr hoch ist [88], kann sich somit auch erhöhter technischer Aufwand in der Reparatur wirtschaftlich lohnen.

Gerade Turbinenschaufeln sind nicht nur mechanischen, sondern auch thermischen und chemischen Belastungen ausgesetzt, weshalb der Zustand dieser Teile nicht nur vom Ausgangszustand abhängt, sondern auch von der gesamten Historie der Nutzung und Reparatur.

Derzeit wird in der Inspektion von Turbinenschaufeln ein großes Arsenal unterschiedlicher Technologien genutzt, von der manuellen Prüfung (siehe Abb.: 1.1) bis hin zu modernen Röntgen- und 3D-Messverfahren. Die benötigte Vielfalt und Flexibilität der Verfahren wird durch die Inspektoren gewährleistet, die Entscheidungen aufgrund von Erfahrung und Messdaten treffen.

Für eine Simulation, und somit die virtuelle Reparatur und virtuelle Funktionsprüfung, reichen die heute erhobenen Daten nicht aus, da jeweils nur Teilaspekte untersucht werden, die nicht in ein globales Zustandsmodell zusammengefasst werden, welches eine

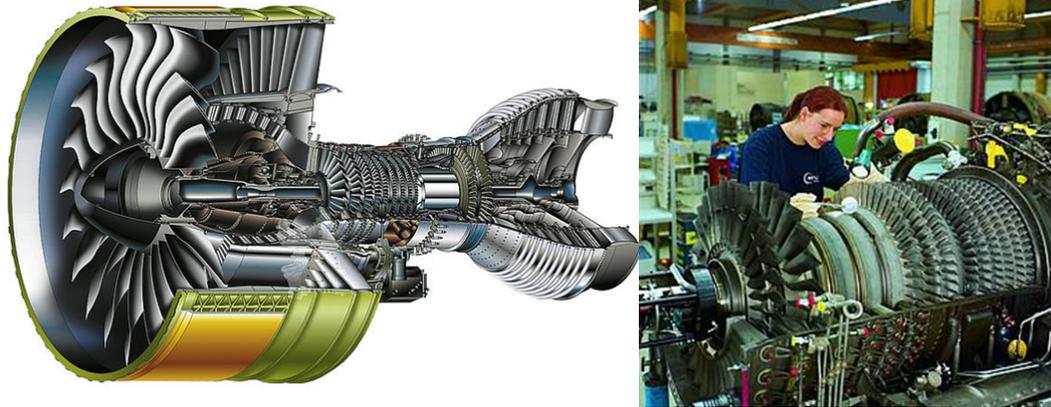


Abbildung 1.1: Schema eines Flugtriebwerkes; Triebwerksinstandhaltung ¹

realitätsnahe Simulation ermöglichte.

Ein Großteil der Simulationen beruhen auf finiten Elementnetzen [17], die ein Bauteil und gegebenenfalls die Umgebung in kleine Elemente unterteilen, die jeweils eigene Materialparameter haben. Bei einem Bauteil wird neben den Materialparametern noch die Geometrie benötigt, um simulieren zu können. Gerade bei der Dauerfestigkeit und der Rissfortpflanzung [44] zeigt sich, dass die Schädigung auch durch Defekte in einer sehr kleinen geometrischen Größenordnungen zustande kommen können.

1.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Die Aufnahme eines Zustandes eines verschlissenen Bauteils bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Der Zustand variiert in der Geometrie sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich. Für die Erforschung und Entwicklung eines Inspektionssystemes für die Produktregeneration wurde der Fokus auf die folgenden, besonders bedeutsamen Ansatzpunkte gelegt:

- Entwicklung eines Konzeptes für ein multiskalen Mess- und Inspektionssystem,
- Detektion von Defekten in Bild- und 3D-Daten,
- Referenzierung von Messdaten in 3D,
- Kalibrierung des Gesamtsystems,

¹Quelle: mtu.de

- Berechnung der Geometrieabweichung zu idealen Sollgeometrien,
- Synthese einer lokalen, individuellen Geometrie zur Berechnung der Abweichung zu einer möglichen Sollgeometrie,
- Filterung, Umwandlung und Darstellung der Daten.

1.3 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2: Aufgabenstellung

Von dem Ziel einer modernen Reparatur, werden die Anforderungen für ein Inspektionssystem abgeleitet.

Kapitel 3: Stand der Technik

Nach einem allgemeinen Überblick zur Detektion von Defekten wird auf Inspektionstechnologie eingegangen. Für die Bildverarbeitung wird der Vorgang der Bildentstehung von der Beleuchtung über die Messobjektoberfläche bis hin zum Kamerasensor aufgezeigt. Für die Verarbeitung der Bilddaten und der Tiefenbilder wird ein Überblick über Standardverfahren gegeben.

Kapitel 4: Konzeption des Systems

Für die Inspektion von verschlissenen Turbinenschaufeln wird ein Mess- und Inspektionssystem für die multiskalige Untersuchung konzipiert. Neben der Sensorik wird auch die Aktorik entworfen.

Kapitel 5: Modellierung

Für die Einzelkomponenten des Multiskalensystems werden die in den späteren Kapiteln angewandten Modelle vorgestellt. Zu den Einzelkomponenten werden die Unsicherheiten und deren Einfluss auf die Messkette betrachtet.

Kapitel 6: Aufbau des Systems

Vom Aufbau des Gesamtsystems bis zur Qualifizierung der einzelnen Komponenten und Methoden werden die Vorarbeiten für die multiskalige Untersuchung vorgestellt.

Näher untersucht werden in diesem Rahmen die Oberflächen-Fehlerdetektion, Algorithmen zur Messung konkaver Bereiche mit Streifenprojektion, die Möglichkeiten zur Referenzierung des Sensorkopfes im Raum, die Kalibrierung und die Datenfusion.

Kapitel 7: Multiskalen Untersuchungen

Zur Untersuchung der Genauigkeit des Systems wird ein Konturnormal gemessen und die Abweichungen von der Sollgeometrie bestimmt und diskutiert. Die Verfahren werden an drei weiteren relevanten Probekörpern getestet.

- Schweißnähte auf Flachproben und an realen Turbinenschaufeln werden für die Reparatursimulation gemessen.
- Eine im Rahmen des Sonderforschungsbereichs entwickelte Turbinenschaufel mit bekannter Geometrie wird untersucht und mit den CAD-Daten verglichen.
- An einer realen, verschlissenen Turbinenschaufel aus einem Flugtriebwerk werden sämtliche Verfahren zum Einsatz gebracht.

Kapitel 8: Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden zusammengefasst und bewertet, um Potentiale für zukünftige Inspektions- und Messtechnologien abzuleiten.

Kapitel 2

Aufgabenstellung

2.1 Mess- und Inspektionstechnik für die Produkt-Regeneration

Instandhaltung und Reparatur sind heute zu einem großen Teil auf die Flexibilität des Menschen angewiesen. Sei es in der Inspektion oder in einem Reparaturschritt, das Hintergrundwissen, die Erfahrung und die Fähigkeit Sachverhalte individuell zu erkennen, sind Grundpfeiler des Vorgehens. Aber nicht nur Vorteile stammen aus dieser menschlichen Komponente. Vergleichbare quantitative Entscheidungen sind kaum möglich, da unterschiedliche Menschen ein unterschiedliches Wissen, unterschiedliche Möglichkeiten und eigene Vorgehensweisen haben.

Gerade bei hochpreisigen Bauteilen, wie sie in der Energietechnik vorkommen, ist der Kostenunterschied zwischen Reparatur und Neuteil oft beträchtlich [88]. Gerade durch die menschliche Komponente in der Reparatur variiert ein repariertes Bauteil in seiner Qualität deutlich stärker als ein Neuteil, wodurch reparierten Teilen häufig ein geringerer Wert als einem Neuteil zugeordnet wird.

Im Sonderforschungsbereich 871 *Produkt-Regeneration* wird die Reparatur von Triebwerksbauteilen untersucht und es werden neue Ansätze zur gesamten Instandhaltungs- und Reparaturprozesskette verfolgt. Den Kern bilden eine virtuelle Reparatur und eine virtuelle Funktions- und Haltbarkeitssimulation. Aus dieser virtuellen Welt werden Entscheidungen zur Reparatur abgeleitet.

Der gesamte virtuelle Pfad benötigt Eingangsdaten zu den zu reparierenden Bautei-

len. Die Ergebnisse der heute üblichen Untersuchungen reichen als Daten zur Simulation nicht aus, da die Einzelschäden zwar protokolliert sind, jedoch zum großen Teil nicht quantifiziert und exakt lokalisiert sind.

Für jegliche Schadensart und jede Schadensschwere existieren heute Sensoren zum Quantifizieren der Beschädigung. Aufgrund der mangelnden Referenzierung und teilweise sehr hohen Inspektionsdauern / Inspektionskosten ist es derzeit nicht wirtschaftlich möglich, alle Bauteile mit allen benötigten Sensoren vollständig zu erfassen.

2.2 Multiskalen-Messtechnik

Nach dem Credo: „So exakt wie nötig, so schnell wie möglich!“, nutzt die Multiskalen-Messtechnik jeweils den schnellstmöglichen Sensor, der genau genug ist, den Schaden zu quantifizieren. Gerade bei der Reparatur, im Gegensatz zur Messung eines Neuteils, ist jedoch nicht im Vorhinein klar, welcher Teil des Werkstückes mit welcher Messtechnik untersucht werden muss, da sich dies nach den Verschleißzustand oder Schadensbild entschieden werden muss.

Als Vermittler zwischen der schnellen und der genauen Sensorik steht die Indikatorfunktion. Diese Indikatorfunktion ermittelt aus den schnell gewonnenen Daten die Bereiche, welche genauer aufgelöst werden müssen und daher noch einmal mit einem genaueren und langsameren Sensor erfasst werden müssen. Durch die Kalibrierung sämtlicher Sensoren in ein Referenzsystem können die Daten in ein Koordinatensystem überführt und fusioniert werden.

2.3 Zieldefinition

Es soll ein Mess- und Inspektionssystem konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen werden, das Fehler auf Turbinenschaufeln detektieren und messen kann. Wichtig ist, dass mit einem groben Sensor die Oberfläche vollständig erfasst wird und relevante Defekte in diesen Daten gefunden werden. Mit einem zweiten, feineren Sensor werden die Defekte hochauflösend erfasst und quantifiziert.

Da Turbinenschaufeln sich während ihrer Lebenszeit verformen und durch Reparaturmaßnahmen in ihrer Geometrie verändert werden, existiert keine exakte Sollgeometrie für jeden Zeitpunkt im *Lifecycle*. Daher können lokale Defekte nicht allein als Ab-

weichung einer Entwurfsgeometrie spezifiziert werden, sondern müssen als Abweichung einer individuellen Sollgeometrie berechnet werden. Anhand der intakten Oberflächenabschnitte wird eine mögliche lokale Sollgeometrie berechnet, die ausgehend von der Messung unbeschädigter Geometriebereiche über lokale Defekte hinweg die Geometrie schließt und so einer unbeschädigten Oberfläche nahe kommt.

Algorithmen zur Unterscheidung von intakten und defekten Oberflächen aus Bild- und 3D-Daten müssen angelernt und bewertet werden, um eine Indikatorfunktion zu entwickeln und eine lokale individuelle Sollgeometrie zu berechnen.

Sämtliche Daten sind hochgenau in Werkstückkoordinaten zu referenzieren. Hierzu müssen die Transformationen zwischen den Sensorkoordinatensystemen und dem Werkstückkoordinatensystem für jede Messpose bestimmt werden.

Das Gesamtsystem wird durch die Untersuchung von Geometrienormalen qualifiziert und an Beispielbauteilen erprobt.

Kapitel 3

Stand der Technik

3.1 Erkennung von Defekten

Die Erkennung von Defekten auf Bauteiloberflächen war lange Zeit eine Tätigkeit die nur in einem beschränktem Maß von automatischen System übernommen werden konnte. Defekte können sehr unterschiedliche Ausprägungen haben, so dass automatische Systeme mit einer hohen Varianz von Ausprägungen umzugehen lernen müssen. In der zerstörungsfreien Prüfung werden Methoden zur Fehlerdetektion zusammengefasst. Riefen, Kratzer, Oberflächenrisse und offene Poren sind klassische Defekte der Fertigungsprüftechnik [28]. In der Reparatur oder Regenerierung kommen vermehrt Dellen, Ausbrüche und allgemeine Verformung aus der täglichen Belastung hinzu.

Um einen Defekt in Messdaten erkennen zu können, ist es notwendig den Sollzustand zu kennen. Die verschiedenen Arten von Funktionsflächen im Maschinenbau sind häufig von unterschiedlichen Oberflächengüten und erlaubten Toleranzen gekennzeichnet.

Eine der einfachsten Arten Defekte zu erkennen, ist es, Daten von einer intakten Oberfläche aufnehmen und so die Änderungen des Signals bei der Messung eines Bauteils zu bewerten, um die Defekte zu erkennen. Durch direkten Vergleich der Signale mit Referenzdaten kann so einfach ein Wert zwischen neuwertig und defekt bestimmt werden.

3.1.1 Geometrische Defekte

Globale Defekte

In einer Zeichnung oder den CAD-Daten liegen für die geometrischen Größen Toleranzen für die erlaubten Ausprägungen vor. Für diese Toleranzen gibt es nach Norm festgelegte Methoden zur Überprüfung [22].

Bei Freiformoberflächen ist die Berechnung der Formabweichung oft nicht eindeutig, da die Zuordnung von Ist- auf Soll-Punkt nicht immer Eindeutig ist. Häufig wird nach einer Best-Fit Einpassung zwischen Messdaten und Modell, der Abstand der Messpunkte in Normalenrichtung der Modellgeometrie berechnet [86].

Lokale Defekte

Zusätzlich zu den für die Fertigung bestimmten Kenngrößen, die sich auf Gestalt, Welligkeit und Rauheit beziehen, ist in der Reparatur noch eine Identifikation und Lokalisierung von beschädigten Bereichen notwendig. Kerben und Einschlüsse, die in ihrer Größe noch in die geometrische Toleranzzone fallen können, gefährden aufgrund der Kerbwirkung oder Aerodynamik trotzdem den Betrieb des Bauteils. Für Komponenten aus Flugtriebwerken gibt es Wartungshandbücher, die Form und Ausprägung von Defekten in die Kategorien: *Ausschuss*, *Reparierbar* und *in Ordnung* einteilen.

3.1.2 Struktur und chemische Defekte

Materialermüdung durch Rissfortschritt oder chemische Degradation sind wichtige Schädigungen die in der Reparatur berücksichtigt werden müssen. Da sich die Defekte rein optisch nicht vollständig erfassen lassen, sind hierfür andere Inspektionstechnologien notwendig [28]. Zur zerstörungsfreie Prüfung oberflächennaher Risse und Schichtschäden können zum Beispiel Hochfrequenz-Wirbelstrom Verfahren und Thermographie mit Impulsanregung genutzt werden [85].

3.1.3 Mustererkennung und Klassifikation

In der Schadenserkenkung ist die Zuordnung von Datenpunkten in die Kategorien *Schadhaft* und *in Ordnung* wichtig. Des weiteren kann ein Schaden einem Schadensty-

pus oder eine Schadensschwere zugeordnet werden. Ein Algorithmus zur Schadensdetektion muss daher schadhafte Bereiche identifizieren und klassifizieren.

Wenn ein Datensatz mit identifizierten Defekten vorhanden ist, der als Referenz dient, können Algorithmen angelernt werden um die Bereiche zu Unterscheiden. Im Falle einer einfachen Klassifikation in zwei Kategorien (z.B. a & b oder + & -) sind vier Ergebnisse möglich:

- *TP* - true positiv: Klassifikator + Referenz +
- *FP* - false positiv: Klassifikator + Referenz -
- *TN* - true negativ: Klassifikator - Referenz -
- *FN* - false negativ: Klassifikator - Referenz +

Die *Accuracy* (Genauigkeit)(Glg.: 3.1) ist in dieser binären Entscheidung als Verhältnis der richtigen Zuordnungen zur Gesamtheit der Zuordnungen definiert [97]. Der Wertebereich liegt zwischen Null und Eins, wobei eine $Acc = 1$ ein Klassifikator beschreibt, der die Daten exakt wie die Referenz zuordnen kann.

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3.1)$$

Häufig ist eine Zuordnung von der Festlegung eines Schwellwertes abhängig. In diesem Fall ist die *Receiver Operating Characteristic (ROC)*[97] eine Möglichkeit die Eignung eines Merkmals als Klassifikator zu bewerten. Die ROC ist ein Diagramm in dem die *True Positive Rate (TPR)* gegenüber der *False Positive Rate (FPR)* aufgetragen wird (siehe Glg.: 3.2 & 3.3).

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.2)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (3.3)$$

Im ROC-Diagramm entspricht der Punkt $TPR = 1; FPR = 0$ einem Klassifikator mit $Acc = 1$. Wenn $TPR = FPR$ entspricht, schafft es der Klassifikator nicht, die Bereiche zu trennen. Bei einem Schwellwertverfahren kann nun für jeden möglichen Schwellwert ein Punkt eingetragen werden um die ROC-Kurve zu bilden (siehe Abb.: 3.1).

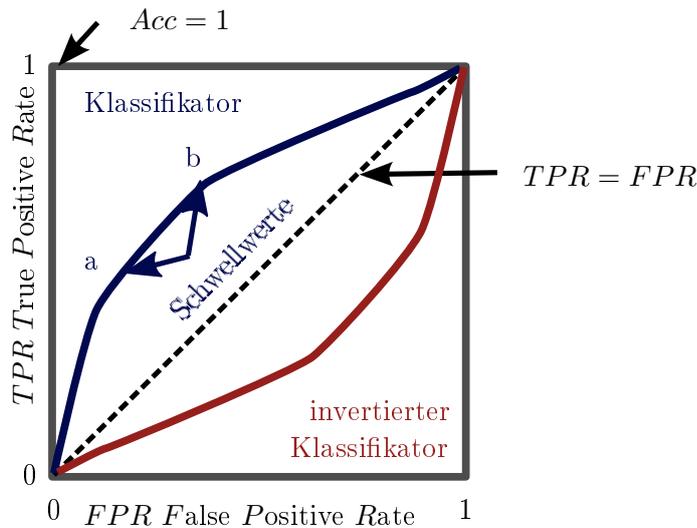


Abbildung 3.1: ROC-Diagramm: mögliche Schwellwerte ergeben die ROC-Kurve des Klassifikators; Je näher die Kurve an den $Acc = 1$ Punkt kommt, um so besser ist das Merkmal zur Klassifikation geeignet

3.2 Interaktion Licht - Oberfläche

Um eine Oberfläche optisch zu charakterisieren, muss Licht, welches von der Oberfläche ausgeht, analysiert werden. Eine Oberfläche kann Licht emittieren, absorbieren, transmittieren und reflektieren. Die betrachteten Bauteile sind metallisch und die Absorption und Reflexion sind die entscheidenden Mechanismen. Diese Phänomene lassen sich alle durch die Interaktion des sichtbaren Lichtes als elektromagnetische Welle mit einer Wellenlänge zwischen 380 nm und 780 nm erklären [90].

Aus der Betrachtung der Lichts aus den Grundlagen der Physik lässt sich nur schwer auf das Reflexions- und Absorptionsverhalten einer Oberfläche schießen, da die Oberflächenfeinstruktur dafür exakt bekannt sein muss [21].

Im Allgemeinen wird die Reflexionen zwischen den beiden theoretischen Extremen, dem idealen Spiegel und dem Lambert'schen Reflektor, beschrieben [41]. Während der ideale Spiegel das Licht nach Glg.: 3.4 reflektiert, streut der Lambert'sche Reflektor das Licht gleichmäßig über den Halbraum über der Oberfläche (siehe Glg: 3.5).

$$I_{\text{Spiegel}} = I_0 \delta \left(\frac{1 + \mathbf{v}}{|1 + \mathbf{v}|} + \mathbf{n} \right) \quad (3.4)$$

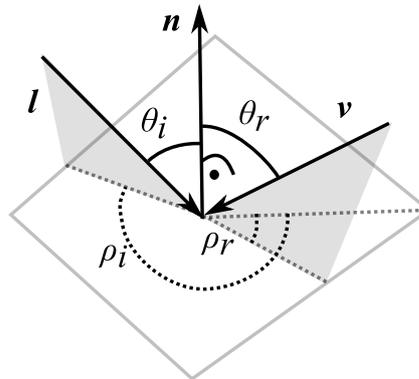


Abbildung 3.2: Die BRDF stellt den Zusammenhang zwischen einfallendem und reflektiertem Licht her

$$I_{Lambert} = I_{L,0} \cos(\theta_i) = I_{L,0} \mathbf{l} \cdot \mathbf{n} \quad (3.5)$$

Als mathematisches Modell der für die Beschreibung der Reflexionen, die zwischen den beiden Extremen liegen, hat sich die *Bidirektionale Reflektanz Verteilungsfunktion* (BRDF) (siehe Glg.: 3.6) durchgesetzt [31, 75, 98]. Es wird dabei aus der Richtung des einfallenden Lichtes θ_i, ρ_i die Reflexion für die Beobachtungsrichtung θ_r, ρ_r berechnet (Abb.: 3.2, Glg.: 3.6).

$$\text{BRDF}(\theta_i, \rho_i, \theta_r, \rho_r) = \text{BRDF}(\mathbf{v}, \mathbf{l}, \mathbf{n}) \quad (3.6)$$

3.2.1 Reflexions Modelle

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Funktionen, je nach Anwendung, zur Beschreibung der BRDF genutzt.

Phong

Bekannt aus der frühen Computer-Grafik ist das Phong-Modell [79] eine Überlagerung eines Lamber'tschen-Reflektors mit einer spekulären Komponente, deren Steilheit über den Exponenten eingestellt werden kann. Das Modell verschafft gerenderten Geometrien einen dreidimensionalen Eindruck, ist jedoch nicht physikalisch begründet, da die Energieerhaltung nicht eingehalten wird.

Torrance-Sparrow

In [98] wird ein Reflexionsmodell entworfen, das auf der Zusammensetzung der Oberfläche aus spiegelnden Facetten beruht. Multiple Reflexionen, Abschattung und Verdeckung führen zu einem Modell, das spekuläre und diffuse Reflexion aus der Verteilung der Facettenneigung berechnet.

Oren-Nayar

Das Lambert'sche Modell, welches oft für nicht glänzende Oberflächen eingesetzt wird. Jedoch zeigen sich bei realen Oberflächen gerade bei höherer Rauheit und größeren Neigungen deutliche Abweichungen und so wurde in [75] ein Modell für eine raue Oberfläche, bestehend aus Lambert'schen Reflektoren, entwickelt, das Abschattung und Mehrfachreflexionen durch die Rauheit berücksichtigt. Als Grundlage der Berechnung wird die Gauss'sche Verteilung der Steigungen postuliert. In [83] wird das Modell für Lichtquellen, die aus einer ähnlichen Richtung, wie der Blickrichtung kommen, auf einen Abschattungsterm vereinfacht, der den Lambert'schen Ansatz anpasst (Glg.: 3.7). Diese Vereinfachung wird insbesondere für die Methodik des *Shape from Shading* genutzt.

$$I_{Oren} = I_0 (k_1 \cos(\theta_i) + k_2 \sin^2(\theta_r)); \forall \mathbf{v} \approx \mathbf{1} \quad (3.7)$$

3.3 Photogrammetrie

Die Photogrammetrie beschäftigt sich mit der Abbildung von räumlichen Objekten auf einen Kamerasensor. Dabei gehören sowohl die Beleuchtung, als auch beleuchtete Objekte, das Kameraobjektiv und der Kamerasensor selbst zur Szene. Die Objektivparameter bestimmen das Abbildungsprinzip, mit dem die Objekte auf den zweidimensionalen Sensor abgebildet werden. Über den Matrixsensor wird aus den auf den Sensor abgebildeten Lichtintensitäten eine Intensitätsmatrix erzeugt, die es zu Interpretieren gilt.

3.3.1 Die geometrische Abbildung

Generell wird die geometrische Abbildung durch die Art der mathematischen Transformation, welche die Koordinaten der Objekte in Sensorkoordinaten umrechnen, unterschieden.

$$\vec{x}_s = f(\vec{x}_0) = f_{verz}(\mathbf{T}_i \mathbf{T}_e \vec{x}_0) \quad (3.8)$$

Die Abbildung (nach Glg.: 3.8) eines Weltpunktes \vec{x}_0 in Koordinaten auf den Kamerasensor \vec{x}_s , kann in die extrinsische Kameramatrix \mathbf{T}_e , die eine Starrkörpertransformation von Welt- in Kamerakoordinaten beschreibt, die intrinsische Matrix \mathbf{T}_i , die von Kamera- auf Sensor-Koordinaten abbildet, und eine allgemeine nichtlineare Verzerrung, zerlegt werden [99].

Während es für die Verzerrung viele Ansätze gibt, wird die intrinsische Matrix abhängig vom Objektiv als affine oder perspektivische Transformation modelliert.

Die affine Kamera

Wenn die Entfernung zwischen Kamera und Objekt die Skalierung auf dem Sensor nicht beeinflusst, spricht man von einer affinen Kamera. Primär telezentrische Objektive (zum Teil auch Mikroskop-Objektive) werden so modelliert [97].

$$\mathbf{T}_{i,\text{affin}} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & t_x \\ 0 & s_y & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Die projektive Kamera

Am bekanntesten ist die perspektivische oder projektive Abbildung. Sowohl Fotoobjektive als auch das menschliche Auge können so modelliert werden. Bei der Abbildung werden die x- und y-Koordinate auf dem Sensor nach dem Abstand z von der Kamera skaliert. Die einfachste Form der perspektivischen Kamera ist die Pinhole-Kamera (siehe Glg.: 3.10).

$$\mathbf{T}_{i,\text{proj}} = \begin{bmatrix} s_x & s_{skew} & 0 & t_x \\ 0 & s_y & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3.2 Telezentrische Objektive und Schärfe

Telezentrische Objektive bilden die 3D-Welt nach dem Modell einer affinen Kamera (siehe Kap.: 3.3.1) auf den Bildsensor ab. Bei der Verwendung der affinen Kamera fällt auf, dass das Bild nicht von der Entfernung zur Kamera abhängt.

Beim telezentrischen Objektiv ist allein die Schärfe der Abbildung vom Abstand abhängig. So ändert sich die Geometrie der Abbildung von Kalibriernormalen auf den Bildsensor nicht, wenn die Kamera in Richtung der optischen Achse bewegt wird. Bei Auflösungsnormalen ändert sich jedoch der Kontrast zwischen hellen und dunklen Bereichen.

Dieser Effekt kann genutzt werden, um die z -Position der Ebene der maximalen Schärfe für ein telezentrisches Objektiv festzulegen. Bei einem Tiefenschärfenormal (Abb.: 3.3) sind regelmäßige Streifenmuster im 45° Winkel aufgebracht. An der Stelle des maximalen Kontrastes kann eine eindeutige z -Position festgelegt werden.

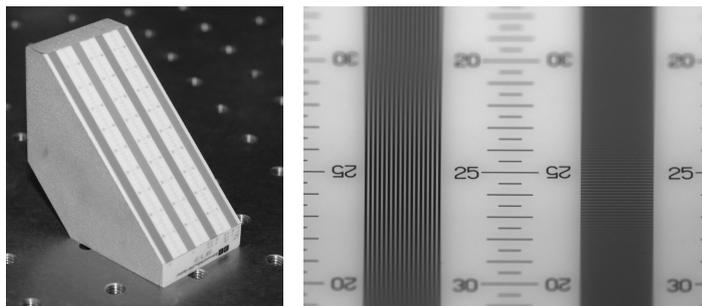


Abbildung 3.3: links: Tiefenschärfenormal verschiedenen Streifenmustern im 45° Winkel; rechts: Außerhalb der Fokusebene verlieren die Muster an Kontrast bis das Muster nicht mehr zu erkennen ist

3.3.3 Intensitätsabbildung

Für die Photogrammetrie wird ein möglichst linearer Zusammenhang zwischen einfallenden Licht und dem später herauskommenden Intensitätswert benötigt.

Der Einfluss des Objektivs beschränkt sich meist auf die Vignettierung, eine Abnahme der Intensität am Bildrand. Der Bildsensor selbst beeinflusst das Ergebnis durch die Sensitivität, die Nichtlinearität der Elektronik, das Rauschen und die Quantisierung. Diese Effekte sind von dem elektrischen Aufbau des Sensors abhängig. Am häufigsten

werden CCD- und CMOS-Sensoren genutzt. Aufgrund der höheren Sensitivität und Linearität wird in der Messtechnik meist auf CCD-Sensoren zurückgegriffen.

Charge-Coupled Device (CCD) Sensor

Jeder Pixel des CCD-Sensors wandelt die einfallende Lichtintensität mit der Quanteneffizienz ν_p in Ladung um. Die Ladung wird über einen Kondensator in eine Spannung umgewandelt und über einen A/D-Wandler in wird daraus ein digitaler Intensitätswert. Die Ladung kann durch sogenanntes Blooming auf benachbarte Pixel übertragen werden, wenn die Ladungsmenge zu groß ist. Dieser Effekt ist zu vermeiden, da der Zusammenhang zwischen einfallendem Licht und Ladungsmenge in dem einzelnen Pixel so nicht mehr gegeben ist. Auf dem Weg der elektronischen Umwandlung wird das Signal mit dem Dunkelrauschen überlagert. Da mehrere Pixel von der selben elektronischen Auswertekette bearbeitet werden, ist der Sensitivitätsunterschied zwischen den Pixeln gering [97].

Photometrie

Lichttechnische und strahlungstechnische Größen werden durch die Nutzung der menschlichen Hellempfindlichkeit $V(\lambda)$ [41] ineinander umgerechnet [90]. Da das menschliche Helligkeitsempfinden nicht für die Bildverarbeitung benötigt wird, werden in dieser Arbeit die strahlungstechnischen Größen, die durch die spektrale Empfindlichkeit der Kamerasensoren in einen Intensitätswert umgerechnet werden können, genutzt. Die Quanteneffizienz von CCD-Sensoren liegt im genutzten Spektralbereich bei ungefähr 50 % [2].

Wenn nur relative Werte für die Helligkeit benötigt werden, kann das Intensitätssignal aus dem CCD-Sensor, aufgrund der hohen Linearität, direkt genutzt werden.

3.3.4 Algorithmen der Bildverarbeitung

Dieses Kapitel kann keinen vollständigen Überblick über die sehr vielfältigen Algorithmen der Bildverarbeitung bieten. Es werden nur die in dieser Arbeit verwendeten Algorithmen kurz beschrieben. Viele der Algorithmen sind in der Anwendung nicht auf Intensitätsbilder beschränkt, sondern werden auch zur Verarbeitung von Tiefenbildern verwendet.

Eine vollständigere Abhandlung der Themen ist in [64, 11, 15, 12] zu finden.

Filter

Die Filter haben das Bild als Eingangssignal und berechnen Pixel für Pixel das Ausgangsbild. Aus der Signaltheorie bekannt sind lineare Filter, die durch die Faltung des Eingangsbildes mit dem Filterkern, oder durch Multiplikation mit der Übertragungsfunktion im Spektralbereich, berechnet werden können [12]. Neben den klassischen linearen Filtern Hochpass, Tiefpass, Bandpass und Bandsperre kommen auch gauß'sche Glättungsfiler, Tiefpass-Ableitungsfiler, Sobel- und Laplace-Filter zum Einsatz [15, 11].

Aus der Reihe der lokalen Rangfolgefilter werden neben dem Median-Filter, zur Unterdrückung kleiner Strukturen [11] auch Minimums- und Maximums-Filter eingesetzt.

Lokale oder globale Vergleichs(Threshold)-Filter wandeln das Bild pixel-weise in Wahr-/Falsch-Werte um [97].

Histogramm Analyse

Das Histogramm, die Häufigkeitsverteilung nach Grauwertklassen, kann zu Analysen von Bildbereichen oder des Gesamtbildes genutzt werden. Wenn eine bi-modale Verteilung vorliegt, kann der Algorithmus von Otsu [76] den Grenzwert finden, der die Menge so teilt, dass die Summe der Varianzen der Einzelmengen minimiert wird.

Segmentierung

Die Segmentierung unterteilt das Bild in n Bereiche. Eine Möglichkeit zur Segmentierung ist, nach einem Vergleichsoperator alle zusammenhängenden Bereiche jeweils einer symbolischen Bedeutung zuzuordnen [64].

Ein vollständig anderer Ansatz ist das sogenannte Region-Growing, das ausgehend von Ansatzpunkten immer mehr Pixel zu einer Region dazunimmt, bis sich die Regionen treffen. Das bekannteste Beispiel ist die Wasserscheiden-Transformation [11].

Merkmale

Für Bereiche, wie zum Beispiel Nachbarschaften oder für Regionen, können aus den Bilddaten Merkmale errechnet werden. Neben Mittelwert und Varianz können auch

weitere Kenngrößen bestimmt werden. Diese werden dann in einen Merkmalsvektor eingetragen um sie mit anderen Merkmalsvektoren zu vergleichen. Für das Wiedererkennen von bestimmten Datenpunkten wurden die Algorithmen SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [72] und SURF (Speeded-Up Robust Features) [5] bekannt.

Fitting

Die Methode der kleinsten Abweichungsquadrate wird auch in der Bildverarbeitung häufig genutzt, um Modelle an Daten anzupassen. Aber gerade wenn nicht bekannt ist, wo im Bild sich ein Modell befindet, muss eine Methode genutzt werden, die mit einer hohen Anzahl an Ausreißern (in diesem Fall Pixel, die das Modell nicht stützen) umgehen kann. Der Random Sample Consensus (RANSAC) findet auch in Daten Modelle, bei denen nur ein Bruchteil tatsächlich zum Modell gehört [25]. Je nach Anteil an Ausreißern $p_{Ausreisser}$ und Anzahl der Modellparameter s kann errechnet werden (siehe Glg.: 3.11), wie häufig k zufällige Datenpunkte gewählt werden müssen, damit der Algorithmus mit einer Wahrscheinlichkeit von $p_{Konvergenz}$ auf das Modell konvergiert.

$$k = \frac{\log p_{konvergenz}}{\log (1 - (1 - p_{Ausreisser})^s)} \quad (3.11)$$

Methoden mit variierender Beleuchtung

Für die Auswertung von Bilddaten ist es wichtig, die gesamte Szene zu interpretieren. Gerade bei künstlichen Szenen, wie Sie in der industriellen Bildverarbeitung vorliegen, kann neben Kamera und Objekt auch die Beleuchtung gezielt variiert werden. Durch die Reflexionseigenschaften des Messobjektes (siehe Kap.: 3.2) kann durch unterschiedliche Beleuchtungen eine Fehlerdetektion, Segmentierung und die Bestimmung der örtlichen Steigung ermöglicht werden [83].

