

Berührungslose kontinuierliche Topografiemessung auf bewegten Körpern

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Gert Reiner Behrends, M.Sc
geboren am 31.03.1991 in Wilhelmshaven

Bremen, 28.11.2022

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fischer,
Universität Bremen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Manske,
Technische Universität Ilmenau

Tag der mündlichen Prüfung: 28.04.2023

Kurzfassung

Materialoberflächen sind die Schnittstelle zwischen Objekten und ihrer Umwelt und daher ein wichtiges Qualitätsmerkmal vieler Produkte. Um schon während der Produktion auf Defekte reagieren zu können, ist eine prozessnahe Messung der Oberflächeneigenschaften anzustreben. In dieser Arbeit werden unterschiedliche Oberflächentopografien rotierender zylindrischer Bauteile mit geringen Rauheiten im Bereich $S_q = 10 \dots 200$ nm betrachtet. Um prozessnahe Messungen an (schnell) rotierenden Objekten durchführen zu können, muss nicht nur die Topografie, sondern auch deren Bewegung gemessen werden. Zur Messung von hochqualitativen Oberflächen ist die Weißlichtinterferometrie (WLI) etabliert. Mit ihr sind Topografiemessunsicherheiten in der Größenordnung einzelner Nanometer möglich. Die am weitesten verbreitete Umsetzung des WLI-Prinzips für Topografiemessungen mit geringen Unsicherheiten ist die vertikal scannende WLI (VSWLI), die allerdings stillstehende Messobjekte voraussetzt. Die lateral scannende WLI (LSWLI) liefert einen Lösungsansatz für Messungen von sich geradlinig bewegenden Oberflächen.

Das Ziel der Arbeit ist, die LSWLI zu befähigen, auch auf kontinuierlich rotierenden Körpern messen zu können. Für die rotatorische LSWLI wurde die Krümmung des kreisförmigen Scanpfads der Messobjekte in die Berechnung der Höhe miteinbezogen. Die Höhenunsicherheit hängt dabei von den Krümmungswinkeln des Scanpfads im Bereich des Sensors ab. Bei der Ausrichtung des Messgeräts auf den Scanpfad ist ein Kompromiss zwischen niedriger Höhenunsicherheit und großem Messbereich zu finden. Mit einer waveletbasierten Frequenzanalyse des LSWLI-Signals lassen sich die lokalen Krümmungswinkel des Scanpfads berechnen. Aus den nur aus demonstatorischen Daten bestimmten Krümmungswinkeln eines Zylinders konnte dessen Radius mit 0,8% Abweichung zum taktil gemessenen Sollradius bestimmt werden. Dabei wurden nur 1,4% des Zylinderumfangs genutzt. Simulationen zu den Auswirkungen der Scanbewegung auf die Höhenunsicherheit bei der rotatorischen LSWLI zeigten, dass der Einfluss der Unsicherheit der Bewegungsmessung auf die Höhenmessunsicherheit um rund eine Größenordnung größer ist, als der Einfluss von Schwankungen der Scanbewegung selbst. Aus diesem Grund ist ein genaues Verschiebungsmesssystem gefordert. Mit einem integrierten, specklebasierten Verschiebungsmesssystem wurden Verschiebungsmessunsicherheiten von 11 nm erreicht, womit laut Simulation auf idealen Zylinderoberflächen Höhenmessunsicherheiten von unter 20 nm möglich sind. Experimentell konnten mit dem entstandenen Demonstrator Topografien von technischen Oberflächen mit Oberflächenrauheiten im Bereich $S_q \approx 50$ nm gemessen werden, welche Höhendifferenzen zu VSWLI-Referenzmessungen mit Standardabweichungen von 37,5 nm aufwiesen. Die Beispielanwendung auf Kugellagerinnenringen demonstriert die Fähigkeit zu kontinuierlichen Topografiemessungen mit hoher Wiederholbarkeit. Die prozessnahe Anwendung an Dressierwalzen zeigt das Potenzial des Messsystems für Topografiemessungen an schnell rotierenden Oberflächen in Fertigungsumgebungen.

Abstract

Material surfaces are connecting objects with their environment and therefore are an important quality feature of many products. In order to be able to react to defects during production, measurements of the surface properties need to be carried out close to the process. In this work, different surface topographies of rotating cylindrical components with low roughness values in the range $S_q = 10 \dots 200$ nm are considered. In order to carry out near-process measurements on (fast) rotating objects, not only the topography but also its movement must be measured. White light interferometry (WLI) has become established for the measurement of high quality surfaces. With it, topography measurement uncertainties in the order of single nanometers are possible. The most widespread implementation of the WLI principle for topography measurements with low uncertainties is the vertically scanning WLI (VSWLI), which requires stationary measurement objects. Lateral scanning WLI (LSWLI) provides a solution for measurements of moving surfaces.

The aim of this work is to enable LSWLI to also work for continuously rotating objects. For rotatory LSWLI, the curvature of the circular scan path of the measurement objects has to be included in the height calculation. The height uncertainty depends on the curvature of the scan path observed by the sensor. When orienting the LSWLI device to the scan path, a compromise must be found between low height uncertainty and high measurement range. Using a wavelet-based frequency analysis of the LSWLI signal, the local curvature angles of the scan path can be calculated. From the curvature angles of a cylinder gathered in this manner, its radius was determined with 0.8% deviation from the tactilely measured nominal radius. Only 1.4% of the cylinder circumference was needed to achieve this. Simulations of the effects of the scanning movement on the height uncertainty of the rotary LSWLI showed that the influence of the uncertainty of the movement measurement on the height measurement uncertainty is approx. one order of magnitude greater than the influence of fluctuations in the scanning movement. For this reason, an accurate displacement measurement system is required. With an integrated, speckle-based measurement system, displacement measurement uncertainties of 11 nm were achieved, which, according to simulation, makes height measurement uncertainties of less than 20 nm possible on ideal cylindrical surfaces. Experimentally, the LSWLI-DSC-demonstrator was used to measure topographies of real surfaces with roughnesses in the range of $S_q \approx 50$ nm. The topographies were determined to have a height difference with a standard deviation of 37,5 nm compared to a VSWLI reference measurement.

An example application on ball bearing raceways demonstrates the capability of continuous topography measurements with high repeatability. The near-process application on sheet metal rollers shows the potential of the measuring system for topography measurements on fast rotating surfaces in a factory environment.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik und Forschung	2
1.3 Ziel und Struktur der Arbeit	7
2 Theoretische Grundlagen	9
2.1 Weißlichtinterferometrie	9
2.1.1 Vertikal scannende WLI	11
2.1.2 Translatorisch lateral scannende WLI	13
2.1.3 Rotatorisch lateral scannende WLI	15
2.2 Verschiebungsmessung mittels Digitaler Speckle-Korrelation	21
2.2.1 Digital Image Correlation (DIC)	21
2.2.2 Digital Speckle Correlation (DSC)	24
3 Experimenteller Aufbau	27
3.1 LSWLI-Demonstrator	27
3.1.1 LSWLI Komponenten	27
3.1.2 LSWLI Auswertalgorithmen	31
3.2 Integration digitaler Speckle-Korrelation	45
3.2.1 DSC Komponenten	46
3.2.2 DSC Auswertalgorithmen	49
4 Charakterisierung und Validierung	51
4.1 Unsicherheitsbetrachtung mittels Monte-Carlo-Simulation	51
4.1.1 Signalmodell	51
4.1.2 Simulationsergebnisse	53
4.2 Charakterisierung des Messsystems im Labor	57
4.2.1 Einfluss der Oberflächenkrümmung	57
4.2.2 Validierung der lokalen Winkelauswertung	64
4.2.3 Validierung der DSC-Verschiebungsmessung	65
5 Anwendungsszenarien	77
5.1 Rotierende Wälzlager	77

5.2	Rotierende Walzen	81
5.2.1	Messung auf Walzen am in-situ Analogversuch	82
5.2.2	Messung auf Walzen in der Werkhalle	88
6	Zusammenfassung und Ausblick	100
6.1	Ausgangslage der Arbeit	100
6.2	Wissenschaftlicher Fortschritt	101
6.3	Weiterführender Forschungsbedarf	104
	Literaturverzeichnis	105
	Eigene Veröffentlichungen	112
	Betreute studentische Arbeiten	113

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Materialoberfläche ist die Schnittstelle für alle chemischen, thermischen und mechanischen Interaktionen zwischen Objekten und ihrer Umwelt. Daher ist es kaum verwunderlich, dass die Oberflächeneigenschaften bei vielen Produkten und ihrer Fertigung als wichtige Einflussgröße berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise ist die Oberflächenbeschaffenheit von Bad- und Küchenarmaturen neben dem dekorativen Anspruch auch relevant für Hygiene und Haltbarkeit. Auf glatten Oberflächen finden Keime wenig halt, ebenso gibt es weniger Angriffsfläche für Kalkablagerungen und Korrosion [1]. Die Rauheiten dieser Oberflächen müssen für den gewollten Effekt im Bereich einiger zehn Nanometer liegen, d.h. lediglich das 100-fache der Größenordnung von Atomradien.

Ein anderes Beispiel ist kaltgewalztes Stahlblech, einem wichtigen Halbzeug für viele Alltagsprodukte. Die Oberflächenbeschaffenheit muss für die Weiterverarbeitung in engen Toleranzen bereitgestellt werden, wobei auch die Oberfläche des Walzwerkzeuges einen Einfluss auf die Blechqualität hat [2]. In der Massenproduktion von Batteriehülsen im Tiefziehverfahren sind zum Beispiel Bleche mit uniformer, glatter Oberfläche gefordert, da diese den für die Fertigung relevanten Reibungskoeffizienten zwischen Blech und Werkzeug beeinflusst [3]. Häufig anzutreffende Mängel der Bleche sind Inhomogenitäten wie Kratzer, Stauchungen oder Abdrücke. Diese fertigungsbedingten Fehlbilder sind unregelmäßig auf dem Blech verteilt, weshalb die Blechoberfläche großflächig geprüft werden sollte. Während der Fertigung bewegen sich die Bleche kontinuierlich mit Geschwindigkeiten im Bereich mehrerer Meter pro Minute, weshalb ein besonderer Fokus dieser Arbeit auf der Messung von kontinuierlich bewegten Oberflächen liegt.

Die Produktqualität wird beim Kaltwalzen maßgeblich vom Zustand der Arbeitswalzen beeinflusst, weshalb eine Topografiemessung der Walzen eine Alternative zum Messen der Bleche darstellt [4]. Mit einer fertigungsnahen, in-situ oder gar in-prozess Messtechnik können Probleme wie Werkzeugverschleiß frühzeitig aufgedeckt und behoben werden. Dies würde eine Abkehr von festen Wartungsintervallen hin zur bedarfsgerechten Wartung der Arbeitswalzen ermöglichen, was die Wirtschaftlichkeit des Fertigungsprozesses steigert, Standzeiten der Werkzeuge verlängert und den Ressourcenverbrauch minimiert. Neben der Überwachung der Walzen während der Blechfertigung eröffnen kontinuierliche Topografiemessungen bei der turnusmäßigen Walzenrekonditionierung ebenso Prozessoptimierungspotentiale. Die Rekonditionierung erfolgt durch Läppen der Walzenoberfläche und wird üblicherweise von erfahrenen Spezialisten überwacht. Eine Topografiemessung während oder zwischen den Bearbeitungsschritten würde objektive Daten zum Zustand der Oberfläche liefern. Eine solche maschinelle Überwachung kann die Dauer der Walzenrekonditionierung verkürzen und den Materialabtrag verringern, da der Läppprozess nur noch bis zum

tatsächlichen Erreichen der Solleigenschaften ausgeführt werden müsste. Außerdem würde eine 100 %-Prüfung der Oberfläche das Läppergebnis verbessern, was letztlich die Qualität der Produktion steigert. Im Gegensatz zu den translatorisch bewegten Blechen rotieren die Arbeitswalzen. Die Topografiemessung an kontinuierlich rotierenden Objekten, wie den Walzen, birgt jedoch zusätzliche Herausforderungen, denn die Krümmungen der Objekte und ihrer Rotationsbahnen müssen sowohl bei der fortlaufenden Aufnahme der Messdaten als auch bei der Datenauswertung berücksichtigt werden.

Zusammenfassend wird zur fertigungsnahen Prüfung von bewegten Metalloberflächen mit sub- μm Rauheiten eine schnelle, hinreichend präzise und kontinuierlich messende Topografiemesstechnik benötigt, die in-situ oder in-prozess auf translatorisch und rotatorisch bewegten Körpern anwendbar ist.

1.2 Stand der Technik und Forschung

Die Hersteller von Blechen und anderen Produkten, bei denen die Oberflächenbeschaffenheit eine Rolle spielt, verwenden für ihre Qualitätsprüfung diverse Messgrößen. So ist ein weitverbreitetes Qualitätsmerkmal für glatte Oberflächen im Sichtbereich der Glanz, welcher von speziellen Messgeräten als Glanzgrad gemessen werden kann [5, 6]. Der Glanzgrad erlaubt Aussagen zum subjektiven Erscheinungsbild, hat aber keinen unmittelbaren Bezug zur Makro- und Mikrogeometrie der Oberfläche, anhand dessen sich der Fertigungsprozess optimieren ließe. Ein weiterer, in der Fertigungsmesstechnik weit verbreiteter Oberflächenparameter ist die Rauheit, für die es wiederum eine Vielzahl von anwendungsbezogenen Definitionen gibt [7, 8]. Für die Rauheit gibt es schnelle, in-prozessfähige Rauheitsmessgeräte (z. B. basierend auf Specklekorrelationsverfahren [9]), welche allerdings nur eine für die jeweils gemessene Oberfläche mittlere optische Rauheit liefern können. Aussagekräftiger als der Einsatz dieser oder anderer spezialisierter Messsysteme ist es, die zugrundeliegende Topografie mit allen Höheninformationen aufzunehmen. Aus einer vollständig gemessenen Topografie können nämlich alle für jedwede Oberflächenprüfung erforderlichen Oberflächenparameter bestimmt werden.

Grundlegend bedeutet eine Topografiemessung im Kontext dieser Arbeit die lokale, flächenhafte Messung des vertikalen Abstands der Oberfläche von einem Sensor. Die Aufnahme der Messdaten kann in unterschiedlichen Varianten ausgeführt sein. Mögliche Aufnahmearten sind in Abbildung 1.1 skizziert. Das Basissensorelement ist der Punktsensor (in Abbildung 1.1, links). Dieser nimmt einen einzelnen Höhenpunkt auf. Streng genommen handelt es sich dabei in der Realität nicht um einen wirklichen Messpunkt im geometrischen Sinne, da die Sensorelemente nicht infinitesimale Punkte, sondern immer eine gewisse laterale Fläche, im weiteren auch Oberflächenelemente genannt, erfassen. Ein einzelner Messwert ergibt noch keine Topografie. Hierfür müssen die vertikalen Abstände zum Sensorelement von mehreren Oberflächenelementen gemessen werden. Die Differenzen der Messwerte zwischen den Einzelmessungen entsprechen schließlich der Topografie des Messobjekts.