Im *Shape from Shading* wird aus den Grauwerten im Bild, bei bekannter Beleuchtung, für jeden Pixel eine Steigung geschätzt und über eine Integration die Oberflächengeometrie berechnet. Da die Steigungen im Allgemeinen nicht widerspruchsfrei zu integrieren sind, werden Ausgleichsalgorithmen benötigt [31, 37, 95].

3.3.5 Kalibrierung der Abbildung

Für die Kalibrierung der internen Abbildungsmatrix einer Kamera werden Punkte im Raum zu Punkten auf den Kamerasensor referenziert und eine Abbildungsmatrix gesucht die den Restfehler minimiert. Eine allgemeine Lösung bietet der sogenannte Bündelausgleich, der den Restfehler der Hin- und Rückprojektion minimiert [35]. Eine Vereinfachung der Kalibrierung wurde von Tsai [99] entwickelt, der eine Kalibrierung mit einem zweidimensionalen Kalibrierkörper (z.B. *chess-board*) ermöglicht, indem er die Abbildungen zwischen der Kalibrierebene und der Sensorebene zunächst als Homographie [35] berechnet. Erst im zweiten Schritt wird aus den vielen Homographien der Bündelausgleich berechnet und die Verzeichnung bestimmt.

Die Güte der Kalibrierung hängt von der Vollständigkeit des Modells, der numerischen Stabilität der Modells, der Menge und Verteilung der erkannten Kalibriermarken und von der Unsicherheit mit der die Koordinaten der Kalibriermarken bestimmt werden können ab.

Als Kalibriermuster haben sich einige Standards durchgesetzt, die jeweils bestimmte Vorteile bieten. Das regelmäßige Kreismuster erlaubt eine hochgenaue Bestimmung der Markerkoordinaten.

3.3.6 Stereo-Photogrammetrie

Die Bildverarbeitung aus den Daten von zwei Kameras hat durch die Ähnlichkeit mit der menschlichen Sicht große Beachtung in der Forschung erfahren. Durch die Nutzung von zwei Ansichten auf eine Szene können auch Tiefeninformationen gewonnen werden [97]. Die Qualität der 3D Daten hängt von Auflösung, Kalibrierung und Triangulationswinkel ab, ist jedoch auch vom Finden und Zuordnen von Objektmerkmalen abhängig. Während früher oft durch Menschen Referenzpunkte markiert wurden, haben sich heute lokale Deskriptoren, die einen Merkmalsvektor aus der Umgebung eines Pixels berechnen, durchgesetzt (z.B. [5]).

Auf technischen Oberflächen ist das Finden von korrespondierenden Punkten sehr schwer, da diese metallischen Oberflächen kaum unterscheidbare Merkmale aufweisen. Des weiteren werden geometrische Merkmale aus unterschiedlichen Blickwinkeln anders aussehen, da sich primär die Form und der Winkel zur Beleuchtung und nicht die Textur ändert. So wird die reine Stereophotogrammetrie, die im Vermessungswesen und in der

Interpretation natürlicher Szenen sehr erfolgreich ist, für die Fertigungsmesstechnik nur selten verwendet und eher aktive Verfahren mit strukturierter Beleuchtung wie die Streifenprojektion genutzt.

3.4 Streifenprojektion

Die Messtechnik basierend auf der Projektion von Streifenmustern hat sich in den letzten Jahren durchgesetzt, um Geometrien von Bauteile zu digital zu erfassen [51]. Sie gehört zu den optischen Messverfahren und basiert, wie die Stereo-Photogrammetrie, auf der Triangulation. Während bei der Stereo-Photogrammetrie ähnliche Bereiche in den beiden Bildern der Kameras gesucht werden, um für dieses Merkmal einen Tiefenwert zu errechnen, wird die Korrespondenz zwischen Kamera und Projektor bei der Streifenprojektion durch eine Musterfolge erzeugt [58]. Gerade bei Oberflächen mit wenigen Merkmalen hat die Streifenprojektion deutliche Vorteile gegenüber der Stereo-Photogrammetrie. Sowohl Kameras als auch Projektoren lassen sich mit einer inneren und äußeren Matrix beschreiben [77]. Während bei der Nutzung eines perspektivischen Objektivs die Tiefenpunkte unterschiedliche Abstände haben, kann bei der Nutzung eines telezentrischen Objektivs (siehe Abb.: 3.4) ein Tiefenbild mit äquidistanter Abtastung erzeugt werden.

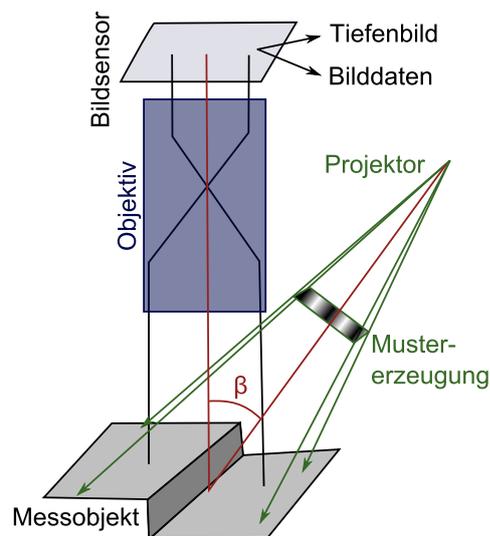


Abbildung 3.4: Modell der Streifenprojektion mit Triangulationswinkel β

Neben Anwendungen in der Messtechnik [58, 13] können die Streifenprojektionsen-

soren auch als 3D-Kameras eingesetzt werden [103]. Eine der Hauptanwendungen ist die Messung von Blechbauteilen, häufig in der Kombination mit einem Roboter für die Repositionierung, um Bauteile vollständig erfassen zu können [27, 92].

3.5 Registrieren und Fusionieren von 3D Messdaten

Im allgemeinen kann ein Werkstück in einer Pose nicht vollständig aufgenommen werden. Um einen Datensatz für das Werkstück zu erzeugen müssen die Daten registriert (in ein gemeinsames Koordinatensystem gebracht) und fusioniert (zusammengesetzt) werden. Die Methoden unterscheiden sich je nach Art in der die Messdaten vorliegen und wie sie weiterverarbeitet werden sollen.

3.5.1 Datenstrukturen für 3D Daten

Für einen Punkt, als einfachstes Element, ist der Dreiervektor eine sinnvolle Datenstruktur. Körper und Oberflächen sind jedoch mehr als eine ungeordnete Ansammlung von Punkten, wodurch andere Datenstrukturen benötigt werden.

Punkte und Punktwolken

Wenn ein Punkt als Vektor zu speichern ist, so kann man größere Anzahlen von Punkten als Menge von n Punkten, einer *Punktwolke*, speichern, oder als $3 \times n$ Datenfeld. In einer solchen Datenstruktur gibt es keine zusammenhängenden Oberflächen, was Abstandsberechnungen und Einpassungen erschwert.

In einigen Fällen werden zu einer Punktwolke noch gemessene oder geschätzte Normalenvektoren gespeichert, was gerade bei der Messung von dünnen Bauteilen wichtig ist, um Vorder- und Rückseite in der weiteren Verarbeitung der Daten nicht zu vertauschen.

Tiefenbild

Ein Tiefenbild ist meist das Ergebnis einer Messung mit einem Stereo- oder Streifenprojektionssensor. Die Tiefenwerte sind in einem zweidimensionalen Array gespeichert, wodurch die Nachbarschaft von Messpunkten festgelegt ist.

Von Tiefenbildern gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Arten:

- die Messpunkte sind in einem äquidistanten Raster (z.B. durch Nutzung eines telezentrischen Objektivs)

- die Messpunkte sind durch eine perspektivische Abbildung entstanden, bei geringer Verzeichnung sind die Daten winkel-äquidistant.

Ein Tiefenbild kann eindeutig in eine Punktwolke überführt werden. Ein Normalenvektor für jeden Datenpunkt kann aus der Berechnung der lokalen Gradienten geschätzt werden. Aufgrund des differentiellen Charakters der Gradientenberechnung hat das Rauschen auf die einzelnen Datenpunkte einen großen Einfluss auf die Richtung des so berechneten Vektors.

Oberflächen-Netze

Oberflächennetze oder *Meshes* bestehen aus Punktwolken mit Verbindungslisten, die Polygone beschreiben. Bei allgemeiner Lage der Polygonpunkte ist die Oberfläche nicht eindeutig zu bestimmen. Daher werden häufig reine Dreiecksnetze genutzt, da somit die Ebenheit und damit die Eindeutigkeit direkt festgelegt wird. Die Normalenvektoren können per Dreieck (wie im STL-Dateiformat) oder per Punkt gespeichert werden.

Voxel

Voxel sind Volumenpixel die den Raum gleichmäßig in den Koordinatenrichtungen aufteilen. Durch diesen Datentyp ist nicht nur die Beschreibung von Oberflächen möglich sondern des gesamten Volumens möglich. Bei hoher Auflösung wird hier sehr viel Speicherplatz benötigt, da im Unterschied zur Oberfläche die Datenmenge mit der dritten statt der zweiten Potenz wächst.

Suchbäume

Zur Einpassung von Geometrien und zur Verbindung von benachbarten Datenpunkten zu einer Oberfläche müssen häufig Punkte gesucht werden, die in der Nähe anderer Punkte liegen. Über die Datenstruktur des KD-Baums [26] wird der Raum durch iterative Bisektion in Quader unterteilt, so dass bei der Bestimmung von Punkten in der Nachbarschaft eine deutlich geringere Suchzeit benötigt wird.

3.5.2 Registrierung

In der Registrierung werden die Daten eines Sensors in ein globales Koordinatensystem überführt. Wenn der Sensor für sich kalibriert ist, müssen die Datenpunkte nur durch eine Starrkörpertransformation in das globale System überführt werden. Diese Transformationen können durch eine externe Lagemessung oder durch direkte Einpassung der Messdaten des Sensors bestimmt werden.

Lagemessung

Die einfachste Art der Registrierung ist die Nutzung von Informationen aus der Positionierung. So kann zum Beispiel ein Koordinaten-Messsystem zur Positionierung genutzt werden oder Präzisionsachsen [51]. In [92, 27] wird ein Industrie-Roboter mit kalibrierter Kinematik genutzt um die Messdaten zu registrieren.

Der Lasertracker [65], der für sich genommen nur eine Position misst, wird häufig unter Zuhilfenahme mit zusätzlicher Vorrichtungen zur Lagebestimmung genutzt. Von den drei Herstellern für Lasertracker gibt es jeweils Systeme zur Lagebestimmung.

Von *Leica Geosystems* gibt es den *T-Mac* und den *T-Probe*, deren Position und Orientierung durch die Fusion von Lasertracker- und Photogrammetriedaten bestimmt werden. Für die Systeme werden typische Genauigkeiten von $\pm 50\mu m$ in der Position und $0,01^\circ$ für die Rotation angegeben. Die deutlich höhere Positionsunsicherheit als beim einfachen Lasertracker erklärt sich mit dem Mindestabstand von fünf Metern. Durch die Nutzung einer Zoomoptik ist die Messunsicherheit im Bereich von 5 bis 15 Metern gleich [62].

Von *Faro* gibt es ein 6DOF System das auf ein Lasertracker aufsetzt, dass eine *Messleistung* von $80\mu m + 5\frac{\mu m}{m}$ angibt [24]. Die Definition des Wortes *Messleistung* wird nicht gegeben.

Der *SmartTracker* von *API* nutzt ein aktiven Reflektor, der die Winkel zum Laserstrahl misst. Einzig die Orientierung als Drehung um den Laserstrahl als Achse, kann so nicht festgelegt werden. Dieser Freiheitsgrad wird durch einen Beschleunigungssensor mit Hilfe des Gravitationsvektor festgelegt.

In [40] wird ein System beschrieben dass keine zusätzlichen Sensoren zur Lagebestimmung nutzt, sondern durch die Kreisführung eines Retroreflektors mit Synchronisation die Lage bestimmt. Trotz des einfachen Aufbaus und des geringen Zusatzaufwandes,

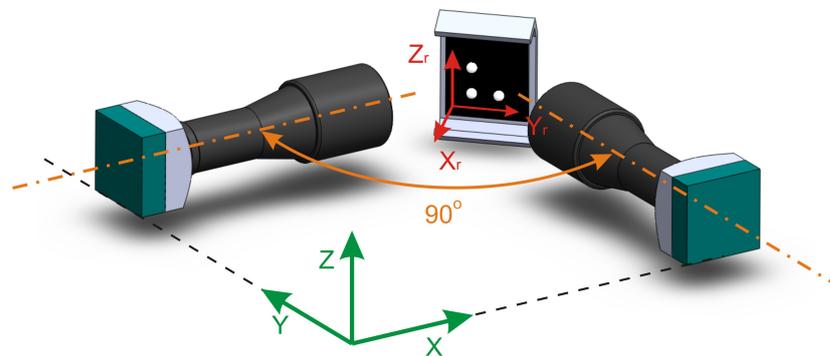


Abbildung 3.5: Lagebestimmung mit zwei telezentrischen Objektiven [49]

wenn ein Lasertracker schon vorhanden ist, erweist sich dieses Messsystem als sehr genau.

Des Weiteren ist es möglich durch Methoden der Photogrammetrie die Lage zu bestimmen. In [49] wird ein Messsystem vorgestellt, dass in einem Volumen von $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ durch Photogrammetrie eine Genauigkeit von $1,4 \mu\text{m}$ bei einer Messfrequenz von 110 Hz erreicht (Abb.: 3.5). Durch die Nutzung telezentrischer Objektive ist die Genauigkeit und Auflösung in diesem Fall über das gesamte Messvolumen gleich.

Bei der Verwendung von perspektivischen Objektiven ist die Angabe der Genauigkeit abhängig vom Abstand zu den Kameras und kann als proportional zum Abbildungsmaßstab angesehen werden [18].

Marker

Wenn auf oder neben dem Messobjekt Marker platziert werden, welche in den Messdaten sichtbar sind, so können die Messfelder anhand der Marker zusammengesetzt werden [6]. In [74] wird ein System *Virtual Landmarks* benannt, indem die Marker über ein Übersichtssystem projiziert werden. Bei virtuellen Marken darf die Sichtlinie zwischen Übersichtssystem und Messobjekt nicht unterbrochen werden, da die Marker sonst nicht projiziert werden können.

Damit Marker oder virtuelle Marker eine Transformation festlegen können, müssen mindestens je drei Marker in jedem Messfeld sichtbar sein. Gerade bei kleinen Messfeldern ist dies problematisch, da sehr viele Marker auf der Messobjektoberfläche verteilt

werden müssen und sie damit verdecken.

Lage aus den Messdaten

Die freie Registrierung von Messdaten ist mit dem *Stitching* aus der Bildverarbeitung verwandt. Es wird versucht sich überlappende Messfelder in einander einzupassen.

Einer der häufigsten Algorithmen ist das *Iterative Closest Point* Verfahren (ICP). Das Verfahren wurde in [7] vorgestellt und bildet mit vielen daraus entstandenen Algorithmen die Basis zur freien Registrierung von von Punktwolken und Oberflächennetzen. Der Algorithmus wird in vier Einzelschritte unterteilt:

- Für jeden Punkt im Datenset A wird der nächste Punkt in Datenset B bestimmt
- Bestimmung der Starrkörpertransformation für diese Punktezuordnung
- Datenset B wird transformiert
- Berechnung der Restabweichung; falls zu groß: wiederhole ab Schritt 1

In [89] werden die Varianten zur Verbesserung des Basiskonzeptes vorgestellt und diskutiert. Zu den Basisschritten werden *Auswahl*, *Wichtung* und *Ausschluss* hinzugenommen.

Ein Hauptproblem von ICP-Algorithmen sind lokale Minima in der Iteration. Gerade bei dünnwandigen Bauteilen kann die Rückseite auf die Vorderseite eingepasst werden. Da sich die am nächsten liegenden Punkte so nicht ändern, konvergieren die Daten in eine falsche Pose. In [78] wird ein *Particle Swarm* gewählt um in der Iteration aus lokalen Minima heraus zu kommen.

Des Weiteren können die Probleme des ICP auch unter Zuhilfenahme des Normalenvektors verringert werden, da so das Einpassen von Vorder- auf Rückseite durch Ausschluss von Punktepaaren mit großen Winkeln zwischen den Normalenvektoren unmöglich ist [89]. Um möglichst eindeutige Übereinstimmungen zu bekommen, wird Normal-Sampling [20] genutzt, um Oberflächenabschnitte mit möglichst gleichverteilten Orientierungen zu nutzen.

Über die Methode Punkt-Ebene (Abb.:3.6) kann verhindert werden, dass es beim Einpassen von Ebenen zu Querversatz durch die Verteilung der Punkte kommt. Da Oberflächen zum großen Teil aus glatten Segmenten, die lokal als Ebene angenähert werden können, bestehen, ist für die Nutzung dieser Punkt-Ebene-Ansätze das

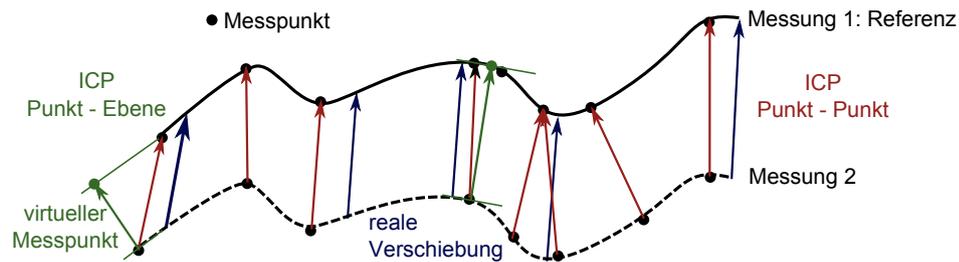


Abbildung 3.6: Registrierung mit verschiedenen ICP-Methoden

Normalen-Sampling, die Auswahl der Punkte nach möglichst gleich verteilten Normalen sinnvoll, da diese lokalen Ebenen immer nur eine Richtung festlegen können [89].

In [14] wird das ICP-Konzept um kleine lokale Verformungen erweitert, um Abweichungen in den Übergängen der Messfelder zu verringern.

Ein anderer Ansatz als der ICP ist das Finden von korrespondierenden Punkten [8]. Das Finden von zueinander gehörenden Punktepaaren in zwei Messdatensätzen ist stark von der Art der Messdaten abhängig. Oft können nur sehr spezielle Punkte gefunden werden. Auf Messungen von glatten Oberflächen, kann diese Methode nicht angewendet werden, da keine eindeutigen Punkte gefunden werden.

Ein weiteres Problem tritt auf wenn mehr als zwei Sets aus Messdaten eingepasst werden müssen. Aufgrund von Messabweichungen und Restfehlern in der Registrierung zueinander wird die Einpassung inkonsistent oder mehrdeutig, da es mehrere Möglichkeiten in Reihenfolge und Wichtung gibt, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. In [45] werden die Daten nacheinander lokal und global zueinander eingepasst, wonach in einer globalen Optimierung der Gesamtfehler minimiert wird.

3.5.3 Fusion von 3D Messungen

Im Allgemeinen wird es auf dem Werkstück Oberflächenbereiche geben, die in unterschiedlichen Posen gemessen wurden. Aufgrund der Messunsicherheiten des Sensors und der Lagebestimmung, werden die 3D-Daten nicht exakt übereinander liegen. Methoden die in 3.5.2 beschrieben wurden können genutzt werden um die Abstände zwischen den Datensätzen zu verringern, trotzdem ist gerade bei Oberflächen, die als Netz beschrieben werden, möglich, dass in den Überlappbereichen die Netze nicht exakt übereinander liegen und somit der Ort der Oberfläche nicht eindeutig ist. In [91] werden Methoden zur Fusion die für Daten unterschiedlicher Auflösung untersucht. Um Unstetigkeiten,

Kanten und Spalten, in der zusammengesetzten Geometrie zu verhindern, werden in den Überlappbereichen sanfte Übergänge zwischen den Messfeldern auf der Basis von Splines erzeugt.

Oft bleiben Löcher in den fusionierten Oberflächen. Werden geschlossene Oberflächen benötigt, können kleine Löcher durch Spline-Oberflächen-Elemente geschlossen werden [71].

3.6 Multiskalen-Messtechnik

Der Begriff "multiskalig" wird in der wissenschaftlichen Literatur sehr unterschiedlich genutzt. In Bezug auf die Messtechnik ist in dieser Arbeit die Nutzung von Sensoren mit unterschiedlichen Auflösungen und die Kombination der Messdaten gemeint.

In der Fertigungsmesstechnik wird die Geometrie eines Werkstückes in die Skalenbereiche Gestalt, Welligkeit und Rauheit unterteilt [22]. Um die Funktion eines Werkstückes zu gewährleisten, muss es in diesen Bereichen innerhalb der jeweiligen Spezifikationen bleiben.

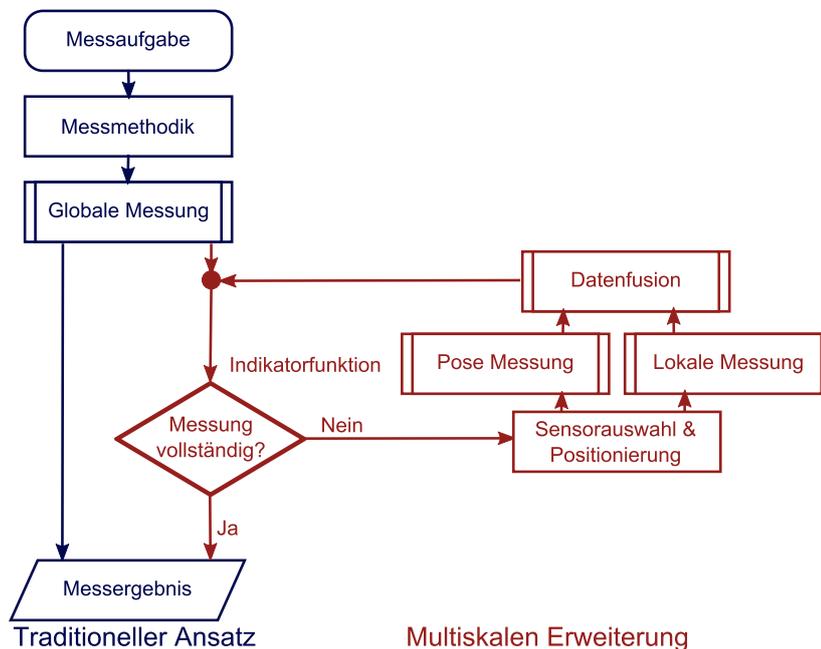


Abbildung 3.7: Erweiterung der Messung durch Multiskalen-Methoden über die Indikatorfunktion

Gerade für die Rauheitsbestimmung oder Messung der Mikrogeometrie wird hoch

genaue Sensorik benötigt. Mit diesen Sensoren ist es jedoch sehr zeitaufwändig große Oberflächenbereiche zu messen. Die Idee der Multiskalen-Messtechnik ist es nun, schnelle und genaue Sensoren zu kombinieren, um lokale Abweichungen in der Mikrogeometrie schnell zu detektieren und nur kleine Bereiche um die Beschädigung fein zu messen und so zu charakterisieren.

Die Multiskalen-Messtechnik wie in [69, 68] beschrieben, definiert sich als Erweiterung des traditionellen Messablaufs mithilfe einer Indikatorfunktion (siehe Abb.: 3.7). Wenn in dieser Indikatorfunktion Hinweise auf feinskalige Defekte gefunden werden, wird ein passender Sensor ausgewählt und positioniert, um die Daten der darauffolgenden hochauflösenden lokal zu messen. Über eine Posemessung referenziert wird diese Messung mit den globalen Daten fusioniert. Der Kreislauf hört erst auf, wenn allen Hinweisen nachgegangen wurde und somit mögliche Defekte mit der benötigten Auflösung erfasst wurden.

Die globale Messung muss nicht immer eine einzelne Messung sein, zum Beispiel in [63] wird mit einem schnell messenden Streulichtsensor nach Defekten in einer Dichtfläche gesucht und der Schaden genauer mit einem Weißlichtinterferometer oder einem chromatischen Punktsensor gemessen und charakterisiert.

Wichtig für den wirtschaftlichen Einsatz ist besonders der (Zeit-)Gewinn durch das Erkennen intakter Teile durch die Indikatorfunktion. In [57] werden die Messgeschwindigkeiten je Oberfläche von unterschiedlichen Sensoren gegenüber gestellt. Besonders herauszuheben ist die geringe Geschwindigkeit von 3D-Mikroskopen (Weißlichtinterferometrie, Konfokal-Mikroskope), die zur Bestimmung von Rauheiten allerdings benötigt werden. Die Reflexionseigenschaften, welche von den Änderungen in den Mikrostrukturen abhängig sind (siehe Kap.: 3.2), können durch Bildverarbeitung mit Makrokamerasystemen erfasst werden.

In [16] wird ein Ansatz zur Vereinfachung des Designs von Multiskalen-Messsystemen vorgestellt. Es werden auf Basis von neuronalen Netzen und genetischen Algorithmen Systeme mit Auswertungsalgorithmen entwickelt. Durch den Ansatz konnte das benötigte Fachwissen und die benötigte Erfahrung für die Auslegung und Programmierung verringert werden.

Ein wichtiger Aspekt der multiskalen Messtechnologie ist die Kalibrierung der Koordinatentransformationen zwischen den Sensoren. Oft müssen eigene Kalibrierkörper entwickelt werden (siehe.: [33]) um für die unterschiedlichen Sensoren geeignet zu sein.

Je nach Komplexität der Testgeometrie wird auch das Finden von optimalen Messposen für jeden Sensor eine Herausforderung. Bei einer vorher bekannten Geometrie können die Messposen modellbasiert gefunden werden [34].

In [91] wird ein weiterer Kernpunkt der multiskalen Technologie, die Registrierung und Fusion der Daten, betrachtet. Im Gegensatz zu anderen Multiskalen-Ansätzen werden die Bereiche für die unterschiedlichen Auflösungen hier im Vorhinein festgelegt. Die Gestalt der Wendschneidplatten wird mit Streifenprojektion gemessen und die Verschleißzone hochauflösend durch ein Fokusvariationssensor erfasst. Die Daten werden zur Bewertung des Verschleißes der Schneiden eingesetzt.

3.7 Automatisierungstechnik

Der Fokus dieser Arbeit fällt in den Bereich der Messtechnik. Dennoch ist gerade bei der Multiskalen-Messtechnik (siehe Kap.: 3.6) ein Zusammenspiel vieler Komponenten notwendig, das nur durch Methoden der Automatisierungstechnik effizient verwirklicht werden kann.

3.7.1 Robotik

Industrieroboter mit serieller Kinematik sind ein Standardelement der Automatisierungstechnik geworden. Häufig werden Roboter mit 6 Drehgelenken genutzt, die es durch diese 6 Freiheitsgrade ermöglichen, den Endeffektor, das Werkzeug oder den Sensor in Position und Orientierung festzulegen. Durch die Länge der Glieder, die minimalen und maximalen Gelenkwinkel und mögliche Eigenkollisionen beschränkt, werden die möglichen Positionen und Lagen als Arbeitsraum definiert.

Kinematik

Die Kinematik eines Roboters beschreibt den Zusammenhang zwischen den Stellwerten der Aktoren und der Position und Lage des Endeffektors, an dem das Werkzeug befestigt wird. Die Kinematik wird häufig mit der Hilfe von Denavit-Hartenberg-Parametern (Tab.: 3.1) aufgestellt [36] und aus einzelnen Transformationen zusammengesetzt.

Um die sechs räumlichen Freiheitsgrade unabhängig voneinander vorgeben zu können, muss die Kinematik mindestens sechs Achsen besitzen. Während die direkte Ki-

nematik, die aus Gelenkwinkeln die Lage bestimmt, ist die inverse Kinematik, die Bestimmung der Gelenkwinkel für eine Lage, im allgemeinen nicht direkt lösbar. Des Weiteren ist die inverse Kinematik auch nicht unbedingt eindeutig.

DH-Parameter TX90	α_i	a_i in mm	d_i in mm	q_i
Schulter	$\pi/2$	50	0	q_1
Arm	0	425	50	q_2
Ellenbogen	$\pi/2$	0	0	q_3
Unterarm	$\pi/2$	0	425	q_4
Handgelenk	$\pi/2$	0	0	q_5
Endeffektor	$\pi/2$	0	100	q_6

Tabelle 3.1: Denavit Hartenberg Parameter des TX90 Roboterarms

Für einen *anthropomorphen* Sechssachs-Roboter gibt es geometrische Vereinfachungen, welche die direkte Berechnung der inversen Kinematik ermöglichen, da sich die letzten drei Gelenksachsen im *Handgelenk (Wrist)* kreuzen. Anschaulich wird erst aus der gewollten Lage die Position der Wrist bestimmt. Da die letzten drei Achsen keinen Einfluss auf die Position der Wrist haben, können so die ersten drei Gelenkwinkel berechnet werden. Die Stellungen der drei Wristgelenke werden nun so gewählt, dass dieses Kardangelenk den Endeffektor korrekt ausrichtet (siehe Abb.: 3.8).

Arbeitsraum und Kollisionsvermeidung

Um eine bestimmte Pose mit einem anthropomorphen Roboter erreichen zu können gibt es bis zu acht Lösungen aus der inversen Kinematik. Die Gesamtheit der möglichen Posen wird Arbeitsraum genannt.

Für die vollständige Inspektion eines Werkstückes muss ein Sensor um das Werkstück positioniert werden können, ohne dass die Gelenke des Roboters, das Werkstück, die Werkstückhalterung und der Sensor jeweils kollidieren. Ein zusätzlicher Drehtisch erlaubt es, ein Werkstück zu messen ohne mit dem Sensor über das Werkstück greifen zu müssen [36].

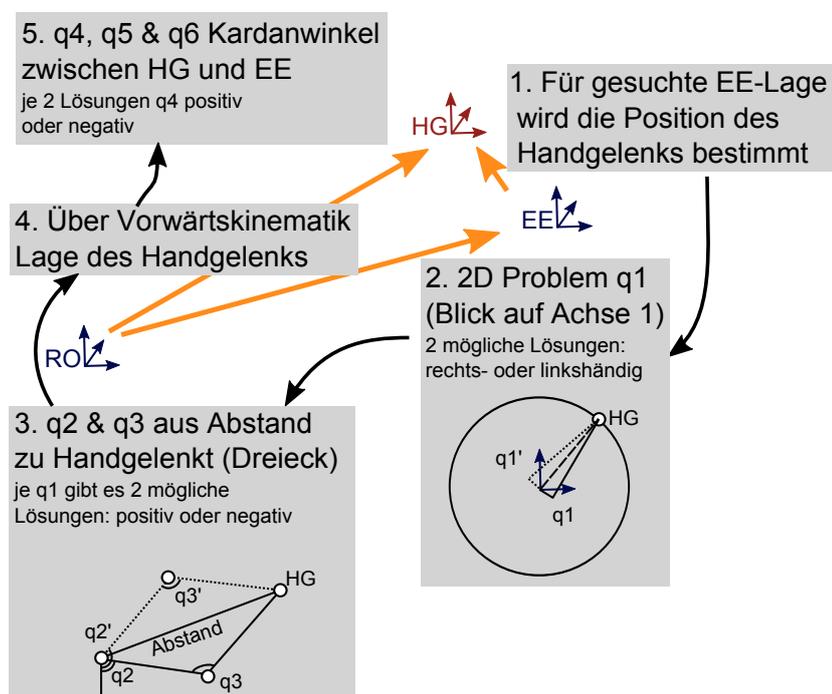


Abbildung 3.8: Direkte Berechnung der inversen Kinematik bei anthropomorphen Robotern aus Endeffektor (EE), Handgelenk (HG) und Roboterposition (RO)

Kapitel 4

Konzeption eines multiskalen Messsystems für die Inspektion von verschlissenen Triebwerkskomponenten

Für eine moderne Reparatur von Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken soll ein Inspektionssystem konzipiert werden, das für die Detektion und Messung von geometrischen Defekten in unterschiedlichen geometrischen Skalenbereichen ausgelegt ist. Für die Produktregeneration wird im Simulationspfad (siehe Kap.: 1) ein virtuelles Modell der Schaufel benötigt, um aus Reparatur-, Leistungs- und Haltbarkeitssimulationen Entscheidungen über die Reparatur zu treffen.

Der multiskalen Ansatz (siehe Kap.: 3.6) ermöglicht es, mit geringem Zeitaufwand Schäden zu erkennen und Geometriebereiche in der benötigten Auflösung zu erfassen. Die geometrischen Defekte von Turbinenschaufeln, die sich im Betrieb befanden, umfassen in ihren Ausprägungen von der globalen Bauteilverformung bis hin zu kleinsten Haarrissen ein großes Spektrum an möglichen Formen und Größen.

Als zusätzliche Anforderung soll während und nach der Reparatur geprüft werden, ob die Reparaturmaßnahmen erfolgreich waren. Hier ist neben der Formabweichung und Oberflächenqualität auch auf Poren und Risse zu achten, die vermehrt in den Wärmeeinflusszonen der einzelnen Bearbeitungsschritte entstehen.

4.1 Multiskalen-Messstrategie

Das Messsystem soll zur Eingangsbefundung, während der Reparatur und zur Qualitätsprüfung nach der Reparatur genutzt werden. In Abb.: 4.1 sind die berücksichtigten Oberflächenzustände zusammengefasst.

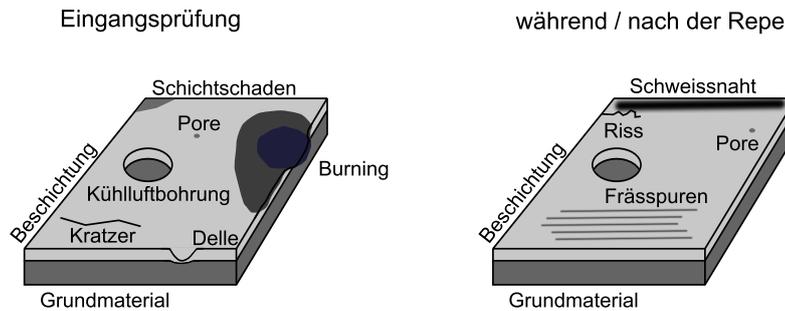


Abbildung 4.1: Oberflächenzustände bei Eingangsprüfung und während und nach der Reparatur

Bei einer neuwertigen Schaufel ist die Oberfläche beschichtet und hat als Abweichung von dieser glatten Oberfläche zusätzlich Kühlluftbohrungen, um eine Filmkühlung zu gewährleisten. Dellen, Ausbrüche, Kratzer, Poren und Schäden in der Beschichtung sind geometrische Veränderungen, die durch verschiedene Verschleißmechanismen im Betrieb entstehen. Bei dem sogenannten *Burning* ist durch chemische Reaktionen nicht nur die Geometrie sondern auch die Struktur verändert. Während der Reparatur kommen Bearbeitungsspuren durch Fräsen und Schweißnähte hinzu.

In Tabelle 4.1 sind die Oberflächenzustände den jeweiligen Indikator- und Messsystemen zugeordnet.