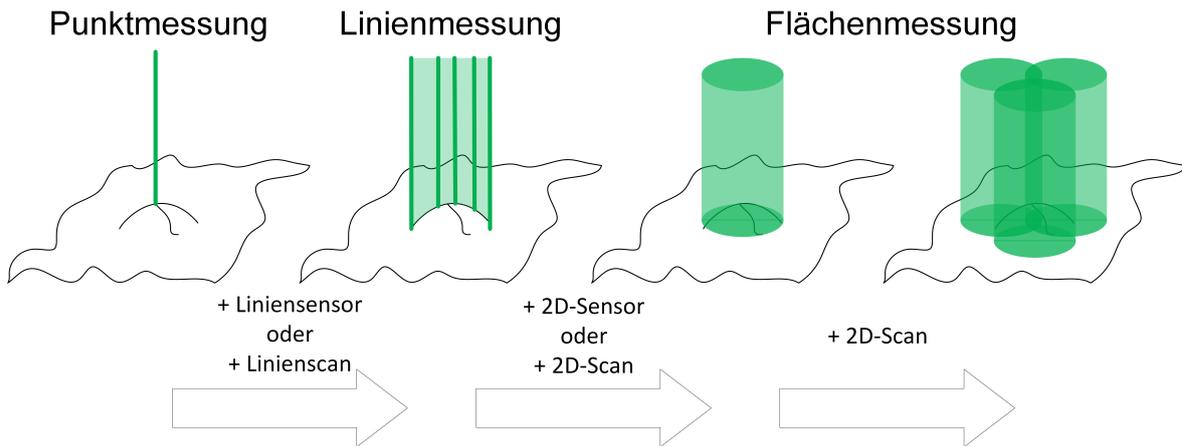


Abbildung 1.1: Aufnahmearten für die Topografiemessung. Die Punktmessung ergibt die Höheninformation an einem Oberflächenelement. Erweiterung um weitere Sensorelemente zum Liniensensor oder Durchführung eines Linienscans ergibt die Höheninformationen über einer Linie. Durch eine zweidimensionale Anordnung der Sensorelemente oder zweidimensionales Scannen wird die Höheninformation über einer Fläche aufgenommen. Durch Verbindung von 2D-Sensor und 2D-Scan ist das Messen der Topografie über größere Flächen möglich.

Die Erweiterung gegenüber der Punktmessung ist die Linienmessung (Abbildung 1.1, 2.v.l.). Bei Linienmessungen wird entlang einer Linie gemessen. Die resultierende Topografie wird in diesem zweidimensionalen Fall auch (Höhen-)Profil genannt. Die Messung von Höhenprofilen ist aus historischen Gründen weit verbreitet und daher auch die Grundlage von Normen für die Fertigungsmesstechnik, so zum Beispiel der ISO 4287 [7]. Die Linienmessung kann auf zwei Arten realisiert werden. Zum einen kann das Messsystem mit mehreren Sensorelementen in einer Linie ausgestattet werden (z. B. Zeilenkameras) oder ein Einzelsensor kann mithilfe einer Kinematik über die Oberfläche geführt werden („Linienscan“). Die scannende Variante ist weiter verbreitet, da mit ihr kostengünstig mit nur einem Sensorelement theoretisch unbegrenzt lange Profillinien aufgenommen werden können. Während die zweidimensionale, linienhafte Profilmessung in der Vergangenheit für die meisten Oberflächen ausreichend war, sind heute zunehmend dreidimensionale Oberflächencharakteristika gefordert, um auch komplexere Oberflächen, wie nicht-isotrope (z. B. gefräste oder gewalzte) oder strukturierte (z. B. geätzte) Oberflächen für die Fertigungsoptimierung aussagekräftig charakterisieren zu können. Die Linienmessung wird durch Hinzufügen einer weiteren Messachse zur Flächenmessung (Abbildung 1.1, 2.v.r.) erweitert. Dies kann durch Abtasten mit einem Punktsensor in einem zweidimensionalen Raster, Scannen eines Liniensensors quer zur Sensorlinie oder Verwendung eines zweidimensionalen Sensorarrays realisiert werden. Die Verbreitung von 2D-Sensorarrays ist mit dem Aufkommen von digitalen Kameras stark gewachsen. Um Oberflächentopografien zu messen, die größer sind als die vom Flächensensor betrachtete Fläche, kann mit Hilfe eines Scans des Flächensensors der laterale Messbereich vergrößert werden (Abbildung 1.1, rechts). Für die Anwendung an bewegten Oberflächen ist es einerseits sinnvoll, einen möglichst großen Teil der Oberfläche simultan aufzunehmen, da die Messzeit begrenzt ist. Dies spricht für ein möglichst großes, flächenhaftes Sensorarray. Andererseits kann die Eigenbewegung des Messobjektes gegebenenfalls als Scanbewegung für scannende Messungen ausgenutzt werden, sodass auch

Punkt- oder, im Sinne der schnellen Erfassung größerer Flächen, Liniensensoren in Frage kämen. Diese Aspekte gilt es bei der Auswahl des Messsystems abzuwägen.

Das klassische Messverfahren für die Objekttopografie ist das Tastschnittverfahren. Hierbei wird die Oberfläche mit einer Tastspitze abgetastet. Das Verfahren liefert Einzelpunkte, im Scanbetrieb auch Profillinien oder 3D-Topografien, anhand derer Objektcharakteristika abgeleitet werden können. Aufgrund seiner Pionierstellung ist das Verfahren im Maschinenbau weit verbreitet und es basieren entsprechend viele Industrienormen, insbesondere aus der Reihe "Geometrical product specification", auf diesem Messverfahren [10, 7]. Zwar kann eine 3D-Topografie zur Bestimmung von Flächenparametern auch mit Tastschnittgeräten aufgenommen werden, allerdings sind flächenhaft aufnehmende Messverfahren zum einen schneller, zum anderen ist durch die simultane Aufnahme vieler zusammenhängender Oberflächenelemente pro Messaufnahme die Gefahr der Positionsabweichung der Oberflächenelemente zueinander geringer oder gar ausgeschlossen. Die EN ISO 25178 definiert zur flächenhaften Messung von Oberflächenparametern geeignete Verfahren [8]. Neben dem berührenden Tastschnittverfahren werden auch berührungslose Messverfahren berücksichtigt. Die in dieser Arbeit betrachteten Objektflächen sind mit Strukturhöhen von wenigen Nanometern häufig zu eben für die meisten Tastköpfe und in vielen Fällen auch zu empfindlich, um sie rückwirkungsfrei mit berührenden Messverfahren zu erfassen. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine berührungslose, optische Messtechnik zur flächenhaften Messung der Objekttopografie für diese Anwendungen verfolgt.

Punkt-für-Punkt im Raster scannende, optische Messsysteme, wie chromatisch-konfokale Sonden, Konfokalmikroskope oder als Punktsensor ausgeführte (Weißlicht-)Interferometer oder OCT-Systeme (optical coherence tomography) scheiden aus, weil diese zwar hinreichend genaue Höheninformationen liefern können [11, 12], allerdings bei Messungen von sich bewegenden Objekten eine Zuordnung der einzeln aufgenommenen Höheninformationen zu spezifischen Oberflächenelementen ohne ergänzende Messtechnik zur Positionsverfolgung nicht möglich ist.

Als Liniensensor ausgeführte optische Messsysteme haben gegenüber flächenhaft messenden Systemen den Nachteil, dass sie weniger Oberflächenelemente simultan aufnehmen. Dies wird aufgewogen mit der häufig sehr hohen Messrate, bei 2D-FD-OCTs [13] oder anderen mit Zeilenkameras ausgestatteten optischen Messsystemen oft im Bereich einiger hundert kHz, was diese Systeme für die Beobachtung schnell ablaufender Prozesse interessant macht [14]. Bei mit Liniensensoren gescannten, in Bewegung befindlichen Flächen gibt es, wie bei punktweise messenden Systemen, ebenfalls Probleme mit der Zuordnung der aufgenommenen Höheninformationen zum Ort der Oberflächenelemente, weshalb flächenhaft messende Systeme vorzuziehen sind.

Flächensensoren bieten den großen Vorteil, dass die Höheninformationen schon bei der Aufnahme aufgrund des Sensoraufbaus fest den beobachteten Oberflächenelementen zugeordnet werden. Bei der scannenden Erfassung von größeren Flächen ist eine Positionszuordnung im Post-Processing durch sogenanntes Stitching möglich, womit das numerische Zusammenfügen mehrerer überlappender Einzelflächen gemeint ist, oft ohne zusätzliche Positionsdaten [15].

Zu den flächenhaft messenden Messverfahren, welche in der ISO 25178 erwähnt werden, sind die Fokusvariation, die Streifenlichtprojektion und die Weißlichtinterferometrie in der Fertigungsmesstechnik am weitesten verbreitet. Alle drei sind bildgebende Verfahren.

Die Streifenlichtprojektion kommt hauptsächlich bei makroskopischen Anwendungen zum Einsatz. Ein Beispiel sei die Formprüfung von großflächigen Bauteilen, wie z. B. in der Automobilindustrie [16]. Eine limitierende Einflussgröße für die Anwendung dieses Verfahrens im mikroskopischen Bereich ist die Skalierbarkeit der Lichtprojektion, die Streifen sind beugungslimitiert, weshalb die Höhenunsicherheiten des Verfahrens bestenfalls im Bereich um 1 μm liegen, was für eine Rauheitsmessung der in dieser Arbeit betrachteten Messobjekte nicht ausreicht [17].

Die Fokusvariation entspricht in ihrem Aufbau einem handelsüblichen bildgebenden (mikroskop-)optischen Aufbau. Durch Aufnahmen mit variierten Abständen zwischen Messobjekt und Objektiv können die Abstände bestimmt werden, an denen die Objektoberflächenelemente sich im Fokus befinden. Hieraus kann wiederum die Topografie berechnet werden. Die Bewertung des Fokus erfolgt durch Bildverarbeitungsalgorithmen, den sog. Focus Measure Functions, und setzt voraus, dass sich deutliche Strukturen auf der Oberfläche des Messobjektfläche befinden [18]. Die in dieser Arbeit betrachteten Objekte sind sehr glatt und enthalten so gut wie keine Strukturen, weshalb die Fokusvariation nicht für Topografiemessungen der Objekte eingesetzt werden kann.

Das für die gestellten Messaufgaben gewählte Messverfahren ist die Weißlichtinterferometrie (WLI), auch bekannt unter Namen wie Kohärenz-scannende-Interferometrie und Kohärenzradar. Die WLI bietet Höhenunsicherheiten bis in den Sub-Nanometerbereich bei lateralen Auflösungen bis zum Beugungslimit. Der einfache Aufbau eines WLI entspricht einem Auflichtmikroskop mit einer breitbandigen Lichtquelle („weißes“ Licht) und einer Interferometerstrecke, welche üblicherweise in das Objektiv integriert ist [19]. WLIs zur Topografiemessung werden meistens als Flächensensor ausgelegt. Die Höheninformation wird dabei im verbreitetsten Fall aus einem Scan entlang der optischen Achse (vertikal scannende Weißlichtinterferometrie VSWLI) bestimmt. Damit ähnelt sie in der Scanbewegung der Fokusvariation, allerdings erlauben die betrachteten Interferenzeffekte eine deutlich feinere Höhenbestimmung. Eine der ersten Nennungen der WLI stammt aus den 1970ern, als Fluornoy et al. die Technik zur Messung von Filmdicken verwendet haben [20]. Die Technik basierte in ihren Anfängen noch auf analoger Fototechnik, wurde jedoch mit Aufkommen digitaler Fototechnik in den späten 1980er Jahren schnell zu einem wichtigen Instrument der Profilometrie [21] [22] [23]. Einen Überblick über die WLI-Technologie geben die Review-Paper [24] [25].

Die WLI bietet also gegenüber den anderen betrachteten Verfahren eine höhere Auflösung und kann auf den Messobjekten in dieser Arbeit eingesetzt werden. Offen ist zunächst, wie gut die WLI zur Messung auf gekrümmten und bewegten Objekten geeignet ist.

Ein wichtiger Aspekt dieser Arbeit ist die Kompatibilität des Messverfahrens mit gekrümmten Oberflächen. Zur Anwendung der VSWLI auf gekrümmten Oberflächen wurden in der Vergangenheit bereits Untersuchungen unternommen. Lehmann [26] behandelte den Einfluss chromatischer Aberrationen der VSWLI-Optik bei der Betrachtung gekrümmter Oberflächen. Die Anwendung der VSWLI auf hemisphärischen Objekten wurde eben-

falls schon untersucht [27]. Scheiding et al. [28] nutzten VSWLI um an Mikrolinsenarrays zu messen. Diese drei vorgenannten Veröffentlichungen demonstrierten, dass die WLI grundsätzlich an gekrümmten Oberflächen angewandt werden kann. Allerdings ist die verwendete vertikal scannende Methode ungeeignet, um auf kontinuierlich lateral bewegten Objekten zu messen, da die Objekte für die Dauer des Vertikalscans stillstehen müssen.

Einen Ausweg liefert die von Olszak [29] beschriebene lateral scannende Weißlichtinterferometrie (LSWLI). Zentrales Element dieser Technik ist der schräg zur optischen Achse verlaufende Scanpfad. Der Höhenscan zur Topografiemessung entsteht bei dieser Technik dadurch, dass Oberflächenpunkte auf diesem Pfad während eines Scans nicht nur lateral durch das Messfeld wandern, sondern dabei gleichzeitig auch ihre Position vertikal entlang der optischen Achse ändern. So kann ohne zusätzliche vertikale Scanbewegung seitens des Messsystems die Topografie des Objektes gemessen werden und das sogar kontinuierlich, solange sie sich auf dem Scanpfad bewegt.

Für die Berechnung der Topografie aus per LSWLI aufgenommenen Daten ist die Kenntnis des Scanpfads zwingend erforderlich, da dieser das Verhältnis von lateraler Ortsänderung im Messfeld zur vertikalen Positionsänderung vorgibt. Für translatorische Scanbewegungen können die Kippwinkel des Scanpfads zur Optik direkt von der Kippeinheit, z. B. einem Goniometer übernommen werden. Ist der Kippwinkel nicht direkt aus dem Setup bekannt, muss er gemessen werden. Hierzu kann z. B. der Scanpfad mit einer anderen Messtechnik eingemessen werden, so wie Bahr, Otto et al. [30] [31]. Auf eine externe Einmessung kann mit dem Ansatz von Munteanu [32] gänzlich verzichtet werden. Hierbei wird der Kippwinkel aus der Frequenz des gemessenen Interferenzsignals der Oberflächenpunkte bestimmt. Die Bestimmung des Kippwinkels aus den Messdaten selbst macht diese Methode attraktiv für LSWLI-Messungen auf Objekten mit unbekannter Scanpfadlage, wie es bei vielen industriellen Anwendungen, z. B. der Blechproduktion, der Fall ist. Munteanu entwickelte diese Methode für translatorische Scanpfade, jedoch ist bei rotierenden Objekten, wie die in dieser Arbeit betrachteten, der Scanpfad nicht geradlinig, sondern folgt der gekrümmten Rotationsbahn der Objekte. Eine frühere Arbeit zur WLI-Messung auf zylindrischen Objekten vernachlässigte die Krümmung des Scanpfads [33]. Es ist offen, ob durch eine Erweiterung von Munteanus Methode auf gekrümmte Scanpfade eine Topografiemessung mittels rotatorischer LSWLI ohne Vorwissen über den Radius und die lokalen Winkel des Scanpfads ermöglicht wird.

Eine wichtige Größe, welche für die translatorische und rotatorische LSWLI benötigt wird, ist die Oberflächenverschiebung durch das Messfeld. Im Gegensatz zur VSWLI, wo die Oberflächenpunkte während des vertikalen Scans an einer festen Position im Messfeld verweilen, wandern die Oberflächenpunkte beim lateralen Scan des LSWLI Verfahrens entlang des Scanpfads durch das Messfeld. Um die Interferenzsignale, die sogenannten Korrelogramme, zur Topografieberechnung zu erhalten, müssen die Intensitätswerte der Oberflächenpunkte an jedem Ort, den sie während des Scans passieren, aus den Einzelaufnahmen extrahiert werden. Die Kenntnis des Ortes der Oberflächenpunkte zu jedem Aufnahmezeitpunkt ist also essentiell für die LSWLI. Dieser Umstand ist seit der ersten Beschreibung der LSWLI bekannt. Olszak [29] beschrieb ein Auswaschen von Oberflächenkonturen aufgrund von Abweichungen von der angenommenen Verschiebungsgeschwindigkeit von 1 Pixel/F-

rame. Munteanu [32] nahm ebenfalls eine feste Geschwindigkeit von 1 Pixel/Frame an. Mit einer Verschiebungsgenauigkeit von $0,2 \mu\text{m mm}^{-1}$ konnte eine $8,69 \mu\text{m}$ hohe Stufe mit einer Unsicherheit von 40 nm gemessen werden. Kapusi et al. [34] wählten die NMM-1 Nanomessmaschine mit einer Positionierunsicherheit von unter 0,1 nm als Translationsantrieb für ihren LSWLI Aufbau. Die Positionierunsicherheiten der vorgestellten Arbeiten, wenn genannt, umfassen einen großen Bereich von einigen hundert bis zu zehntel Nanometern. Eine quantitative Untersuchung des Einflusses der Positionierung auf die Unsicherheit der Topografiemessung fehlt. Zudem gehen alle Studien von einer konstanten Verschiebung aus. Bei fertigungsnahen in-prozess Anwendungen kann diese Annahme nicht getroffen werden, da sich die Messtechnik dort üblicherweise den Fertigungsparametern, wie z.B. Werkzeugvorschüben oder Werkstückverweilzeiten, unterordnen muss. Es ist daher sinnvoll, den Einfluss von Verschiebungsunsicherheit und Verschiebungsmessunsicherheit getrennt als zwei unabhängige Unsicherheitsbeiträge zur Topografiemessunsicherheit betrachten.

Zusätzlich sind diese vorgestellten Ansätze nicht geeignet für rotatorische Bewegungen. Bei rotatorischen Scans ist die Umfangsgeschwindigkeit die relevante Größe. Diese wird von der Drehzahl und dem Scanfadradius beeinflusst. Aufgrund der mikroskopischen Größenverhältnisse des Messfeldes müsste der Radius mit Unsicherheiten im Bereich weniger Mikrometer bekannt sein, was im industriellen Anwendungsgebiet nicht gegeben oder im Falle von in-prozess Messungen von radiusändernden Bearbeitungsprozessen sogar unmöglich ist. Es ist also eine Verschiebungsmesstechnik erforderlich, welche mit für die LSWLI geeigneten Unsicherheiten die Oberflächenverschiebungen von rotatorisch gescannten Objekten messen kann.

Zusammenfassend ist die lateral scannende Weißlichtinterferometrie eine vielversprechende Technologie für kontinuierliche Topografiemessungen rotierender Objekte mit Messunsicherheiten im Bereich weniger Nanometer. Um die lateral scannende Weißlichtinterferometrie hierzu zu befähigen, sind jedoch offene Fragen zur Berücksichtigung der Krümmung des Scanpfads sowie zur Verschiebungsbestimmung der rotierenden Objekte zu klären.

1.3 Ziel und Struktur der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist es, die lateral scannende Weißlichtinterferometrie zu befähigen, nicht nur auf translatorisch bewegten, sondern auch auf kontinuierlich rotierenden Körpern messen zu können. Um unabhängig von externen Sensoren zu funktionieren, d.h. als in sich geschlossenes Messsystem in-situ/in-prozess Oberflächenmessungen ausführen zu können, soll zusätzlich ein integriertes Speckle-Messsystem zur Messung der Oberflächenverschiebung eingeführt werden. Mit den neuen Fähigkeiten des Topografiemesssystems werden schließlich neue Anwendungsfelder wie die in-situ Messung an rotierenden Walzen und Wälzlagern erschlossen.

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen zur Weißlichtinterferometrie im allgemeinen sowie der translatorisch scannenden und der neuen rotatorisch scannenden WLI im speziellen vorgestellt. Außerdem werden die Grundlagen zur digitalen Speckle-Korrelation, welche erstmals zur Verschiebungsmessung in ein WLI integriert verwendet wird, dargelegt. In **Kapi-**

tel 3 wird der realisierte Aufbau des lateral scannenden Weißlichtinterferometers beschrieben. Ebenso wird die auf Robustheit ausgelegte Softwareimplementierung von der Rohdatenaufnahme, über die Datenvorbereitung bis zur Auswertung der Topografie und der zugehörigen Interpretation der berechneten Topografie dokumentiert. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung der Hardware und der Signalverarbeitung des in den LSWLI Aufbau integrierten Speckle-Messsystems zur Verschiebungsmessung per Speckle-Korrelation. Das anschließende **Kapitel 4** ist der Charakterisierung und Validierung des entstandenen Messsystems gewidmet. Dabei wird die mit dem LSWLI Aufbau theoretisch erreichbare Höhenmessunsicherheit basierend auf einer Monte-Carlo-Simulation abgeschätzt. Aus den Simulationsergebnissen werden die Anforderungen an die Messunsicherheit der Speckle-Verschiebungsmessung theoretisch abgeschätzt und im Experiment validiert. Ebenso wird die Messunsicherheit der Topografiemessung des realisierten LSWLI Demonstrators unter Laborbedingungen experimentell bestimmt um die Messunsicherheitsabschätzung aus der Monte-Carlo-Simulation zu validieren. Danach wird in **Kapitel 5** das Messsystem in Anwendungsszenarien für rotatorisch bewegte Messobjekte eingesetzt. An Wälzlagern wird die Fähigkeit zu unendlich langen, kontinuierlichen Topografiemessungen demonstriert. An rotierenden Walzen wird zudem demonstriert, wie robust das Messsystem bei hohen, schwankenden Scangeschwindigkeiten und Umgebungsvibrationen in der Fertigungsumgebung arbeitet. Im abschließenden **Kapitel 6** werden die erzielten Forschungsergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Weißlichtinterferometrie

Das verwendete Prinzip der Interferometrie ist im allgemeinen wie folgt: Das Licht einer kohärenten Lichtquelle wird durch einen Strahlteiler in zwei Wege, einen Referenzweg mit fester Länge und einen Messweg mit variabler Länge aufgeteilt. Wenn die Lichtstrahlen der beiden Pfade an einem Detektor rekombinieren, interferieren sie miteinander. Der Aufbau von Interferometern für die Mikroskopie ist in Abbildung 2.1 schematisch gezeigt.

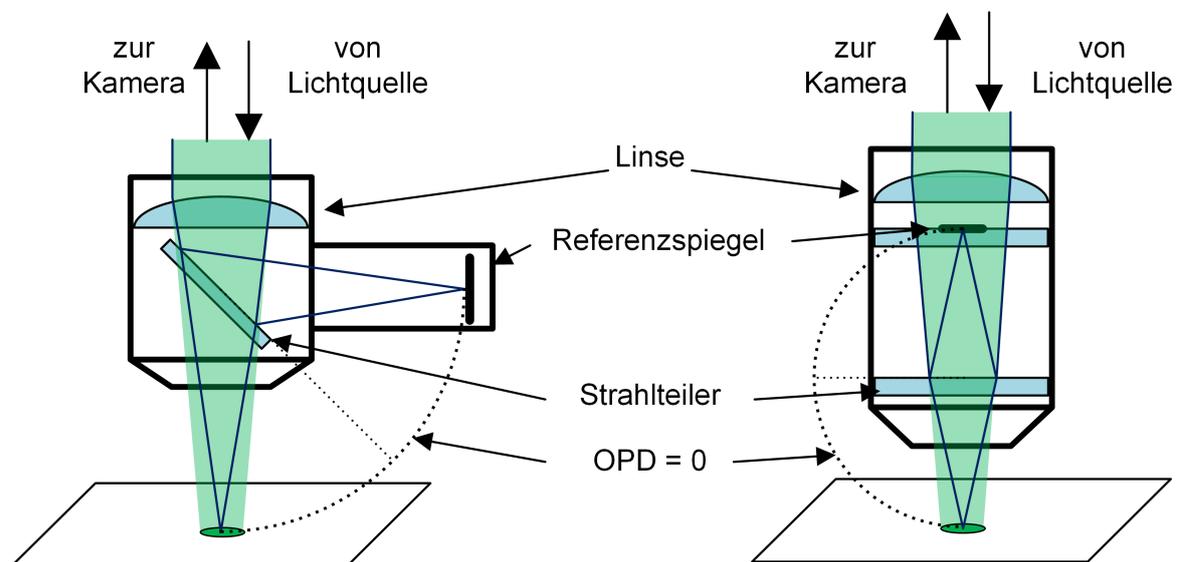


Abbildung 2.1: Zwei Bauarten von Interferenzobjektiven nach [19]. a) Michelsonobjektiv. b) Mirauobjektiv. Der Abstand, bei dem die optische Pfadlängendifferenz (OPD) = 0 ist, wurde mit gepunkteten Linien kenntlich gemacht.

Die linke Bauart ist dem Michelson-Morley Interferometer von 1887 nachempfunden [35]. Beim Michelson Interferometer steht der Referenzarm des Interferometers im rechten Winkel zur optischen Achse des Objektivs. Beim rechts dargestellten Mirau-Objektiv, patentiert 1949 [36], verläuft der Referenzarm koaxial entgegengesetzt zum Messarm. Beide Versionen haben die wesentlichen Komponenten Strahlteiler, Referenzspiegel und Linse gemein, alle in Abbildung 2.1 markiert. Die Mirau-Bauart ermöglicht den Bau kompakter Objektive, welche nicht größer sind als herkömmliche Mikroskopobjektive. Mirau-Objektive sind aufgrund des im Zentrum der optischen Achse positionierten Referenzspiegels auf höhere Vergrößerungsstufen $>10\times$ begrenzt, da der Spiegel bei kleineren Vergrößerungen das Zentrum der Abbildung obskurieren würde. Für kleinere Vergrößerungsstufen, $1\times$ - $5\times$, kommen Michelson-Objektive zum Einsatz. Die laterale Auflösung des optischen Systems wird in beiden Varianten durch das Beugungslimit begrenzt, welches maßgeblich von numerischer Apertur NA und Vergrößerung des Objektivs abhängig ist.

Ebenfalls sind in Abbildung 2.1 für beide Bauarten die jeweiligen Abstände für eine optische Pfadlängendifferenz (OPD) von Null gekennzeichnet. Die OPD ist der optische Längenunterschied zwischen dem Referenzpfad und dem Messpfad. Die detektierte Lichtintensität hängt davon ab, ob die OPD eine konstruktive ($OPD = n\lambda$) oder destruktive ($OPD = n/2\lambda$) Interferenz verursacht. Die Interferenzen werden durch eine optische Pfadlängendifferenz zwischen dem variablen Messpfad und dem fixen Referenzpfad im Objektiv verursacht und können erst beobachtet werden, wenn beide optischen Pfade auf dem Detektor wieder aufeinandertreffen. Die Intensität des detektierten Signals eines Punktes, der seine vertikale Position z im variablen Messpfad ändert ist nach [37]

$$I_z = I_0 \cdot \left[1 + \exp \left[-\ln(2) \cdot \left(\frac{2(l - l_{\text{ref}})}{l_c} \right)^2 \right] \cdot \cos \left(\frac{4(l - l_{\text{ref}})}{\pi\lambda_0} \right) \right], \quad (2.1)$$

wobei I_0 die mittlere Intensität, l der Abstand zwischen der Probenoberfläche und dem Strahlteiler ($l = z(\text{Oberfläche}) - z(\text{Strahlteiler})$) und l_{ref} der Abstand zwischen dem Referenzspiegel und dem Strahlteiler (Referenzweg) ist. Die Kohärenzlänge l_c bestimmt das Abklingen des Intensitätssignals und lautet für eine Lichtquelle mit gaußischem Spektrum

$$l_c = \frac{4 \ln(2)}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{n \cdot \Delta\lambda}, \quad (2.2)$$

wobei λ_0 die zentrale Wellenlänge des Lichtspektrums, n der Brechungsindex des umgebenden Mediums und $\Delta\lambda$ die Halbwertsbreite (engl. full width half maximum - FWHM) des Spektrums ist. Nach Gleichung 2.1 schwankt die Intensität I_z zwischen lokalen Maxima und Minima, wenn die Länge der Messstrecke in einem Abstandsbereich um die Null-OPD-Ebene (bei z_{OPD}) verändert wird, wobei die Einhüllende der Intensität bestimmt durch die Kohärenzlänge l_c mit zunehmender Entfernung von der Null-OPD-Ebene abnimmt. Die Maxima und Minima von idealen, monochromatischen Lichtquellen (z. B. Laser) klingen aufgrund der hohen Kohärenzlänge nicht ab, was zu einer Uneindeutigkeit führt, da sich das Interferenzsignal mit jeder Periode der Interferenz wiederholt. Bei einer kurzkohärenten Weißlichtquelle hingegen fällt die Intensität der Maxima und Minima gaußförmig ab. Das nullte Maximum dieses Intensitätsprofils lässt sich eindeutig z_{OPD} zuordnen. Durch eine Variation des Messarms des Interferometers, dem Scan, wird die einem Oberflächenpunkt zugehörige pfadlängenabhängige Intensität I_z aufgenommen. Eine solches Signal wird im Folgenden als Korrelogramm bezeichnet. Die Intensität des (idealen) Korrelogramms und auch der Interferenzkontrast zwischen einem Maximum und seinen benachbarten Minima im Korrelogramm sind maximal für den Oberflächenabstand $z = z_{\text{OPD}}$, wo die Pfadlängendifferenz $\Delta l = l - l_{\text{ref}} = 0$ ist. Die Periodenlänge des Korrelogramms über z entspricht der halben Zentralwellenlänge des Beleuchtungsspektrums. Ein ideales Korrelogramm ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Das abgebildete Korrelogramm wurde basierend auf Gleichung 2.1 erstellt. Die Intensität in Graustufen wurde auf die mittlere Intensität des Signals I_0 zentriert. Für die Darstellung wurde als zentrale Wellenlänge $\lambda_0 = 500 \text{ nm}$ und als Kohärenzlänge $l_c = 2 \mu\text{m}$ gewählt.

Die Aufnahme der Korrelogramme erfolgt i.d.R. kamerabasiert. Dies erlaubt die gleichzeitige Aufnahme vieler Korrelogramme, nämlich ein Korrelogramm pro Pixel des Sensors. Aus den Korrelogrammen werden die Positionen $z_{\text{OPD},i}$ der Oberflächenpunkte bestimmt.

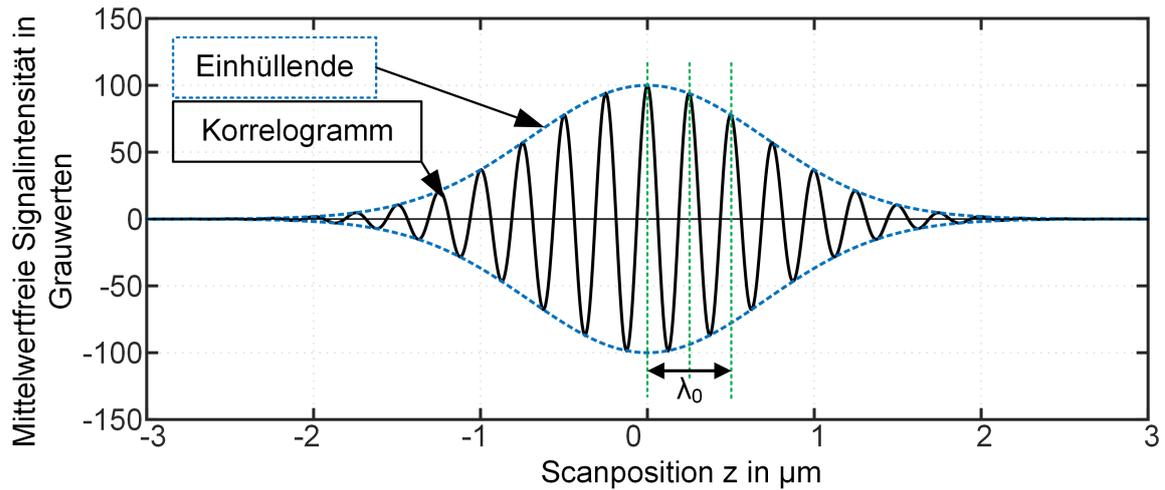


Abbildung 2.2: Korrelogramm eines Punktes bei Änderung der Länge des Messpfades.