Dellen und Ausbrüche sind lokale konkave Geometrieänderungen, sie treten vorrangig an der Leitkante der Schaufel auf und sind häufig durch Einschläge hervorgerufen. Von der Oberflächenbeschaffenheit her müssen sie sich nicht von der intakten Oberfläche unterscheiden. Bei gerichteter Beleuchtung ist der Schaden durch einen Intensitätsgradienten mit bloßem Auge oder in einem Kamerabild zu erkennen. Um die Abweichung von der intakten Geometrie zu messen, wird ein 3D-Sensor benötigt. Die Sensoren, die mit dem Messprinzip der Streifenprojektion arbeiten, können bis in den μm -Bereich messen und sind für die Quantifizierung der Größe des Schadens ausreichend.

Die Ausdehnung und Form von Kratzern kann sehr unterschiedlich ausfallen. Bei der

Oberflächentyp	Indikatorsysteme	Messsysteme
Delle / Ausbruch	BV, SP	SP
Kratzer	BV, STR	SP, 3DM
Schichtschaden	W, (BV)	(W)
Burning	(BV, W)	(SP)
Pore	BV	3DM
Schweißnaht	-	SP
Rekonturiert (nach z.B. Fräsen)	BV SP	WLI
Riss	W, (BV)	(W,WLI)

Tabelle 4.1: Mess- und Indikatorsysteme für Oberflächenabweichungen

BV: BildVerarbeitung; SP: StreifenProjektion; STR: STReulicht; W: Wirbelstrom; 3DM: 3D-Mikroskopie

Nutzung von gerichteter Beleuchtung können sie häufig schon durch Bildverarbeitung erkannt werden. Kratzer werden durch 3D-Mikroskopie oder Streulichtsensoren erfasst [63].

Bei Schichtschäden und *Burnings* handelt es sich um Strukturschäden. Sie können durch optische Sensoren nur erfasst werden, wenn sich diese Schäden an der Oberfläche erkennen lassen. Die Veränderung der Oberflächenstruktur kann häufig als dunklere, rauere Oberfläche auch durch Bildverarbeitung erkannt werden. Mit Wirbelstromsensorik können diese Strukturschäden als Änderung der Leitfähigkeit erfasst werden [85]. Die geometrischen Abweichungen aufgrund dieser Schäden können mit einem Streifenprojektionssensor quantifiziert werden.

Aufgrund ihrer geringen Größe sind Poren in rauen Oberflächen nur schwer zu erkennen. Zum Messen der Poren eignet sich je nach Größe die 3D-Mikroskopie oder Streifenprojektion.

Für die Bearbeitungsspuren aus der Reparatur werden keine Indikatorfunktionen benötigt, da die Orte der Bearbeitung bekannt sind. Die Geometrien von Schweißnähten lassen sich gut durch Streifenprojektion erfassen und für die Bewertung der Oberfläche nach der spanenden Bearbeitung werden 3D-Mikroskope eingesetzt [84].

Risse sind als Strukturdefekte mit Optosensorik auf der Oberfläche nur anhand von

Sekundärschäden, wie z.B. Ausbrüchen, erkennbar.

Zu den Sensoren müssen geeignete Algorithmen, Kalibrierungen, Aktoriken und Referenzierungssysteme gefunden werden, um die Schadensdaten in einem gemeinsamen Koordinatensystem für die Simulation nutzbar zu machen.

4.2 Systemkomponenten

4.2.1 Aktorik

Für das Positionieren des Sensorkopfes relativ zum Werkstück ist eine Aktorik notwendig, welche die Sensoren über die Dauer der Messung hält. Des weiteren muss die Größe und Gestalt der Werkstücke beachtet werden. Als Referenzbauteil für die Produktregeneration wurde eine Hochdruckturbinenschaufel aus einem Flugtriebwerk gewählt. Funktional bestehen Turbinenschaufeln aus zwei Bereichen, dem Fuß, der über den sog. *Tannenbaum* die Schaufel mit dem Rotor verbindet, und der *Airfoil* (engl. Tragfläche), die durch die aerodynamische Wechselwirkung mit dem heißen Abgasstrahl ein Drehmoment auf die Welle des Triebwerks erzeugt. Die zu betrachtenden Turbinenschaufeln sind kürzer als 300 mm und nicht breiter als 100 mm.

Die *Airfoil* ist eine Freiformoberfläche, d.h. eine Oberfläche, die nicht aus geometrischen Primitiven besteht. Zur Untersuchung der Oberfläche ist es für die meisten optischen Sensoren von Vorteil die optische Achse nach der Normalenrichtung der Oberfläche zu wählen. Für die Untersuchung von Freiformoberflächen bedeutet dies, dass die Sensoren mit freier Orientierung um zwei Achsen im Raum ausrichtbar sein müssen. Bei Messsystemen, die auf Triangulation basieren, wie z.B. die Streifenprojektion, kommt die zweite optische Achse hinzu und für die Messung von Rillen, wie sie im Fuß der Turbinenschaufel vorkommen, muss die zweite Achse so ausgerichtet werden, dass es nicht zu Verdeckungen kommt. Durch diese Festlegung der dritten Achse der Orientierung bilden die Positionen zu diesen Sensororientierungen eine Art Hülle um das Messobjekt, die mit dem benötigten Messabstand des Sensors wächst.

Wenn das Messobjekt selber drehbar gelagert wird, kann der Arbeitsraum in dem die Sensoren positioniert werden, entscheidend verringert werden. Durch die Nutzung eines Drehtellers als Achse für das Messobjekt müssen die Sensoren nur in fünf Freiheitsgraden bewegt werden können, um alle Messposen einzunehmen. Bei der Nutzung

eines sechs-achsigen Roboterarms für die Positionierung der Sensoren hat man durch den zusätzlichen Freiheitsgrad die Möglichkeit die Kinematik zu konfigurieren, um Kollisionen zu vermeiden [36].

4.2.2 Sensorik

Die Anforderungen an Sensoren für ein Inspektionssystem zur Erfassung der Bauteiloberfläche sind: „So genau wie nötig und so schnell wie möglich.“ Diese Herangehensweise führt häufig zu einer hohen Gewichtung der Genauigkeitsanforderung und somit zu einem sehr langsamen System.

Durch den Ansatz der Multiskalen-Messtechnik kann dieses Problem gelöst werden, indem Sensoren mehrerer Messprinzipien und Auflösungen genutzt werden, um eine anforderungsgerechte, möglichst schnelle Inspektion zu gewährleisten. In [68] wird für ein Multiskalenmesssystem ein Übersichtssensor genutzt, der das gesamte Bauteil erfassen kann sowie ein feiner Sensor zur hoch genauen Erfassung der Schäden. In [69] wird der multiskalen Ansatz mit drei Auflösungen genutzt.

Das stufenweise Herangehen vom Übersichtsmesssystem zum genauesten Sensor führt zu der Problematik, dass sehr viele Sensoren nötig sein können, wenn jeweils durch die Indikatorfunktion Hinweise auf Defekte in der feineren Skala schon in der groben Skala erkennbar sein müssen.

Wenn von dem hochauflösenden System ausgegangen wird, können jeweils größere Messsysteme gewählt werden, in denen die Defekte gerade noch sichtbar sind. Die Kopplung zwischen dem groben und dem feineren Messsystem kann nicht über die Auflösung oder Messgenauigkeit begründet werden, sondern muss über die Detektierbarkeit der zu erkennenden Abweichungen geschehen. Insbesondere die Änderung des Reflexionsverhaltens einer Oberfläche ist in einer sehr groben Skala noch zu detektieren, wenn die Änderung in einem sehr kleinen Skalenbereich stattfindet [63].

Auflösung und Genauigkeit

Die Regeneration von Triebwerkskomponenten wird durch Luftfahrtbehörden und Firmen geregelt. Geometrie, Toleranzen und Kennzahlen sind im Allgemeinen nicht öffentlich zugänglich. Die feinste relevante Strukturgröße bei Turbinen- und Verdichterschaufeln ist die Rauheit, die sich stark auf Verluste in der Randzone der Strömung



Abbildung 4.2: Aufnahme eines 1 Cent Stückes mit a) telezentrischer Kamera b) Mikrostreifenprojektionssystem c) Weißlichinterferometer

auswirkt [42, 9]. Neben der Rauheit sind auch Einschlüsse wichtig, die Dellen oder Ausbrüche in der Leitkante von Turbinenschaufeln hinterlassen. Diese bewegten sich bei Beispielbauteilen im Bereich von $10 \mu m$ bis $150 \mu m$ Tiefe bei einer lateralen Größe im Millimeterbereich.

Kompromiss aus Inspektionszeit und Genauigkeit

Die Oberfläche eines Bauteils muss vollständig erfasst werden. Eine grobe Einteilung der Sensoren kann nach der Messzeit pro Oberfläche erfolgen. Wie in [57] am Beispiel dreier Sensoren zu sehen ist, kann die Erfassungsgeschwindigkeit in Oberfläche pro Zeitdauer bei hoher Auflösung um den Faktor 15.000 sinken.

Wenn es durch einen schnelleren Sensor möglich ist den Bereich, der mit hoher Auflösung erfasst werden muss, zu verringern, kann somit die Inspektionsdauer für das gesamte Bauteil deutlich verringert werden. Wenn die Aufnahmezeiten der Sensoren, welche die Daten aus Abbildung 4.2 aufgenommen haben, mit der erfassten Fläche in Relation gebracht werden, so wird bei dem Bildverarbeitungssystem durchschnittlich $\sim 6090 \frac{mm^2}{s} = \frac{408mm^2}{0,067s}$, bei dem Mikrostreifenprojektionssystem $\sim 18 \frac{mm^2}{s} = \frac{108mm^2}{6s}$ und bei dem Weißlichinterferometer $\sim 0,2 \frac{mm^2}{s} = \frac{0,29mm^2}{1,5s}$ aufgenommen. Es ist zusätzlich zu beachten, dass für jede weitere Messung die Aktorik neu zugestellt werden muss. So kommen noch zusätzliche Ausschwingzeiten, die die Inspektionszeit verlängern, hinzu.

Die drei in Abbildung 4.2 dargestellten Daten der verschiedenen Sensortypen, bieten jeweils einen Zugewinn an Auflösung und Information aus der Messung und zugleich einen Skalierungsfaktor, der es ermöglicht, gleiche Merkmale wiederzufinden.

4.2.3 Referenzierung

Wie in Kapitel 3.5.2 dargestellt, gibt es eine große Auswahl an Methoden zur Referenzierung. Da Marker aufgrund des geringen Messbereiches der Sensoren zu aufwendig wären, blieben noch “virtuelle Marker“ [74] oder ein externes Messsystem zur Verfolgung der Sensorkopflage in Betracht. Da die Turbinenschaufel eine recht komplexe Geometrie hat, welche die Sichtbarkeit der “virtuellen Marker“ für eine Übersichtskamera verdecken kann, wurde im Rahmen dieser Untersuchung von diesem Konzept Abstand genommen.

Zur Referenzierung des Sensorkopfes stehen photogrammetrische und Lasertrackerbasierte Methoden im Rahmen der Untersuchungen zur Verfügung. Die Genauigkeit einer photogrammetrischen Lagebestimmung kann sehr hoch sein [49], ist jedoch proportional zur Größe der Messvolumens [18]. Aufgrund der unterschiedlichen Bauteilgrößen wäre ein photogrammetrisches Verfahren auf die maximale Bauteillänge von 300 mm Länge auszulegen. Ein Lasertracker hat eine hohe Grundgenauigkeit von $\pm 15 \mu\text{m}$ und die Unsicherheit steigt nur mit $5 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ an [62].

Um die Problematik der Verdeckung zu umgehen und über ein großes Messfeld eine hohe Genauigkeit zu erzielen, wird zur Referenzierung ein Lasertracker gewählt.

4.3 Zieldefinition

Für die Inspektion von verschlissenen Teilen wird ein Messsystem benötigt, das Schäden erkennen und dreidimensional messen kann. Für eine schnelle und vollständige Untersuchung des Werkstückes bietet sich ein Kamerasystem mit variabler Beleuchtung an, womit über Bildverarbeitung und Reflektanzanalyse viele Schäden erkannt werden können.

Für Rauheits- und Mikrostrukturmessungen wird ein sehr hochauflösendes Messgerät benötigt, wie z.B. ein Weißlichtinterferometer oder ein konfokales Mikroskop. Diese Sensorik wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht, es werden jedoch erste Vorarbeiten durchgeführt.

Um den Skalensprung zwischen Makro-Bildverarbeitung und 3D-Mikroskopie zu überbrücken, wird ein Streifenprojektionssensor vorgesehen, der mit einer Auflösung im einstelligen Mikrometer-Bereich Schäden hochauflösend erfassen kann.

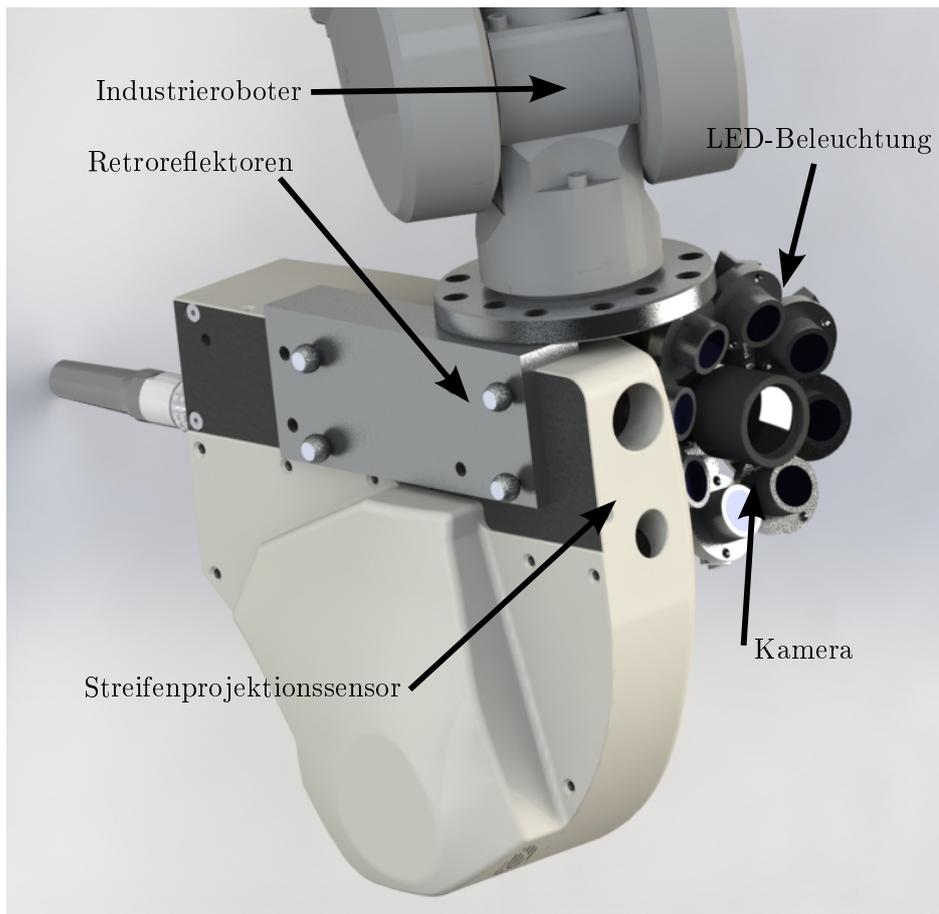


Abbildung 4.3: CAD-Modell des geplanten Sensorkopfes

Für die freie Positionierung der Sensoren ist ein Industrieroboter vorgesehen. Zusätzlich wird das Werkstück auf einer Drehachse gelagert, um die zu untersuchende Seite immer dem Messsystem zudrehen zu können und so ein Übergreifen, welches zu Kollisionen führen kann, zu vermeiden.

4.4 Angestrebte Messstrategie

Für die Untersuchung der Bauteile müssen aus den einzelnen Sensordaten Ergebnisse zusammengesetzt werden. Zusätzlich müssen die Sensoren für jede Messung positioniert und referenziert werden.

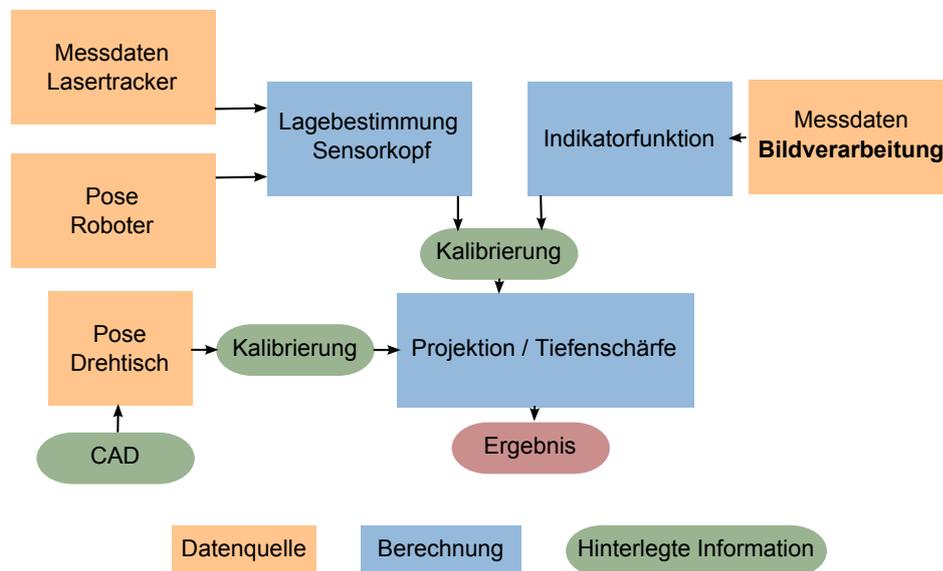


Abbildung 4.4: Datenverarbeitungskonzept für die Bildverarbeitung

4.4.1 Bildverarbeitung

Die Lage des Sensorkopfes, die zur Referenzierung notwendig ist, wird durch Lasertracker und Roboter bestimmt (siehe Abb.: 4.4). Mit Hilfe der Kalibrierung der Koordinatensysteme können die Ergebnisse aus der Indikatorfunktion in Bauteilkoordinaten umgerechnet werden. Da die Tiefeninformationen im Bild fehlen, kann ein von der Tiefenschärfe abhängiger Bereich als möglicher Ort des Defektes bestimmt werden. Falls die CAD-Geometrie bekannt ist, und die Lage der Schaufel eingepasst wurde, kann

auch der mögliche Ort des Defektes auf die Sollgeometrie projiziert werden. Die ungefähre Lage der Defekte kann so auf ein kleines Volumen eingeschränkt werden. Die Posen zur Aufnahme sind vorab als Messplan hinterlegt.

4.4.2 Streifenprojektion

Die Hinweise auf Defekte aus der Bildverarbeitung werden genutzt, um die notwendigen Posen für die hochauflösende dreidimensionale Erfassung der möglichen Defekte zu berechnen. Falls Teile der Geometrie grundsätzlich erfasst werden sollen, so müssen diese Posen zusätzlich hinterlegt sein. Wie bei der Bildverarbeitung wird auch bei der Streifenprojektion Roboter und Lasertracker zur Referenzierung genutzt (siehe Abb.:4.5). Anders als bei der Bildverarbeitung ist keine Sollgeometrie notwendig, die Daten können direkt über die kalibrierte Transformation ins Objektkoordinatensystem überführt werden.

Um das entstandene 3D-Modell zusammenzuführen, kann mit den Methoden der Datenfusion aus den Einzelmessungen ein größerer Bereich zusammengesetzt werden.

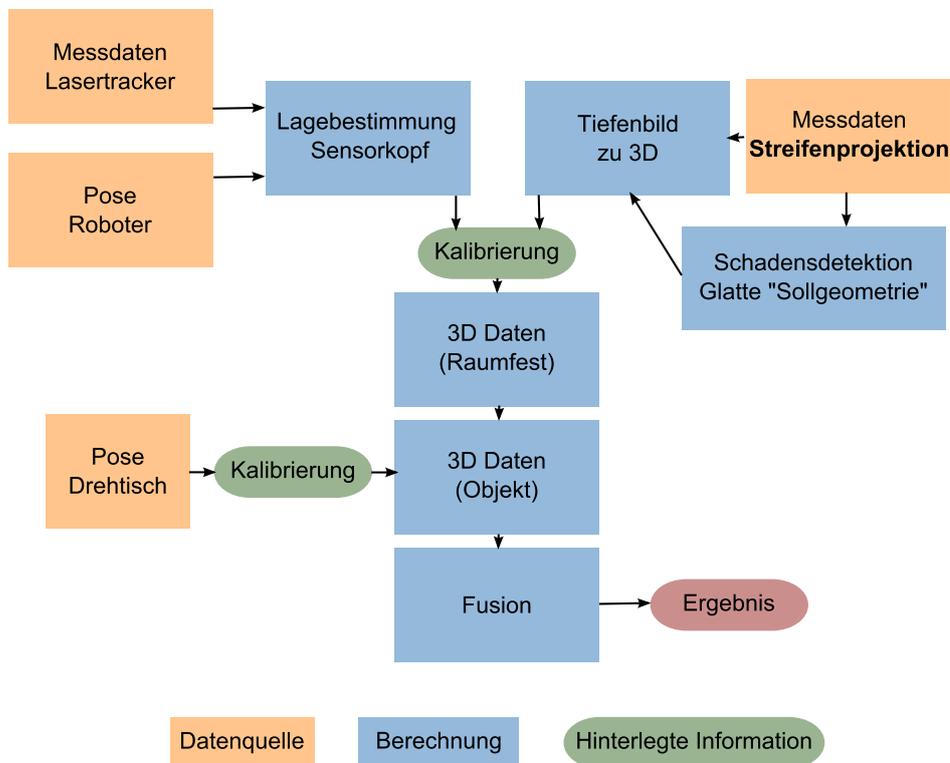


Abbildung 4.5: Datenverarbeitungskonzept für die Streifenprojektion

4.4.3 Zusammenfassung der Multiskalen-Strategie

Die angestrebte Messstrategie folgt dem Ansatz der multiskalen Messtechnik (vgl. Abb.: 3.7). Vorgesehen sind drei Stufen der Sensorik: Bildverarbeitung, Streifenprojektion und Weißlichtinterferometrie.

Die Mikrostrukturmessung mittels Weißlichtinterferometrie wird jedoch vorerst ausgeklammert und erst in der Zukunft dem Messsystem hinzugefügt. Daher wird Sie in dieser Arbeit nicht weiter ausgeführt.

Anders als in anderen Projekten der multiskalen Messtechnik wird es bei verschlissenen Turbinenschaufeln nicht möglich sein nur eine Indikatorfunktion zu nutzen, da die Defekte sich in ihrem Auftreten und ihrer Nachweisbarkeit nicht mit einem einzelnen System identifizieren lassen. Daher wird der Ansatz durch Daten aus anderen Inspektionssystemen erweitert werden müssen.

Zu der multiskalen Messung kommt eine multiskalen Auswertung hinzu, indem bei der Datenreduktion in der 3D Messung Bereiche mit unterschiedlicher Messpunktdichte genutzt werden. Dies ermöglicht eine hoch aufgelöste Speicherung der Defekte, sodass die Datenmenge des Gesamtmodells nicht zu groß für die Darstellung auf einem herkömmlichen PC wird.

Kapitel 5

Modellierung der Komponenten

Durch die hohe Zahl an Komponenten, die sich auf die Messung auswirken, kommt es zu einer hohen Zahl an Einflüssen auf den Messwert (siehe Abb. 5.1). Neben der rein theoretischen Betrachtung wurden viele Einflüsse und Streuungen auch direkt aus Wiederholungsmessungen an Kalibriernormalen abgeschätzt. Herstellerangaben zu einzelnen Komponenten wurden überprüft und fließen in die Betrachtung ein. Die Einflüsse auf das System wurden nach Ishikawa in Abb.: 5.1 in Anlehnung zu [38] aufgestellt.

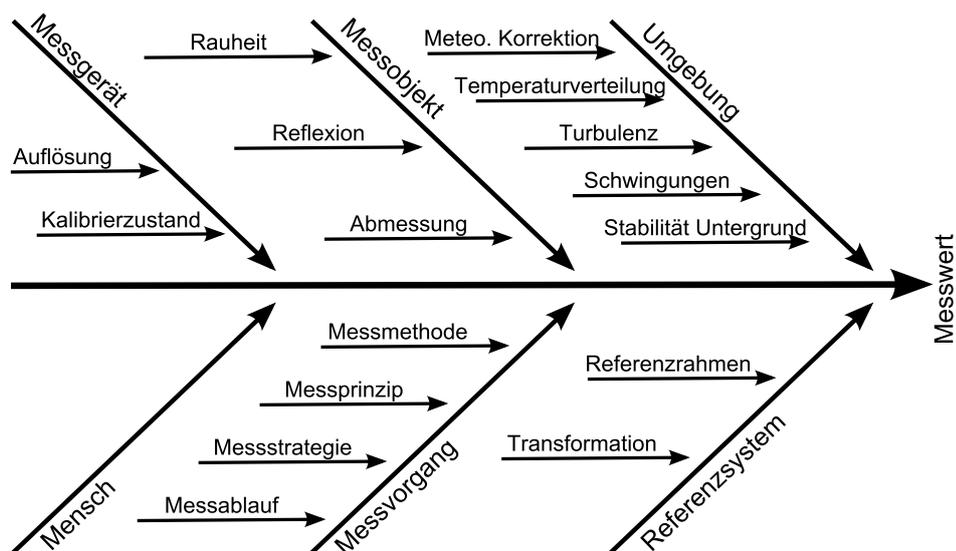


Abbildung 5.1: Gliederung des Einflüsse auf das Messergebnis nach Ishikawa

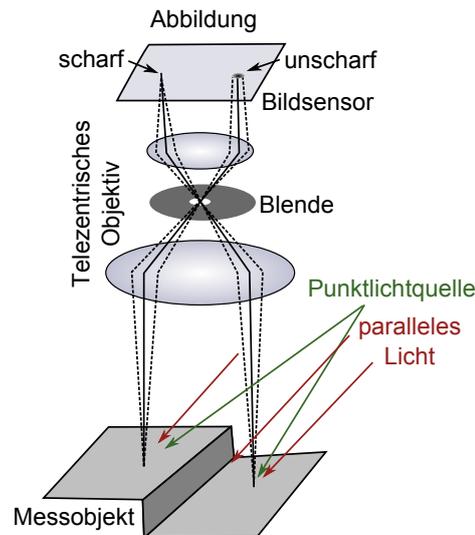


Abbildung 5.2: Szene aus Sicht einer telezentrischen Kamera

5.1 Sensormodelle

5.1.1 Kameramodell

Aus der Bildverarbeitung sind verschiedene Arten von Kameramodellen bekannt. Oft wird rein auf die geometrische Abbildung Wert gelegt, da in dieser Arbeit auch direkte Rückschlüsse aus Helligkeitswerten erfolgen, muss die gesamte Messkette (siehe Abb.: 5.2) von dem Licht von der Oberfläche hin zu einem digitalen Intensitätswert betrachtet werden. Des weiteren spielt die Tiefenschärfe bei den verwendeten Objektiven eine große Rolle.

Für die Helligkeitsabbildung werden die CCD-Sensoren als linear zur Lichtleistung angenommen, wenn der Sensor nicht in der Sättigung ist [97]. Für Pixel in der Sättigung, und deren Nachbarn, wird kein Helligkeitswert angenommen, da er durch Blooming unbrauchbar sein könnte. Es wird angenommen, dass das Helligkeitssignal mit einem mittelwertfreiem Rauschen überlagert ist.

Geometrische Abbildung

Die Abbildung der Kamera mit telezentrischem Objektiv wird rein über eine affine Abbildungsmatrix beschrieben (siehe Kap.: 3.3.1). Da das Modell der affinen Kamera die Entfernung von der Kamera vollkommen vernachlässigt, die reale Kamera aber durch die Tiefenschärfe ein beschränktes Messvolumen besitzt, muss der Abstand der Schär-

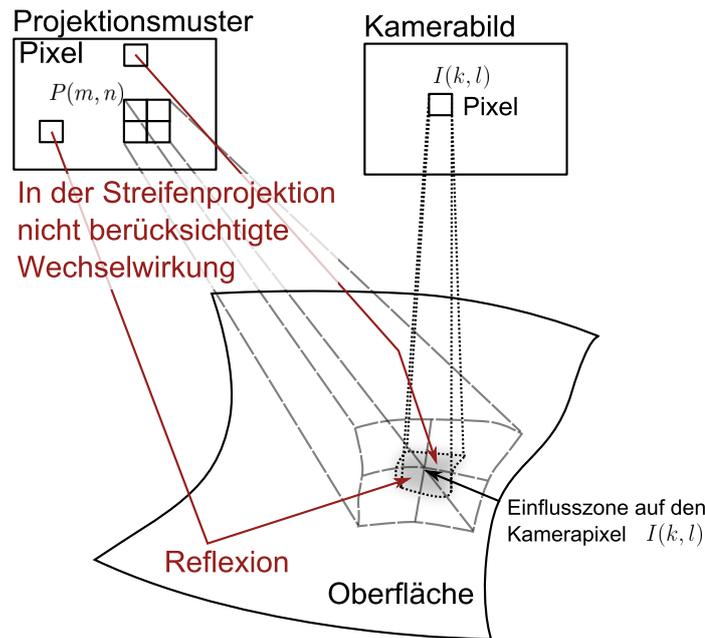


Abbildung 5.3: Wechselwirkung in projizierten Mustern

feebene noch zusätzlich berücksichtigt werden. So wird das Messvolumen als Quader mit der Tiefe, die der Tiefenschärfe entspricht, angenommen. Objekte außerhalb dieses Bereiches, die auf den Sensor abgebildet werden, können durch ihre mangelnde Schärfe als außerhalb des Messbereichs liegend identifiziert werden.

5.1.2 Streifenprojektion

Das verwendete Streifenprojektionssystem (siehe Kap.: 6.1.4) wird mit der Software und Kalibrieremethode des Herstellers genutzt. So werden die Oberflächenpunkte die im Messvolumen, von Kamera und Projektor gesehen werden, in ein äquidistant gerasertes Tiefenbild umgerechnet.

Wie in Kap.: 6.1 weiter ausgeführt, ist die Kalibrierprozedur des Herstellers relativ einfach gehalten und nutzt nur die Mitte des Messbereiches, um das gesamte Messvolumen zu kalibrieren. Um die Ungenauigkeiten aus dieser Prozedur zu verringern wird durch die Aufnahme vieler Probemessungen einer Kalibrierebene zusätzlich eine 3D Verzerrungsmatrix genutzt, um genauere Messwerte zu erhalten [13].

Aus der Korrespondenz von Projektorpixel zu Kamerapixel wird in der Streifenprojektion ein Tiefenwert errechnet. Sämtliche Algorithmen gehen davon aus, dass jeder Oberflächenpunkt vom Projektor durch eine Sequenz von Schwarzweiß- oder Graustu-

fenbildern unter Zuhilfenahme von geometrischen Einschränkungen eindeutig zugeordnet wird. Gerade bei konkaven Geometrien kann dies eine unzulässige Vereinfachung sein (siehe Abb.: 5.3), da die orts aufgelösten Musterfolgen durch Reflexion an der Oberfläche andere Oberflächeausschnitte mitbeleuchten, wodurch die Eindeutigkeit der Zuordnung nicht mehr gegeben ist. Diese indirekte Beleuchtung kann daher als Maß für die mögliche Qualität der Daten dienen.

5.2 Referenzierung

5.2.1 Roboter

Der Sensorkopf mit den Sensoren zur Erfassung der Bauteile wird von einem 6-Achs Industrieroboter positioniert. Aufgrund der seriellen Kinematik und der wärmebedingten Ausdehnung ist die absolute Positioniergenauigkeit eines Roboters zu gering um die Messfelder in der vorliegenden Messaufgabe zu referenzieren. Interessant ist hingegen jedoch die Genauigkeit der Orientierung. Die direkte Kinematik berechnet Position und Orientierung aus den Gelenkwinkeln und den Parametern (Kap.: 3.7.1) des Roboters.

In das Unsicherheitsbudget müssen zwei große Einflüsse aufgenommen werden: die Unsicherheit der Achsencoder und die wärmebedingte Verformung. Während die Unsicherheit der Achsencoder aus den Datenblättern entnommen werden kann, muss die Verformung durch Wärme abgeschätzt werden.

Wärmeausdehnung

Bei gleichmäßiger Temperaturverteilung im Roboter werden sich die einzelnen Glieder nach ihrem Ausdehnungskoeffizienten ausdehnen. Während sich diese Längenänderung direkt auf die Positionsgenauigkeit auswirkt, muss die Auswirkung auf die Orientierung weiter untersucht werden. Durch Versuche, welche die Orientierungsänderung über die Zeit messen, in der der Roboter sich durch die Abwärme der eigenen Motoren aufheizt, kann die Größe des Einflusses abgeschätzt werden. Wie in Abb.: 5.4 zu sehen, ist bei der Erwärmung des Roboters durch den Motorstrom kein Trend zu erkennen der gegenüber den statistischen Schwankungen der Messung ins Gewicht fällt. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Wärmeausdehnung einen geringen, bei der Messgenauigkeit vernachlässigbaren Einfluss auf die Orientierung des Sensorkopfes bei festen

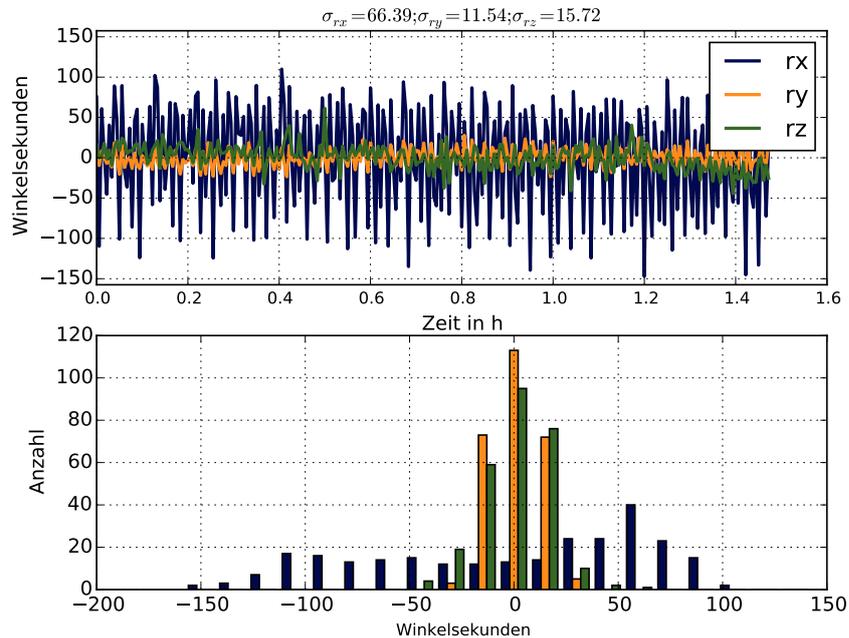


Abbildung 5.4: Zeitverlauf und Histogramm der Orientierungsänderung des Sensorkopfes über die Zeit der Erwärmung des Roboters

Gelenkwinkeln hat.