Aus den gemessenen $z_{\text{OPD},i}$ und einem definierten $z_{\text{OPD},\text{ref}}$, welches z. B. in der Mitte des Messbereiches definiert wird, kann schließlich die Topografie, bestehend aus relativen Höhenwerten h_{AB} berechnet werden. Die Aufzeichnung der Korrelogramme erfolgt in den für diese Arbeit relevanten realisierten Prinzipien durch eine zeitliche Variation des Abstands z in Form einer Scanbewegung zwischen Messgerät und Messobjekt. Die folgenden Unterabschnitte behandeln die vertikal, die translatorisch-lateral und die rotatorisch-lateral scannende WLI, wobei letztere im Fokus dieser Arbeit steht.

2.1.1 Vertikal scannende WLI

Die klassische technische Umsetzung des WLI Prinzips ist die bereits im Abschnitt 1.2 angesprochene vertikal scannende Weißlichtinterferometrie. Ihr Prinzip ist in Abbildung 2.3 gezeigt.

Bei der VSWLI wird die vertikale Position $z_{\text{OPD},i}$ für jeden Punkt (repräsentiert durch einen Pixel) innerhalb des Sichtfeldes (engl. field of view - FOV) gesucht, um daraus die Topografie des Messobjektes mit den Höhen h_{ij} zu berechnen. Hierzu wird ein Oberflächenscan in z -Richtung durchgeführt und anschließend für jeden Punkt die $z_{\text{OPD},i}$ -Position bestimmt, an der die Einhüllende der aufgenommenen Intensität ihr Maximum erreicht. Bezogen auf die zwei Beispielpunkte A und B in Abbildung 2.3 entspricht die Höhenkoordinate h_A eines Oberflächenpunktes A der Scanposition $z_{\text{OPD},A}$. Die Höhendifferenz h_{AB} zwischen den zwei Oberflächenpunkten A und B ergibt sich damit aus der Differenz der beiden Scanpositionen

$$h_{\text{AB}} = z_{\text{OPD},B} - z_{\text{OPD},A}. \quad (2.3)$$

Die Längenänderung des Messpfades des Interferometers wird bei diesem Scanmodus durch eine vertikale Bewegung zwischen Messobjekt und Objektiv realisiert (z. B. durch vertikales Verfahren des Messobjekts oder der Objektivs). Um unbeeinflusst von der Masse der Messobjekte scannen zu können, wird das WLI bzw. nur das Interferometerobjektiv bewegt.

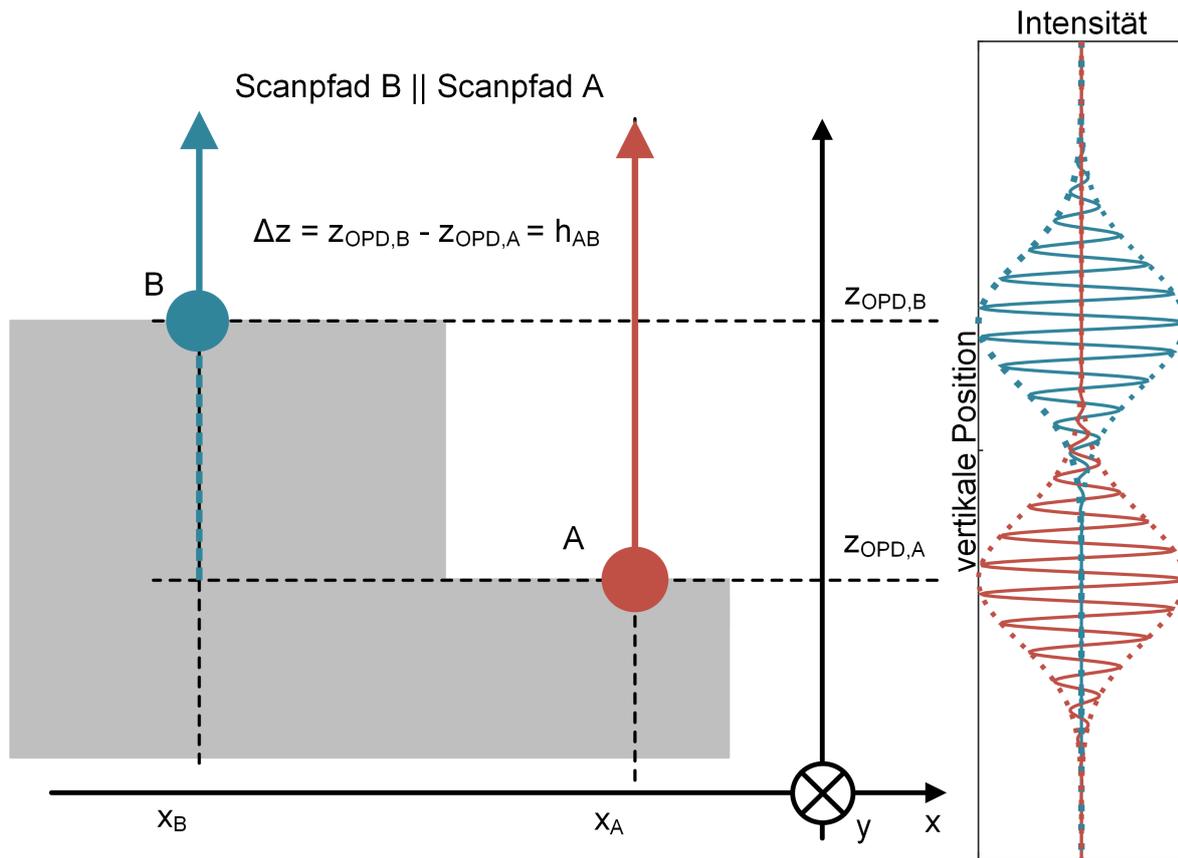


Abbildung 2.3: Schematischer Überblick über den vertikal scannenden WLI-Scanmodus. Links: Definition der Geometrie des vertikalen Scanmodus am Beispiel einer Stufe. Rechts: Korrelogramme, die beim Durchgang der Punkte A (rot) und B (blau) durch das Messvolumen des WLI gemessen werden.

Messbereich und Auflösung Da die Topografie direkt aus den vertikalen Positionen $z_{OPD,i}$ berechnet wird, sind die Anforderungen an den vertikalen Scanvorgang hoch, um Höhenmessunsicherheiten in der Größenordnung von einem Nanometer erreichen zu können. Die vertikale Abtastung sollte zum einen gleichmäßig sein, für die präzisere, lineare Interpolation der Höhenwerte nach der Auswertung und zum anderen eine bestimmte Schrittweite nicht überschreiten, um eine Unterabtastung der Korrelogramme zu vermeiden. GBS, der Hersteller des WLI für die Referenzmessungen in dieser Arbeit, gibt eine Mindestabtastrate von $\Delta z_{\min,GBS} = \lambda/8 = 66,5\text{nm}$ für das Messsystem an. Um eine ausreichend gleichmäßige Scanbewegung zu erreichen, erfolgt der vertikale Scan in einer kontinuierlichen und nicht in einer schrittweisen Bewegung. Die Abtastrate der Kamera wird so zur Scaneinheit abgestimmt, dass die gewünschte Abtastrate in z-Richtung erreicht wird. Um den Einfluss von Erschütterungen und Vibrationen aus der Umgebung zu minimieren, wird der vertikale Scan so schnell wie möglich ausgeführt. In der Literatur werden weitere Ansätze zur Verringerung der vertikalen Scanpositionsunsicherheit beschrieben. So kann die räumliche Position des WLI-Sensors zum Messobjekt mit sog. Nanomessmaschinen überwacht werden [34] oder durch Integration zusätzlicher interferometrischer Messtechnik in die WLI-Optik in vertikaler Richtung gemessen und kompensiert werden [38]. Der Messbereich eines VSWLI ist in z-Richtung prinzipiell nur durch die maximale Verfahrlänge des z-Antriebs begrenzt. Eine Limitation der vertikal scannenden WLI liegt in der Anwendbarkeit auf sehr

großflächigen und sich bewegenden Messobjekten. Bei großflächigen Messobjekten, deren zu messende Fläche größer als das FOV des Sensors ist, werden die einzeln aufgenommene Teiltopografien des Messobjektes in der Nachbearbeitung digital durch das sogenannte „Stitching“ zu einer Gesamtopografie zusammengesetzt. Da der vertikale Scan eine gewisse Zeit dauert, würden bei einer lateralen Bewegung des Messobjektes die Interferenzsignale der Oberflächenpunkte auf dem Kamerasensor verrutschen, wodurch die Korrelogramme verfälscht oder gar zerstört würden. Die reine vertikal scannende WLI ist daher für bewegte Objekte nicht geeignet.

2.1.2 Translatorisch lateral scannende WLI

Eine Alternative zur VSWLI für bewegte Objekte bietet hier die lateral scannende WLI. Bei der translatorischen LSWLI wird ein Objekt seitlich durch das FOV des WLIs auf einem gekippten Scanpfad bewegt. Die Geometrie des translatorisch lateralen Scans ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Aufgrund des Neigungswinkels Θ des Scanpfads bewegt sich jeder Oberflächenpunkt des Objekts nicht nur horizontal (x -Richtung) durch das FOV, sondern auch in vertikaler Richtung (z -Richtung). Diese Änderung der vertikalen Position ist analog zum z -Scan der VSWLI und führt zu einem Korrelogramm, das mit dem unten in Abbildung 2.4 dargestellten vergleichbar ist. Es ist zu beachten, dass die Korrelogramme in der Abbildung über der x -Achse aufgetragen sind, wodurch sie abhängig von Θ gestauchter oder gestreckter erscheinen können. Bei einem Auftrag über die z -Achse wäre die Korrelogrammfrequenz weiterhin konstant $f_{\text{corr}}(z) = \lambda_0/2$. Die beiden beispielhaften Oberflächenpunkte A und B haben einen Höhenunterschied von h_{AB} im Oberflächenkoordinatensystem. Punkt A bewegt sich auf dem Scanpfad A (rote Linie) durch das FOV und schneidet die Null-OPD-Linie bei x_1 . Punkt B bewegt sich durch das FOV auf dem Scanpfad B (blaue Linie), der parallel zum Scanpfad A verläuft und um $\Delta z = z_1 - z_2$ vertikal verschoben ist. Der Punkt B schneidet die Null-OPD-Linie bei x_2 . Der vertikale Abstand $\Delta z = (x_1 - x_2) \tan(\Theta)$ zwischen den Scanbahnen lässt sich durch Auswertung des Kosinus des Kippwinkels Θ in die tatsächliche Oberflächenhöhendifferenz h_{AB} umrechnen:

$$h_{AB} = \Delta z \cdot \cos(\Theta) = (x_1 - x_2) \cdot \sin(\Theta). \quad (2.4)$$

Damit lässt sich der Höhenunterschied zwischen zwei beliebigen Oberflächenpunkten A und B aus dem Neigungswinkel der Scanpfade und den x -Positionen, an denen die Hüllkurven ihrer Korrelogramme maximal werden, berechnen.

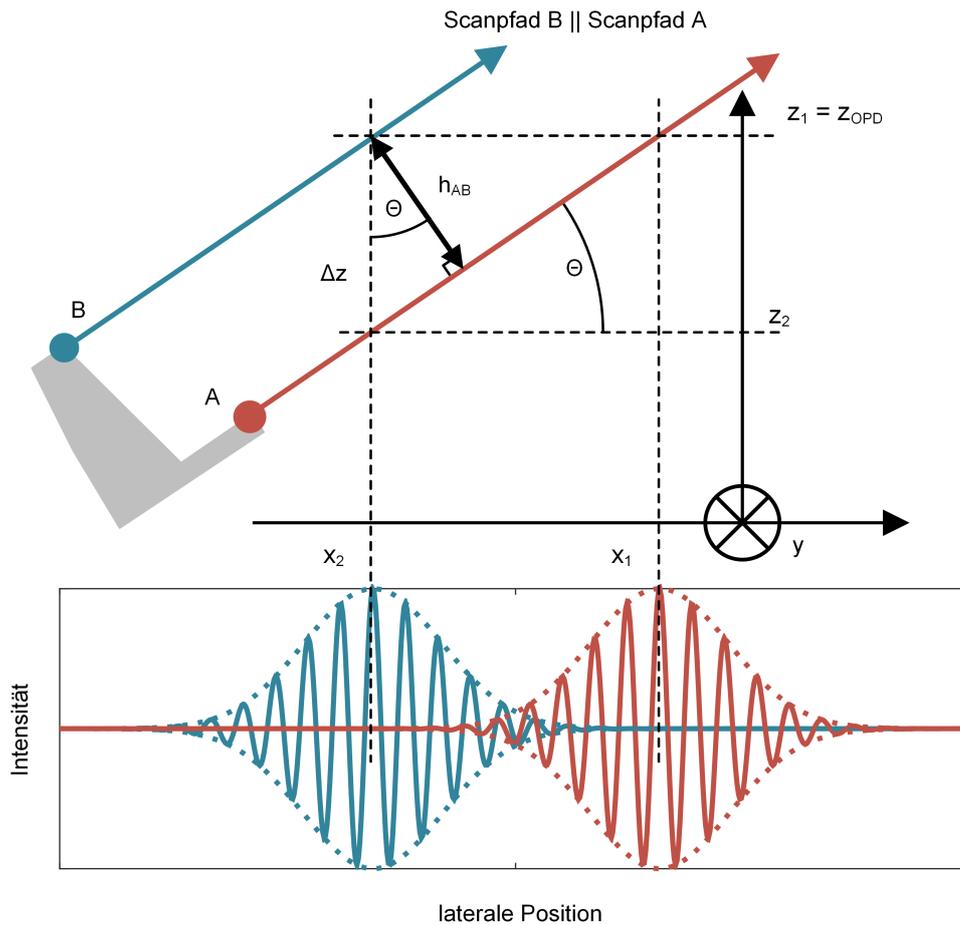


Abbildung 2.4: Schematischer Überblick über den translatorischen LSWLI Scanmodus. Oben: Definition der Geometrie des translatorischen Scanmodus. Unten: Korrelogramme, die beim Durchgang der Punkte A (rot) und B (blau) durch das FOV des LSWLI gemessen wurden. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Die Positionen x_1 und x_2 sind durch die Oberflächenbewegung und die Auswertung der entsprechenden Korrelogramme bekannt. Zur Vereinfachung der Berechnung wird einem Pixel des Kamerasensors in Scanrichtung (z. B. in der Sensormitte) eine Referenzposition x_1 zugewiesen. Da zur Aufnahme der Signale i.d.R. eine flächige digitale Industriekamera verwendet wird, wird ein kontinuierlicher Strom von Oberflächenpunkten beobachtet, der sich in horizontaler x -Richtung durch das FOV bewegt (Linienmessung). Abhängig von der Anzahl der Kamerapixel in y -Richtung werden mehrere Reihen von Punkten parallel aufgezeichnet (flächenhafte Messung). Nach Gleichung 2.4 muss der Neigungswinkel des Scanpfads bekannt sein, der entweder durch eine Kalibrierung mit einem Referenzobjekt oder durch die von Munteanu [32] beschriebene Selbstkalibrierungsmethode ermittelt wird. Die Methode von Munteanu verwendet die Frequenz f_{corr} der Korrelogramme, um den Neigungswinkel des Scanpfads zu berechnen:

$$|\Theta| = \arctan \left(\frac{f_{\text{corr}} \lambda_0}{2s_{\text{pixel}} N_{\text{pixel},x}} \right), \quad (2.5)$$

wobei λ_0 die zentrale Beleuchtungswellenlänge, s_{pixel} die Breite der von einem Pixel beobachteten Oberfläche und $N_{\text{pixel},x}$ die Anzahl der Pixel in Scanrichtung ist, über die die Frequenz ausgewertet wird.

Messbereich und Auflösung Bei der LSWLI sind Messbereich und Auflösung über den geneigten lateralen Scanpfad miteinander verknüpft. Messbereich und Auflösung lassen sich aus Gleichung 2.4 ableiten.

Anforderungen an den Messbereich: Da die Anzahl der Pixel und damit die Größe des Kamerasensors in Scanrichtung konstant ist, ist der Messbereich direkt vom Neigungswinkel abhängig, wobei der geometrischen Zusammenhang $h_{\max} = w \cdot \sin(\Theta)$ mit der FOV-Weite w gilt. Der kleinste Neigungswinkel mit dem noch eine Struktur der Höhe h_{AB} gemessen werden kann, beträgt $\Theta_{\min, h_{AB}} = \arcsin\left(\frac{h_{AB}}{w}\right)$. Des Weiteren wird der Neigungswinkel dadurch begrenzt, dass das Korrelogramm in das FOV passen muss, um ausgewertet werden zu können. Als Kriterium wird angenommen, dass die Hüllkurve des Korrelogramms im FOV mit der Breite w um mindestens 50 % absinkt, also dass der Scanpfad im FOV eine vertikale Änderung Δz gleich der Kohärenzlänge der Beleuchtung l_c durchläuft. Aus dieser Annahme ergibt sich ein minimaler Tangentenwinkel von $\Theta_{\min, \Delta z} = \arcsin\left(\frac{l_c}{\sqrt{l_c^2 + w^2}}\right)$.

Anforderungen an die axiale Messauflösung: Mit dem Pixelpitch s_{pixel} , dem Abstand zwischen zwei Pixelzentren, beträgt die Höhe zwischen zwei Pixeln $\Delta h_{AB} = s_{\text{pixel}} \cdot \sin(\Theta)$. Je steiler der Neigungswinkel, desto größer sind die Höhenstufen zwischen Pixeln der aufnehmenden Kamera. Der maximale Neigungswinkel, bei dem noch eine Stufe h_{AB} aufgelöst werden kann, ist $\Theta_{\max, h_{AB}} = \arcsin\left(\frac{h_{AB}}{s_{\text{pixel}}}\right)$. Eine weitere Limitation des Neigungswinkels nach oben ist bedingt durch die maximale messbare Änderung der Interferenz, von maximaler konstruktiver zu maximal destruktiver Interferenz, durch eine vertikale Änderung Δz zwischen zwei benachbarten Pixeln. Für Pixel mit dem vom Rayleigh-Kriterium begrenzten minimalen Abstand $s_{\text{pixel}} = \Delta x_{\text{Rayleigh}} = 1,22\lambda_0 \text{NA}^{-1}$ ergibt sich ein maximaler Neigungswinkel von $\Theta_{\max, \Delta z} = \arctan\left((2,44\lambda_0)^{-1} \text{NA}\lambda_{\text{eff}}\right)$, der auch von Lehmann et. al hergeleitet wurde [40]. Dort wird die effektive Wellenlänge als $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_0 / \cos(\Theta_{\text{NA}})$ mit dem Öffnungswinkel der Objektivapertur Θ_{NA} definiert.

2.1.3 Rotatorisch lateral scannende WLI

Der Unterschied zwischen dem klassischen, translatorischen LSWLI-Verfahren und der rotatorischen LSWLI liegt in der unterschiedlichen Scanbewegung. Durch die Rotationsbewegung des Messobjekts bewegt sich die Oberfläche des Objekts auf einem gekrümmten Scanpfad. Die Montage der WLI-Optik an einer festen Position relativ zum Messobjekt ermöglicht LSWLI für rotatorische Bewegungen. Die Herausforderung dieses Aufbaus besteht darin, dass die Abtastschritte in z-Richtung aufgrund des gekrümmten Scanpfads der einzelnen Oberflächenelemente nicht äquidistant sind. Jeder Schritt hängt von der lateralen Position des Oberflächenelements im FOV und der Messposition über dem Oberflächenprofil ab. Das Prinzip des rotatorischen Scanmodus ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

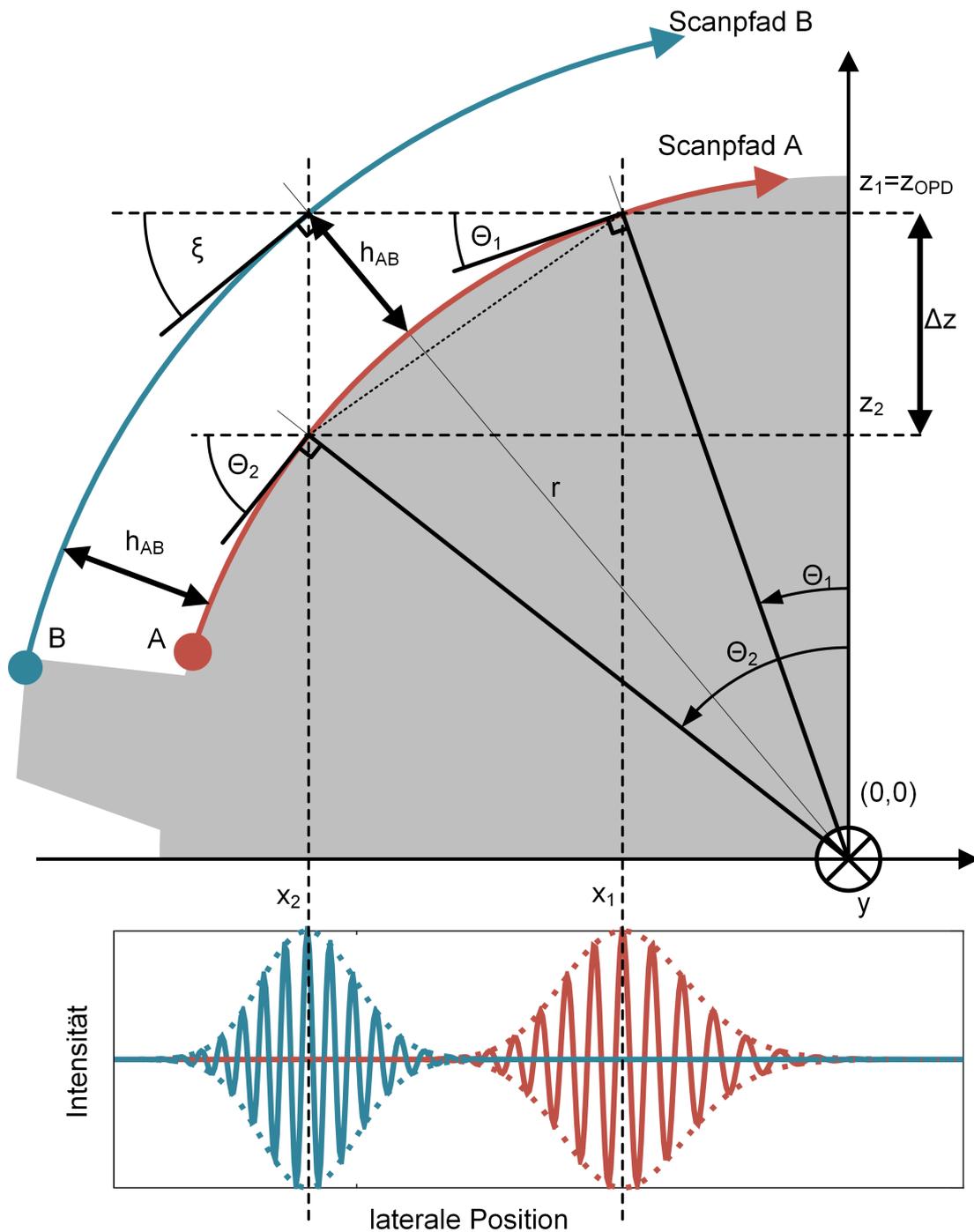


Abbildung 2.5: Schematischer Überblick über den rotatorischen LSWLI-Scanmodus. Oben: Definition der Geometrie des rotatorischen Scanmodus. Der Ursprung liegt im Mittelpunkt der Kreisbahn mit dem Radius r . Der Scheitelpunkt liegt auf der z -Achse. Unten: Korrelogramme, gemessen während der Passage der Punkte A (rot) und B (blau) durch das FOV des LSWLI. Signalintensität als durchgezogene Linien, Einhüllende als gepunktete Linien. Man beachte die Frequenzabnahme des Signals in Richtung des Scheitelpunktes. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Die beispielhaften Oberflächenpunkte A und B bewegen sich auf den konzentrischen, kreisförmigen Scanpfaden A (rote Linie) und B (blaue Linie) um den Koordinatenursprung, welcher im Rotationsmittelpunkt liegt. Der Radius des Scanpfads B ist um die Strukturhöhe h_{AB} ,

die Messgröße, größer als der Radius r des Scanpfads A. Die Punkte A und B schneiden die Null-OPD-Linie bei z_{OPD} an den x -Koordinaten x_1 bzw. x_2 . Beim Durchlaufen des FOV des LSWLI können Korrelogramme wie unten in Abbildung 2.5 für die Punkte A und B beobachtet werden. Da die Änderung der z -Koordinate auf den gekrümmten Scanpfaden nicht linear ist, nehmen die Frequenzen der Korrelogramme mit der Nähe zum Scheitelpunkt ab, da der lokale Oberflächenwinkel Θ dabei geringer wird. Entsprechend der dargestellten Geometrie wird ein System von vier Gleichungen betrachtet, um die Strukturhöhe h_{AB} in Abhängigkeit von den Positionen x_1, x_2 und den Tangentenwinkeln Θ_1, Θ_2 abzuleiten:

$$\Delta z = z_1 - z_2 = r (\cos(\Theta_1) - \cos(\Theta_2)) \quad (2.6)$$

$$\Delta z = (x_1 - x_2) \tan\left(\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}\right) \quad (2.7)$$

$$r \sin(\Theta_2) = (r + h_{\text{AB}}) \sin(\xi) \quad (2.8)$$

$$r \cos(\Theta_1) = (r + h_{\text{AB}}) \cos(\xi) \quad (2.9)$$

Gleichung 2.6 beschreibt die vertikale Differenz $z_1 - z_2$ unter Verwendung der parametrischen Kreisgleichung für den Abtastpfad A. Gleichung 2.7 beschreibt die vertikale Differenz $z_1 - z_2$ mit Hilfe des horizontalen Abstands $x_1 - x_2$ und des Winkels $\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}$ der Sehne, die beide x -Positionen auf Scanpfad A verbindet. Gleichung 2.8 beschreibt die Koordinate x_2 auf den beiden Scanpfaden A (Schnittpunkt mit z_2) und B (Schnittpunkt mit z_1) unter Verwendung der parametrischen Kreisgleichungen. Analog beschreibt Gleichung 2.9 die gemeinsame Koordinate z_1 für die beiden Scanpfade A (Schnittpunkt mit x_1) und B (Schnittpunkt mit x_2). Der unbekannte Radius r kann durch x_1, x_2, Θ_1 und Θ_2 ausgedrückt werden, durch Gleichsetzen der Gleichungen 2.6 und 2.7. Den unbekanntem Tangentenwinkel ξ , welcher auf beiden Scanpfaden gleich ist, als Ausdruck von Θ_1 und Θ_2 erhält man durch Umformen von 2.8 und 2.9 nach h_{AB} und anschließendem Gleichsetzen beider Ausdrücke, um ξ zu erhalten. Die Ausdrücke für r und ξ werden dann entweder auf Gleichung 2.8 oder Gleichung 2.9 angewendet und für h_{AB} gelöst:

$$h_{\text{AB}} = \frac{(x_1 - x_2) \tan\left(\frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}\right)}{\cos(\Theta_1) - \cos(\Theta_2)} \cdot \left(\cos(\Theta_1) \sqrt{\frac{\sin^2(\Theta_2)}{\cos^2(\Theta_1)} + 1} - 1 \right). \quad (2.10)$$

Diese Gleichung für h_{AB} beruht auf den Tangentenwinkeln Θ_1, Θ_2 auf dem Scanpfad A und den horizontalen Koordinaten x_1 und x_2 , die die Positionen markieren, an denen die Hüllkurven der Korrelogramme der Punkte A und B maximal sind. Alle diese Größen können aus den LSWLI-Aufnahmen bestimmt werden.

Im Gegensatz zur translatorischen LSWLI, bei dem nur ein Winkel für den Scanvorgang charakteristisch ist, ist der Scanpfad beim rotatorischen LSWLI kreisförmig, so dass sich der Tangentenwinkel des Scanpfads während der Rotation durch das FOV ändert. In den Korrelogrammen ist dies als Änderung der lokalen Frequenz zu beobachten (vgl. Abbildung 2.5, unten). Um den Selbstkalibrierungsansatz von Munteanu zur Bestimmung des

Oberflächenwinkels anwenden zu können, muss Gleichung 2.5 durch eine orts aufgelöste Frequenzanalyse erweitert werden, um die jeweiligen lokalen Winkel $\Theta(x)$ zu erhalten:

$$|\Theta(x)| = \arctan\left(\frac{f_{\text{corr}}(x)\lambda_0}{2s_{\text{pixel}}N_{\text{pixel},x}}\right), \quad (2.11)$$

wobei $f_{\text{corr}}(x)$ die lokale Frequenz der Streifen im Korrelogramm, λ_0 die zentrale Wellenlänge der Beleuchtung, s_{pixel} die Breite des vergrößerten Pixels und $N_{\text{pixel},x}$ die Anzahl der Pixel in Scanrichtung ist, über die die Frequenz ausgewertet wird. Zu beachten ist, dass die Gleichung einen absoluten Wert des Winkels angibt. Würde sich das FOV über den Scheitelpunkt eines kreisförmigen Objekts erstrecken, müsste das Vorzeichen des Winkels a priori berücksichtigt werden.

Durch die Gleichungen 2.10 und 2.11 wird das LSWLI-Messprinzip um einen rotierenden Scanmodus erweitert. Der translatorische Modus kann als Spezialfall des rotatorischen Abtastmodus betrachtet werden, vgl. Gleichungen 2.4 und 2.10 für $\Theta_1 = \Theta_2 = \Theta$, wobei die Scanpfade im translatorischen Fall unendlich große Radien haben und somit als geradlinige Pfade innerhalb des FOV mit einem gemeinsamen Neigungswinkel Θ angenommen werden können.

Messbereich und Auflösung Der Messbereich und die Auflösung der LSWLI hängt insbesondere beim rotatorischen Scanmodus stark von den lokalen Winkeln der Scanpfade in Bezug auf die optische Achse des WLI ab. Ein steilerer Winkel führt zu einem größeren axialen Messbereich. Wenn ein bestimmter Messbereich erforderlich ist, um die gesamte Topografie des Objekts erfassen zu können, ist also ein bestimmter Mindestwinkel erforderlich. Gleichzeitig führt ein steilerer Winkel jedoch zu einer gröberen Abtastung. Dies wiederum bedeutet, dass eine Messung mit einer bestimmten Auflösung nur bis zu einem bestimmten maximalen Neigungswinkel durchgeführt werden kann. Die Suche nach dem besten Kompromiss zwischen Reichweite und Auflösung ist bei rotatorischer LSWLI aufgrund der Krümmung des Scanpfads besonders schwierig. Daher werden die Grenzen des Messfensters in den folgenden geometrischen Überlegungen für zylindrische Objekte festgelegt. Für rotatorische Scanpfade gilt, dass die Höhenänderung am Scheitelpunkt der Kreisbahn minimal ist und mit steigender Entfernung vom Scheitelpunkt entsprechend einer Kreisbahn quadratisch zunimmt. Der Scheitelpunkt ist bei der rotatorischen LSWLI als der Ort auf dem Scanpfad definiert, von dem eine Normale ausgeht, welche parallel zur optischen Achse des WLI verläuft. Die der folgenden Diskussion zu Grunde liegende Geometrie ist in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt. Dort sind die nutzbaren Messpositionen als Abstände vom Scheitelpunkt von x_{min} bis x_{max} mit den dort vorliegenden Scanpfadwinkeln Θ_{min} und Θ_{max} eingezeichnet. Das FOV der Sensors, welches auf den Scanpfad ausgerichtet ist hat eine Breite w zwischen den FOV-Rändern. Über dem Scanpfad befindet sich auf einer koaxialen Bahn eine Oberfläche mit dem Abstand h_{AB} vom Scanpfad.