5.2.2 Lasertracker

Der Lasertracker (Leica AT901) ist in sich schon ein Multi-Sensor Messsystem. Über die Messung der Wetterstation wird der Brechungsindex der Luft bestimmt, mit dem zusammen über ein Absolut- und ein Relativ-Interferometer der Abstand zwischen Lasertracker und Reflektor bestimmt wird. Über die beiden Drehencoder in den Achsen des Umlenkspiegels wird die Richtung bestimmt.

Als Ergebnis liefert der Lasertracker die Position des optischen Zentrums des Retroreflektors in Kugelkoordinaten oder umgerechnet in kartesische Koordinaten mit einer Frequenz bis zu 1000 Hz.

Vom Hersteller werden einfache Unsicherheitsangaben für den Lasertracker gemacht, die eine absolute und eine entfernungsbedingte Unsicherheit, bei einer Messung über zwei Sekunden, addiert [62]. In dieser Arbeit wird der Lasertracker jedoch nicht nur genutzt um einzelne Punkte zu messen, sondern auch um den Retroreflektor in der Be-

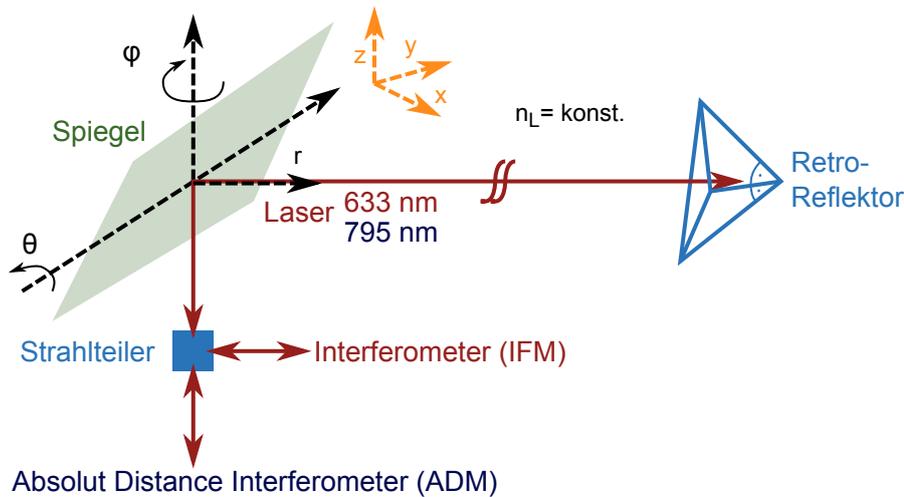


Abbildung 5.5: Messprinzip eines Lasertrackers: θ, φ werden durch die Winkelencoder der Spiegelmechanik gemessen, r wird durch die Interferometer (IFM & ADM) bestimmt. Gewöhnlich werden diese Koordinaten in ein kartesisches Koordinatensystem $(x, y \text{ \& } z)$ umgerechnet

wegung zu verfolgen. Die Bedingungen (Erfassung über zwei Sekunden; Stillstand; kein Abreißen des Laserstrahls) für die vom Hersteller angegebenen Unsicherheiten sind in dieser Arbeit nicht immer gegeben und daher müssen die Einflüsse auf die Unsicherheit im Folgenden analysiert werden.

Messung in Kugelkoordinaten

Der Lasertracker errechnet die Koordinaten eines 3D Punktes aus den beiden Achswinkeln θ, φ und der optischen Weglänge zwischen dem Spiegel und dem Retroreflektor, die mit den Interferometern (ADM und IFM) gemessen wird (siehe Abb.: 5.5). Entlang der kartesischen Achsen des Lasertrackerkoordinatensystem überlagern sich somit die Unsicherheiten der Spiegellage und der Interferometer. Wenn für die Unsicherheitsbetrachtung für jeden Punkt in Richtung der Achsen des Lasertrackers erfolgt, die ein Kugelkoordinatensystem entsprechen, können die Einflüsse getrennt werden. In einer Messung mit 1kHz über zwei Sekunden ergibt sich in kartesischen Koordinaten jeweils eine Überlagerung der verschiedenen Einflüsse (siehe Abb.: 5.6), während in Kugelkoordinaten die hohe Genauigkeit der interferometrischen Abstandsmessung r (siehe Abb.: 5.7) deutlich zu sehen ist. Aus der Unsicherheit des Abstandes und den Unsicherheiten im Winkel ergibt sich ein Unsicherheitsellipsoid. Daher wird im Folgenden die Unsi-

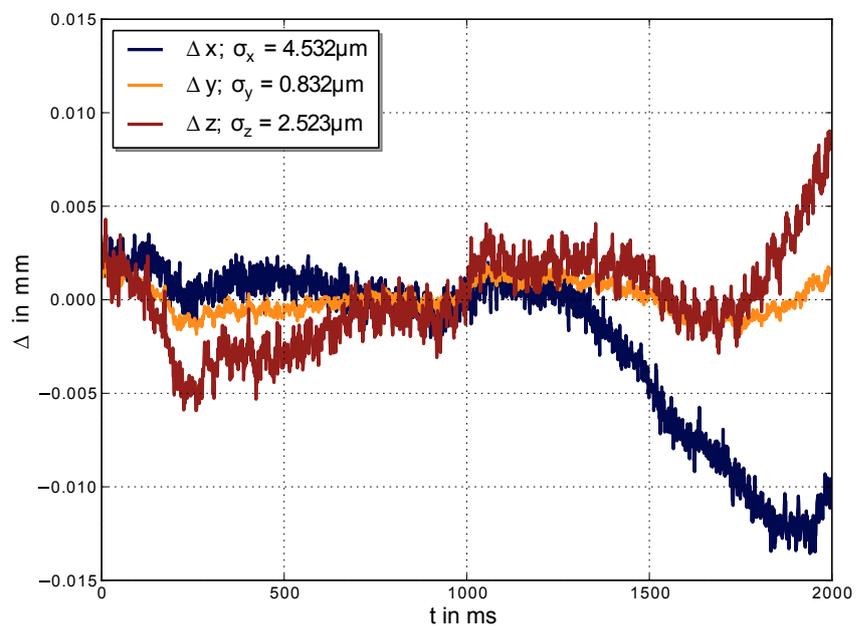


Abbildung 5.6: Abweichungen vom Mittelwert der Positionsmessung eines fixierten Retroreflektors mit einer Abtastrate von 1kHz in kartesischen Koordinaten: Die Abweichungen in x- und z-Richtung sind wesentlich höher als in y-Richtung

cherheit immer auf die Hauptachsen dieses Ellipsoiden bezogen und mit $\Delta r, r\Delta\theta, r\Delta\phi$ angegeben.

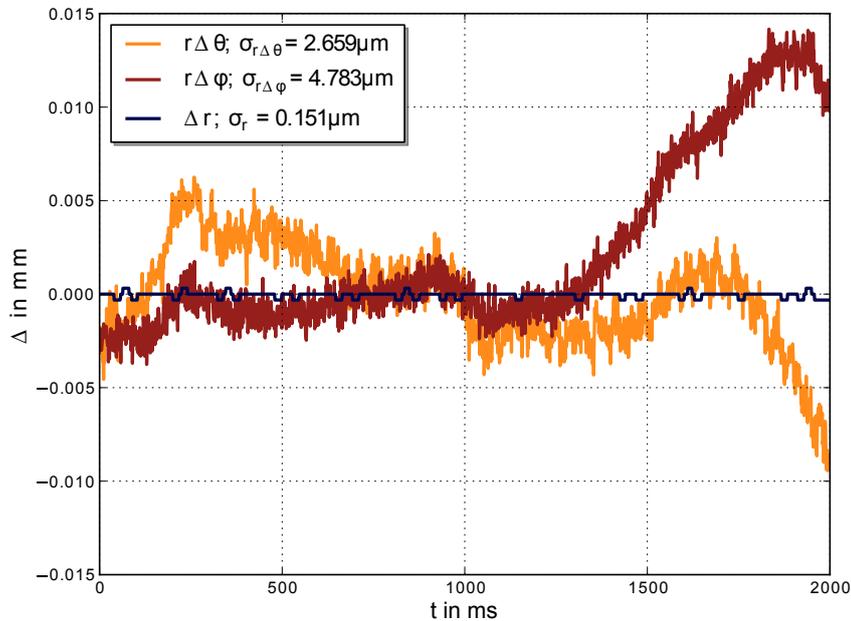


Abbildung 5.7: Die Daten aus Abb.: 5.6 in Kugelkoordinaten transformiert: In r-Richtung sind die Abweichungen sehr gering, da diese Richtung rein interferometrisch gemessen wird

Umgebungseinflüsse

Der größte Einfluss aus der Umgebung ist die örtliche und zeitliche Änderung des Brechungsindexes der Luft. Während der Abstand in erster Ordnung nur durch die Änderung der Mittelwertes beeinflusst wird, ändert sich die Strahlrichtung, und damit die Winkel auch durch lokale Unregelmäßigkeiten im Brechungsindex. Um den Einfluss abzuschätzen, werden Messreihen mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen aufgenommen. Neben dem Abstand zwischen Lasertracker und Reflektor, wird auch die Zahl der Wärmequellen und Lüftungen (Roboter, Computer und Klimaanlage) und der Menschen im Raum variiert. Die Änderung gegenüber der Messung mit den geringsten Umwelteinflüssen (Abb.: 5.8) ist gering und daher werden diese Einflüsse auf die Messung als vernachlässigbar eingeschätzt.

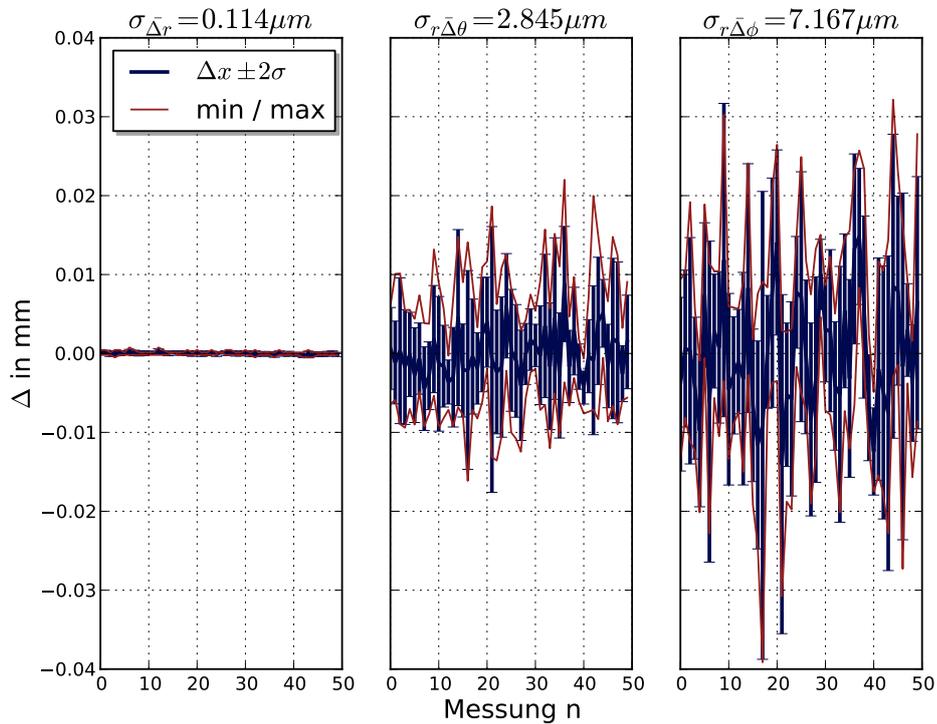


Abbildung 5.8: Wiederholmessung mit dem Lasertracker in ruhiger Umgebung (keine Menschen im Gebäude); blau) Mittelwert für jede Messung, rot) Minimum und Maximum für jede Messung

Bestimmung des Abstandes nach Unterbrechung des Laserstrahls

Wenn der Strahl zum Retroreflektor abreißt, muss die absolute Distanz neu gemessen werden. Der AT-901 hat für diesen Fall das sogenannte “Absolut Distance Meter“ ein durchstimmbares Interferometer das den absoluten Abstand im Bereich zwischen 1m und 80m messen kann. Um den Einfluss zu separieren, wird ein fixierter Retroreflektor 50 mal gemessen, nachdem jeweils der Strahl unterbrochen wurde. Wie in Abb.: 5.9 zu sehen erhöht sich die Standardabweichung im Vergleich zu Abb.: 5.8 in allen drei Koordinaten nur leicht.

Einfluss des Retroreflektors

Es werden von mehreren Herstellern Retroreflektoren mit unterschiedlichen optischen Prinzipien in unterschiedlichen Preisklassen angeboten. Einer der Haupteinflussfaktoren

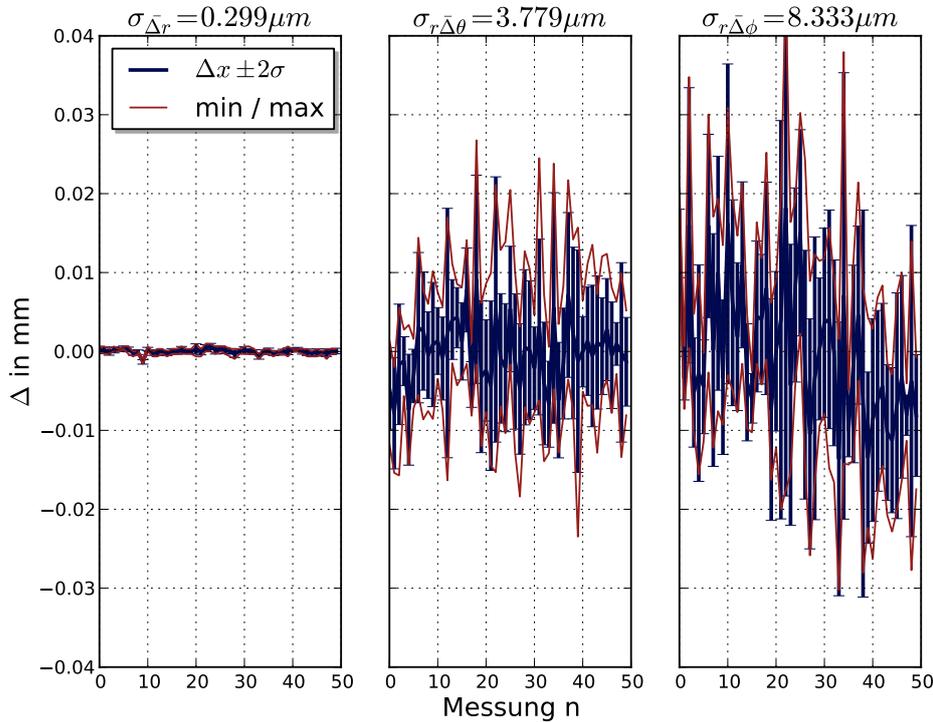


Abbildung 5.9: Wiederholmessung mit Abriss des Lasers nach jeder Messung; blau) Mittelwert für jede Messung, rot) Minimum und Maximum für jede Messung

ren, die Zentrität des optischen Zentrums in der Kugel (siehe Tab.: 5.2.2) und der maximale Öffnungswinkel, grenzt die Ausrichtungen in denen gemessen werden kann ein. Die RFI Reflektoren (Reflector for Fixed Installations) werden als Glasprisma ausgeführt und eignen sich nur für die Messung bei gleichbleibender Orientierung zum Laserstrahl, da es durch die Brechung an der Frontebene zu einen orientierungsabhängigen Versatz kommt.

Reflektortyp	Zentrierung in mm	Öffnungswinkel in °
RedRing 0,5"	$\pm 0,006$	30
RedRing 1,5"	$\pm 0,006$	30
TBR (Tooling Ball R.) 0,5"	$\pm 0,01$	22
RFI (R. for Fixed Installations) 0,5"	NA	50
Katzenauge	$\pm 0,01$	± 60

Tabelle 5.1: Daten verschiedener Retroreflektortypen [61]

Einfluss von Bewegung

Das Verfolgen des Retroreflektors geschieht über ein geregeltes, dynamisches System. Wenn sich der Reflektor bewegt wird es immer einen Schleppfehler geben, da der Laserstrahl von der Regelung nur nachgeführt wird. In der Richtung r wird der Fehler gering sein, da sich die optische Weglänge bei seitlichem Versatz nicht ändert. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass auf regelmäßigen geschlossenen Trajektorien der Schleppfehler bei allen Messungen gleich ist und somit in der Kalibrierung mitberücksichtigt wird.

Berücksichtigung der Einflüsse auf die Messung

Es lassen sich drei große Einflüsse auf die Messung finden: sich bewegende Menschen, Luftzirkulation und der zeitliche Temperaturgradient. Menschen die sich in der Nähe des Lasertrackers bewegen, scheinen besonders die Komponente r in Strahlrichtung zu stören Abb.: 5.10. Dies lässt sich leicht über die Verformung des Bodenbelags oder Fundaments erklären, da Lasertracker und Messobjekt eine Art “U“ auf dem Fundament bilden. Der zeitliche Temperaturgradient wirkt sich auch insbesondere auf die Richtung r aus, da die Wetterstation des Lasertrackers, die Änderung langsamer und nur an einem Ort erfasst, und so der falsche Brechungsindex der Luft für die Messung angenommen wird. Eine höhere Luftzirkulation scheint, in einem bestimmten Bereich, die Messunsicherheit zu verringern. Eine Erklärung hierfür wäre die schnellere Durchmischung der Luft und somit ein homogeneres Brechungsindexfeld.

5.2.3 6DOF-Messung

Die Messung der Lage des Sensorkopfes wird in den verschiedenen Methoden von unterschiedlichen Unsicherheiten beeinflusst. Um für die 6DOF-Messung einheitliche Unsicherheiten bestimmen zu können, werden die Unsicherheiten für die Position und die Orientierung jeweils einzeln betrachtet.

Die Referenz wird im Mittelpunkt oder Schwerpunkt der Einzelmessungen definiert. Die Winkelabweichung wird jeweils als Rotation um diese Position betrachtet und für die Abweichung die linearisierte Drehmatrix für kleine Winkel [36] genutzt.

Für die Auswirkung der Unsicherheiten der 6DOF-Messung auf die Unsicherheit der Registrierung ist auch der Abstand vom Messfeld des jeweiligen Sensors zum Zentrum der Lagemessung entscheidend.

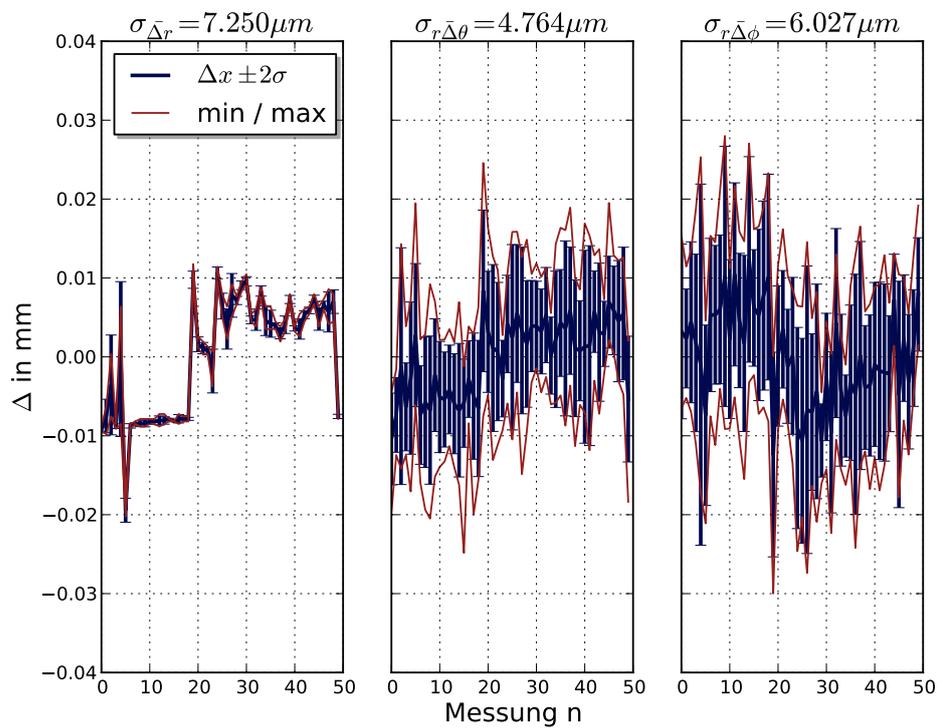


Abbildung 5.10: Wiederholmessung mit dem Lasertracker mit den größten Schwankungen (Menschen bewegen sich in direkter Nähe des Messsystems); blau) Mittelwert für jede Messung, rot) Minimum und Maximum für jede Messung

Bewertungsverfahren

Da kein Referenzmesssystem, das sicher genauer als der Lasertracker ist, zur Verfügung steht, wird die Angabe der Unsicherheit nach dem *Maximal Permissionable Error* MPE [39] des Herstellers genutzt. Um die Orientierungsmessung zu qualifizieren wird nach [19] die Fähigkeit durch Wiederholmessungen bewertet. So entsteht für die 6DOF-Messung ein Unsicherheitsellipsoid für die Position und eines für die Orientierung (siehe Kap.: 6.6).

5.2.4 Registrierung

In der Registrierung werden die Daten eines Sensors über die 6DOF-Lagemessung und die Position des Drehtisches in Messobjektkoordinaten umgewandelt. Die Abweichungen können in systematische Fehler, wie die Abweichung der Kalibrierung, und zufällige Fehler, wie die Unsicherheit von Sensor und Lagemessung aufgeteilt werden.

Einfluss des Lasertrackers und der Lagebestimmung 6DOF

Wie in Kapitel 5.2.3 aufgezeigt, wird die Unsicherheit der Position und der Orientierung bestimmt. Gerade der Fehler für die Orientierung des Sensorkopfes wirkt sich mit dem Abstand zum Messvolumen des Sensors auch als Fehler auf die Position der Messdaten in globalen Koordinaten aus. Bei kleinen Winkelfehlern ($\sin(\alpha) = \alpha$), wie hier anzunehmen, erhöht sich der daraus resultierende Fehler linear mit dem Abstand zum Messvolumen.

Einfluss des Sensors

Die Genauigkeit des 3D-Sensors kann aus den Datenblättern entnommen werden [30] und bezieht sich auf einen Messaufbau indem der Sensor von oben (also in Richtung der Schwerkraft) auf das Objekt misst. Durch die Montage am Endeffektor des Roboters kann die Lage des Sensor geändert werden, die aber für die Bestimmung der Genauigkeit immer konstant war. Aufgrund von Verformungen wird der Sensor eine geringere Genauigkeit haben, als bei der Genauigkeitsüberprüfung. Diese Einflüsse sind nur schwer zu messen, da sie nur mit den Unsicherheiten einer Lagebestimmung überlagern erfasst werden können. Somit ist aus dem Datenblatt keine brauchbare Information zur Genauigkeit oder der Messunsicherheit des Sensors zu entnehmen.

Einfluss der Kalibrierung

Die Koordinatentransformation ${}^{SK,SA}\mathbf{T}$ (vom Sensor A SA zum Sensorkopf SK) muss kalibriert werden. Die Abweichung zwischen der kalibrierten und tatsächlichen Transformation fügt jeder Messung eine konstante Abweichung hinzu. Diese aus der Restunsicherheit der Kalibrierung stammende Abweichung wird durch Analyse der Parameterschwankungen bei wiederholter Kalibrierung durchgeführt.

Einfluss des Drehtisches

Der Einfluss des Drehtisches kann in die Unsicherheit des Drehencoders, den *Wobble* (die Änderung der Drehachse in Abhängigkeit des Drehwinkels) und die Kalibrierabweichung der Achse eingeteilt werden. Die Unsicherheit aus dem Achswinkel wird mit steigendem Abstand zur Drehachse r größer.

Die Lage der Achse wird über den Lasertracker ermittelt, indem ein Retroreflektor, der auf dem Tisch montiert ist, während einer Umdrehung gemessen wird.

Gesamtunsicherheit

Die Überlagerung der Unsicherheiten ist komplex und nur schwierig abzuschätzen. Der relative Einfluss der Einzelunsicherheiten auf das Endergebnis kann durch Verfahren der Monte Carlo Simulation nach dem Zusatz des *Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)* [50] ausgewertet werden.

Die Abweichungsanalyse von Wiederholmessungen an einem geometrischen Primitiv kann die Streuung bewerten und zu den theoretischen Abweichungen in Bezug gesetzt werden.

Kapitel 6

Realisierung des Multiskalen-Messsystems



Abbildung 6.1: Das aufgebaute Multiskalen-Messsystem

6.1 Komponenten

6.1.1 Aktorik

Roboter Stäubli TX 90

Der Stäubli TX90 ist ein 6-Achs Industrieroboter in anthropomorpher Konfiguration. Die kinematische Kette besteht aus den seriell angeordneten Gelenken: Basis Q1, Schulter Q2, Ellenbogen Q3 und den drei Handgelenksachsen Q4, Q5, Q6 (Tab.: 6.1.1). Von der Basis bis zum Handgelenk hat er eine Reichweite von 0,9 m (siehe Abb.: 6.2) mit einer zulässigen Last bis 14 kg (20 kg bei eingeschränktem Arbeitsraum) am Endeffektor. Vom Hersteller wird eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 35\mu m$ angegeben [96]).

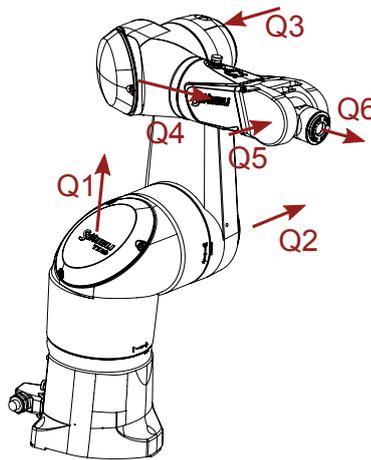


Abbildung 6.2: Roboter: Stäubli TX90 [96]

Aufgrund der anthropomorphen Kinematik, läßt sich die inverse Kinematik direkt berechnen (siehe: Abb.: 3.7.1), und so kann die Gelenkconfiguration für jeden erreichbaren Punkt des Arbeitsraumes explizit berechnet werden. Für eine Endeffektorlage, können bis zu acht Gelenkconfigurationen genutzt werden. Diese Posen können über die Zusätze *links-/rechts-händig*, *Ellenbogen positiv/negativ* und *Handgelenk positiv/negativ* festgelegt werden.

Der Roboter wird über Netzwerk mit Hilfe des SOAP-Protokolls [100] angesteuert. So können Informationen zum Betriebszustand abgerufen werden und Bewegungsbe-
fehle gegeben werden.

Achse	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
Arbeitsbereich + in °	180	147,5	145	270	140	270
Arbeitsbereich - in °	180	130	145	270	115	270
Auflösung in m°	0,057	0,057	0,057	0,057	0,122	0,183

Tabelle 6.1: Arbeitsbereich und Auflösung der Achsen des TX90

Drehtisch Newport URS 150

Der Drehtisch URS 150 von Newport wird durch ein vom Hersteller vorgegebenes Protokoll über eine EIA-232 (RS-232) Schnittstelle angesprochen. Der Tisch kann mit bis zu $80^\circ/s$ bewegt werden und hat eine hohe Absolutgenauigkeit (siehe Tab.: 6.1.1). Zum Spannen von Kalibrierkörpern und Werkstücken ist ein Präzisionsschraubstock auf dem Drehtisch montiert.

Winkelbereich	kontinuierlich
Wiederholbarkeit	$0,002^\circ$
bidirektionale Wiederholbarkeit	$\pm 0,003^\circ$
Absolute Genauigkeit	$0,023^\circ \pm 0,0115^\circ$

Tabelle 6.2: Wiederholbarkeit und Genauigkeit der Drehachse [73]

6.1.2 Referenzierung

Lasertracker Leica AT-901

Der Lasertracker AT-901 kann mit einem Radius zwischen 1 und 80 Metern, 360° um die Hochachse und $+30^\circ/-45^\circ$ zum Boden die Position eines Retroreflektors messen. Die Genauigkeit der Messung wird mit $\pm 15\mu m + 5\frac{\mu m}{m}$ angegeben [62].

Retroreflektoren

Die meist genutzten Retroreflektoren in dieser Arbeit sind vom Typ Leica Red Ring $0,5''$, da sie in der höchsten Genauigkeitskategorie mit einem Gewicht von $6g$ am leichtesten sind [62]. Zum Einmessen des Versuchsstandes wurde zudem ein Leica Red Ring $1,5''$ genutzt, welcher die gleiche Genauigkeit hat, aber wesentlich schwerer ist ($170g$).

Zusätzlich werden noch Glassprismen-Retroreflektoren eingesetzt, die aufgrund der orientierungsabhängigen Messabweichung [101] nur für Wiederholmessungen genutzt werden.

6.1.3 Bildverarbeitungseinheit

Kamera AVT-Stingray

Die AVT Stingray 145b hat einen Sony ICX285 CCD-Sensor mit einer Auflösung von 1388 x 1038 Pixeln, die jeweils eine Seitenlänge von $6,45\mu\text{m}$ haben. Zusammen mit dem A/D-Wandler, der 14 Bit Grauwertauflösung ermöglicht, ist bis zu 24 dB Signal-Rauschabstand möglich [2]. Mit voller Auflösung bietet die Kamera eine Bildrate bis 16 Hz. Im Versuchsstand wird die Kamera über die Software pyVimba [81] angesprochen.

Objektiv SILL TZM 3075

Das telezentrische Objektiv mit einem Abbildungsmaßstab von 0,375 und einer maximalen Verzeichnung von 0,1% bildet das Messobjekt im Abstand von ca. 90 mm scharf auf den Sensor der AVT-Stingray ab [94]. Mit einem Auflösungsvermögen von 75 Linienpaaren pro Millimeter im Objektraum bei 50% Kontrast, kann das Objektiv das Bild mit einer Auflösung von ca. $5\mu\text{m}$ auf den Sensor scharf abbilden.

Aufgrund der geringen Verzeichnung, die weniger als 0,5 Pixel Versatz auf dem Sensor ausmacht, wird auf die Korrektur verzichtet.

Beleuchtung

Der Beleuchtungsring besteht aus vier Power-LEDs, die von einem Arduino [3] über eine Leistungselektronik angesprochen werden. Durch den Arduino wird die Bildaufnahme zur Beleuchtung synchronisiert. Es werden grüne *ledxon* 3W Power-LEDs, mit Optiken, die eine Aufweitung des Lichtkegels von 7° bewirken, verwendet. Sie sind gleichmäßig um die Kamera angeordnet und beleuchten aus einem Winkel von 20° zur optischen Achse.

6.1.4 Streifenprojektionssensor GFM μ CAD premium

Das Streifenprojektionssystem hat ein Messvolumen von 12,827 mm x 9,764 mm x 3 mm bei einer Auflösung von $8\mu\text{m}$ lateral und $1\mu\text{m}$ vertikal [30]. Das System besteht aus einer CCD-Kamera mit Aufnahmeoptik und einer LED-Lichtquelle, die über ein DMD-Array ein Muster projiziert [29].

Eine Messung ergibt eine Tiefen- und ein Grauwertbild der Auflösung 1624 x 1236. Neben der einfachen Messung ist es auch möglich direkt mit *HDR*, High Dynamik Range, zu messen, wodurch bis zu 5 Messungen mit unterschiedlichen Helligkeiten in eine Messung überführt werden. Bei glänzenden Oberflächen kann so eine bessere Qualität der Messdaten erreicht werden.

6.2 Datenverarbeitung

6.2.1 Anschluss der Systemkomponenten

Durch die unterschiedlichen Sensoren und Aktoren wird eine Menge an unterschiedlicher Kommunikation (siehe Abb.: 6.3) zwischen den Systemkomponenten notwendig. Um eine einheitliche Lösung zur Automation aller Komponenten zu ermöglichen, wurde eine abstrakte Zwischenschicht programmiert, um so alle Komponenten auf gleiche Art und Weise ansprechen zu können.

Die gesamte Automatisierung erfolgt in Python [59, 70, 46]. Durch die Vielfältigkeit von Python und die Fähigkeit Programmcode zur Laufzeit auszuwerten, ist es möglich, auch die Messabläufe in Python selber zu schreiben. Für jede Komponente wurde somit eine, aus der Interface-Klasse namens *MachineIO* abgeleitete, Klasse geschrieben die Methoden zur Kommunikation und Ansteuerung für das Gerät enthalten.

6.2.2 Datenvorverarbeitung

Die Rohdaten der einzelnen Komponenten müssen zu einem Ergebnis umgewandelt werden. Für das Multiskalen-Messsystem kommen viele verschiedene Arten von Daten zusammen:

- Intensitätswerte von den Kameras,
- Tiefenbildrt von dem Streifenprojektionssystem,

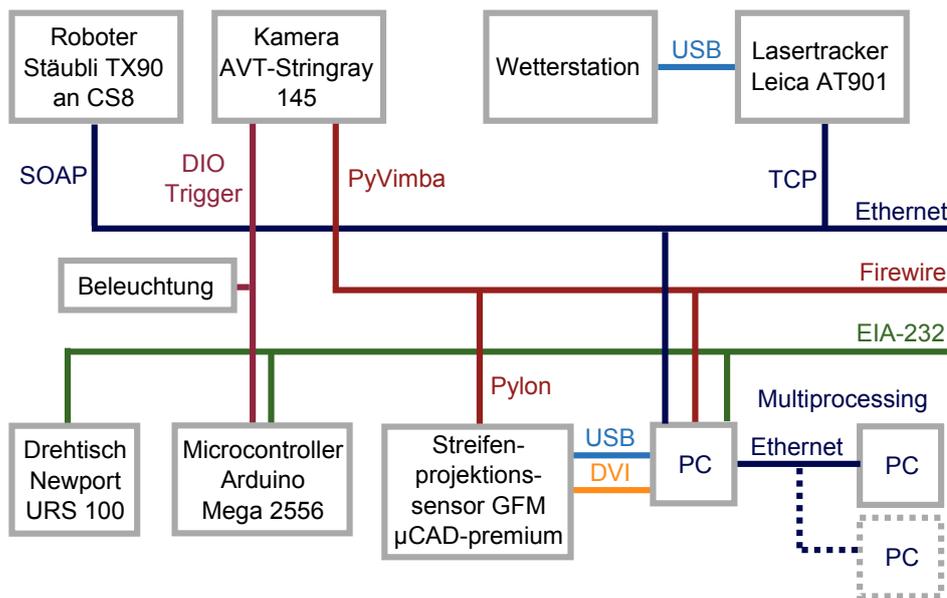


Abbildung 6.3: Übersicht über den Anschluß der Versuchstandskomponenten

- Positionen des Retroreflektors vom Lasertracker,
- Achspositionen von Drehtisch und Roboter,
- Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte von der Wetterstation des Lasertrackers.