Anforderungen an den Messbereich: Um einen bestimmten Bereich von Strukturhöhen h_{AB} messen zu können, muss der Rand des FOV in einem Mindestabstand x_{min} zum Scheitelpunkt positioniert werden. Der Scanpfadwinkel an dieser Position ist Θ_{min} . Die x -Koordinaten der FOV-Ränder auf einem Scanpfad lauten also gemäß der parametrischen Kreisgleichung $x_{\text{min}} = r \sin(\Theta_{\text{min}})$ und $x_{\text{min}} - w = r \sin(\Theta_2)$, wobei r der Scanpfadra-

dius ist. Die Verwendung dieser Koordinaten des FOV in Verbindung mit Gleichung 2.10 ermöglicht die Berechnung des minimalen Tangentenwinkels in Abhängigkeit von den Messobjekthöhen h_{AB} :

$$\Theta_{\min, h_{AB}} = \arcsin\left(\frac{h_{AB}^2 + 2h_{AB}r - w^2}{2rw}\right). \quad (2.12)$$

Für große Radien wird der Winkel $\Theta_{\min, h_{AB}}$ asymptotisch zu $\arcsin(\frac{h_{AB}}{w})$. Unter der Bedingung, dass nur Winkel im Bereich $0^\circ < \Theta < 90^\circ$ zulässig sind, hat dieser Grenzwert die gleiche Form wie der konstante Winkel im Fall der translatorischen LSWLI.

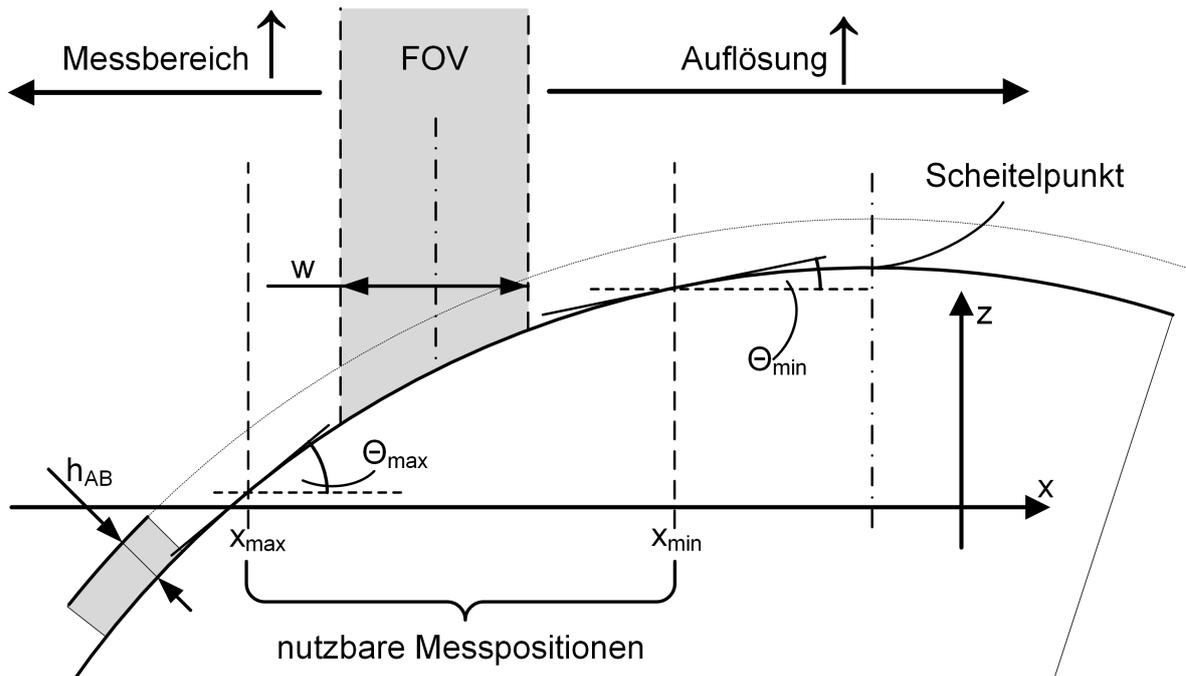


Abbildung 2.6: Lage des FOV in Bezug auf den gekrümmten Scanpfad und die nutzbaren Messpositionen. Das FOV wird schmäler als der Bereich nutzbarer Positionen angenommen. Eine Messung näher am Scheitelpunkt ergibt eine feinere Auflösung, aber einen kleineren Messbereich. Ähnliche Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Da das Interferometer nicht direkt h_{AB} , sondern die vertikale Projektion Δz der Struktur misst, gibt es eine weitere Einschränkung für den minimalen Tangentenwinkel aus Sicht des Signals. Es wird angenommen, dass das Signal nur dann auswertbar ist, wenn die Hüllkurve des Korrelogramms im gesamten FOV um mindestens 50 % abfällt (wodurch also das Korrelogramm um 50 % abfällt). Daher ist eine untere Schranke für $\Theta_{\min, \Delta z}$ durch die Bedingung $\Delta z = l_c$ gegeben, wobei l_c die Kohärenzlänge ist. Wendet man diese Bedingung und die x -Koordinaten des FOV auf Gleichung 2.6 an, so ergibt sich

$$\Theta_{\min, \Delta z} = \arcsin\left(\frac{l_c}{2r} \sqrt{\frac{4r^2}{(l_c^2 + w^2)} - 1} - \frac{w}{2r}\right). \quad (2.13)$$

Die untere Grenze für den Tangentenwinkel bei großen Radien ist $\arcsin\left(\frac{l_c}{\sqrt{l_c^2 + w^2}}\right)$. Der minimale Tangentenwinkel hängt also sowohl von messobjektspezifischen als auch von mess-

systemspezifischen Parametern ab, so dass für eine bestimmte Messaufgabe der Größere der beiden Grenzwerte zur Auswahl der Messposition herangezogen werden sollte.

Anforderungen an die axiale Messauflösung: Um eine bestimmte minimale physikalische Auflösung für die Strukturhöhe Δh_{AB} zu erreichen, darf das hintere Ende des FOV höchstens einen Abstand zum Scheitelpunkt von x_{\max} haben. Die axiale Auflösung hängt von der Genauigkeit des Algorithmus ab, der für die Auswertung der aufgenommenen Korrelogramme verantwortlich ist. Um die axiale Auflösung unabhängig von einem Algorithmus beurteilen zu können, wird der tatsächliche physikalische Abstand der Beobachtungspixel als Leistungsmerkmal verwendet. Die physikalische Auflösung ist hier definiert als die Strukturhöhendifferenz Δh_{AB} , die von den letzten beiden benachbarten Pixeln des FOV $x_{\max} + s_{\text{pixel}}$ und x_{\max} beobachtet werden kann, wobei s_{pixel} der Abstand zwischen zwei von benachbarten Pixeln beobachteten Oberflächenpunkten ist. Analog zu $\Theta_{\min, \Delta h_{AB}}$ ergibt sich aus Gleichung 2.14 ein maximaler Tangentenwinkel $\Theta_{\max, \Delta h_{AB}}$:

$$\Theta_{\max, \Delta h_{AB}} = \arcsin \left(\frac{\Delta h_{AB}^2 + 2\Delta h_{AB}r - s_{\text{pixel}}^2}{2r \cdot s_{\text{pixel}}} \right). \quad (2.14)$$

Bei großen Radien nähert sich der Winkel $\Theta_{\max, \Delta h_{AB}}$ dem Grenzwert $\arcsin \left(\frac{h_{AB}}{s_{\text{pixel}}} \right)$ an, der dem Limit des translatorischen Scanmodus entspricht. Bei einem LSWLI mit fester Pixelgröße kann die Anforderung an die physikalische Messauflösung für ein Objekt mit einem bestimmten Nennradius an Messpositionen mit Oberflächentangentenwinkeln von höchstens $\Theta_{\max, \Delta h_{AB}}$ erfüllt werden.

Aus Sicht des Signals ist der maximal beobachtbare vertikale Abstand zwischen zwei Pixeln $\Delta z = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2}$. Dabei wird die effektive Wellenlänge $\lambda_{\text{eff}}(\lambda_0, \text{NA})$ verwendet, wobei NA die numerische Apertur ist. Δz steht hier für den Abstand zwischen einem konstruktiven und einem destruktiven Interferenzstreifen (Phasenwechsel von π). Setzt man diese Bedingung und die x-Koordinaten der letzten beiden Pixel im FOV in Gleichung 2.6 ein, so ergibt sich

$$\Theta_{\max, \Delta z} = \arcsin \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{4r} \sqrt{\frac{4r^2}{\frac{\lambda_{\text{eff}}^2}{4} + s_{\text{pixel}}^2} - 1} - \frac{s_{\text{pixel}}}{2r} \right). \quad (2.15)$$

Für große Radien r nähert sich der Winkel $\Theta_{\max, \Delta z}$ dem Grenzwert $\arcsin \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} \left(\frac{\lambda_{\text{eff}}^2}{4} + s_{\text{pixel}}^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \right)$. Wird das Rayleigh-Kriterium für den kleinsten nutzbaren Pixelabstand

$s_{\text{pixel}} = \Delta x_{\text{Rayleigh}} = 1,22 \lambda_0 \text{NA}^{-1}$ auf den Grenzwert angewandt, so ergibt sich

$$\Theta_{\max, \Delta z} = \arctan \left((2,44\lambda_0)^{-1} \text{NA} \lambda_{\text{eff}} \right), \quad (2.16)$$

was dem von Lehmann et al. beschriebenen kritischen Winkel für die Messbarkeit in der Weißlichtinterferometrie entspricht [40]. Dementsprechend wird auch der maximale Tangentenwinkel durch messobjekt- und messsystemspezifische Parameter bestimmt, womit der kleinere Winkelwert für die Wahl der Messposition ausschlaggebend ist.

2.2 Verschiebungsmessung mittels Digitaler Speckle-Korrelation

Aus den theoretischen Betrachtungen in Abschnitt 2.1 kann gefolgert werden, dass die lateralen Aufnahmeorte der Korrelogrammstützpunkte entweder konstant gehalten (VSWLI) oder verfolgt (LSWLI) werden müssen. Für eine erfolgreiche WLI Messung ist es also unabdingbar zu wissen, wie weit die betrachtete Oberfläche zwischen zwei Bildaufnahmen verschoben wurde. Ohne exakte Verschiebungsdaten können die zur Topografieberechnung benötigten Korrelogramme nicht korrekt rekonstruiert werden, da Signale verschiedener Oberflächenpunkte vermischt würden.

Unter Laborbedingungen, in denen sowohl die Bewegung der Oberfläche als auch die Bildaufnahmezeit weitestgehend bekannt und konstant sind, kann die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit bereits zur erfolgreichen Rekonstruktion der Korrelogramme ausreichen. Ergänzend kann häufig die Bewegung des Linear- oder Rotationsantriebs ausgelesen werden, was im Labor ebenfalls häufig ausreicht, um Verschiebungsschwankungen zu berücksichtigen. Bei rotatorischen Messungen werden vom Rotationsantrieb üblicherweise nur die Rotationswinkel ausgegeben, weshalb zur Bestimmung der für die LSWLI relevanten Umfangsgeschwindigkeiten der Radius des Messobjektes bekannt sein müsste. Hierzu sei gesagt, dass bei stärkeren Krümmungen aus der Umfangsgeschwindigkeit noch die Geschwindigkeitskomponente in Scanrichtung (welche parallel zur Sensorfläche verläuft) berechnet werden müsste. Da zudem die Ermittlung des Radius eine weitere Messung mit einem anderen Messgerät (bspw. Tastschnittgerät) erfordert, ist die Nutzung der Rotationswinkel und anschließende Umrechnung in die laterale Verschiebung außerhalb des Labormaßstabs nicht praktikabel. Es ist also eine Verschiebungsmesstechnik erforderlich, welche ohne weitere Hilfsgrößen direkt die Verschiebung zwischen zwei Aufnahmen misst, und zwar synchron zum WLI und möglichst am gleichen Ort und aus der gleichen Perspektive wie die WLI Aufnahme. Um unabhängig von der Art der Scanbewegungen zu funktionieren, sollte die Verschiebungsmessung anhand der Bilddaten des WLI-Sensors durchgeführt werden. So wird die Verschiebungsmessung synchron und direkt am Ort der WLI-Messung aufgenommen, ohne dass die Perspektiven von örtlich getrennten Messtechniken zueinander bestimmt werden müssten.

2.2.1 Digital Image Correlation (DIC)

Eine heute verbreitete Technik zur Berechnung von Verschiebungen in zeitlichen Bildfolgen ist die digitale Bildkorrelation, im weiteren DIC (von engl. "digital image correlation") genannt. ist heute ein wichtiges Werkzeug für viele bildbasierte Messtechniken. Ein bekanntes Anwendungsfeld ist die Particle Image Velocimetry (PIV) [41]. Bei dieser Technik werden Fluidströmungen durch darin suspendierte Partikel sichtbar gemacht. Durch eine dünn-schichtige Beleuchtung der Partikel und Fotografie dieser Schicht in kurzer, zeitlich definierter Abfolge, kann aus der Positionsänderung der Partikel zwischen zwei Aufnahmen die lokale Geschwindigkeit der Partikel (und damit der Strömung, der sie folgen) berechnet werden. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist in der Bildstabilisierung [42] zu finden. Durch das Korrelieren von Bildinhalten kann z. B. in der Mikroskopie der Bild- oder Probendrift

kompensiert werden. Auch zur Anfertigung von Panoramabildern kann die DIC eingesetzt werden.

Die mathematische Grundlage des DIC-Algorithmus ist die Kreuzkorrelationsfunktion für zwei Signale f und g , aufgenommen jeweils an den Orten p und $p + \tau$. Die Kreuzkorrelationsfunktion zweier kontinuierlicher Signale ist definiert als Integral

$$(f \star g)(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{f(p)} g(p + \tau) dp = \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{f(p - \tau)} g(p) dp, \quad (2.17)$$

wobei die Überstriche die komplexe Konjugation anzeigen. Bei einer Festkörpertranslation von p nach $p + \tau$, welche zwischen zwei Bildern f und g stattfindet, ändert sich bis auf die Randgebiete im Idealfall nichts an den Bildsignalen. Die Kreuzkorrelation der beiden Signale wird maximal, wenn ein τ eingesetzt wird, was beide Signale zur Überdeckung führt. Dieses τ entspricht dann der Verschiebungsweite des Bildinhalts. Für die Kreuzkorrelation gilt, analog zum Faltungstheorem, der Zusammenhang der Fouriertransformierten (mit dem Fourieroperator \mathcal{F}):

$$\mathcal{F}(f \star g) = \overline{\mathcal{F}(f)} \cdot \mathcal{F}(g). \quad (2.18)$$

Der generelle Ablauf eines FFT-basierten DIC-Algorithmus ist in Abbildung 2.7 skizziert.