Alle Messsysteme haben unterschiedliche Sensoren und Charakteristika und müssen vorverarbeitet werden.

Kameras

Sowohl mit der Kamera aus dem Bildverarbeitungssystem als auch von der Kamera des Streifenprojektionssystems werden Grauwertbilder aufgenommen. Um die Bilder unabhängig von der Auflösung des A/D-Wandlers zu machen, werden die Bilder in den Wertebereich $[0..1]$ gebracht. Das Bild aus dem Streifenprojektionssystem wird durch die Software direkt von der Verzerrung befreit.

Streifenprojektionssystem

Das Streifenprojektionssystem *μ CAD premium* der Firma GF Messtechnik [29] wird durch eine vom Hersteller vorgeschriebene Prozedur kalibriert und liefert Geometrie-

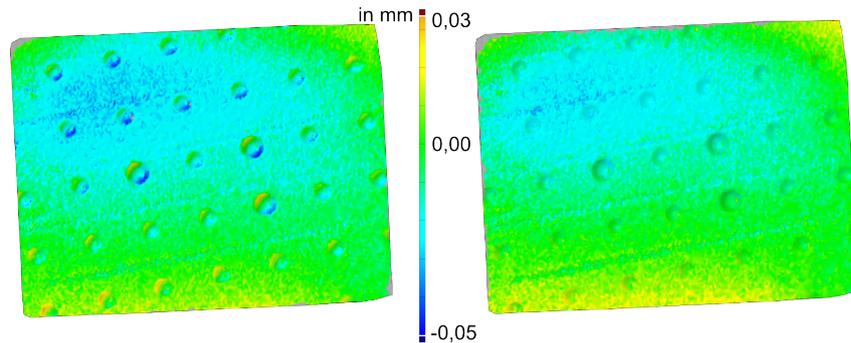


Abbildung 6.4: Dreidimensionale Darstellung der Abweichung (in Richtung der Oberflächennormalen) bei der Messung der Kalibrierkörpergeometrie an unterschiedlichen Stellen im Messfeld des μCAD premium Sensors vor (links) und nach (rechts) der Transformation

daten in Form einer Höhenkarte in metrischen Koordinaten. Die vom Hersteller vorgeschriebene Kalibrierung besteht aus einer Korrektur der Verzeichnungsparameter der Kamera anhand eines Gitternormals, dem Festlegen einer z_0 -Ebene durch ein Ebenennormal und der z -Skalierung anhand eines Stufennormals [30].

In der Kalibrierung des Gesamtsystems (Kap.: 6.7.4) fiel auf, dass es bei der Messung eines Ebenheitsnormales zu Abweichungen kam. Wenn nicht in der exakten Lage, wie die Ebene bei der Kalibrierung lag, gemessen wurde, ergab sich eine wellenförmige Abweichung in z -Richtung. Bei der Kalibrierung mit dem Kugelabschnittskalibrierkörper (Kap.: 6.8.2) fiel eine hohe Restabweichung der Kalibriermarken auf, die noch über der Abweichung bei den Ebenen lag. Eine weitere Untersuchung bei der wiederholten Messung des Kugelabschnittskalibrierkörpers in verschiedenen Posen zeigte einen Versatz der Kalibriermarken in Abhängigkeit der Tiefe im Bild.

Wie in Abbildung 6.4 (links) zu sehen sind die Kalibriermarken deutlich versetzt. Durch die Berechnung einer affinen Koordinatentransformation (siehe Glg. 6.1), die den Restfehler bei der Kalibrierung des Gesamtsystems minimiert, konnten die Sensordaten so transformiert werden, dass sich der Restfehler um einen Faktor von 4 verringert hat. In Abbildung 6.4 (rechts) ist zu sehen, dass die Datenfelder nun geringere Abweichung

haben.

$${}_{u'}x = {}_{u'}A_u x = \begin{pmatrix} 0.9996 & 0.0000 & 0.0139 \\ -0.0005 & 1.0000 & 0.0104 \\ -0.0005 & -0.0003 & 1.0011 \end{pmatrix} {}_u x \quad (6.1)$$

In (siehe Glg. 6.1) ist eine Matrix für diese affine Transformation angegeben. Es ist leicht zu sehen, dass die Achsen nicht senkrecht aufeinander stehen, und dass die z -Achse gestreckt wird. Die Restabweichungen in Abb.: 6.4 zeigen aber auch, dass die affine Transformation nicht alle Abweichungen beseitigt.

Es wurde der Schluss gezogen, dass der Sensor durch die vom Hersteller vorgegebene Routine keine Daten mit ausreichender Qualität liefert, und dass die Kalibrierung durch eigene Methoden erweitert werden muss.

Die affine Transformation wird angewendet um die Geometriedaten zu entzerren.

Lasertracker

Aus der Lasertracker-Messung wird die Koordinatentransformation des Sensorkopfes berechnet. Je nach Prinzip der Lagebestimmung müssen die Daten unterschiedlich ausgewertet werden (siehe Kap.: 6.6). Grundsätzlich werden die Positionsdaten in dem Koordinatensystem des Lasertrackers gemessen [62].

6.3 Fehlerdetektion

Im regulären Betrieb ist die Fehlerdetektion Herzstück eines automatischen Inspektionssystems. Für den Multiskalen-Ansatz in der Inspektion ist dieses Thema Zentral, da die Fehlerdetektion gleichzeitig die Indikatorfunktion (siehe 3.6) ist. Nur wenn in der Fehlerdetektion alle relevanten Fehler gefunden werden, kann die Multiskalen-Messtechnik genutzt werden.

In dieser Arbeit werden Fehler auf Turbinenschaufeln durch Bildverarbeitung und durch Analyse von Tiefenbildern erfasst. Die Möglichkeit der Fehlerdetektion durch Vergleich der Messdaten mit der CAD-Geometrie wird nicht bearbeitet, da die Abweichungsberechnung zu CAD-Daten in Polyworks [48] und GOM-Inspect [32] direkt erfolgen kann. Eine Herausforderung bei Turbinenschaufeln ist die Verformung über die Laufzeit durch die hohen Fliehkräfte, wodurch sich die Schaufel immer weiter von der

Gestalt der Auslegungsgeometrie entfernt. Lokale Fehler können so in der Abweichungsanalyse in Referenz zur Sollgeometrie so nicht von der globalen Verformung getrennt werden.

Als erster Ansatz zur Entwicklung einer automatischen Fehlerdetektion, wurde das Vorgehen von geschulten Inspektoren analysiert und versucht die menschliche Herangehensweise durch Methoden und Algorithmen anzunähern. Zur Fehleranalyse wurde die Bildverarbeitungseinheit mit variabler Beleuchtung und das Streifenprojektionssystem, welches Bild- und Geometriedaten liefert, genutzt.

6.3.1 Schadendetektion unter variierender Beleuchtung

Viele der möglichen Schäden auf betriebsbeanspruchten Turbinenschaufeln sind an der Oberfläche optisch für einen Menschen direkt zu erkennen. Gerade lokale Geometrieänderungen führen zu einer Änderung des Reflexionsverhaltens der Oberfläche.

Wenn nun ein Bild der Oberfläche aufgenommen wird, erweist es sich jedoch als schwierig die Oberflächen zu segmentieren, da die Helligkeit eines Pixels im Bild von der Beleuchtungsrichtung, Oberflächennormalen und dem Reflexionsverhalten abhängig ist. In [31] wird ein Verfahren vorgestellt, wie die Einflüsse der Reflexionseigenschaften und Form der Oberfläche getrennt werden können.

Während ein menschlicher Inspekteur das Bauteil unter einer Beleuchtung bewegt, um durch die Reflexionseigenschaften den Schaden besser zu erkennen, wird hier die Lage von Objekt und Kamera konstant belassen und die Beleuchtungsrichtung variiert, da so die Zuordnung zwischen Pixel und Oberfläche konstant bleibt.

Da die Oberflächen anhand ihrer Reflexionseigenschaften identifiziert werden sollen, werden zu den verschiedenen Oberflächenarten die Reflexionseigenschaften gemessen und in ein Reflexionsmodell (BRDF siehe Kap.: 3.2), das eine Vorhersage ermöglicht, eingepasst. In der Inspektion wird die Werkstückoberfläche mit konstanter Lage von Kamera zu Werkstück, mit variierenden Beleuchtungen aus unterschiedlichen Richtungen mehrfach aufgenommen. Im letzten Schritt wird für jeden Pixel, der ja eine Abbildung des immer selben Oberflächenabschnittes ist - jedoch jeweils aus einer anderen Richtung beleuchtet wurde - überprüft, ob die Helligkeiten aus der Bilderserie zu einem der Reflexionsmodelle passen.

Messung der Reflexionseigenschaften

Zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften, wurde ein Oberflächenausschnitt von jedem Oberflächentyp mit einem Laser einer Wellenlänge von $543,5\text{ nm}$ mit einem Spot von ca. $1,5\text{ mm}$ Durchmesser aus der Normalenrichtung beleuchtet. Im Halbraum über der Probe wurde der Strahlungsfluss, mit einem Strahlungsfluss-Messgerät, das durch den Roboterarm im Abstand von $0,4\text{ m}$ auf die Probe ausgerichtet wurde, gemessen. Die Messwerte wurden ins Verhältnis zur Reflexion einer Oberfläche aus Kreidestaub gesetzt (Abb.: 6.5).

Beleuchtung und Auswertung

Für die Aufnahmen wurde eine Beleuchtung aus vier Spots mit einer mittleren Wellenlänge von ca 540 nm durch grüne PowerLEDs realisiert, die jeweils oberhalb, unterhalb, rechts und links vom telezentrischen Objektiv mit einem 20° Winkel zur optischen Achse ausgerichtet wurden.

Von der Oberfläche wird je ein Bild mit einer der LEDs als Beleuchtung aufgenommen. Aus den vier Bildern wird nach [31] die Normalenrichtung für jeden Pixel nach jeder Modelloberfläche berechnet. Für eine schnellere Berechnung, wurde jeweils die Steigung in x- und y-Richtung einzeln ausgerechnet und dabei die Kopplung vernachlässigt.

Aus den Modelloberflächen und den abgeschätzten Steigungen wird ein künstliches Bild für jedes bekannte Oberflächenmodell pixelweise berechnet (siehe Abb.: 6.6). Über die Differenz der Intensitäten der Originalbilder zu den künstlichen Bildern wird jeder Pixel dem am besten passenden Oberflächenmodell zugeordnet.

Ergebnisse

Neben der Zuordnung zu einem Oberflächentyp kann auch noch die Abweichung zum Modell genutzt werden, um die Oberfläche zu charakterisieren. In Abb.: 6.7 wird ein Großteil der Oberfläche dem beschichteten, intakten Zustand zugewiesen. Jedoch sind die Kratzer auf der Oberfläche, für die es kein eindeutiges Reflexionsmodell gibt, als Abweichung klar zu erkennen. Die Kante und der Bereich neben der Schaufel wurde fälschlicherweise in die Kategorie Burning / Grundmaterial eingeteilt, da die Oberfläche nicht in allen Bildern beleuchtet wurde. Durch einen Schwellwert, als Schranke für die

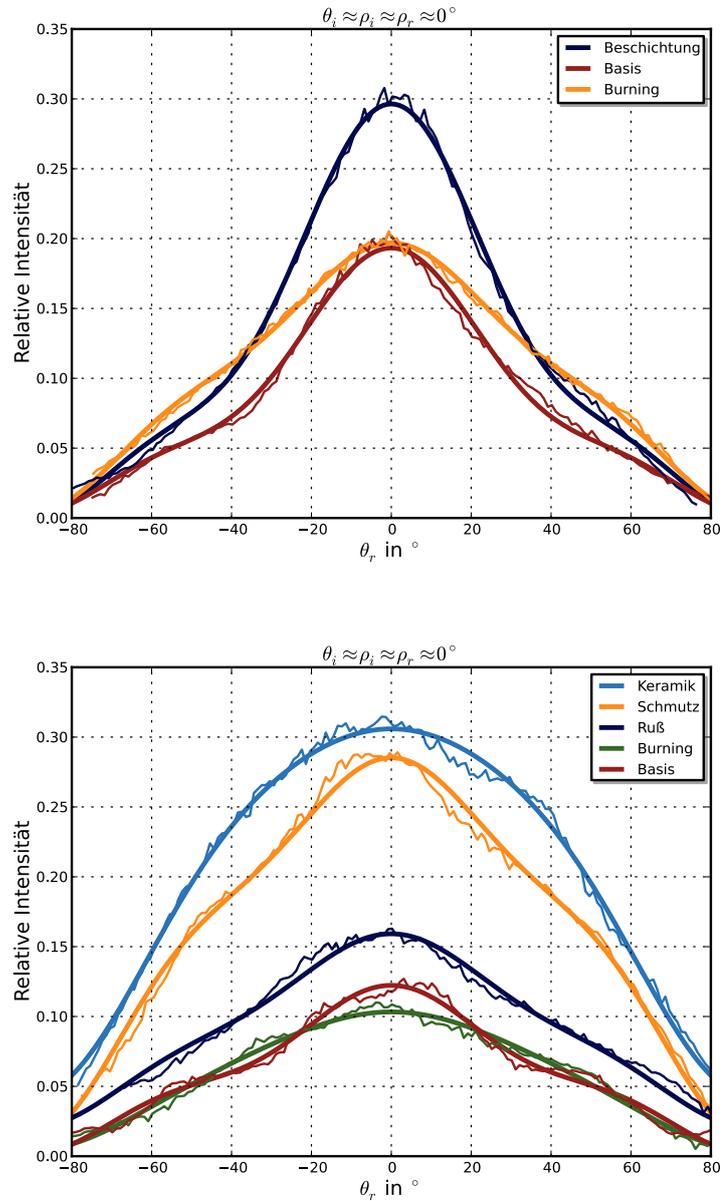


Abbildung 6.5: Messung(dünn) und die in das Modell der Reflexionsverteilung angepasste(dick) Reflexionsintensitäten über dem Beobachtungswinkel θ_r bei senkrechter Beleuchtung für die unterschiedlichen Oberflächenzuständen von zwei Turbinenschau-feln (Winkeldefinition siehe Abb.: 3.2)

Pixel die untersucht werden, können diese Bereiche jedoch gut segmentiert werden.

Aus den Daten wird für jeden Pixel ein Zustand und eine Normalenrichtung berech-net. Aus der Normalenrichtung können nach Kapitel 6.3.2 die Krümmungen berechnet

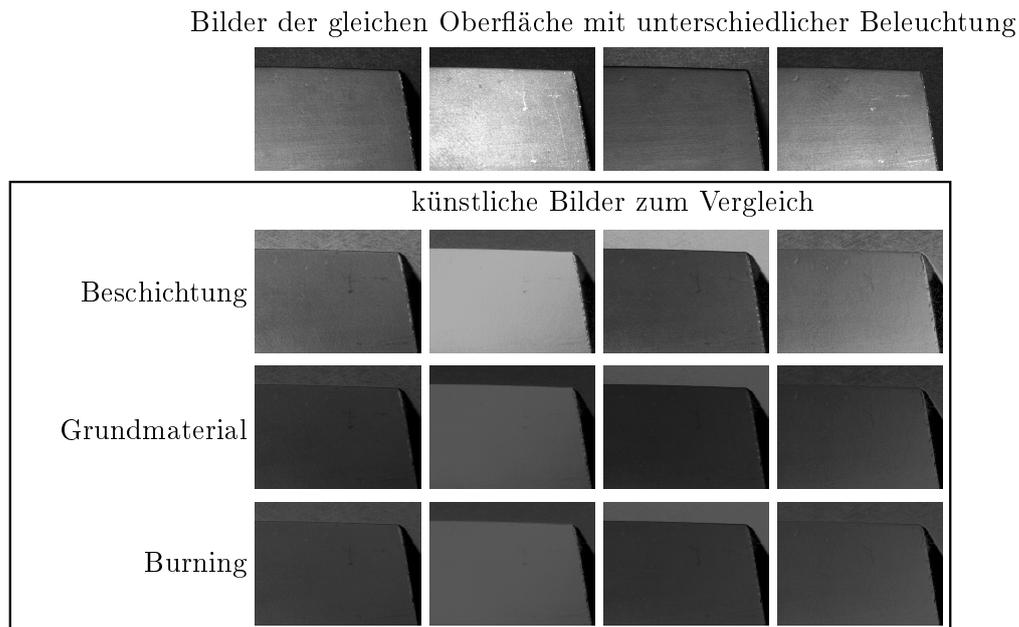


Abbildung 6.6: Bilder der gleichen Oberfläche aufgenommen unter vier unterschiedlichen Beleuchtungen verglichen mit den künstlichen Bildern zu den angenommenen Oberflächenzuständen (Beschichtung, Grundmaterial, Burning)

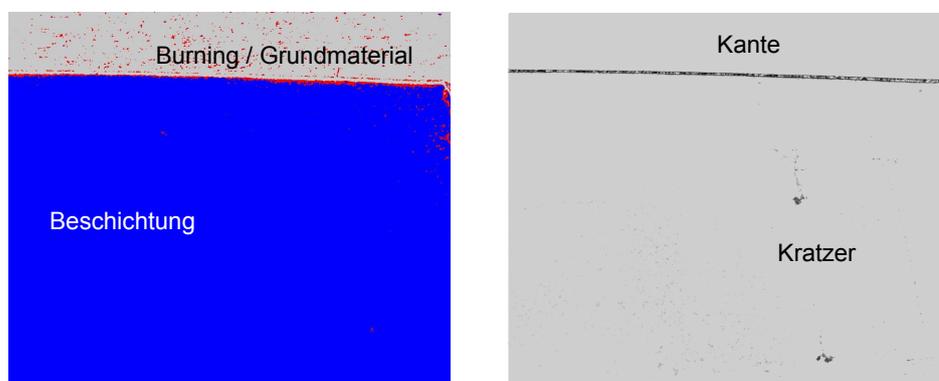


Abbildung 6.7: Segmentierte Oberfläche (blau: Beschichtung, rot: Burning, grau: Grundmaterial) (links); Abweichungen zu den modellhaften Reflektionseigenschaften der Segmentierten Oberfläche: Besonders hohe Abweichungen an Kratzern und Kanten (rechts)

werden und so basierend auf den Krümmungsabweichungen Fehler detektiert werden.

6.3.2 Schadendetektion aus dem Tiefenbild

Bei der Messung mit dem Streifenprojektionssensor entstehen automatisch ein Grauwert- und ein Tiefenbild, in denen nach lokalen Schäden gesucht wird.

Die *Airfoil*, der aerodynamisch wirksame Teil einer Turbinen- oder Verdichterschaukel, wird nach bestimmten Kriterien ausgelegt. Ein besonders grundlegendes Designprinzip ist die Krümmungsstetigkeit der Oberfläche, da Sprünge in der Krümmung Turbulenzen begünstigen und so den Wirkungsgrad vermindern [93]. Zusätzlich ergeben sich aus der traditionellen Auslegung, dem Entwerfen der Schnittgeometrie, welche über die Länge der Schaufel verwunden wird, größere Krümmungen nur in Schnittrichtung der Schaufel.

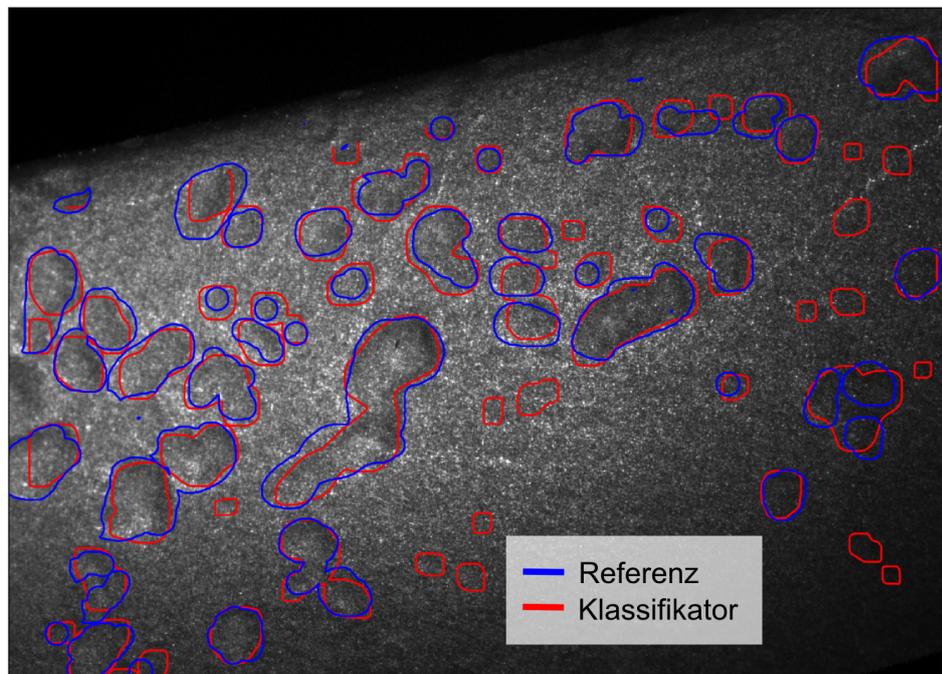


Abbildung 6.8: Erkennung von Defekten durch Anlernen des Algorithmus nach den Referenzdaten

Um die Parameter für die Ansätze anzulernen wurde in den Messdaten die Oberfläche manuell als Referenz (Abb.: 6.8) in die Kategorien *Defekt* und *in Ordnung* eingeteilt. So können für jeden Ansatz die *richtig positiv Rate*, die *falsch positiv Rate*, die *richtig negativ Rate* und die *falsch negativ Rate* bestimmt und ein Klassifikator angelern werden.

Auswahl geeigneter Filter

Der absolute Tiefenwert oder die daraus berechnete Steigung sind zur direkten Fehlerdetektion ungeeignet, da diese Werte direkt durch die Lagebeziehung zwischen Sensor und Messobjekt beeinflusst werden. Es müssen Merkmale gefunden werden die nur gering von der Pose während der Aufnahme abhängen.

Die Krümmung ist eine differential-geometrische Größe, deren Berechnung aus Messdaten nur angenähert werden kann. Insbesondere die lokale Rauheit führt bei der Berechnung zu hohen Krümmungswerten. Die Krümmung wird aus den numerischen Ableitungen ersten und zweiten Grades berechnet. Durch eine Tiefpassfilterung, z.B. mit Gauß-Kernel, kann für die Ableitungsberechnung der Einfluss hochfrequenten Rauschens und der Rauheit verringert werden. Für eine Oberfläche im dreidimensionalen Raum gibt es zwei Möglichkeiten zur Berechnung der Krümmung. Die mittlere Krümmung K_M ist der Mittelwert der beiden Hauptkrümmungen k_1, k_2 im Oberflächenpunkt, während die gauß'sche Krümmung K_G das Produkt der beiden Hauptkrümmungen ist. Für jeden Oberflächenpunkt kann in jeder tangentialen Richtung eine Krümmung berechnet werden, wobei der Krümmungswert dem Kehrwert des Radius des Kreises entspricht. Die Hauptkrümmungen k_1, k_2 entsprechen der größten und kleinsten Krümmung. Bei einer Kugel entsprechen $k_1 = k_2 = 1/r$.

Krümmungsfiler und Defekte

Zur Berechnung der Oberflächenkrümmung aus Messdaten werden Ableitungen erster und zweiter Ordnung benötigt. In Abb.: 6.9 werden die Ableitungen zur Berechnung der Krümmung jeweils unter Zuhilfenahme gauß'scher Tiefpassfilter berechnet. Bei einer Standardabweichung von $1px$ ist der Filterkern sehr klein und es könne kaum Strukturen erkannt werden. Bei $8px$ sind die relevanten Strukturen sehr gut sichtbar. Bei der Tiefpassfilterung mit $\sigma = 20px$ werden große Bereiche durch die Propagation von *ungültig Werten* nicht mehr auswertbar und feinere Strukturen verschwinden ganz.

Die theoretischen Unterschiede zwischen der mittleren und gauß'schen Krümmung können mit der manuellen Segmentierung verglichen werden. Besonders auffällig ist, dass die mittlere Krümmung die Erkennung der Umrisse der Schäden zulässt, jedoch auch an Kanten (siehe Abb.: 6.9), die nicht schadhaf sind, Maxima hat. Die gauß'sche Krümmung hingegen hat ihre Maxima innerhalb schadhafter, in zwei Richtungen stark

gekrümmter Oberflächen.

Insgesamt fällt auf, dass sich die Krümmungen in der Nähe von Defekten schnell ändern. Um diese Änderungen quantitativ sichtbar zu machen werden die Krümmungen durch einen Filter der den Betrag des örtlichen Gradienten berechnet hervorgehoben (siehe Abb.: 6.9 unten).

Segmentierung anhand der Krümmung

Für die Krümmungen und den Betrag des Gradienten der Krümmungen werden Grenzwertoptimierungskurve, die *Receiver Operating Characteristic-Curve (ROC)* (siehe Kap.: 3.1.3), berechnet, um die Eignung dieser Werte zur Segmentierung der Defekte zu prüfen. Je näher die Kurve dem Punkt mit *true positive rate* (richtig positiv Rate) (*TPR*) 100% bei *false negative rate* (falsch negativ Rate) (*FNR*) 0% gegenüber der Identität kommt, desto besser ist der Ansatz als Klassifikator geeignet.

Die gauß'sche Krümmung ist in der ROC (Abb.: 6.10) nur bis zu einer *true positive rate* bis 20% nutzbar, danach steigt die *false positive rate* sehr schnell an. Die mittlere Krümmung ist bei den Filtern mit $\sigma = 8px$ und $\sigma = 20px$ bis 40% oder 60% ein guter Klassifikator.

Der Betrag des Gradienten der Krümmungen scheint ein wesentlich besserer Klassifikator zu sein als die Krümmungen selber (Abb.: 6.10). Besonders bei der gauß'schen Krümmung ist der Gradient ein stabiler Klassifikator.

Segmentierung in mehreren Stufen

Gerade das schnelle Ansteigen der (*FPR*) macht die Klassifikation problematisch, insbesondere wenn eine (*TPR*) nahe 100% benötigt wird.

Bisher wurde der prozentuale Anteil der Fläche, für die Fehler die gefunden wurden, betrachtet. Um die Features weiter zu bewerten, wird untersucht, welcher Anteil der Fehler überhaupt gefunden wird (siehe Abb.: 6.11). Es zeigt sich, dass sich die Defekte mit allen Kennwerten finden lassen.

Der Unterschied zwischen dem Finden der Defekte und der vollständigen Markierung der Defekte kann mit einem mehrstufigen Verfahren erreicht werden, indem durch einen ersten Kennwert die Fehler gefunden werden und in der zweiten Stufe werden die umliegende Flächen auf die Zugehörigkeit zum Defekt untersucht und durch ein *region*

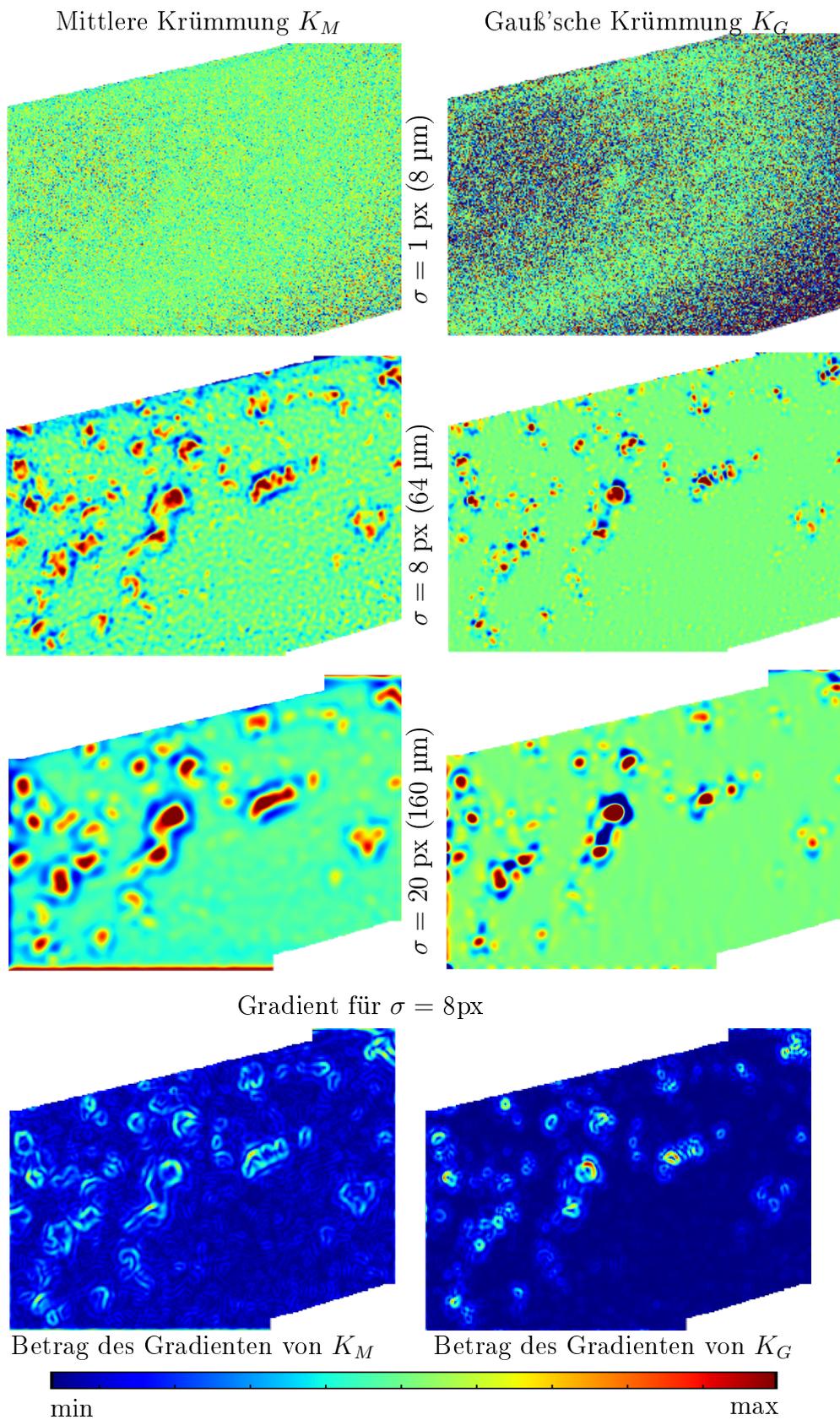


Abbildung 6.9: Ergebnisse der Krümmungsfiler bei Variation der Tiefpassfilterung (σ);
Unten: Betrag des Gradienten der Krümmungen

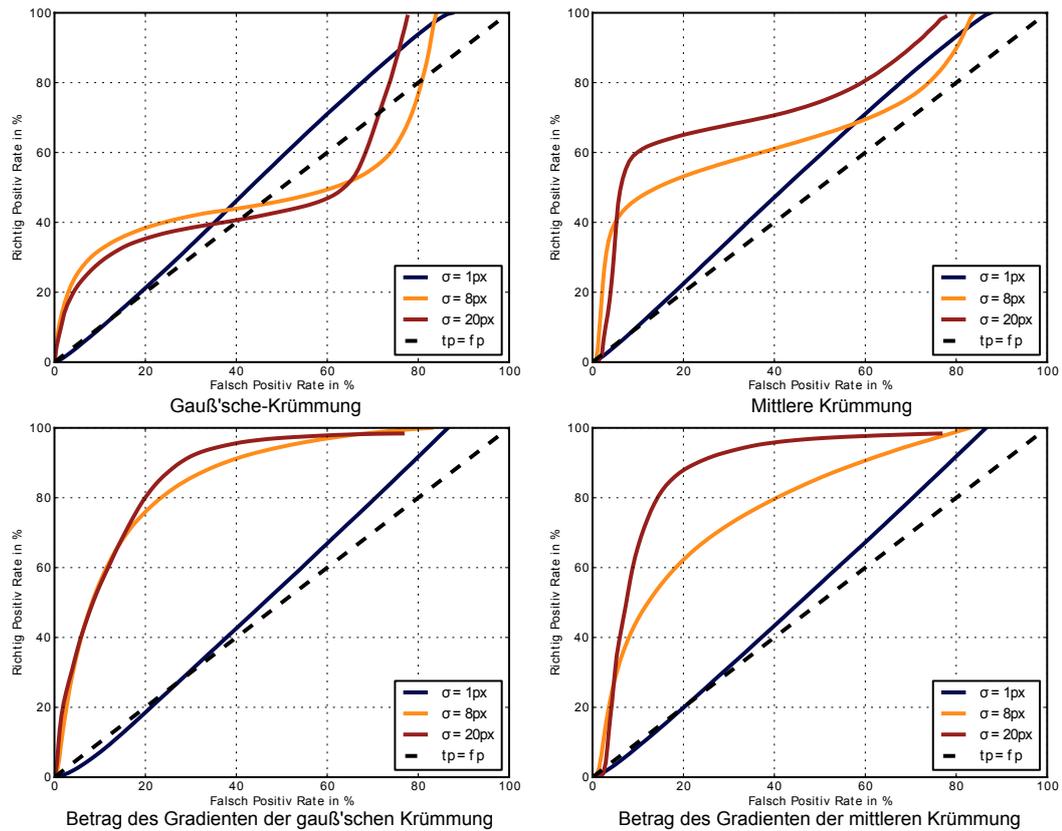


Abbildung 6.10: ROC zur Schadensdetektion (nach Flächenanteilen)

growing vervollständigt.

Als erste Stufe der Detektion bietet sich die gauß'sche Krümmung und ihr Gradient an, da sie in der Detektion der Fehler besonders geringe *FPR* erreichen. Für die zweite Stufe werden die beiden Gradienten gewählt, um die Fläche aufzufüllen. Das Ergebnis des zweistufigen Klassifikators in Abb.: 6.8 wurde mit einer leichten *false positive rate* (*FPR*) gewählt, bei der alle Defekte in der Referenz gefunden wurden.