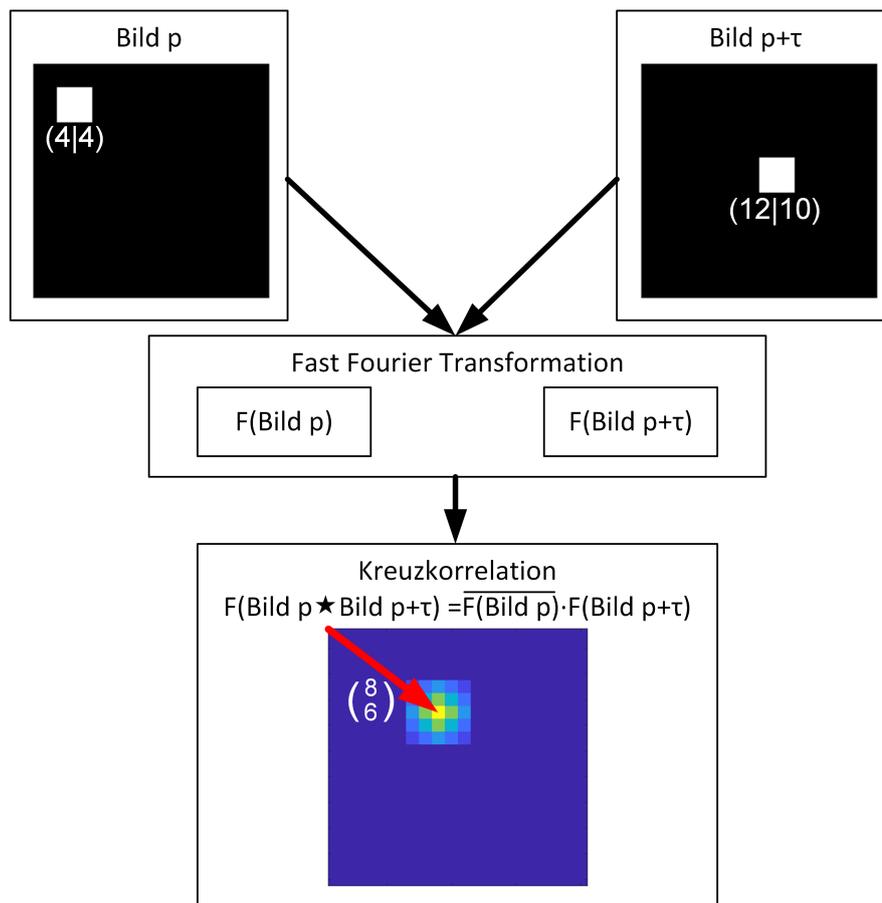


Abbildung 2.7: Genereller Ablauf eines FFT-basierten DIC-Algorithmus, wie dem von Guizar-Sicairos et al. [43]. Die Koordinaten und der Verschiebungsvektor sind in Pixel angegeben.

Die beiden Eingangsbilder zeigen das gleiche weiße Quadrat, welches zwischen ihnen um 8 Pixel nach rechts und um 6 Pixel nach unten verschoben wurden. Aus dem Maximum der Kreuzkorrelation nach Gleichung 2.18 kann die Verschiebung direkt abgelesen werden.

Die effiziente, computergestützte Berechnung über den Fourierbereich wird auch beim Algorithmus von Guizar-Sicairos et al. [43] angewandt, welcher in dieser Arbeit eingesetzt wird. Dieser Algorithmus ist mit dem Fokus auf eine besonders zeiteffiziente Berechnung der Bildinhaltsverschiebung entworfen worden.

Mit dem Algorithmus können nur zweidimensionale Festkörpertranslationen erkannt werden. Er ist daher nicht geeignet für Bilder, bei denen sich die einzelnen Bildstrukturen relativ zueinander bewegen (wie z. B. die Einzelpartikel bei der PIV). Andere Effekte, wie Verzerrung, Verdrehung oder Vergrößerung, werden nicht berücksichtigt. Für diese Effekte könnten andere Algorithmen, wie der Enhanced Correlation Coefficient (basierend auf [44]), verwendet werden. Allerdings sei hier erwähnt, dass (LS)WLI-Aufnahmen, die Verzerrung, Verdrehung oder Vergrößerung/Verkleinerung enthalten, nicht für eine korrekte WLI-Topografieauswertung geeignet sind, da derartige Änderungen der Aufnahmeperspektiven nicht mit den Anforderungen der WLI an die geometrischen Beziehungen zwischen Aufnahmeposition, Scanfad und Interferenzeffekten vereinbar sind. Da eine Auswertung von Aufnahmen, bei denen die vorgenannten Bildeffekte auftreten nicht ausgewertet werden können, ist der zeiteffiziente Algorithmus von Guizar-Sicairos für den vorgesehenen Einsatz bei der Erkennung der Bewegung der starren LSWLI Messobjekte gut geeignet.

Übliche DIC-Algorithmen bestimmen die Verschiebung zwischen zwei Bildern anhand der Fouriertransformierten der eingegebenen Bilder. Die Verschiebung entspricht den Matrixindizes, an denen die Kreuzkorrelationsfunktion maximal ist. Diese erste Schätzung der Verschiebung hat eine Auflösung von einem ganzzahligen Pixel. Ist, wie in dieser Arbeit, eine Subpixel-Auflösung gefordert, ist ein Upsampling der Kreuzkorrelationsmatrix um einen Upsamplingfaktor κ notwendig. Das Upsampling wird nicht an den Eingangsdaten, sondern an der Korrelationsmatrix durch Dirichlet-Kernel-Interpolation im Fourier-Raum durchgeführt. So muss in diesem Schritt nur die Hälfte der Daten, nur die Ergebnismatrix statt der Eingabematrizen, für die Hochskalierung verarbeitet werden, wobei trotzdem alle Bildpunkte der Eingangsbilder im Ergebnis der Kreuzkorrelation berücksichtigt sind. Da die Berechnung mit der gesamten Matrix dennoch viel Speicher und Rechenzeit beansprucht, wurde aufgrund der großen Menge an zu verarbeitenden Bilddaten pro LSWLI Scan der auf numerische Effizienz optimierte Ansatz von Guizar-Sicairos gewählt, welcher einen zweistufigen Upsampling-Ansatz verfolgt.

Der Algorithmus arbeitet zweistufig. In der ersten Stufe wird das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion mit $\kappa = 2$ bestimmt. Um dieses erste, grobe Maximum herum wird in einer zweiten Stufe eine feinere Bestimmung des Korrelationsmaximums mit $\kappa > 2$ (in der Praxis dieser Arbeit wird ein $\kappa = 100$ verwendet) durchgeführt. Um nun nicht die ganze Kreuzkorrelationsmatrix hochskalieren zu müssen, bedient sich der Algorithmus einer matrixbasierten Fouriertransformation nach [45], mit der die Korrelationsmatrix in nur dem kleinen, relevanten Bereich um das grobe Maximum herum hochskaliert wird. Die Auswerteprecision des Algorithmus ist gleich zu anderen Upsamplingalgorithmen mit einer Auflösung von $1/\kappa$ im Bildkoordinatensystem. Die Matrixindizes des Korrelationsmaximums im

Fourierbereich werden nach ihrer Bestimmung in das Koordinatensystem der Eingangsbilder zurücktransformiert.

Essentiell für eine gute Korrelation ist die Präsenz von kontrastreichen, einzigartigen Strukturen in den Bildern. Einschränkend sind bei der Anwendung von DIC die Interferenzstreifen in den WLI Aufnahmen. Diese sind zwar deutlich, aber bewegen sich nicht direkt mit dem Oberflächenscan in Scanrichtung, sondern nur, wenn sich der Abstand zwischen Messobjekt und Optik im Laufe der Messung ändert. Da die Lage der Interferenzstreifen insbesondere bei längeren Messstrecken nicht vorhersagbar ist und da die Mehrheit der zu untersuchenden Messobjekte glatte Oberflächen mit nur wenigen ausgeprägten, verfolgbaren Strukturen sind, muss eine andere Form von korrelierbaren Markern verwendet werden.

2.2.2 Digital Speckle Correlation (DSC)

Um während der LSWLI-Scans verlässliche Marker für die Bestimmung der lateralen Bewegung der Messobjekte mittels DIC im Bild zu haben, werden Laser-Speckle verwendet, welche in einer dedizierten Region des Kamerasensors aufgenommen werden.

Diese specklebasierte Methode wird im Folgenden als Digital Speckle Correlation (DSC) bezeichnet. In der Literatur ist hierfür auch der Begriff DISC (Digital Image Speckle Correlation) geläufig [46, 47]. Gegenüber anderen Methoden zur Markeraufbringung [48] hat der Einsatz von optischen Specklemustern den Vorteil, nicht invasiv zu sein, da es sich bei den Speckles um ein optisches Interferenzphänomen handelt und nicht um ein physisches auf die Proben aufgebracht Markerobjekt. Gegenüber der Nutzung von natürlichen auf den Messobjekten vorhandenen Strukturen als Marker haben Speckle den Vorteil, dass sie zuverlässiger auf den untersuchten technischen Oberflächen erzeugt werden können, als dass zufällige Strukturen, wie Kratzer, auftreten. Dabei verfügen sie über einen hohen Kontrast und ihr Muster ist unkorreliert.

Der Speckleeffekt entsteht bei der Beleuchtung einer Oberfläche mit kohärentem Licht. Hierbei handelt es sich um einen Interferenzeffekt, welcher sich nicht auf dem Objekt, sondern erst in der Beobachtungsebene manifestiert. In Abbildung 2.8 wird die Entstehung von Laser Speckles schematisch gezeigt (Abbildung basierend auf Cloud [49]) und folgend nach den Werken von Gasvik [50] und Goodman [51] beschrieben.

Voraussetzung für das Entstehen von Speckles ist eine kohärente Lichtquelle und eine beleuchtete Oberfläche, welche im betrachteten Bereich eine Höhenänderung in der Größenordnung der Beleuchtungswellenlänge aufweist, durch welche der Abstand zwischen Oberflächenpunkt und Beobachtungsposition variiert. Da die Intensitäten der Oberflächenpunkte nicht aus einer ideal punktwisen Abbildung entstehen, sondern aus dem Streulicht aus der Umgebung eines Oberflächenelements gebildet werden, besteht die komplexe Amplitude eines Speckles aus der Summe aller Einzellichtstrahlen, die eine Beobachtungsposition treffen:

$$I_{\text{komplex}} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N I_k e^{i\phi_k} \quad (2.19)$$

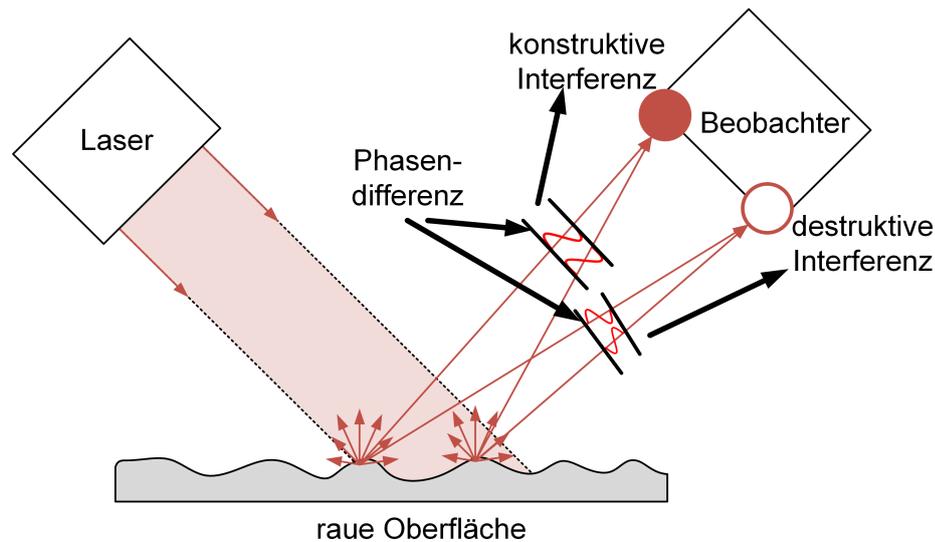


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung zur Entstehung von subjektiven Laser-Speckles durch kohärente Beleuchtung einer Oberfläche. Ein Laser beleuchtet eine raue Oberfläche gleichmäßig. An der Oberfläche gestreutes Licht von verschiedenen Orten trifft sich beim Beobachter. Wenn die eintreffenden Strahlen mehrheitlich in Phase sind, führt die konstruktive Interferenz der Strahlen zu einem hellen Speckle. Sind die Strahlen nicht in Phase, führt dies zu destruktiver Interferenz und einem dunklen Speckle.

Da jeder einzelne Lichtstrahl eines Intensitätssignals eine zufällige Intensität und Phase aufweist, werden im Gesamtbild zufällig helle und dunkle Bereiche beobachtet. Die Verteilung der Intensitätswerte folgt einer negativen Exponentialverteilung der Form

$$P(I) = \frac{1}{\bar{I}} \exp\left(-\frac{I}{\bar{I}}\right). \quad (2.20)$$

Demnach sind dunkle Bereiche wahrscheinlicher als helle - die Speckle erscheinen als klar getrennte helle Punkte mit dunkler Umrandung.

Die mittlere Ausdehnung eines Speckles in der Beobachtungsebene wird angegeben als $d_{\text{Speckle}} = (1 + M)\lambda(2NA)^{-1}$ mit der Vergrößerung M und der numerischen Apertur NA des optischen Systems und der Beleuchtungswellenlänge λ_{Speckle} [51]. Während die Größe in der Beobachtungsebene proportional zu NA^{-1} ist, folgt die Größe der Speckle senkrecht dazu in axialer Richtung NA^{-2} . Da die Bewegung in lateraler Richtung bei der LSWLI gut 50x größer ist als die axiale Änderung durch die Scanpfadkipfung oder -Krümmung ist, ändert sich die Erscheinung der Speckle während eines Scaninkrements (also zwischen zwei Bildaufnahmen mit einer Sollverschiebung in der Größenordnung $< 10 \mu\text{m}$) kaum. Die Speckle korrelieren also lange genug, um sie als Marker für die Bestimmung der Scanbewegung mittels Bildkorrelation zu verwenden. Das fundamentale untere Limit der Messunsicherheit für eine specklebasierte Verschiebungsmessung wurde hergeleitet in [52] und wird kleiner mit einer zunehmenden Zahl an Speckles sowie kleineren Speckles, wobei die Specklegröße von Beleuchtungswellenlänge, Apertur und Abbildungsmaßstab bestimmt wird. Sind die Speckle jedoch zu klein, ein Optimum liegt erfahrungsgemäß bei 2-3 Pixeln, wird die Messung durch Quantisierungseffekte negativ beeinflusst.

Die Beleuchtungsintensität ist ein weiterer zu beachtender Punkt. Insbesondere bei kurzen Kameraintegrationszeiten, welche z. B. bei LSWLI-Messungen von schnell bewegten

Oberflächen notwendig sind, ist auf eine ausreichende Laserleistung zu achten, damit auf möglichst der gesamten Fläche des DSC-Sensorbereichs Speckle erscheinen. Aus Effizienzgründen ist es dabei sinnvoll, den Speckle-Laserstrahl mittels Linsen gezielt in den beobachteten Oberflächenausschnitt einzuleiten. Bei der LSWLI ist insbesondere die Messung in Scanrichtung interessant, sodass zudem eine Umformung des zunächst runden Strahlprofils mittels Linienoptik in die LSWLI-Scanrichtung zu verlängern bzw. in der Breite einzugrenzen, um nicht den WLI-Sensorbereich mit nicht-WLI-Licht zu kontaminieren.

Insgesamt ist der Aufbau eines Specklemesssystems und dessen Handhabung als unkompliziert zu bewerten. Die Erscheinung der Speckle lässt sich gut konstruktiv mit optischen Komponenten realisieren. Das Erzeugen der Laserspeckle auf der Oberfläche ist rückwirkungsfrei und die DSC- und WLI-Subsysteme beeinflussen sich nicht gegenseitig. Der Einbau eines DSC-Verschiebungsmesssystems in den LSWLI-Demonstrator ist also mit den beiden Messprinzipien gut vereinbar und wird daher in Abschnitt 3.2 umgesetzt, wie auch in [53].

3 Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau gliedert sich in zwei Abschnitte. Abschnitt 3.1 ist den Komponenten des rotatorisch lateral scannenden Weißlichtinterferometers und der Auswertung der interferometrischen Informationen zur Topografiemessung gewidmet. In Abschnitt 3.2 wird die Integration des laserspecklebasierten Verschiebungsmesssystems in Hard- und Software beschrieben. Beide Abschnitte beziehen sich auf Abbildung 3.1, welche das Schema und eine fotografische Darstellung des LSWLI-DSC-Demonstratormesssystems zeigt.

3.1 LSWLI-Demonstrator

Im Unterabschnitt 3.1.1 werden die Hardwarekomponenten des LSWLI-Demonstrators vorgestellt. Die Komponenten ergeben zusammen den Demonstrator, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Aufnahme- und Auswertungsmethoden der Topografiedaten, die mit dem LSWLI-Demonstrator aufgenommen werden, werden in Unterabschnitt 3.1.2 beschrieben.