6.3.3 Synthese einer Geometrie ohne lokale Schäden

Um lokale von globalen Fehlern zu trennen, wird ein 3D Modell benötigt, welches nur noch die globalen Abweichungen enthält. Auf der Schaufeloberfläche ist die Geometrie krümmungsstetig [93] und so ist es möglich die unbeschädigte Oberfläche über kleine Defekte hinweg durch eine solche Oberfläche zu schließen. Bei B-Splines kann durch die Wahl der Ordnung (3) eine Krümmungsstetigkeit erreicht werden. Die in Kap. 6.3.2 erkannten lokalen Defekte werden so durch Stützstellen auf dem gesamten Umfang

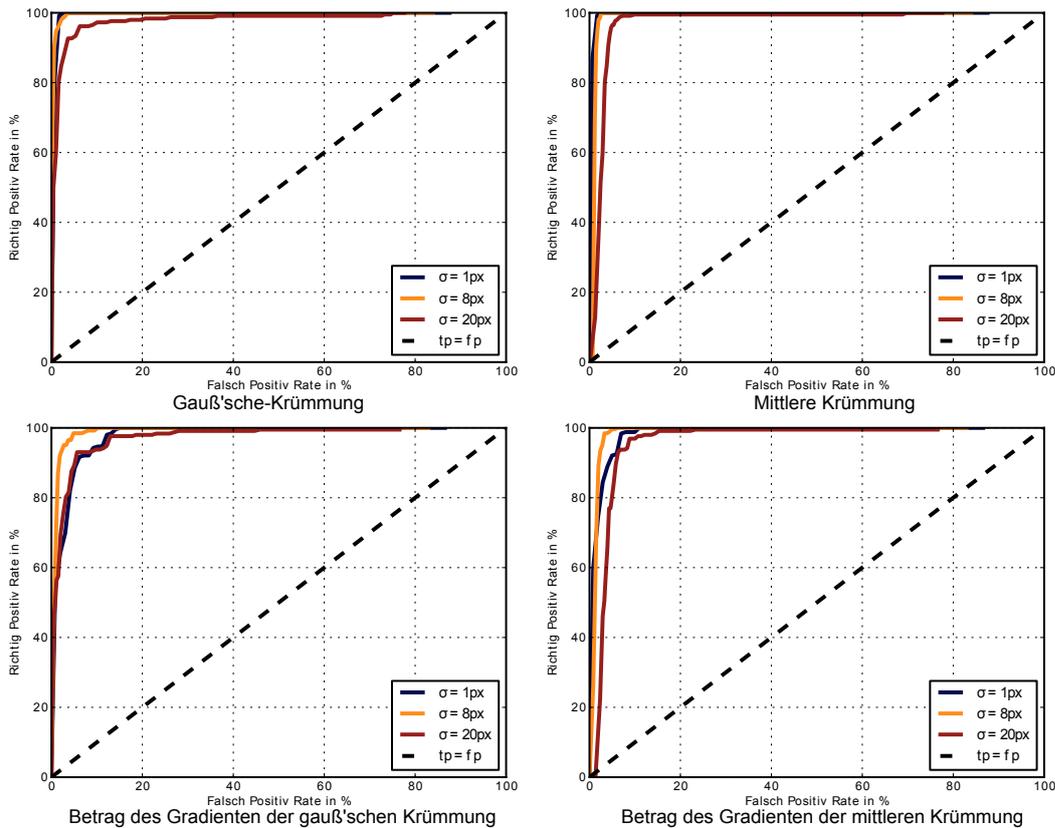


Abbildung 6.11: ROC zur Schadensdetektion (nach "Hit or Miss")

glatt geschlossen.

6.4 Datenreduktion

Ein Messfeld des μCad -Sensors besteht aus $2 \cdot 10^6$ lateral äquidistanten Tiefeninformationen. Um die Daten in Werkstückkoordinaten nutzen zu können müssen sie in 3D Punkte umgewandelt werden. Eine Messung würde demnach $6 \cdot 10^6$ Fließkommazahlen entsprechen. Bei einer Kodierung mit 32- oder 64 Bit wären dies je 21 oder 42 Megabyte. Wenn größere Teile der Schaufel beschädigt sind, können über hundert Messfelder benötigt werden.

Für die Bearbeitung und Visualisierung der Daten steigen die Rechenzeit und Speicheranforderung erheblich mit der Größe der Datenmenge. Wenn die Nachbarschaftsbeziehungen, die im Tiefenbild automatisch gegeben sind, auch in 3D genutzt werden sollen, muss ein Oberflächennetz erstellt werden, dass in einem Graphen die Verbindungen

dungen der Punkte speichert. Häufig werden Dreiecksnetze anstelle von allgemeinen Graphen genutzt, da Dreiecke auf jeden Fall eben sind und es möglich ist alle Oberflächen so zu beschreiben.

Bei einer regelmäßigen Messpunktanordnung können aus vier Punkten immer zwei Dreiecke erstellt werden. In dem Datenaustauschformat STL kommt ein Messfeld so auf 184 Megabyte. Bei dieser Datenmenge wird schon bei der Nutzung weniger Datenfelder die Bearbeitungszeit stark ansteigen und eine flüssige Visualisierung unmöglich.

Um die Datenrate zu reduzieren, muss sich die Anzahl der Dreiecke verringern. Für die Messtechnik ist nun interessant inwieweit das Dreiecksnetz den Messpunkten entspricht. Bei der Suche nach guten Stützpunkten für dieses Dreiecksnetz, geht die Regelmäßigkeit der Daten verloren. Hier kann jedoch ein Dreiecksnetz über den Algorithmus von Delauny gefunden werden. Es wurden drei Verfahren realisiert und verglichen.

6.4.1 Reduktion durch Filterung im Tiefenbild

Der triviale Ansatz nur jeden zweiten, vierten oder n-ten Punkt im Tiefenbild zu wählen kann das Datenvolumen schnell verringern. Da es sich um eine Abtastung handelt, kann es so zu Aliasing kommen. Um diesen Effekt zu unterbinden, müssen die Daten daher durch einen Tiefpassfilter geglättet werden.

Die Methode ist sehr schnell und es muss nur ein linearer Filter genutzt werden. Feine Strukturen gehen verloren und Kanten werden verrundet. Das Ergebnis ist mit einer Messung eines viel größeren Sensors vergleichbar.

6.4.2 Iterative Reduktion

Falls die Messdaten eine ideale Ebene bilden können Sie durch zwei Dreiecke beschrieben werden. Iterativ wird nun, um diese Annäherung an die reale Geometrie, ein Intervall an zulässiger Abweichung definiert, und Bereiche die aus diesem Intervall heraustreten werden segmentiert, um in Extrema zu suchen. Diese Punkte werden zusätzliche Stützstellen für die nächste Iteration. Durch den Algorithmus von Delauny wird nun ein neues Dreiecksnetz bestimmt und die Abweichung neu bestimmt.

Über die Iteration kann sichergestellt werden, dass ebene Abschnitte mit wenigen Punkten beschrieben werden, während die maximale Abweichung von der gemessenen Geometrie über das Intervall bestimmt werden kann.

Für die Bestimmung der Abweichung werden sehr viele Rechen- und Suchoperationen benötigt, was den Algorithmus langsam macht.

6.4.3 Reduktion durch Approximation mit linearen Splines

Die Berechnung der Abweichung hat den zeitlich größten Einfluss auf die Reduktion. Eine einfache Art die Dauer zu reduzieren ist es mit mehr Stützstellen anzufangen. Hier gibt es die Möglichkeit von regelmäßig angeordneten oder zufälligen Stützstellen.

Für die exakte Bestimmung des Abstandes zwischen einem Dreiecksnetz muss für jeden Datenpunkt des zugehörige Dreieck gefunden werden, um den Abstand zur Ebene, die das Dreieck bildet, zu berechnen.

Wesentlich schneller ist es, die Stützstellen für lineare Splines zu nutzen und eine Vergleichshöhenkarte zu berechnen, um durch Subtraktion mit dem Datensatz die Abweichung in Tiefenrichtung zu bestimmen. Das Intervall aus dem vorherigen Abschnitt ist die Projektion des Abstandes auf die z -Achse.

Da dieses Verfahren wesentlich schneller und die maximale Abweichung eingestellt werden kann, wird dieses Verfahren genutzt. Auf einem modernen PC können die Daten in Taktzeit der Messung so in Dreiecksnetze umgewandelt werden.

6.5 Messung konkaver Bereiche mittels Streifenprojektion

Sehr wichtig für eine automatische Inspektion ist die Verlässlichkeit der Daten. Diese Verlässlichkeit ist gerade bei der Messung von glänzenden und konkaven Bereichen nicht gegeben [80]. Gerade im Bereich vom *Tannenbaum* (siehe Kap.: A.1), der die Einspannung einer Turbinen- oder Verdichterschaufeln in den Rotor gewährleistet, sind konkave Elemente mit hohen Krümmungen zu finden.

Bei der Streifenprojektion wird die Werkstückoberfläche vom Projektor beleuchtet. Je nach Oberflächeneigenschaften wird ein Teil dieses Lichtes als Mischreflexion über den Halbraum über der Oberfläche abgegeben. Bei konkaven Oberflächen liegt nun ein Teil der Oberfläche in dem Halbraum über einem anderen Ausschnitt der Oberfläche. Somit beeinflussen sich die Beleuchtungszustände dieser beider Oberflächenausschnitte gegenseitig. Durch die Beleuchtungsrichtung und die BRDF (Kap.: 3.2) wird nun die

Höhe des Einflusses bestimmt. Diese Einflüsse werden in der Streifenprojektion derzeit nicht berücksichtigt [1, 51, 58, 102] und können zu erhöhtem Rauschen oder gar zu vollständig falschen Messergebnissen führen.

6.5.1 Komplexität der Problems

In den Auswertalgorithmen der Streifenprojektion wird davon ausgegangen, dass räumlich benachbarte Projektorpixel den Oberflächenbereich beleuchten, der auf einen Kamerapixel abgebildet wird (siehe Abb.: 5.3). Bei unbekannter Geometrie und Oberfläche kann jedoch jeder Projektorpixel auf jeden Bildpixel wirken. Für das verwendete Streifenprojektionssystem [29] müsste für jede Messanordnung der Einfluss von 1024×768 Projektorpixeln auf 1624×1236 Kamerapixels bestimmt werden. Auch wenn die Bestimmung dieses Zusammenhangs zu besseren Ergebnissen führen könnte, so ist der Zeitaufwand jedoch so groß, dass eine andere Lösung gefunden werden muss.

6.5.2 Entwicklung eines Qualitätsmaßes

Für die Auswertung der Streifenbilder ist das Verhältnis von direkter zu der nicht modellierten indirekten Beleuchtung wichtig. In der klassischen Streifenprojektion werden Binärbilder (Graycode) und Graustufenbilder (\cos^2) verwendet, die im Durchschnitt 50% der maximalen Helligkeit haben.

Die Idee für einen Qualitätsmaßstab ist nun, einen Test zu entwickeln, der das Verhältnis von direkter zu indirekter Beleuchtung ermitteln kann. Nun gibt es zwei Extreme: Wenn alle Projektorpixel hell sind, hat jeder Pixel maximale direkte und indirekte Beleuchtung; wenn alle Projektorpixel dunkel sind, wird weder direkt noch indirekt beleuchtet. Muster mit 50% hellen und 50% dunklen Pixeln beleuchten jeden Pixel im Durchschnitt zu 50% indirekt, genauso wie es bei den gewöhnlichen Streifenmustern ist. Für den Qualitätstest muss nur noch eine Musterfolge gefunden werden, die den Unterschied zwischen heller und dunkler direkter Beleuchtung findet.

Für den Test wurde eine Folge von Projektionsmustern aus sechs Schachbrettmustern gefunden (siehe Abb.: 6.12), die jeden Einflussbereich für einen Kamerapixel mindestens einmal direkt beleuchtet und zusätzlich einmal nicht direkt (Anmerkung: *Nicht direkt* heißt hier nicht indirekt) beleuchtet.

Zu den sechs Schachbrettmustern $P_{ch1..6}$ und den vollständig hellem und dunklem

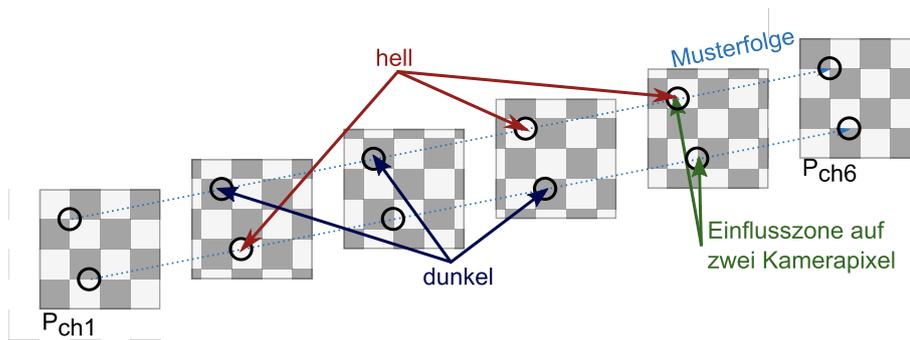


Abbildung 6.12: Durch die Abfolge von Schachbrettmustern wird jeder Oberflächenabschnitt mindestens einmal direkt beleuchtet und ist mindestens einmal im Dunkeln.

Projektor P_h, P_d werden die zugehörigen Kamerabilder $I_{ch1..6}, I_h, I_d$ aufgenommen. Aus diesen Ausgangsbildern werden die abgeleiteten Bilder I_{max} (Glg.: 6.2) und I_{min} (Glg.: 6.3) bestimmt.

$$I_{max}(k, l) = \max(I_{ch1}(k, l), \dots, I_{ch6}(k, l)) \quad (6.2)$$

$$I_{min}(k, l) = \min(I_{ch1}(k, l), \dots, I_{ch6}(k, l)) \quad (6.3)$$

Q_{ch} als Qualitätsmaß

Unter der Annahme, dass der Einfluss der indirekten Beleuchtung bei den Schachbrettbildern immer gleich ist, wird mit Q_{ch} (Glg.: 6.4) das Verhältnis aus direkter Beleuchtung zu maximaler Beleuchtung gebildet:

$$Q_{ch}(k, l) = \frac{I_{max}(k, l) - I_{min}(k, l)}{I_h(k, l) - I_d(k, l)}; \forall I_h(k, l) > I_d(k, l). \quad (6.4)$$

Wenn ein Oberflächenbereich nicht indirekt beleuchtet wird, so ist $I_{max} = I_h$ und $I_{min} = I_d$ und so kommt es zu einer Qualität = 1. Wenn nun $I_{max} = I_{min}$ ist, hängt die Helligkeit nicht von der direkten Beleuchtung ab und die Qualität ist 0. Außer bei Ausreißern bewegt sich Q_{ch} im Bereich [0..1] und wird mit zunehmendem Einfluss der indirekten Beleuchtung geringer.

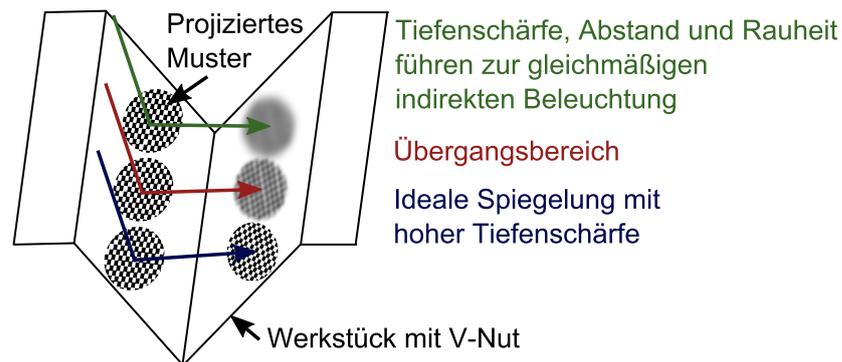


Abbildung 6.13: Indirekte Beleuchtung durch Reflexion

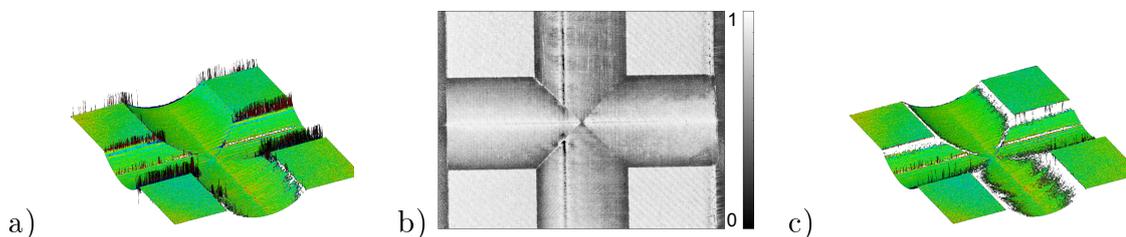


Abbildung 6.14: a) Messung ohne Filterung b) Qualitätskarte c) Gefilterte Messung

Einschränkungen von Q_{ch}

Bisher wurde angenommen, dass der Einfluss der indirekten Beleuchtung bei allen Schachbrettmustern gleich ist. Diese Annahme ist gerade bei hochgradig spiegelnden Oberflächen nicht mehr haltbar, da in der Reflexion das Muster nicht ausreichend "verwischt" wird. Wie in Abb.: 6.5.2 zu sehen, wird die Annahme der gleichmäßigen indirekten Beleuchtung mit höherem Abstand, geringerer Tiefenschärfe des Projektors und höherer Rauheit der Oberfläche besser. Auch die Strukturgröße der Schachbrettes sollte möglichst klein sein, damit ein möglichst kleiner Streukreis ausreicht das Muster zu egalisieren.

Anwendung von Q_{ch}

Zur Qualifizierung der Methoden wurde ein Werkstück mit zwei sich kreuzenden U-Nuten 6.14 erstellt, das die Problematik der Mehrfachreflexion in unterschiedlichen Richtungen verdeutlicht.

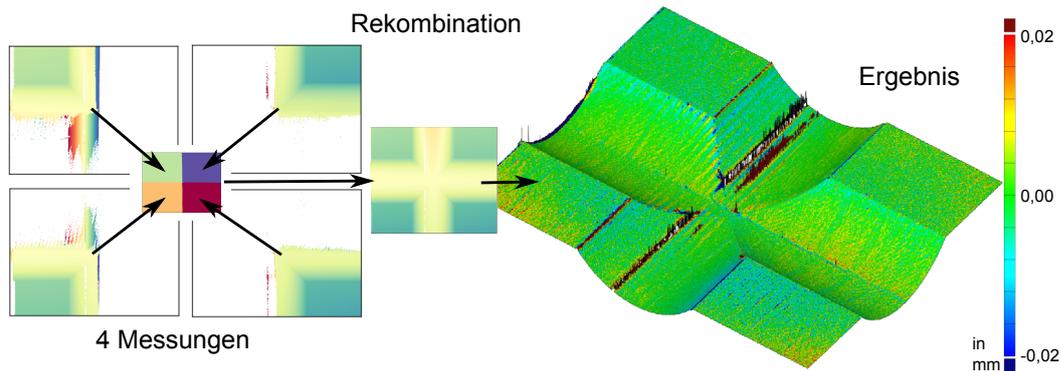


Abbildung 6.15: Rekombination der Geometrie aus vier Messungen

6.5.3 Vermeidung von Reflexionen

Ein Qualitätsmaß kann nur vor der Nutzung unzuverlässiger Daten schützen. Über Bereiche, die nur mit sehr schlechter Qualität gemessen wurden, sind dadurch keine Aussagen möglich. Der Ansatz ist einfach: Wenn Wechselwirkung die Messung stört, muss der Einfluss vermieden werden. Indem Geometriebereiche, die einen hohen gegenseitigen Einfluss auf die Beleuchtung haben, nacheinander gemessen werden, verringert sich der Anteil der störenden indirekten Beleuchtung [55].

Wenn zum Beispiel eine V-Nut gemessen werden soll, wird erst nur auf eine Seite projiziert. Die andere Seite wird im Anschluss gemessen und die Daten der beiden Bereiche werden zusammengefügt. Dieses Vorgehen ist durch repositionieren des Streifenprojektors realisierbar. Durch die Nutzung virtueller Masken auf den Projektionsmustern können auf gezielt Bereiche im Projektor dunkel geschaltet werden.

Da die Kamera aus den nicht direkt beleuchteten Bereichen durch die indirekte Beleuchtung auch Signale bekommt, können die Daten nicht immer direkt zusammengefügt werden. Für die Messung des Probekörpers (Abb.: 6.15) wurde aus einer Einflussanalyse ein Rekombinationsbild erstellt.

Am Beispiel der sich kreuzenden U-Nuten wird das Vorgehen aufgezeigt (Abb.: 6.15).

In [80] wird ein interessantes Vorgehen zur Automatisierung der Detektion von sich beeinflussenden Bereichen aufgezeigt, dass durch die Nutzung einer vollständigen Kalibrierung Mehrdeutigkeiten unterdrückt. Im derzeitigen Entwicklungsstadium können jedoch noch nicht automatisch virtuelle Masken erzeugt werden.

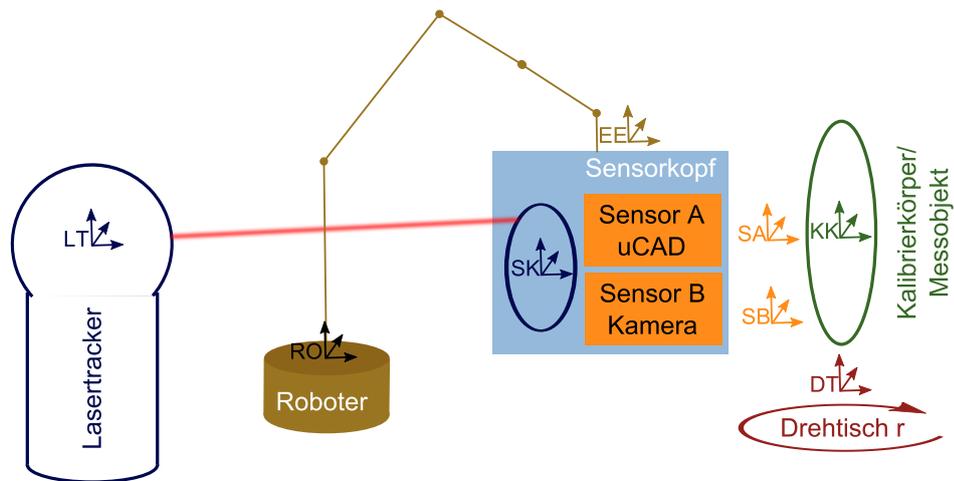


Abbildung 6.16: Überblick zu den verwendeten Koordinatensystemen

6.6 Referenzierung

Die Lage des Sensorkopfes (Koordinatensystem SK) wird durch den Lasertracker gemessen, um die Sensordaten in ein Weltkoordinatensystem (Lasertracker LT oder später Kalibrierkörper KK) umzuwandeln (siehe Abb.: 6.16). Es werden drei Methoden zur Bestimmung verglichen: Messung eines Retroreflektors und Nutzung der Orientierung vom Roboter, Messung von drei Retroreflektoren und Bestimmung der Transformation aus der Prokrustes-Analyse [23] und die Messung mit einem bewegten Retroreflektor.

Fusion von Roboter- und Lasertracker-Daten

Die Unsicherheit der Bestimmung der Roboterpose aus den Gelenkwinkel betrifft besonders die Position des Endeffektors. Die Unsicherheiten für die Orientierung sind wesentlich geringer (Kap.: 5.2.3). Somit kann die einfache Nutzung der Messung eines Retroreflektors zusammen mit der Orientierung aus der Roboterkinematik (6.5) die Unsicherheit der Lage deutlich verringern.

Um O_{Fusion} nutzen zu können muss die Position des Retroreflektors \vec{p}_{LT} in Koordinatensystem des Roboter-Endeffektors kalibriert werden.

$$\mathbf{O}_{Fusion} = (e\vec{x}_R, e\vec{y}_R, e\vec{z}_R, \vec{p}_{LT}) \quad (6.5)$$

Nutzung von 3 oder mehr Retroreflektoren

Wenn mindestens drei Retroreflektoren, welche nicht kollinear ausgerichtet sind, am Endeffektor durch den Lasertracker gemessen werden, kann die Lage über die Prokrustes-Analyse [23] bestimmt werden.

Um den Fehler gering zu halten, sollten die Lagen der Retroreflektoren zueinander möglichst genau a-priori bestimmt worden sein.

Wenn immer die gleiche Retroreflektoren zur Messung genutzt werden, ist es Sinnvoll, den Koordinatenursprung in den Schwerpunkt der Positionen zu legen, da durch Mittelung so der Einfluss der einzelnen Messunsicherheiten verringert wird.

Die Transformation $\mathbf{O}_{\text{Prokrust}}$ wird durch die Prokrustes Analyse zwischen den zugehörigen Punkten bestimmt.

$$\mathbf{O}_{\text{Prokrust}} = (\mathbf{R}; \mathbf{T}) \quad (6.6)$$

Bestimmung der Lage mit bewegten Retroreflektoren

Der Lasertracker kann nur die Position eines Retroreflektors messen. Um eine Lage (Position und Orientierung) zu bestimmen sind mindestens drei Positionen notwendig. Neben der Nutzung mehrerer Retroreflektoren an unterschiedlichen Positionen, kann auch ein Retroreflektor, der bewegt wird, verwendet werden. In Kap. 6.7 wird ein Führungsgetriebe aufgezeigt, das einen Retroreflektor auf einer Ellipsenbahn führt.

6.7 Entwicklung eines neuartigen Systemes zur Lagebestimmung mit dem Lasertracker

In Kap.: 3.5.2 wurden unterschiedliche Systeme zur Bestimmung der Lage in allen 6 Freiheitsgraden vorgestellt. Gerade der Lasertracker hat ein hohes Potential, aufgrund der hohen Genauigkeit durch das interferometrische Messprinzip. Wie in Kap.: 5.2.2 aufgezeigt, ist die größte Einschränkung die laterale Unsicherheit, durch den Lichtweg durch das Gradientenindexfeld der Luft. Diese Einschränkung trifft aber auch alle anderen optischen Lagesensoren, nur wird dies oft nicht wahrgenommen, da andere Einflüsse größer sind.

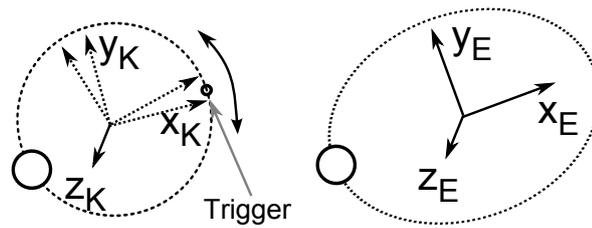


Abbildung 6.17: Kreis und Ellipse zur Definition eines Koordinatensystems

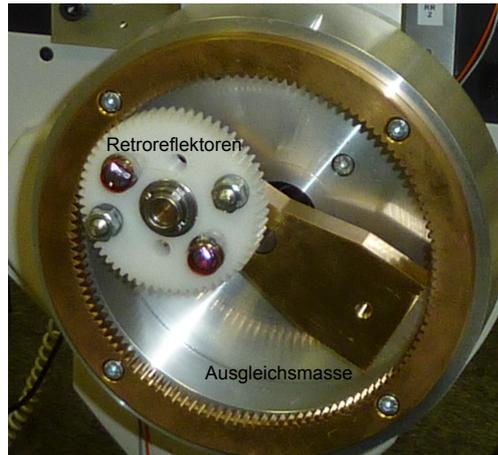


Abbildung 6.18: Realisiertes Räderumlaufgetriebe mit zwei Retroreflektoren

In [40] wird ein Messsystem vorgeschlagen, dass aus der Kreisführung eines Retroreflektors die Koordinatentransformation unter Zuhilfenahme eines Triggersignals ermöglicht. Daraus wurde die Idee geboren, ein System zu bauen, dass allein aus der Führung, ohne Zusatzsensoren, die Berechnung einer Koordinatentransformation ermöglicht. Eine Ellipse hat drei senkrecht aufeinander stehende Achsen, die somit eine direkte Definition eines neuen Koordinatensystems ermöglichen. Wie in Abb.: 6.17 zu sehen, ergibt sich somit eine geschlossene Lösung für die Bestimmung der Koordinatentransformation.

6.7.1 Entwicklung eines Ellipsengetriebes

Zur Realisierung eines Führungsgetriebes wurde nach den möglichen Getriebeprinzipien recherchiert [47]. Für die Erzeugung einer elliptischen Bahnkurve gibt es mehrere Möglichkeiten (Abb.: 6.19). Aufgrund der Einfachheit und Robustheit wurde das Räderumlaufgetriebe ausgewählt.

Da das Getriebe an den Sensorkopf montiert wird, ist es wichtig, dass durch den

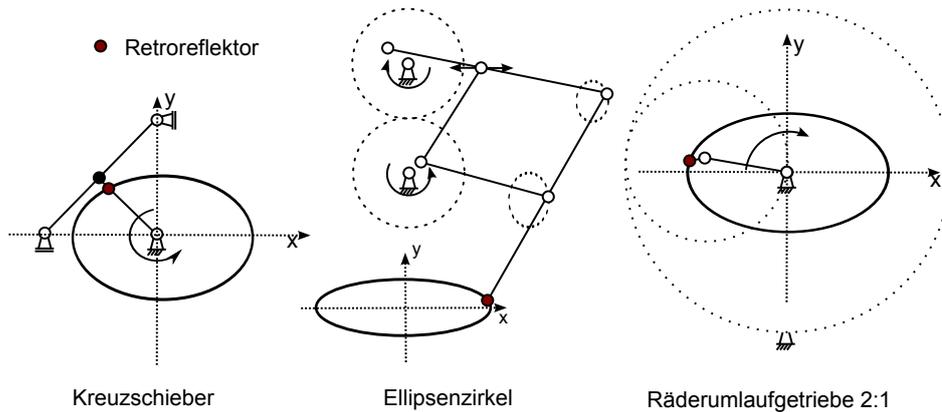


Abbildung 6.19: Mögliche Führungsgetriebe für Ellipsenbahnen

Umlauf des Getriebes keine Schwingungen in das System gebracht werden, welche die Messungen stören. Beim Räderumlaufgetriebe kann dies leicht durch Ausgleichsmassen erreicht werden.

6.7.2 Berechnung der Lage aus den Ellipsenpunkten

Die Ellipse kann durch Regression [66] räumlich eingepasst werden. Die Parameter a und b die Lage des Mittelpunktes \vec{x}_e und die drei Koordinatenachsen $e\vec{x}_e, e\vec{y}_e, e\vec{z}_e$ müssen gefunden werden. Da zur Kompensation eines möglichen Schleppfehlers (siehe kap.: 5.2.2) nur vollständige Ellipsenbahnen genutzt werden, können als Startwert der Ellipseneinpassung die Achsen der Hauptachsentransformation, der Mittelpunkt und die alten Ellipsenparameter a und b genutzt werden.

Die Achsen einer Ellipse haben keine eindeutige Richtung, um immer das gleiche Koordinatensystem aufzustellen, werden weitere Bedingungen benötigt.

- $e\vec{z}_e$ in Richtung \vec{n}
- $e\vec{x}_e$ in Richtung \vec{a}
- $e\vec{y}_e$ in Richtung \vec{b}
- $e\vec{z}_e$ zeigt Richtung Lasertracker: $e\vec{z}_e \cdot \vec{x}_{LT} \geq 0$
- Rechtshändiges Koordinatensystem

- Es bleiben zwei Möglichkeiten, die nicht eindeutig aus einem Datensatz festgelegt werden können, daher: Am Anfang wird die x-Achse an der z-Achse des Lasertracker-Koordinatensystems ausgerichtet $e\vec{x}_e \cdot e\vec{z}_{LT} \geq 0$, danach wird ihre Orientierung immer so gewählt, dass es kein „Umklappen“ gibt $e\vec{x}_{e1} \cdot e\vec{x}_{e2} \geq 0$.

Zusammen kann so die Koordinatentransformation $\mathbf{O}_{\text{Ellipse}}$ (vgl. Glg.: 6.7) festgelegt werden:

$$\mathbf{O}_{\text{Ellipse}} = (e\vec{x}_e, e\vec{y}_e, e\vec{z}_{e,LT} \vec{x}_{center}). \quad (6.7)$$

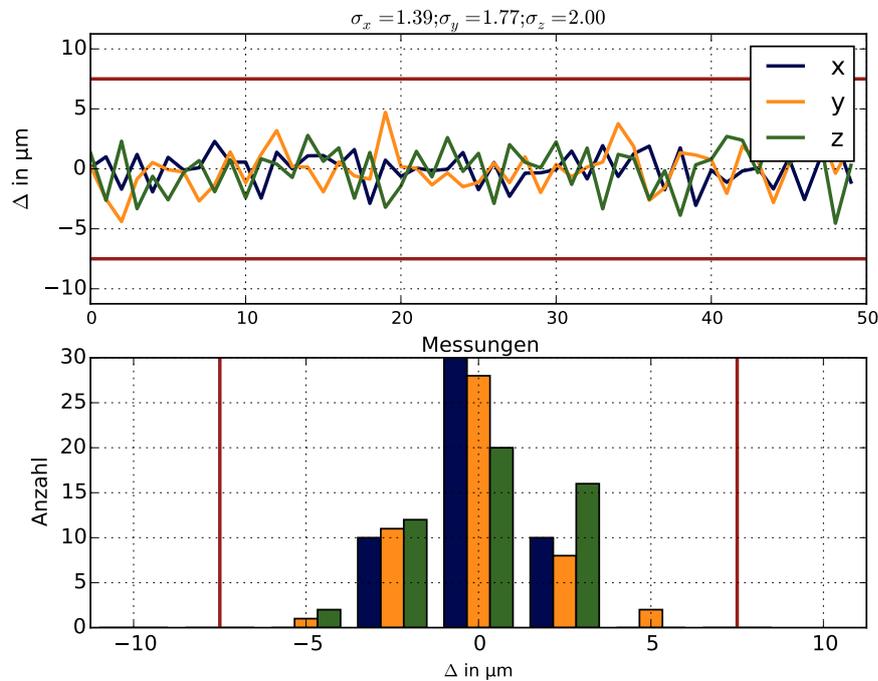


Abbildung 6.20: Wiederholungsmessung der Positionsabweichung in x-,y- und z-Richtung: 50 Messungen aufgetragen als Abfolge und als Histogramm

6.7.3 Fähigkeitsuntersuchung

Die Unsicherheiten von 5.2.2 und der Einpassung werden durch mögliches Spiel und Verformung des Getriebes überlagert. Um nun die Orientierungsmessung zu qualifizieren, wird zuerst eine Fähigkeitsuntersuchung durchgeführt, die die Schwankungen

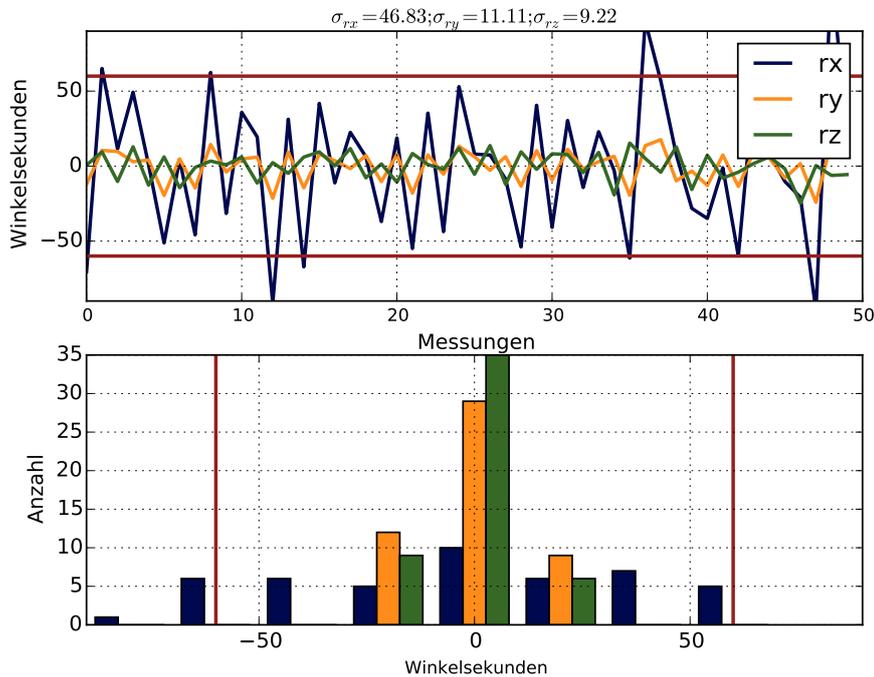


Abbildung 6.21: Wiederholungsmessung der Orientierungsabweichung als kleine Drehwinkel um die x-,y- und z-Achse: 50 Messungen aufgetragen als Abfolge und als Histogramm

der Parameter über 50 Wiederholungsmessungen analysiert. Während die Position des Mittelpunktes mit $\sigma_x < 2\mu\text{m}$ schwankt (Abb.: 6.20), weist die Orientierung um Y- und Z-Achse eine Standardabweichung $\sigma_\phi < 12''$ und $\sigma_\phi < 47''$ um die X-Achse (Abb.: 6.21) auf.

6.7.4 Vergleich mit herkömmlichen Methoden

Mit einem Sigma von unter $12''$ um die Y- und Z-Achse und einem Sigma von $47''$ um die X-Achse ist das System sehr gut in der Bestimmung der Orientierung gegenüber den kommerziellen Systemen mit $60''$ um alle Achsen. Da sich jedoch die Orientierung vom Roboter auch als sehr genau erwiesen hat (siehe Kap.: 5.2.1), wird auch die Methode durch Fusion von Roboter- und Lasertracker-Daten genutzt.

6.8 Kalibrierung des Gesamtsystems

Für die einzelnen Systeme, Streifenprojektion und Kamera mit telezentrischem Objektiv, gibt es jeweils Kalibriermethoden, um die Abbildung des Sensors zu metrischen Koordinaten zu gewährleisten. Für das Multiskalensystem müssen die einzelnen Sensoren in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden.

Wie in Abb.: 6.16 zusammengefasst, müssen die jeweiligen Transformationen zwischen den Koordinatensystemen gefunden werden. In Kap.: 5.2 wurde beschrieben, wie für jede Pose die Transformation von Lasertracker zu Sensorkopf $^{SK,LT}\mathbf{T}$ bestimmt wird.

Um das Prinzip ‘Kalibrieren wie Messen’ zu nutzen, müssen die Sensoren mithilfe ihrer eigenen Daten kalibriert werden. So muss durch die Aufnahme des Kalibrierobjektes eine Geometrieinformation des Kalibrierkörpers erkannt werden.

Die unterschiedlichen Arten von Sensoren müssen jeweils genug Informationen zur Kalibrierung aus den Daten finden.

6.8.1 Kalibrierkörper

Die Kalibrierkörper (Abb.: 6.22) dienen der Festlegung der Transformationen von den Sensorkoordinatensystemen in das Kalibrierkörperkoordinatensystem $^{KK,SA}\mathbf{T}, ^{KK,SB}\mathbf{T}$.

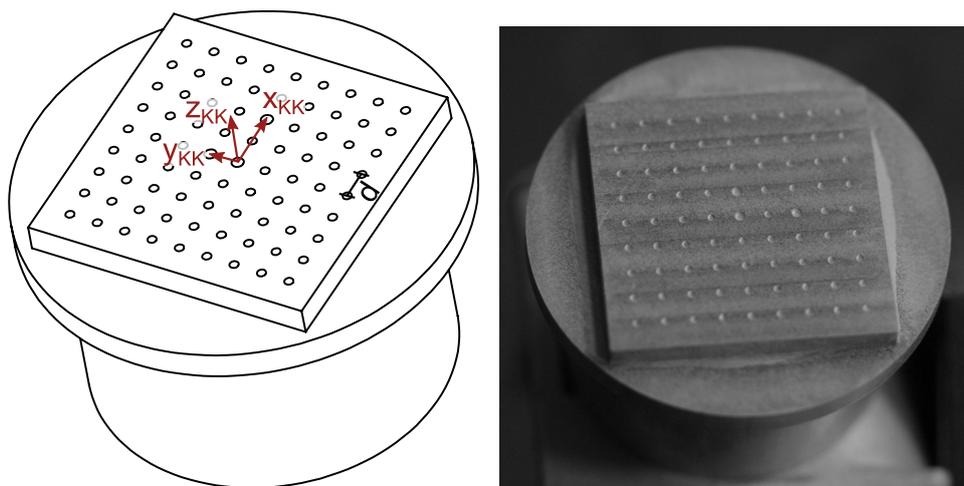


Abbildung 6.22: Festlegung des Koordinatensystems durch den Kalibrierkörper

6.8.2 Datenverarbeitung für die Kalibrierkörper

Kalibrierkugel

Eine Kugel bestimmt durch ihre Form nur den Mittelpunkt exakt. Die zu der Kugel gehörigen Datenpunkte können durch RANSAC (siehe 3.3.4) gefunden werden und optimal eingepasst werden [67].

Da die Lage des Zentrums der Kugel stark schwankte wurde von dieser Methode Abstand genommen.

Kugelabschnitts-Kalibrierkörper

Für die Kalibrierung relevant sind die Nullebene und die darin eingebrachten Kugelabschnitte. Für das Finden der Ebene (Abb.: 6.24) mit RANSAC (siehe 3.3.4) wird die Wahrscheinlichkeit benötigt, zu der ein Messpunkt zur Ebene gehört. Die Kugelabschnitte machen ca. 30% der Oberfläche aus. Zusätzlich wird konservativ mit 10% Ausreißern gerechnet, womit für die Bestimmung der korrekten Ebene mit 99,9%-iger Wahrscheinlichkeit das Erheben von 52 Stichproben notwendig ist (siehe Glg.: 3.11).

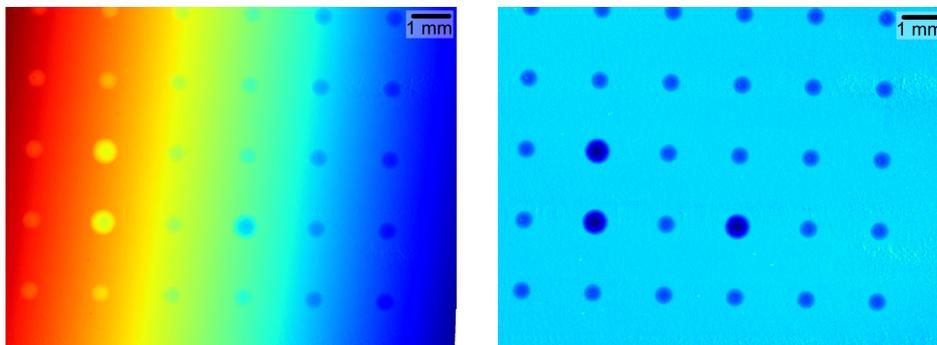


Abbildung 6.23: Rohdaten der Streifenprojektionsmessung des Kugelabschnitts-Kalibrierkörpers (links); Die Höhenkarte nach RANSAC-Einpassung der Kalibrierebene (rechts)

Um die Kugelabschnitte zu segmentieren wird ein Schwellwertfilter um die Ebene mit der Breite der doppelten Rautiefe angewandt. In sämtlichen Bereichen, die nicht zu der Ebene gehören, werden über die Methode kleinster Quadrate Kugeln eingepasst (siehe Kap.: 3.3.4). Nach der Restabweichung, dem gefundenen Radius und Abstand des Mittelpunktes von der Nullebene werden die Kugelabschnitte als zum Muster gehörig

qualifiziert (Abb.: 6.23). Die Lage der Kalibriermarken wird durch die Fußpunkte der Kugeln auf der Nullebene festgelegt.

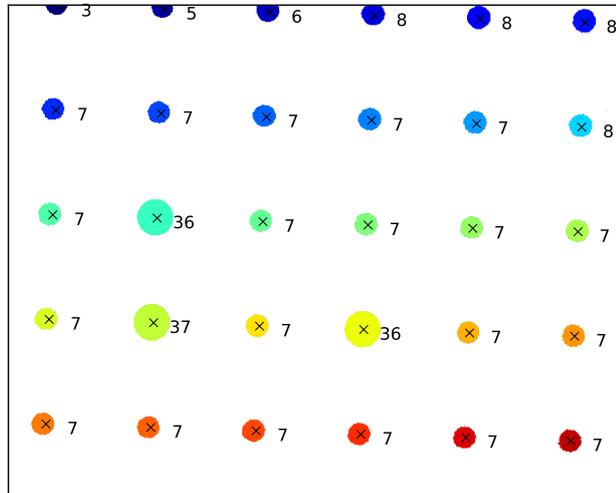


Abbildung 6.24: Automatisch erkannte Marken in den Messdaten (Volumen in $10^3 \mu m^3$)

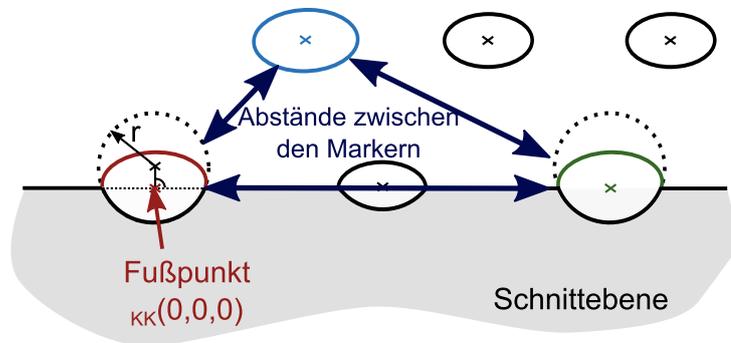


Abbildung 6.25: Schema: Auswertung der Kalibrierkörpermessung

Die tiefsten Kugelabschnitte markieren den Koordinatenursprung, die X- und die Y-Achse. Die drei Marker haben die selben geometrischen Eigenschaften und sind in einem rechtwinkligem Dreieck angeordnet. Über die Verhältnisse der Abstände werden die Marker ihrem Koordinatenpunkt zugeordnet (siehe Abb.: 6.25).

Nach der inertialen Festlegung der Achsen werden die restlichen Marker in das gleichmäßige Gitter eingepasst. Die Koordinatentransformation zwischen Sensordaten und Kalibrierkörper wird durch die Prokrustes-Analyse [23] festgelegt.

Kalibrierkörper für orientierungsabhängige Verzerrung

Wie in Kap.: 6.2.2 erwähnt, wird das Streifenprojektionssystem nur in einer Lage kalibriert. Um die Einflüsse der Orientierung des Sensors gegenüber dem Schwerevektor \vec{g} zu verringern wurde der Körper in (Abb.: 6.26) genutzt.

Die Winkel und Abweichungen der Ebenen zueinander wurde gemessen und kein systematischer Zusammenhang zwischen der Sensororientierung und den Abweichungen gefunden.

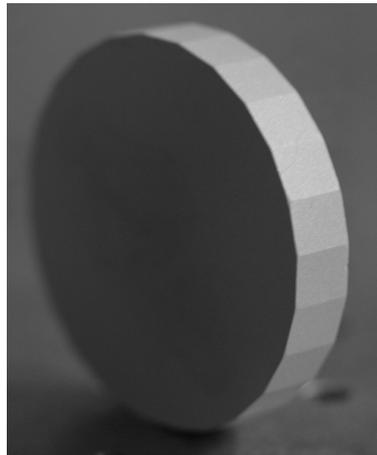


Abbildung 6.26: Kalibrierkörper: Ebenen 15°

6.8.3 Bestimmung der Transformationen

Für die gesamte Messkette müssen die Transformationen gefunden werden um Messdaten der Sensoren in Objektkoordinaten umzuwandeln. Die Umwandlung von Kalibrierkörperkoordinaten in Sensorkoordinaten ${}^{SA, KK} \mathbf{T}, {}^{SB, KK} \mathbf{T}$ wird durch die Auswertung der Messung des Kalibrierkörpers festgelegt. Die Transformationen zwischen den Sensoren und den Sensorkopfkoordinaten muss nun noch gefunden werden.

Es werden mit den Sensoren in unterschiedlichen Posen die Kalibrierkörper aufgenommen und für die Pose i jeweils die Transformation ${}^{SA, KK} \mathbf{T}_i, {}^{SB, KK} \mathbf{T}_i$ bestimmt und aus der Referenzierung ${}^{LT, SK} \mathbf{T}_i$. Die Koordinatensysteme des Lasertrackers LT und des Kalibrierkörpers KK bleiben bei den unterschiedlichen Posen konstant, genauso wie die gesuchten Starrkörpertransformationen ${}^{SK, SA} \mathbf{T}, {}^{SK, SB} \mathbf{T}$.

Durch die Minimierung des Abstandes bei der Rücktransformation in Kalibrierkörperkoordinaten zwischen unterschiedlichen Posen i, j können so durch die Methode

der kleinsten Quadrate nach Nelder-Mead die Transformationen nichtlinear eingepasst werden. Um einen möglichst hohen Konvergenzradius zu haben, wird die Starrkörpertransformation als Drehung um eine Achse modelliert.

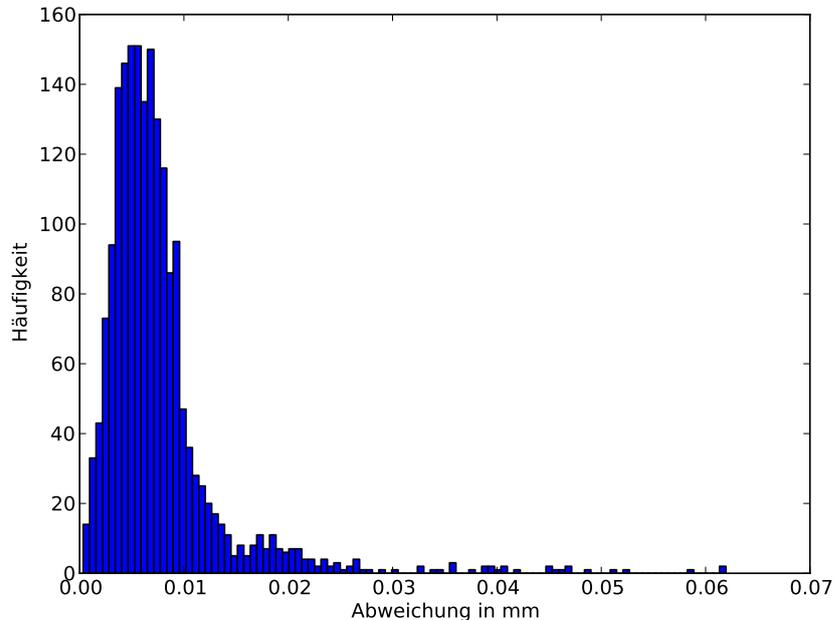


Abbildung 6.27: Histogramm der Restabweichungen nach der Kalibrierung

$$\min \left(\sum_{i=1}^{Posen} \sum_{j=1}^{Posen} \|{}_{KK}x_i - {}_{KK}x_j\| \right); \forall i \neq j \quad (6.8)$$

6.8.4 Ergebnisse

Die Qualität der Kalibrierung kann durch den Restfehler bei der Ausgleichsrechnung bewertet werden. In Abbildung 6.27 sind die Restabweichungen in ein Histogramm eingetragen. Die mittlere Abweichung beträgt $7,62\mu\text{m}$ und ist damit kleiner als ein Pixel des Sensors.

6.9 Datenfusion

Durch Messunsicherheiten in der Referenzierung werden benachbarte Messfelder immer einen kleinen Versatz aufweisen. Durch Methoden des ICP-Verfahrens (siehe Kap.:

3.5.2) können diese Messfelder nun aneinander ausgerichtet werden (Abbildung 6.28 c)).

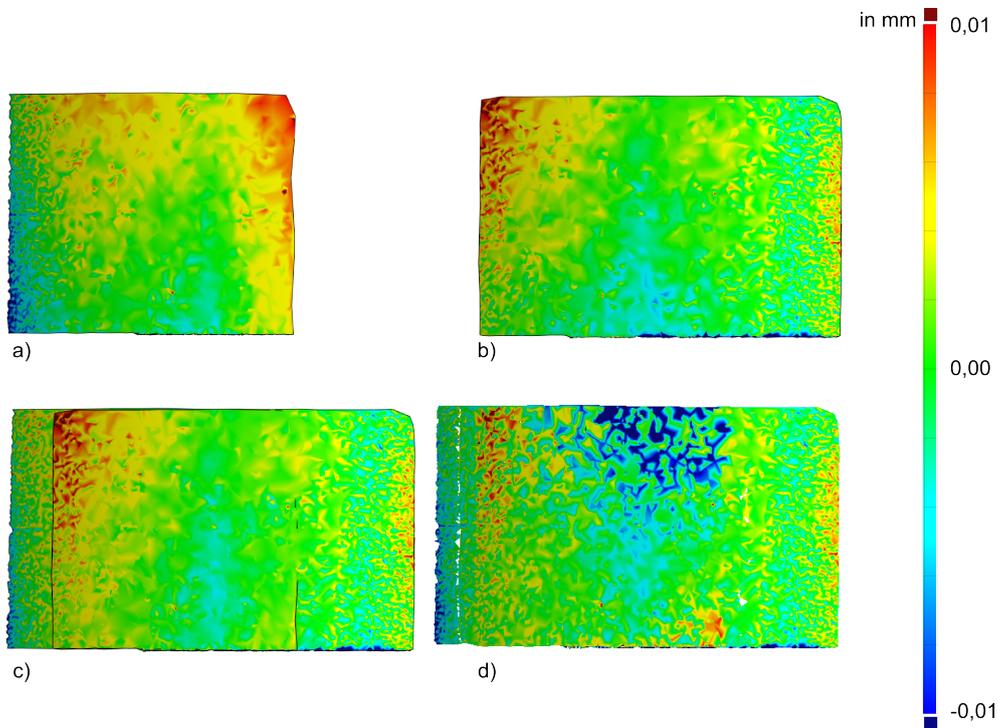


Abbildung 6.28: Fusion von Messfeldern eines Zylinderabschnitts; a) Abweichung vom Zylinder Messfeld 1; b) Abweichung vom Zylinder Messfeld 2; c) Abweichung vom Zylinder der mit ICP ausgerichteten Messfelder; d) Abweichung der fusionierten Messfelder

Im allgemeinen hat ein Messfeld jedoch mehrere Nachbarn und beim Zusammenfügen dieser Messfelder können je nach Reihenfolge unterschiedliche Gesamtgeometrien entstehen. Eine beste Lösung ist aufgrund der großen Datenmenge schwer zu finden, weswegen iterativ in einer Baumstruktur vorgegangen, sodass jedes Datenfeld sich an dem Nachbarn mit dem größten Überlappbereich ausrichtet. So entstehen immer größere Flächen, die am Ende eine Gesamtgeometrie ergeben.

Nach der Ausrichtung von zwei Messfeldern zueinander ist die Lage der Oberfläche im Überlappbereich nicht eindeutig (Abb.: 6.28 c)). Wenn der Überlappbereich relativ eben ist, kann er auf zwei Dimensionen projiziert werden und durch eine Delaunay-Triangulation neu vernetzt werden. Aufgrund der höheren Messpunktdichte und nicht ausgeglichener Abweichungen kann dieser Bereich rauer wirken (Abb.: 6.28 d)).

Kapitel 7

Ergebnisse von Multiskalen - Untersuchungen

7.1 Messung eines Konturnormals

Zur Überprüfung der Genauigkeit des Messsystems wurde ein Konturnormal [82] gemessen. Diese Art des Normals wird gewöhnlich zur Kalibrierung von Tastschnittgeräten eingesetzt. Die Ebenen und Zylinderausschnitte lassen auch eine Überprüfung eines 3D Messsystemes zu.

7.1.1 Einzelmessung

Zur Bewertung der Ergebnisse einer Einzelmessung mit dem Streifenprojektionssensor wird der Zylinder r3 (siehe Abb.: 7.1) gemessen. Für die optimale Messpose für dieses Element wird der Sensor normal zur Grundebene ausgerichtet und zusätzlich die Projektionsrichtung in einer Ebene mit der Zylinderachse gewählt.

Die Winkel $\beta_{1..4}$ können auch je aus einer Messung bestimmt werden. Für die Innenwinkel β_2 und β_4 wird jeweils die Einzelmessung als auch die bereichsweise Messung (siehe Kap.: 6.5.3) aus zwei Messungen in der selben Pose bewertet.

7.1.2 Vollständige Messung (ohne Fusion)

Die Messdaten werden aufgenommen und durch die Lagemessung über die Kalibrierung in ortsfeste Koordinaten überführt. Nach der Reduktion der Daten (siehe Kap.: 6.4) und

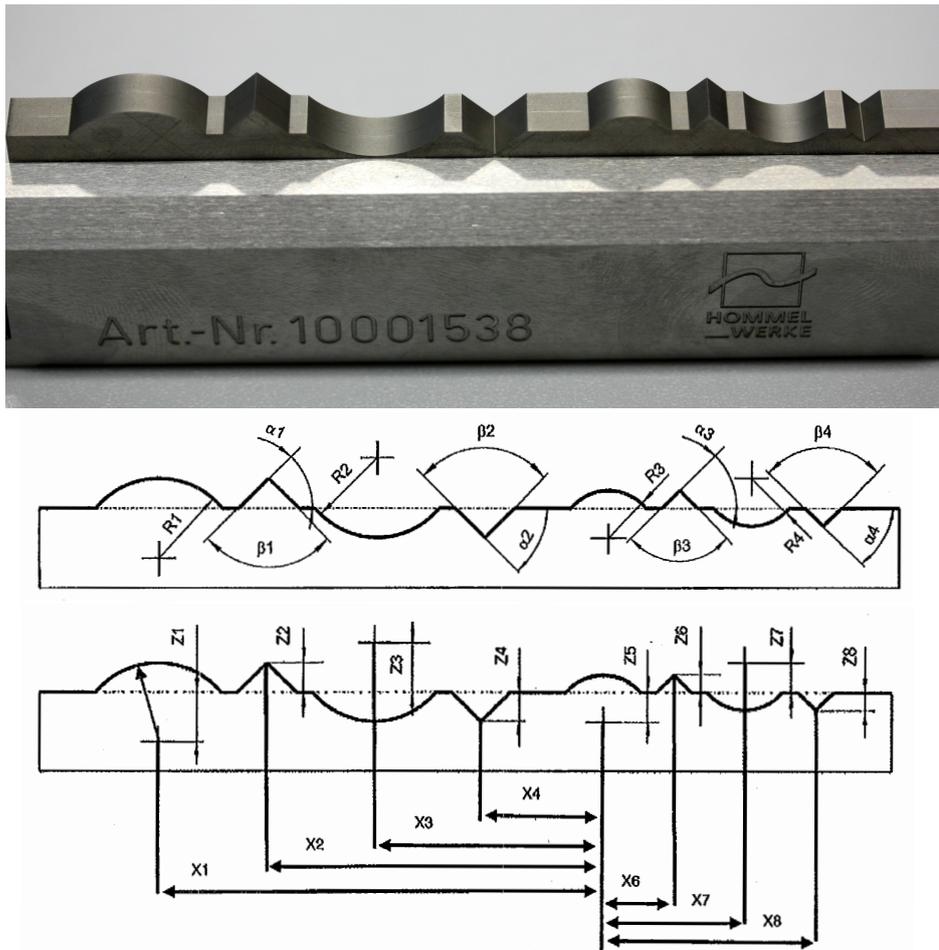


Abbildung 7.1: Konturnormal Typ KN 8: Foto; Definition der Geometrie

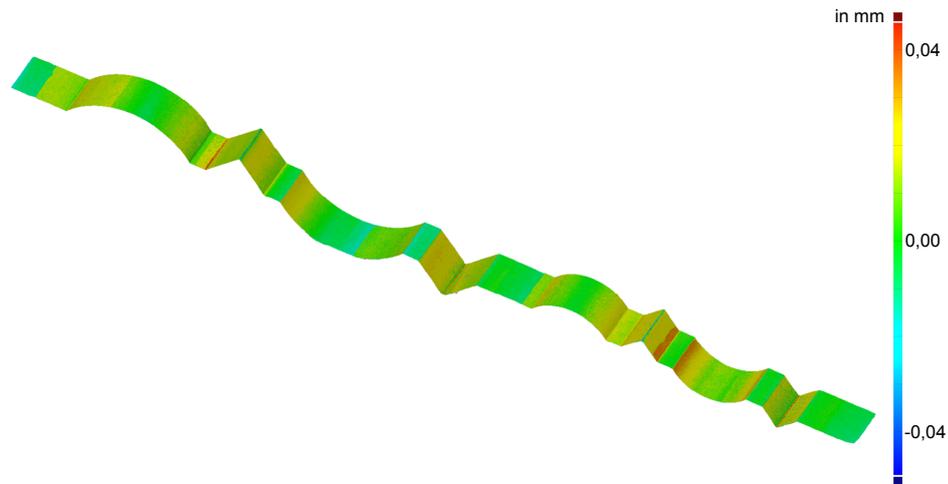


Abbildung 7.2: Abweichung der Messdaten vom Konturnormal mit $\sigma = 15,8\mu m$ (ohne Fusion)

Besteinpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate wird der Abstand zwischen Messdaten und CAD-Modell ausgewertet (siehe Abb.: 7.2). Die Standardabweichung der Messpunkte vom CAD-Modell beträgt $15,8\mu m$.

Die Form- und Lageparameter des Normals werden jeweils aus der Einpassung von Ebenen und Zylindern errechnet.

Lageparameter x

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	55,8034	0,8	55,818	13,8
2	42,3245	0,8	42,328	2,7
3	28,8431	0,8	28,843	0
4	15,3645	0,8	15,378	12,7
6	8,8800	0,8	8,889	8,2
7	17,7608	0,8	17,754	-6,0
8	26,6400	0,8	26,629	-10,2

Die Lageparameter x_i und z_i schwanken im Bereich um $\pm 13\mu m$. Durch eine hohe Abweichung fällt primär der Radius von Zylinder 1 mit $30\mu m$ Abweichung auf. Die Winkelabweichungen in der kleinen V-Nut (α_4, β_4) haben gegenüber den anderen Winkeln wesentlich höhere Abweichungen. Aufgrund der Anfälligkeit für Mehrfachreflexionen (siehe Kap.: 6.5) ist auch die Anzahl der Ausreißer in diesem Bereich sehr

Lageparameter z

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	6,2972	1,0	6,311	10,2
2	3,7045	0,8	3,715	9,3
3	6,3009	1,2	6,290	-10,0
4	3,7091	0,8	3,711	1,2
5	3,7749	1,3	3,772	1,6
6	2,2152	0,8	2,206	-8,4
7	3,8059	1,3	3,818	-10,7
8	2,2205	0,8	2,211	-8,7

Radien r

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	10,0021	0,9	10,030	29
2	10,0106	1,1	10,000	-9,5
3	5,9940	1,2	5,996	0,8
4	6,0207	1,2	6,030	8,1

Winkel

#	Istmaß in $^\circ$	Unsich. in $^\circ$	Messwert in $^\circ$	Abweichung in $^\circ$
α_1	44,9820	0,0150	45,08	0,085
α_2	44,9914	0,0150	45,07	0,065
α_3	44,9868	0,0150	44,95	0,015
α_4	44,9404	0,0162	44,79	-0,13
β_1	90,0394	0,0150	89,92	-0,15
β_2	90,0026	0,0150	89,87	-0,12
β_3	90,0387	0,0183	89,92	-0,10
β_4	90,0926	0,0212	90,92	0.81

hoch. Damit sind diese Parameter nur mit höherer Unsicherheit zu bestimmen.

7.1.3 Vollständige Messung (mit Fusion)

Über Fusionsalgorithmen können die Sprünge und Kanten zwischen den Messfeldern verringert werden. Die Messdaten werden durch den ICP allerdings verschoben, was sich auf die geometrische Auswertung auswirkt (siehe Kap.: 3.5.2). Um den Einfluss der Algorithmen abzuschätzen werden die Auswertungen aus der letzten Abschnitt mit fusionierten Messdaten wiederholt.

Lageparameter x

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	55,8034	0,8	55,828	23,8
2	42,3245	0,8	42,334	8,3
3	28,8431	0,8	28,843	0
4	15,3645	0,8	15,373	8,2
6	8,8800	0,8	8,881	10,4
7	17,7608	0,8	17,749	-11,4
8	26,6400	0,8	26,620	-18,7

Lageparameter z

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	6,2972	1,0	6,303	5,1
2	3,7045	0,8	3,710	4,4
3	6,3009	1,2	6,295	-5,1
4	3,7091	0,8	3,711	1,2
5	3,7749	1,3	3,778	1,3
6	2,2152	0,8	2,215	-1,9
7	3,8059	1,3	3,797	-7,8
8	2,2205	0,8	2,213	-6,7

Es zeigt sich, dass die Formparameter geringere Abweichungen haben. Während sich die Lageparameter in z -Richtung verbessern, verschlechtern sich jedoch die Lageparameter in x -Richtung. Da die Änderung durch die Fusion stark variiert und von den Überlappbereichen abhängig ist, wird die Fusion für die anderen Auswertungen nicht genutzt.

Radien r

#	Istmaß in mm	Unsich. in μm	Messwert in mm	Abweichung in μm
1	10,0021	0,9	10,018	15
2	10,0106	1,1	10,003	-6,5
3	5,9940	1,2	5,992	-0,7
4	6,0207	1,2	6,027	4,7

Winkel

#	Istmaß in $^\circ$	Unsich. in $^\circ$	Messwert in $^\circ$	Abweichung in $^\circ$
α_1	44,9820	0,0150	45,06	0,066
α_2	44,9914	0,0150	45,05	0,045
α_3	44,9868	0,0150	44,82	-0,15
α_4	44,9404	0,0162	44,87	-0,05
β_1	90,0394	0,0150	89,89	-0,13
β_2	90,0026	0,0150	89,87	-0,11
β_3	90,0387	0,0183	89,94	-0,08
β_4	90,0926	0,0212	90,64	0,53

7.2 Messung während der Regeneration

Die Qualität der Reperatur hängt von dem Wissen vor den Bearbeitungsschritten ab. Nach dem Reperaturschweißen muss die Schaufel rekonturiert werden. Wenn die Geometrie um die Schweißnaht bekannt ist, kann eine gezielte Vorsteuerung der Fräsparameter die Geometrieabweichungen verringern und die Oberflächenqualität verbessern [10].

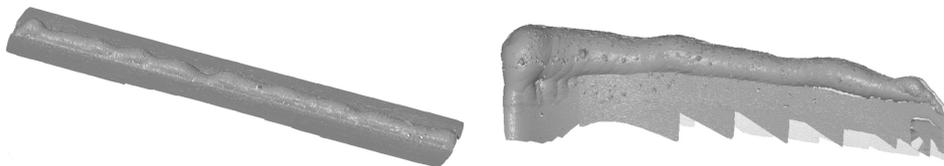


Abbildung 7.3: Schweißnaht auf Flachprobe; Reparaturschweißnaht an Turbinenschaufeltyp

Die Geometrie von Schweißnähten wurde an Probeblechen und einer realen Tur-



Abbildung 7.4: Turbinenschaufel für einen Luftturbinenprüfstand [4]

binenschaufel aus einem Flugtriebwerk aufgenommen. Die Messungen wurden aus je mehr als 30 Messfeldern in Referenzkoordinaten zusammengesetzt (siehe Abb.: 7.3).

7.3 Messung einer Turbinenschaufel aus einem Versuchsstand

Die Turbinenschaufeln (siehe Abb.: 7.3) wurde am Institut für Turbomaschinen und Fluidodynamik der Leibniz Universität Hannover entwickelt [4] und bietet dadurch die Gelegenheit, dass sowohl die Schaufel als auch ihre originalen CAD-Dokumente zur Verfügung stehen. Die Schaufel wird in einem Luftturbinenversuchsstand genutzt und hat daher keine Beschichtung und kein Kühlsystem.

Die Schaufel wurde spanend aus Aluminium hergestellt und hat eine hochglänzende Oberfläche, die sich in den Reflexionseigenschaften deutlich von den Oberflächen von Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken unterscheidet. Um die glänzende Oberfläche mit dem vorhandenen Streifenprojektionssystem messen zu können, wurde Kreidespray auf gebracht, dass eine dünne, diffus reflektierende Schicht auf die Werkstückoberfläche legt.

Gerade im Bereich der *Tip* (Schaufelspitze) zeigen sich Abweichungen und kleine Sprünge in den Messdaten. Sie lassen sich aus der Messunsicherheit der Lasertrackers ($\pm 20\mu m$ in dieser Konfiguration) und Unsicherheiten in dem Drehwinkel und der Achsstellung der Drehachse erklären.

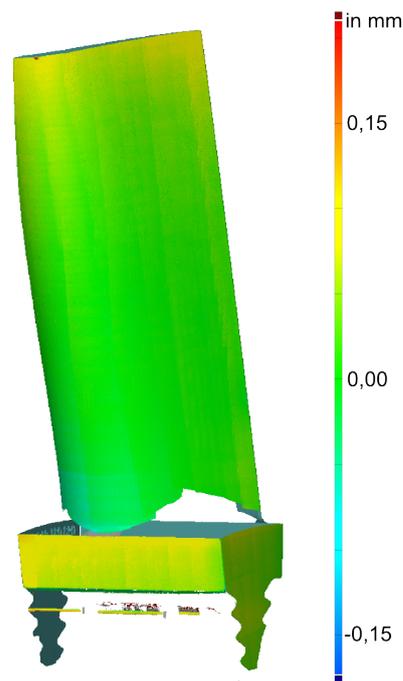


Abbildung 7.5: Messung der Luftturbinenschaufel mit einer Geometrieabweichung von ca. 0,1 mm am Kopf

7.4 Messung einer betriebsbeanspruchten Turbinenschaufel



Abbildung 7.6: Betriebsbeanspruchte Turbinenschaufel mit Defekten in der Leitkante

Die Turbinenschaufel (Abb.: 7.4) hat gut sichtbare Einschlüsse in der Leitkante. Für Turbinenschaufeln, die tatsächlich in Flugtriebwerken eingesetzt werden, sind die Auslegungsgeometrien Firmengeheimnisse. Trotzdem dürfen auch andere Firmen, die

diese Daten nicht kennen, Schaufeln nach den Wartungshandbüchern reparieren. Der Vergleich dieser ausgemusterten Schaufel gegenüber einer Einsatzbereiten zeigt globale Geometrieabweichungen (Abb.: 7.7). Leider sind die lokalen Defekte, die Einschläge in der Leitkante, in diesem Vergleich kaum sichtbar.

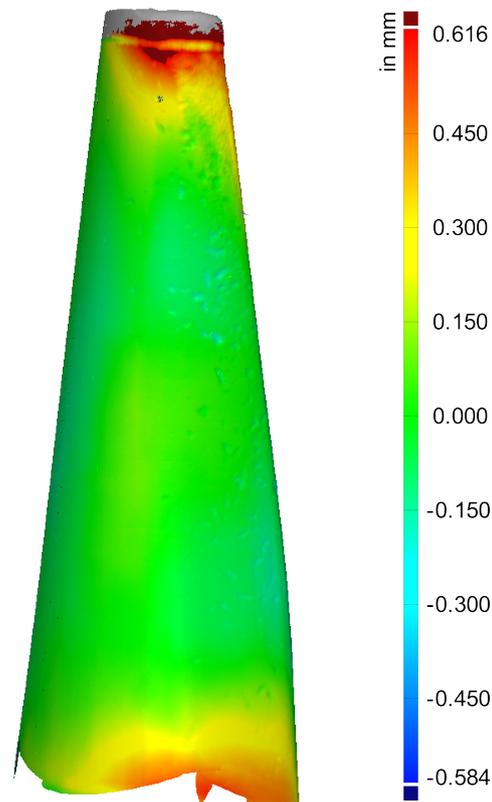


Abbildung 7.7: Geometrieabweichung einer verschlissenen Schaufel nach Best-Fit-Einpassung

Aufgrund der hohen Betriebstemperatur bei gleichzeitig hoher Fliehkraft verformen sich Turbinenschaufeln innerhalb ihrer Einsatzzeit. Diese Änderung der Geometrie ist in einem bestimmten Rahmen durchaus zulässig. Um die Abweichung des Ist-Zustandes zu einem Soll-Zustand bewerten zu können, muss aus dem Ist-Zustand eine mögliche individuelle Sollgeometrie, die durch die Regeneration erreicht werden soll, für jede Schaufel berechnet werden. Der erste Ansatz, der in diesem Projekt durchgeführt wurde, ist es Einschläge und Ausbrüche zu detektieren und unbeschädigte Bereiche zu segmentieren. Um nun eine mögliche Sollgeometrie zu erhalten, werden die Einschläge und Ausbrüche aus dem Modell entfernt und krümmungsstetig mit kubischen B-Splines an die unbeschädigten Bereiche angeschlossen. Dieses Verfahren hat natürliche Grenzen,

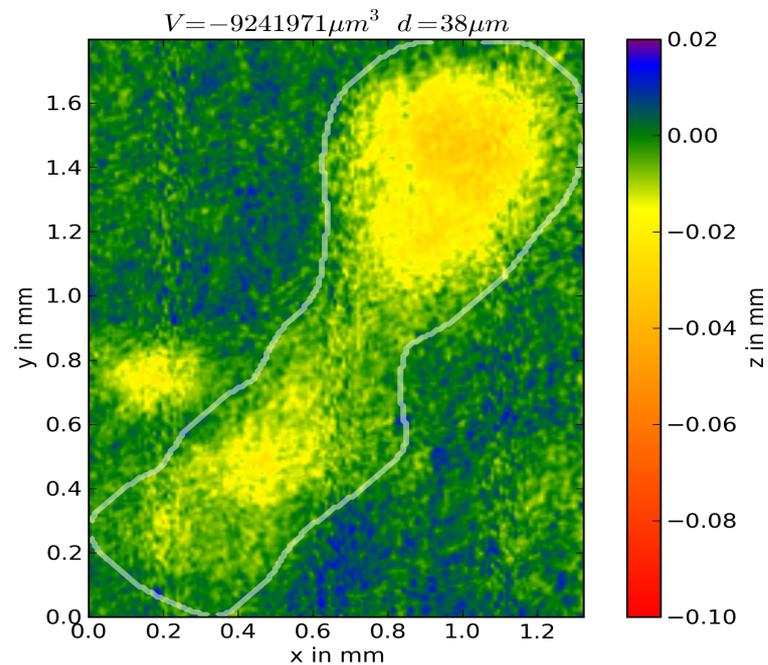


Abbildung 7.8: Segmentierung eines lokalen Schadens; Darstellung als Abweichung von der individuellen Sollgeometrie

gerade bei größeren Schäden kann so die Gestalt stark verändert werden. Bei kleinen Schäden können die Splines die Form eines unbeschädigten Oberflächenabschnitts gut nachbilden. An dieser Stelle kann bisher natürlich keine Aussage über die Festigkeit oder Aerodynamik einer so gewonnenen Geometrie gemacht werden.

Durch diese individuelle, lokale Sollgeometrie wird es möglich, lokale Schäden in Tiefe und Volumen zu spezifizieren (siehe Abb.: 7.8).

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Mess- und Inspektionstechnik für die Produktregeneration

Für die Inspektion und Messung von betriebsbeanspruchten Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken wird ein System benötigt, das Fehlstellen schnell detektieren und hochauflösend messen kann.

Es wurde ein robotergestütztes Messsystem aufgebaut, dessen Sensorkopf über einen Lasertracker hoch genau im Raum referenziert wird. Als Sensoren werden eine Kamera mit telezentrischem Objektiv mit einem variablen Beleuchtungssystem aus 4 LEDs, sowie ein Streifenprojektionssystem mit lateraler Auflösung von $8\mu\text{m}$ genutzt. Für alle Komponenten wurde eine Schnittstelle zur Automatisierung in der Programmiersprache Python entwickelt.

Für die Multiskalen-Inspektion von betriebsbeanspruchten Turbinenschaufeln aus Flugtriebwerken wurde die Messkette von der Aufnahme der Rohdaten bis zum Ergebnis erforscht.

Besonders wichtig bei der Verwendung mehrerer Sensoren ist die Referenzierung in einem gemeinsamen Koordinatensystem, wie zum Beispiel dem Werkstückkoordinatensystem, damit Messwerte der Sensoren für den gleichen Oberflächenabschnitt zusammen gefügt werden können. Für die Bestimmung der Sensorkopflage mit dem Lasertracker wurde ein Führungsgetriebe, welches den Retroreflektor auf einer Ellipsenbahn führt, entwickelt und qualifiziert. Als 6DOF-Messgerät ist es kommerziellen

Lösungen überlegen, und hat eine Standardabweichung von weniger als $2\mu m$ in allen Achsen der Translation und $10''$, $12''$ und $47''$ in den rotatorischen Freiheitsgeraden.

Die Detektion von Defekten auf der Oberfläche von betriebsbeanspruchten Turbinenschaufeln wurde durch Bildverarbeitung und Analyse der 3D-Messdaten durchgeführt. Es wurde ein reflektanzbasiertes Detektionsverfahren, das auf der Ausnutzung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen basiert, genutzt, um Hinweise auf Defekte zu erhalten. In den 3D-Messdaten vom Blatt der Turbinenschaufel konnte die krümmungstetige Sollgeometrie genutzt werden, um Defekte durch ihre hohe lokale Krümmung und Krümmungsänderung zu segmentieren.

Zur geometrischen Analyse lokaler Defekte wurde die Identifikation von Fehlstellen genutzt, um eine lokale Sollgeometrie zu berechnen, damit die lokalen Abweichungen unabhängig von der globalen Verformung bewertet werden können.

Um auch in konkaven Geometrien messen zu können, wurden zwei Verfahren erforscht, die Messungen mit Streifenprojektion trotz Mehrfachreflexion auf der Oberfläche ermöglichen. Zum einen wurde eine Testsequenz entwickelt, mit deren Hilfe sich die Einflüsse dieser ungewollten Reflexionen bewerten lassen. Zum anderen wurde daraus ein einfaches Verfahren abgeleitet, um manuell diese Reflexionen zu unterbinden und somit bessere Messdaten zu generieren.

Die erreichbare Messgenauigkeit des Systems wurde durch Messung eines durch die PTB kalibrierten Konturnormals vorgenommen. Die Lageabweichungen der Merkmale ist geringer als $14\mu m$. Bei den Formparametern wurde eine Abweichung von $29\mu m$ bei einem Zylinder mit Radius $10mm$ festgestellt. Bei der Kalibrierung des Gesamtsystems ergab sich ein mittlerer Restfehler von $7,62\mu m$. Die Abweichung ist aus der Grundunsicherheit des Lasertrackers bei mindestens $\pm 15\mu m$ zu erklären. Hinzu kommen noch die Einflüsse aus der vom Hersteller vorgegebenen Kalibrierung des μCAD -Sensors, der sich am Roboter nicht ausreichend kalibrieren lässt.

Das System wurde erfolgreich zur Messung der Geometrie von Schweißnähten auf Flachproben und an Turbinenschaufeln getestet. Auch für die geometrische Abweichungsanalyse konnte eine Turbinenschaufelgeometrie aus über 200 Einzelmessfeldern automatisch zusammengesetzt und anschließend einer Abweichungsanalyse unterzogen werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Multiskalen-Ansatz zur Inspektion und Messung von betriebeanspruchten Turbinenschaufeln eine zügige und genaue Untersuchung der Bauteile gewährleistet. Gerade in der Detektion der Fehlstellen zeigt die reflektanzbasierte Photogrammetrie deutliche Vorteile, da zum Einen die Inspektionsgeschwindigkeit deutlich höher ist, und zum Anderen zum Teil auch Defekte erkannt werden können, die keine Änderung der Geometrie nach sich ziehen. Für den Einsatz in der Praxis wird jedoch eine weit größere Datenbasis aus Beispielfekten zum Anlernen der Detektionsalgorithmen benötigt werden, um eine sichere Detektion und Unterscheidung der Defekte gewährleisten zu können.

8.2 Ausblick

8.2.1 Analyse der Mikrogeometrie

Die Erweiterung des multiskalen Messsystems um ein 3D-Mikroskop ist unerlässlich, wenn Kratzer, Risse und Rauheiten untersucht werden sollen. Aus der Erfahrung im Umgang mit der robotergestützten Sensorkopf-Positionierung kann schon abgeschätzt werden, dass durch die Drift des Roboters (siehe Kap.: 5.2.1) die Messungen, aufgrund der Relativbewegung zum Messobjekt, verzerrt werden.

Um diese nicht zu vermeidende Drift kompensieren zu können, wird ein Weißlichtinterferometer mit erhöhter Kohärenzlänge vorgeschlagen. Durch die Erhöhung der Kohärenzlänge, etwa durch Filter oder die Nutzung von LEDs als Lichtquelle, wird der Bereich vergrößert indem die Interferenz detektiert werden kann. Durch den Vergleich eines durch die Drift des Roboters verzerrten Interferogrammes mit einem Idealen kann die Relativbewegung aus der Drift geschätzt und rechnerisch invertiert werden. So werden die Messdaten entzerrt und es können trotz Drift Mikrogeometrien und Oberflächenparameter korrekt bestimmt werden.

8.2.2 Holistisches Modell des Bauteilzustandes

Die Simulation des Bauteilverhaltens ist auch von der Material- und Festigkeitsverteilung abhängig. Die Außengeometrie und sich äußerlich abzeichnende Schäden, die Gegenstand dieser Abhandlung sind, können nicht ausreichen, den Zustand eines betriebeanspruchten Bauteils vollständig zu beschreiben. Erst in einer Kombination

mit weiterer Sensorik, wie Wirbelstromverfahren, Impulsthermographie oder Röntgenuntersuchungen, können für den Betrieb wichtige Zustände aus dem inneren des Bauteils aufgenommen werden. Für realistische Eingangsdaten in eine Bauteilsimulation müssen diese Daten in ein gemeinsames holistisches Modell überführt werden.

Anhang A

Anhang

A.1 Turbinen- und Verdichterschaufeln

Die Oberflächen von Turbinen- und Verdichterschaufeln bestehen aus Funktionsflächen mit unterschiedlichen Namen. Die in der Arbeit verwendeten Bezeichnungen werden in Abbildung A.1 an einem CAD-Modell einer Turbinenschaufel aufgezeigt.

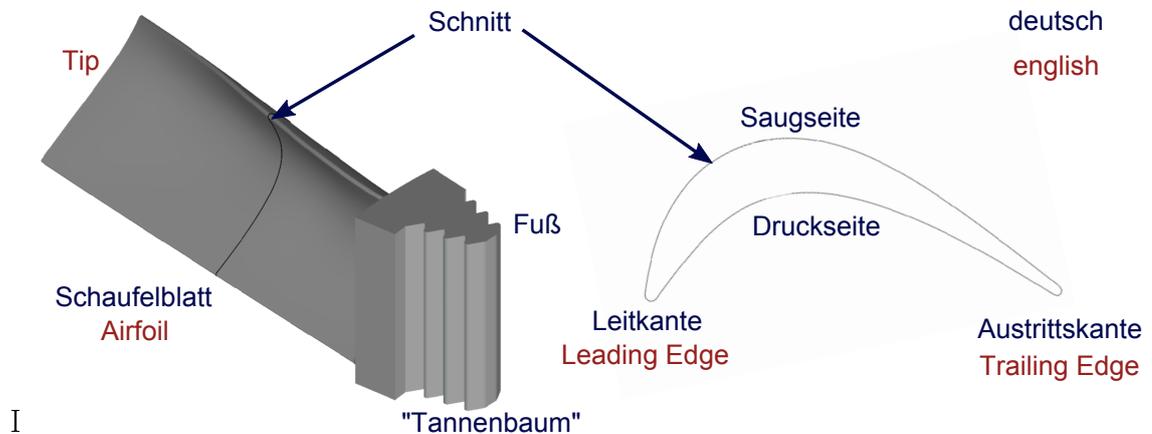


Abbildung A.1: Bereiche auf einer Turbinenschaufel

Literaturverzeichnis

- [1] ABO-NAMOUS, Omar: *Optical cooperativity in relation to fringe projection systems*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2012
- [2] ALLIED VISION TECH: *AVT Stingray*. Allied Vision Tech
- [3] ARDUINO: *Arduino Maga2560*. www.arduino.cc
- [4] ASCHENBRUCK, Jens ; MEINZER, C. E. ; POHLE, Linus ; SCHEIDT, Lars P. ; SEUME, Jörg: Regeneration-induced forced response in axial turbines. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013
- [5] BAY, Herbert ; TUYTELAARS, Tinne ; GOOL, Luc V.: SURF: Speeded Up Robust Features. In: *ECCV (1) 2006*, 2006
- [6] BERTAGNOLLI, Frank: *Robotergestützte automatische Digitalisierung von Werkstückgeometrien mittels optischer Streifenprojektion*, Universität Karlsruhe (Technische Hochschule), Diss., 2006
- [7] BESL, Paul J. ; MCKAY, Neil D.: A method for registration of 3-D shapes. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 14 (1992), Feb, Nr. 2, S. 239–256. <http://dx.doi.org/10.1109/34.121791>. – DOI 10.1109/34.121791. – ISSN 0162–8828
- [8] BLAIS, Gerard ; LEVINE, Martin D.: Registering multiview range data to create 3D computer objects. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 17 (1995), Aug, Nr. 8, S. 820–824. <http://dx.doi.org/10.1109/34.400574>. – DOI 10.1109/34.400574. – ISSN 0162–8828

-
- [9] BONS, Jeffrey P. ; TAYLOR, Robert P. ; MCCLAIN, Stephen T. ; RIVIR, Richard B.: The Many Faces of Turbine Surface Roughness. In: *J. Turbomach.* 123 (2001), S. 739–748
- [10] BÖSS, Volker ; NESPOR, Dennis ; SAMP, Anna: Numerical Simulation of Process Force during Re-contouring of Welded Parts Considering Different Material Properties. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 6(3) (2013), S. 167–174
- [11] BRADSKI, Gary ; KAEHLER, Adrian ; LOUKIDES, Mike (Hrsg.): *Learning OpenCV*. O'Reilly Media, 2008
- [12] BREDIES, Kristian ; LORENZ, Dirk: Mathematische Bildverarbeitung. In: *Mathematische Bildverarbeitung*. Vieweg+Teubner, 2011
- [13] BREITBARTH, Martin ; BRAEUER-BURCHARDT, Christian ; KUEHMSTEDT, Peter ; HEINZE, Matthias ; NOTNI, Gunther: Measurement of optical free-form surfaces with fringe projection, 2008, S. 706605–706605–12
- [14] BROWN, Benedict ; RUSINKIEWICZ, Szymon: Global Non-Rigid Alignment of 3-D Scans. In: *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH)* 26 (2007), August, Nr. 3
- [15] BURGER, Wilhelm ; BURGE, Mark J.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, 2006
- [16] BURLA, Avinash ; HAIST, Tobias ; LYDA, Wolfram ; AISSA, Mohamed H. ; OSTEN, Wolfgang: *Assistant systems for efficient multiscale measurement and inspection*. 2011
- [17] CHASKALOVIC, Joel: Some Fundamental Classes of Finite Elements. In: *Finite Element Methods for Engineering Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 39–61
- [18] DENCHEVA, Veselina: *Genauigkeit der digitalen Photogrammetrie*, TU Wien, Diss., 2005

- [19] DIETRICH, Edgar ; SCHULZE, Alfred: *Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2009. – eBook ISBN: 978-3-446-42084-7 Print ISBN: 978-3-446-41525-6
- [20] DIEZ, Yago: Hierarchical Normal Space Sampling to speed up point cloud coarse matching. In: *Pattern Recognition Letters* 33 (2012), Nr. 16, S. 2127 – 2133. – ISSN 0167–8655
- [21] DUPARRÉ, Angela ; FERRE-BORRULL, Josep ; GLIECH, Stefan ; NOTNI, Gunther ; STEINERT, Jörg ; BENNETT, Jean M.: Surface Characterization Techniques for Determining the Root-Mean-Square Roughness and Power Spectral Densities of Optical Components. In: *Appl. Opt.* 41 (2002), Jan, Nr. 1, 154–171. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.41.000154>. – DOI 10.1364/AO.41.000154
- [22] DUTSCHKE, Wolfgang: *Fertigungsmesstechnik*. B. G. Teubner Stuttgart, 1990
- [23] EGGERT, D.W. ; LORUSSO, A. ; FISHER, R.B.: Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms. In: *Machine Vision and Applications* 9 (1997), Nr. 5-6, S. 272–290. – ISSN 0932–8092
- [24] FARO: *Faro Lasertrackersysteme*. <http://www.faro.com/de-de/produkte/messtechnik/faro-lasertracker/ueberblick>
- [25] FISCHLER, Martin A. ; BOLLES, Robert C.: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography / AI Center, SRI International. 1980 (213). – Forschungsbericht
- [26] FOLEY, Tim ; SUGERMAN, Jeremy: KD-Tree Acceleration Structures for a GPU Raytracer. In: MEISSNER, M. (Hrsg.) ; SCHNEIDER, B.-O. (Hrsg.): *Graphics Hardware 2005*, 2005
- [27] FRANKE, Rene ; BERTRAM, Torsten ; SCHULTE, Michael ; KOPYLOW, Christoph von: Development of a high accuracy automatic measurement system utilizing an industrial robot and a fringe projection system. In: *Technologies for Practical Robot Applications, 2009. TePRA 2009. IEEE International Conference on*, 2009, S. 141–148

- [28] GEVATTER, Hans-Jürgen ; GRÜNHAUPT, Ulrich: *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [29] GFMESSTECHNIK GMBH: *Handbuch Optische 3D-Messgerät MikroCAD*. Wartherstrasse 21; D-14513 Berlin Teltow: GFMesstechnik GmbH, 9 2008
- [30] GFMESSTECHNIK GMBH: *Kalibrierzertifikat*. 5 2010
- [31] GOLDMAN, Dan B. ; CURLESS, Brian ; HERTZMANN, Aaron ; SEITZ, Steven M.: Shape and Spatially-Varying BRDFs from Photometric Stereo. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 32 (2010), June, Nr. 6, S. 1060–1071. <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.2009.102>. – DOI 10.1109/TPAMI.2009.102. – ISSN 0162–8828
- [32] GOM MBH: *GOM Inspect*. <http://www.gom.com/de/3d-software/gom-inspect.html>
- [33] GRONLE, Marc ; LYDA, Wolfram ; BURLA, Avinash ; OSTEN, Wolfgang: *Extrinsic calibration of a fringe projection sensor based on a zoom stereo microscope in an automatic multiscale measurement system*. 2012
- [34] GRONLE, Marc ; LYDA, Wolfram ; OSTEN, Wolfgang: *Model-based, active inspection of three-dimensional objects using a multi-sensor measurement system*. 2013
- [35] HARTLEY, Richard ; ZISSERMAN, Andrew: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2000
- [36] HEIMANN, Bodo ; GERH, Wilfried ; POPP, Karl: *Mechatronik: Komponenten - Methoden - Beispiele*. Carl Hanser Verlag M?nchen Wien, 2007
- [37] HELBERT, David ; KHOUDEIR, M. ; DO, M.-T.: Rough Surfaces and Relief Extraction by Generalized Lambertian's Photometric Model. In: *Signal Processing and Communications, 2007. ICSPC 2007. IEEE International Conference on*, 2007, S. 1507–1510
- [38] HENNES, Maria: Konkurrierende Genauigkeitsmaße - Potential und Schwächen aus der Sicht des Anwenders. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten : AVN* 7 (2007), S. 136–146

- [39] HENNES, Maria ; HEISTER, H.: Neuere Aspekte zur Definition und zum Gebrauch von Genauigkeitsmaßen in der Ingenieurgeodäsie. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten : AVN* 11-12 (2007), S. 375–383
- [40] HENNES, Maria ; RICHTER, E.: Ein neuartiges Verfahren zur 6DOF-Bestimmung. In: *Oldenburger 3D Tage*, 2009, S. 254–261
- [41] HERING, Ekbert: Photonik. In: HERING, Ekbert (Hrsg.) ; MARTIN, Rolf (Hrsg.): *Photonik*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 233–281
- [42] HOHENSTEIN, Sebastian ; ASCHENBRUCK, Jens ; SEUME, Jörg: Aerodynamic Effects of Non-Uniform Surface Roughness on a Turbine Blade. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2013
- [43] HOHL, Andreas ; KRIEGESMANN, Benedikt ; WALLASCHEK, Jörg ; PANNING, Lars: The Influence of Blade Properties on the Forced Response of Mistuned Bladed Disks. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 2011
- [44] HOLL, Matthias ; LOEHNERT, Stefan ; WRIGGERS, Peter: An adaptive multiscale method for crack propagation and crack coalescence. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 93 (2013), S. 23–51
- [45] HUBER, Daniel F. ; HEBERT, Martial: Fully automatic registration of multiple 3D data sets. In: *Image and Vision Computing* 21 (2001), S. 637–650
- [46] HUGHES, John M.: *Real World Instrumentation with Python: Automated Data Acquisition and Control Systems*. O'Reilly, 2010
- [47] ILMENAUER DFG-LEISTUNGSZENTRUM FÜR FORSCHUNGSINFORMATION: *Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek*. <http://www.dmg-lib.org/>
- [48] INNOVMETRIC SOFTWARE INC: *Polyworks*. <http://www.duwe-3d.de/de/Products/polyworks>
- [49] JANZ, Alexej: *Aufbau und experimentelle Untersuchung eines Mikro-Makro-Kinematik basierenden Systems zur Mikrobearbeitung*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2014

-
- [50] JCGM ; JCGM (Hrsg.): *Evaluation of measurement data -Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement Propagation of distributions using a Monte Carlo method.* BIPM, 2008
- [51] KÄSTNER, Markus: *Optische Geometrieprüfung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile*, Leibniz Universität Hannover, Diss., 2008
- [52] KRAUSS, Moritz: *Inspection of Complex Shaped Work Pieces for Product Regeneration / Institute of measurement and automatic control (Leibniz Universität Hannover).* 2010. – Forschungsbericht
- [53] KRAUSS, Moritz ; FRACKOWIAK, Wojciech ; PÖSCH, Andreas ; KÄSTNER, Markus ; REIMCHE, Wilfried ; REITHMEIER, Eduard ; MAIER, Hans J.: *Assessment of used turbine blades on and beneath the surface for product regeneration*, 2013
- [54] KRAUSS, Moritz ; KÄSTNER, Markus ; REITHMEIER, Eduard: *Evaluation of Worn Surfaces Using Directional Illumination.* In: *Optical Measurement Techniques for Systems and Structures*, 2012
- [55] KRAUSS, Moritz ; KÄSTNER, Markus ; REITHMEIER, Eduard: *Data quality estimation from interdependencies for structured light sensors.* In: *Computational Vision and Medical Image Processing: VIP Image 2013*, 2013, S. 191 – 195
- [56] KRAUSS, Moritz ; KÄSTNER, Markus ; REITHMEIER, Eduard: *Multi-Scale Inspection of Worn Surfaces for Product Regeneration.* In: *Journal of the CMSC* 1 (2013), S. 28 – 32
- [57] KRAUSS, Moritz ; OHRT, Christoph ; KÄSTNER, Markus ; REITHMEIER, Eduard: *3D Messtechnik für Inspektion und In-Situ Überwachung.* In: *Ingenieur Spiegel* 3 (2011), S. 71–72
- [58] KÜHMSTEDT, Peter ; MUNCKELT, Christoph ; HEINZE, Matthias ; BRÄUER-BURCHARDT, Christian ; NOTNI, Gunther: *3D shape measurement with phase correlation based fringe projection.* In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection* Bd. 6616, 2007
- [59] LANGTANGEN, Hans P.: *A Primer on Scientific Programming with Python.* Springer, 2011

-
- [60] LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER: *Sonderforschungsbereich 871: Produkt Re-generation*. www.sfb871.de
- [61] LEICA GEOSYSTEMS: *Leica Geosystems: Lasertracker*. <http://www.leica-geosystems.com>
- [62] LEICA GEOSYSTEMS: *User Manual AbsoluteTracker*. Leica Geosystems, 2008
- [63] LEIS, Alexander ; KÄSTNER, Markus ; REITHMEIER, Eduard: Detektion von Verschleißbereichen mittels orts aufgelöster 3D-Rauheitsanalyse. In: *tm* 10 (2010), S. 601–606
- [64] LIEDTKE, Claus-E. ; ENDER, Manfred: *Wissensbasierte Bildverarbeitung*. Springer Berlin Heidelberg, 1989
- [65] LOSER, Raimund: Laser Tracker Accuracy Certification for Large- Volume Measurements. In: *The Journal of the CMSC* 0 (2009), Autumn, S. 14–19
- [66] LÖSLER, Michael ; NITSCHKE, Martin: Bestimmung der Parameter einer Regressionsellipse in allgemeiner Raumlage. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten : AVN* 117 (2010), S. 113–117
- [67] LUKACS, Gabor ; MARTIN, Ralph ; MARSHALL, Dave: Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation. In: BURKHARDT, Hans (Hrsg.) ; NEUMANN, Bernd (Hrsg.): *Computer Vision ECCV'98* Bd. 1406. Springer Berlin Heidelberg, 1998. – ISBN 978-3-540-64569-6, S. 671–686
- [68] LYDA, Wolfram ; BURLA, Avinash ; HAIST, Tobias ; ZIMMERMANN, J. ; OSTEN, Wolfgang ; SAWODNY, Oliver: Automated multiscale measurement system for MEMS characterisation, 2010, S. 77180G–77180G–11
- [69] LYDA, Wolfram ; ZIMMERMANN, J. ; BURLA, Avinash ; REGIN, J. ; OSTEN, Wolfgang ; SAWODNY, Oliver ; WESTKÄMPER, E.: *Sensor and actuator conditioning for multiscale measurement systems on example of confocal microscopy*. 2009
- [70] MCKINNEY, Wes: *Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly, 2012

- [71] MENG, Qinggang ; LI, B. ; HOLSTEIN, Horst: Adaptive Point-Cloud Surface Interpretation. In: SEIDEL, H.-P. (Hrsg.) ; NISHITA, T. (Hrsg.) ; (Hrsg.) ; PENG, Q. (Hrsg.): *LNCS 4035* Bd. 4035. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, S. 430–441
- [72] MORTENSEN, Eric N. ; DENG, Hongli ; SHAPIRO, Linda: A SIFT Descriptor with Global Context. In: *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005*
- [73] NEWPORT: *URS Series Precision Rotation Stages*. http://www.newport.com/URS-Series-Precision-Rotation-Stages/303761/1033/info.aspx#tab_Specifications. Version:4 2014
- [74] NOTNI, Günter ; KÜHMSTEDT, Peter ; HEINZE, Matthias ; MUNKELT, Christoph: The concept of virtual landmarks in 3D multi-view fringe projection, 2007, S. 676208–676208–10
- [75] OREN, Michael ; NAYAR, Shree K.: *Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision*. 1992
- [76] OTSU, Nobuyuki: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, S. 62–66
- [77] PENG, Tao: *Algorithms and methods for 3-D shape measurement using digital fringe projection*, University of Melbourne, Australia, Diss., 2006
- [78] PHAN, Haiv ; LECH, Margaret ; NGUYEN, Thuc: Registration of 3D Range Images Using Particle Swarm Optimization. In: MAHER, MichaelJ. (Hrsg.): *Advances in Computer Science - ASIAN 2004. Higher-Level Decision Making* Bd. 3321. Springer Berlin Heidelberg, 2005, S. 223–235
- [79] PHONG, Bui-Tuong: Illumination for Computer Generated Pictures. 18 (1975), Nr. 6, S. 311–317
- [80] POESCH, Andreas ; KAESTNER, Markus ; REITHMEIER, E.: Fringe projection measurement of highly specular objects in the presence of multi-reflection. In: *Computational Vision and Medical Image Processing: VIP Image 2013*, 2013

- [81] PÖSCH, Andreas: *pyVimba*. Blog. http://mechaos.de/wordpress/?page_id=263. Version:9 2013
- [82] PTB, Physikalisch-Technische B.: Kalibrierschain: Konturnormal / Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 2005. – Forschungsbericht
- [83] RAGHEB, H. ; HANCOCK, E.R.: Surface normals and height from non-Lambertian image data. In: *3D Data Processing, Visualization and Transmission, 2004. 3DPVT 2004. Proceedings. 2nd International Symposium on*, 2004, S. 18–25
- [84] RAHLVES, Maik ; SEEWIG, Jörg (Hrsg.): *Optisches Messen technischer Oberflächen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009
- [85] REIMCHE, Wilfried ; BRUCHWALD, Oliver ; FRACKOWIAK, Wojciech ; BACH, Fr.-W. ; MAIER, H. J.: Non-Destructive Determination of Local Damage and Material Condition in High-Performance Components. In: *HTM - Journal of Heat Treatment and Materials* 2 (2013)
- [86] ROTH-KOCH, Sabine: *Merkmalsbasierte Definition von Freiformgeometrien auf der Basis räumlicher Punktwolken*. Springer, 1996
- [87] ROTTWINKEL, Boris ; NOELKE, C. ; HUSTEDT, M. ; KAIERLE, S. ; WESLING, V.: Single Crystal Crack Cladding of CMSX-4. In: *24th AEROMAT*, 2013
- [88] RUPP, Olaf: Instandhaltungskosten bei zivilen Strahltriebwerken / MTU Maintenance Hannover GmbH. http://mtu.de/de/technologies/engineering-news/others/Rupp_Instandhaltungskosten_ziviler_Strahltriebwerke.pdf. – Forschungsbericht
- [89] RUSINKIEWICZ, Szymon ; LEVOY, Marc: Efficient Variants of the ICP Algorithm. In: *Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)*, 2001
- [90] SCHRÖDER, Gottfried: *Technische Optik*. Vogel Verlag, 1974
- [91] SHAW, Laura: *Methode zur automatischen Registrierung und Fusion von Multisensordaten zur Charakterisierung von mehrskaligen Werkstücken*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Diss., 2012

- [92] SHI, Quan ; XI, Ning ; ZHANG, Chi: Develop a Robot-Aided Area Sensing System for 3D Shape Inspection. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* (2010), Nr. 132
- [93] SIGLOCH, Herbert: *Strömungsmaschinen: Grundlage und Anwendungen*. Carl Hanser Verlag, 2013
- [94] SILL-OPTICS: *Machine Vision Data Sheet S5LPJ3075*. Sill-Optics
- [95] SOLEM, Jan E. ; AANAES, Henrik ; HEYDEN, Anders: PDE Based Shape from Specularities. In: GRIFFIN, LewisD. (Hrsg.) ; LILLHOLM, Martin (Hrsg.): *Scale Space Methods in Computer Vision* Bd. 2695. Springer Berlin Heidelberg, 2003. – ISBN 978-3-540-40368-5, S. 401–415
- [96] STÄUBLI TEC-SYSTEMS GMBH: *Roboterarm Baureihe TX90 Betriebsanleitung*. 11 2009
- [97] SZELISKI, Richard ; GRIES, D. (Hrsg.): *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer Verlag, 2011
- [98] TORRANCE, Kenneth E. ; SPARROW, Ephraim M.: Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. In: *J. Opt. Soc. Am.* 57 (1967), Sep, Nr. 9, 1105–1112. <http://dx.doi.org/10.1364/JOSA.57.001105>. – DOI 10.1364/JOSA.57.001105
- [99] TSAI, Roger Y.: A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* RA-3 (1987), August, Nr. 4, S. 323–344
- [100] W3C: *XML Protocol Working Group*. <http://www.w3.org/2000/xp/Group/>. Version:6 2014
- [101] YANG, Bing-Xin ; FRIEDSAM, Horst: *Ray-tracing studies for a whole-viewing-angle retroreflector*. 1999
- [102] ZHANG, Song ; HUANG, Peisen S.: Novel method for structured light system calibration. In: *Optical Engineering* 45 (2006), August, Nr. 8

- [103] ZHANG, Zhe ; NEJAT, Goldie ; GUO, Hong ; HUANG, Peisen: A novel 3D sensory system for robot-assisted mapping of cluttered urban search and rescue environments. In: *Intelligent Service Robotics* 4 (2011), Nr. 2, S. 119–134. – ISSN 1861–2776

Eigene Veröffentlichungen

Einige Ergebnisse dieser Arbeit wurden schon an anderer Stelle vorveröffentlicht und werden nicht immer explizit erwähnt.

[56], [53], [55], [57], [52], [54]

Lebenslauf

Moritz Krauß

geboren am 19.09.1979 in Belo Horizonte, Brasilien

Schulbildung

1986 - 1990 Grundsschule III Burgdorf
1990 - 1992 Orientierungsstufe I Burgdorf
1992 - 2000 Gymnasium Burgdorf
30.6.2000 allgemeine Hochschulreife
2000 - 2001 Zivildienst im Eilenriedestift Hannover e.V.

Studium

2001 - 2003 Studium Physik (Dipl.) an der Universität Hannover
2003 - 2009 Studium Maschinenbau (Dipl.) an der
Leibniz Universität Hannover
10.10.2009 Dipl.-Ing. Maschinenbau Fachrichtung Mechatronik

Berufliche Tätigkeit

2010 - 2014 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
am Institut für Mess- und Regelungstechnik
der Leibniz Universität Hannover