3.1.1 LSWLI Komponenten

Der optische Aufbau des lateral scannenden Weißlichtinterferometers entspricht weitestgehend dem eines handelsüblichen Auflichtmikroskops. Zentrales Element und wesentlicher Unterschied ist das interferenzverursachende Objektiv. Im Folgenden werden die Hauptkomponenten des LSWLI-Demonstrators kurz vorgestellt.

Objektiv

Für diese Arbeit wurden interferenzfähige Objektive der Firma Nikon verwendet, insbesondere das 10x/0.3 Mirau-Objektiv. Die Interferenzobjektive von Nikon sind ab einer Vergrößerung von 10x nicht mehr als Michelson sondern als Mirau-Objektiv ausgeführt [54]. Für die Funktionsweise der Objektive sei auf Abschnitt 2.1 verwiesen. Die kompakte Bauform der Mirau-Objektive ohne den abstehenden Interferenzarm erlaubt den einfachen Anbau der Halterung für das nachträglich integrierte Specklemesssystem.

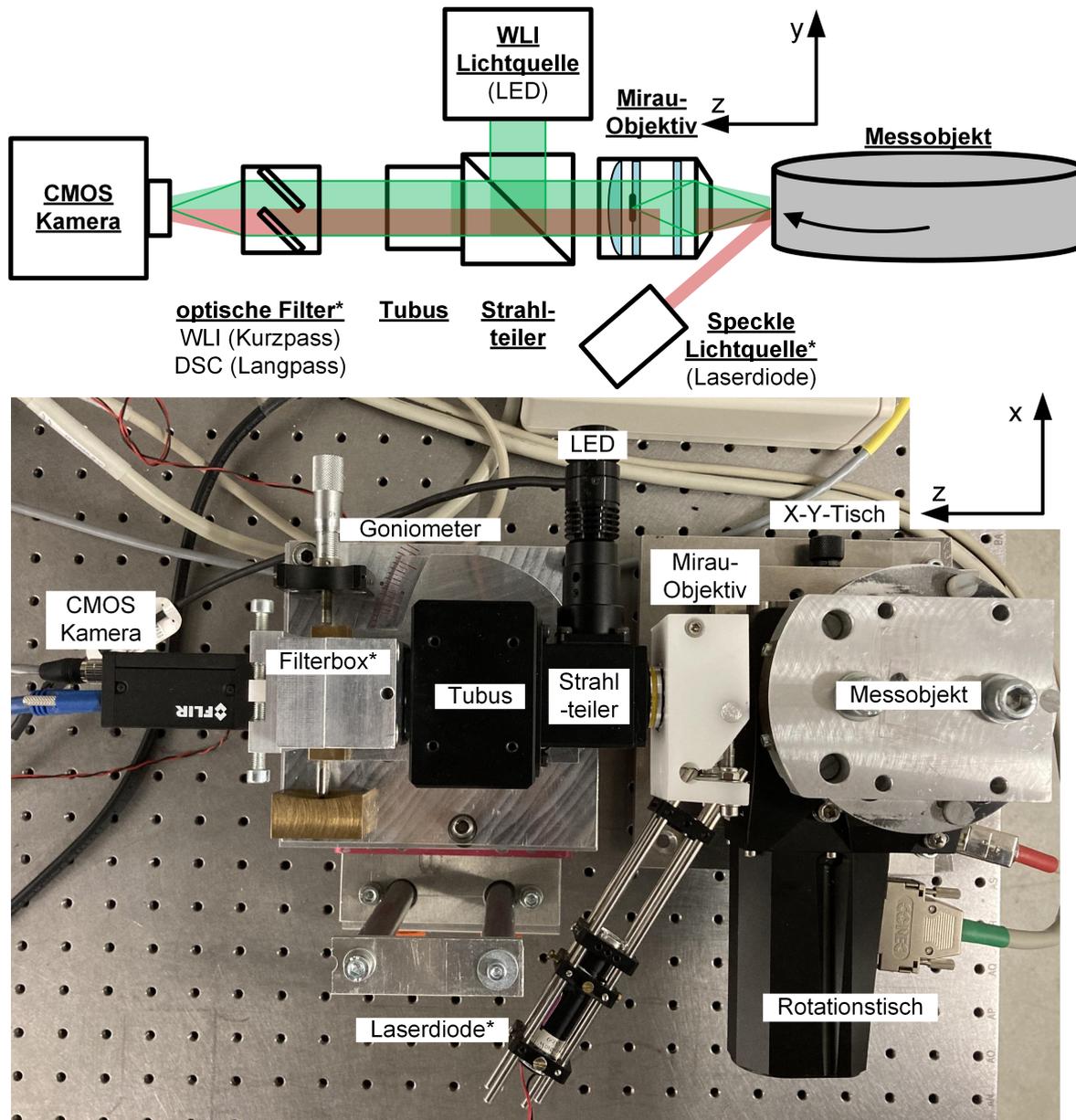


Abbildung 3.1: Oben: Prinzipskizze des LSWLI-Demonstrators als Seitenansicht zur besseren Darstellung der optischen Strahlführung. Unten: Fotografie des LSWLI-Demonstratorsetups als Draufsicht. Die Komponenten des LSWLI (Objektiv, Lichtquelle, Kamera, Tubus) sowie die Ausrichtungs kinematik werden in Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Die mit * markierten Komponenten, Filterbox und Laserdiode, sind Komponenten, welche exklusiv für die integrierte Verschiebungsbestimmung benötigt werden. Sie werden im Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Ähnliche Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2021 [53].

Lichtquelle

Für die Beleuchtung wurden zwei LEDs verwendet, deren Daten denen von LEDs in kommerziellen WLIs ähneln. Zunächst wurde eine 3 W LED mit einer zentralen Wellenlänge von 520 nm und einer FWHM-Bandbreite von 70 nm eingesetzt [55]. Später wurde eine 10 W LED mit einer zentralen Wellenlänge von 530 nm verwendet [56], um eine höhere Beleuchtungsstärke zu erzielen. Im getriggerten Betrieb können die Bilder unterhalb der Belichtungszeit der Kamera, also mit weniger als 5 μs dauernden Lichtpulsen, belichtet werden.

Kamera

Die verwendete Kamera ist eine FLIR Grasshopper 3 (GS3-U3-23S6M-C [57]), mit einem monochromen Sony IMX174 CMOS-Chip. Sie verfügt über eine Auflösung von 1920x1200 Pixeln mit einem Pixelpitch von 5,86 μm . Über ihre USB 3.1 Verbindung können maximal 163 fps bei voller Auflösung übertragen werden. Die hohe Quantenausbeute von 76 % (bei 525 nm) erlaubt auch bei kurzen Integrationszeiten von minimal 5 μs eine angemessene Beleuchtungsstärke bei niedrigem Rauschen (vier 8-Bit-Counts Dunkelrauschen). Essentiell für die Messung von bewegten Objekten ist der globale Shutter.

Tubus

Als Tubus wurde ein Nikon Compact Microscope Tubus (Typ CM-30 [54]) verwendet. Er verfügt über eine 1x Vergrößerung, Köhlerbeleuchtung und ermöglicht Anbau von Kamera, Beleuchtung und Objektiv ohne Adapter. Der Abbildungsmaßstab des gesamten optischen Systems aus Kamera, Tubus und Objektiv wurde mit Hilfe eines Glargets experimentell zu 0,557 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ bestimmt.

Bewegungsunschärfe

Für die Messung von bewegten Objekten ist die Bewegungsunschärfe eine Limitierung für die maximale Objektgeschwindigkeit bei der noch gemessen werden kann. Bewegungsunschärfe tritt auf, wenn sich das Objekt während der Integrationszeit der Kamera über mehrere Pixel hinweg bewegt.

Als Grenze für die Bewegungsunschärfe wird für diese Arbeit eine Bewegung von 1 Pixel innerhalb der Integrationszeit gewählt. Bei der kürzesten einstellbaren Integrationszeit von 5 μs ergibt sich bei einer Abbildungsgröße von 0,557 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ eine maximale Messobjektgeschwindigkeit von 111,4 mms^{-1} , bei der ohne Bewegungsunschärfe gemessen werden kann. Bei geringer Beleuchtungsstärke, z. B. durch optische Eigenschaften der Oberfläche oder durch Limitierungen der Lichtquelle (z. B. durch Sicherheitsbestimmungen am Einsatzort), muss eine längere Integrationszeit verwendet werden, wodurch die maximale Geschwindigkeit sinkt bzw. die Bewegungsunschärfe zunimmt.

Ausrichtungskinetik

Auch wenn das LSWLI-Prinzip ohne aktive Bewegung des Messaufbaus funktioniert, so sind doch diverse Bewegungsmöglichkeiten zur Einstellung der Messposition erforderlich. Die Fokusebene und die Ebene der maximalen Interferenz (welche im Optimalfall koinzidieren sollten) haben einen festen Abstand zur Objektivöffnung. Der Fokusbereich und der Interferenzbereich haben eine Ausdehnung von, je nach Objektiv und Beleuchtung, ungefähr $5\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$ über bzw. unter den Fokus- und Interferenzebenen. Das Messobjekt muss während einer Messung mit der korrekten Neigung/Krümmung des Scanpfads durch das Messvolumen bewegt werden. Die am Demonstrator hierfür verfügbaren Einstellmöglichkeiten sind in Abbildung 3.2 skizziert.

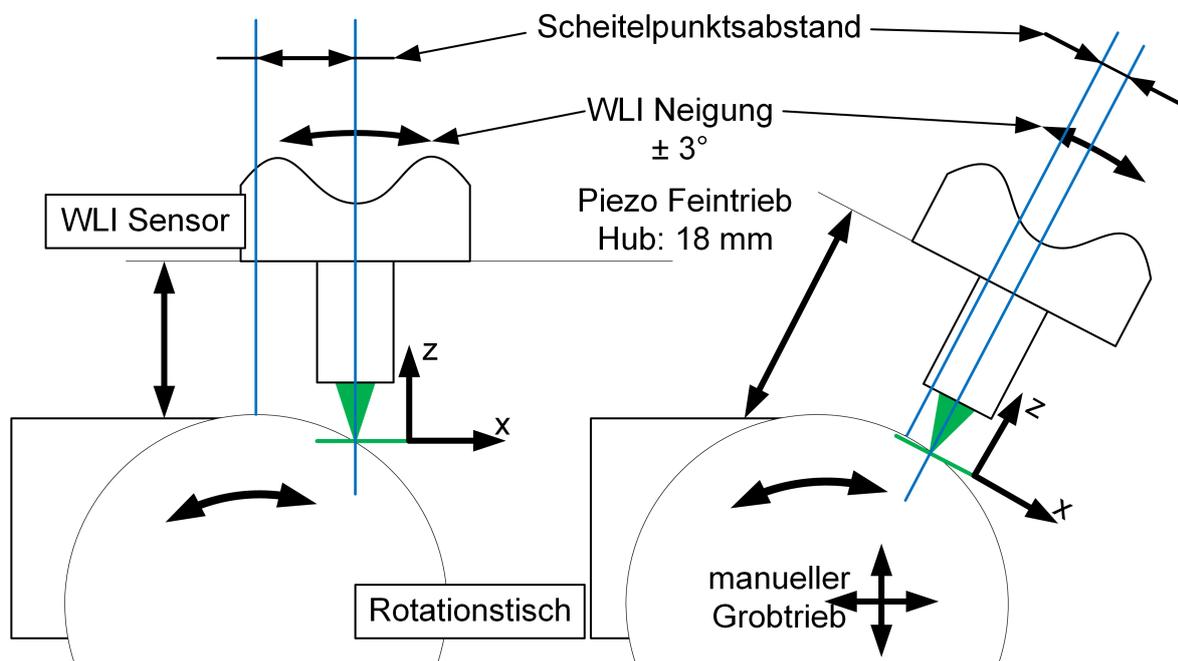


Abbildung 3.2: Skizze der mechanischen Einstellmöglichkeiten mit zwei Beispielausrichtungen. Blau: Orientierungslinien für den Abstand der optischen Achse zum Scheitelpunkt der Kreisbahn. Grün: Markierung des Fokus des WLIs. Der Sensor kann geneigt und in Richtung der optischen Achse per Piezolineareinheit fein eingestellt werden. Die Position des Rotationstisches verfügt über manuelle Stellmöglichkeiten als Grobtrieb.

Der WLI Sensor kann durch Stellschrauben um $\pm 3^\circ$ in der X-Z-Ebene geneigt werden. Der z-Abstand des Sensors zum Rotationstisch kann mit einem Piezolineartisch um 18 mm bewegt werden. Zur Grobausrichtung kann zudem der Rotationstisch manuell per Stellschrauben verschoben werden.

Bei der initialen Einstellung des Messgerätes wird das Objektiv so an die Oberfläche herangebewegt, dass die Fokus- und Interferenzebenen in der Mitte des Kamerabildes erscheinen. Die gewünschte Position wird zunächst mit einem manuellen Grobtrieb angefahren. Zur Feineinstellung kommt ein Linos MS30 Piezolineartisch [58] mit Linos CF30 Controller [59] zum Einsatz. Vorteil des elektronisch verstellbaren Tisches ist, dass das Bild während des Ausrichtens des Messgerätes zum Messobjekt nicht durch Berührung des Sensors durch Bedienende verwackelt wird.

Für translatorisch laterale Messungen ist ein zur optischen Achse gekippter, gerader Scanpfad erforderlich. Hierbei ist der Winkel zwischen optischer Achse und Scanpfad über das gesamte Bildfeld konstant. Der Kippwinkel kann durch einen manuellen Goniometertisch eingestellt werden. Bei der Einstellung des Scanpfads im Bildfeld der rotatorischen LSWLI wird die Krümmung der kreisförmigen Rotationsbahn ausgenutzt. Die Auswirkungen der Betrachtungsposition auf die Scanpfadkrümmung ist in Abbildung 2.6 dargestellt und wurde im Abschnitt 2.1.3 behandelt. Die Ausgangsposition für die Ausrichtung ist der Scheitelpunkt des kreisförmigen Scanpfads. Der Scheitelpunkt kann bei kreisförmig rotierenden Objekten unabhängig von der WLI Neigung durch laterale Bewegung entlang der x -Achse (und Nachführung von Fokus und Kohärenzbereich in z -Richtung) in das FOV des Sensors bewegt werden. Je weiter das FOV in x -Richtung vom Scheitelpunkt weg verschoben wird, desto größer wird die unter dem FOV vorliegende Höhenänderung durch die Krümmung des Scanpfads. Durch die Krümmung des Scanpfads gibt es nicht einen konstanten Winkel unter dem FOV, sondern eine kontinuierlich mit Entfernung zum Scheitelpunkt ansteigende Winkelzunahme. Ein vorheriges Einmessen ist zur Einstellung einer Messposition nicht erforderlich, denn alle Einstellungen lassen sich vor der Messung anhand des Vorschaubildes der WLI Kamera durchführen. Die vorliegende Geometrie der Messposition lässt sich während der Auswertung der Messdaten berechnen, allem voran die lokal vorliegenden Winkel des Scanpfads im FOV aus den Korrelogrammfrequenzen (vgl. Abschnitt 3.1.2.4).

3.1.2 LSWLI Auswertalgorithmen

Im Gegensatz zum Vorgehen bei der weiter verbreiteten VSWLI, müssen die aufgenommenen Rohdaten einer LSWLI-Messung zusätzliche Vorbereitungsschritte durchlaufen bevor eine Auswertung der Korrelogramme durchgeführt werden kann. Diese haben hauptsächlich mit der messprinzipbedingten lateralen Bewegung der betrachteten Oberfläche zu tun. In Abbildung 3.3 ist der generelle schematische Ablaufplan der LSWLI-Auswertung dargestellt. In den nachfolgenden Abschnitten sind die einzelnen Bausteine der Auswertung im Detail beschrieben.

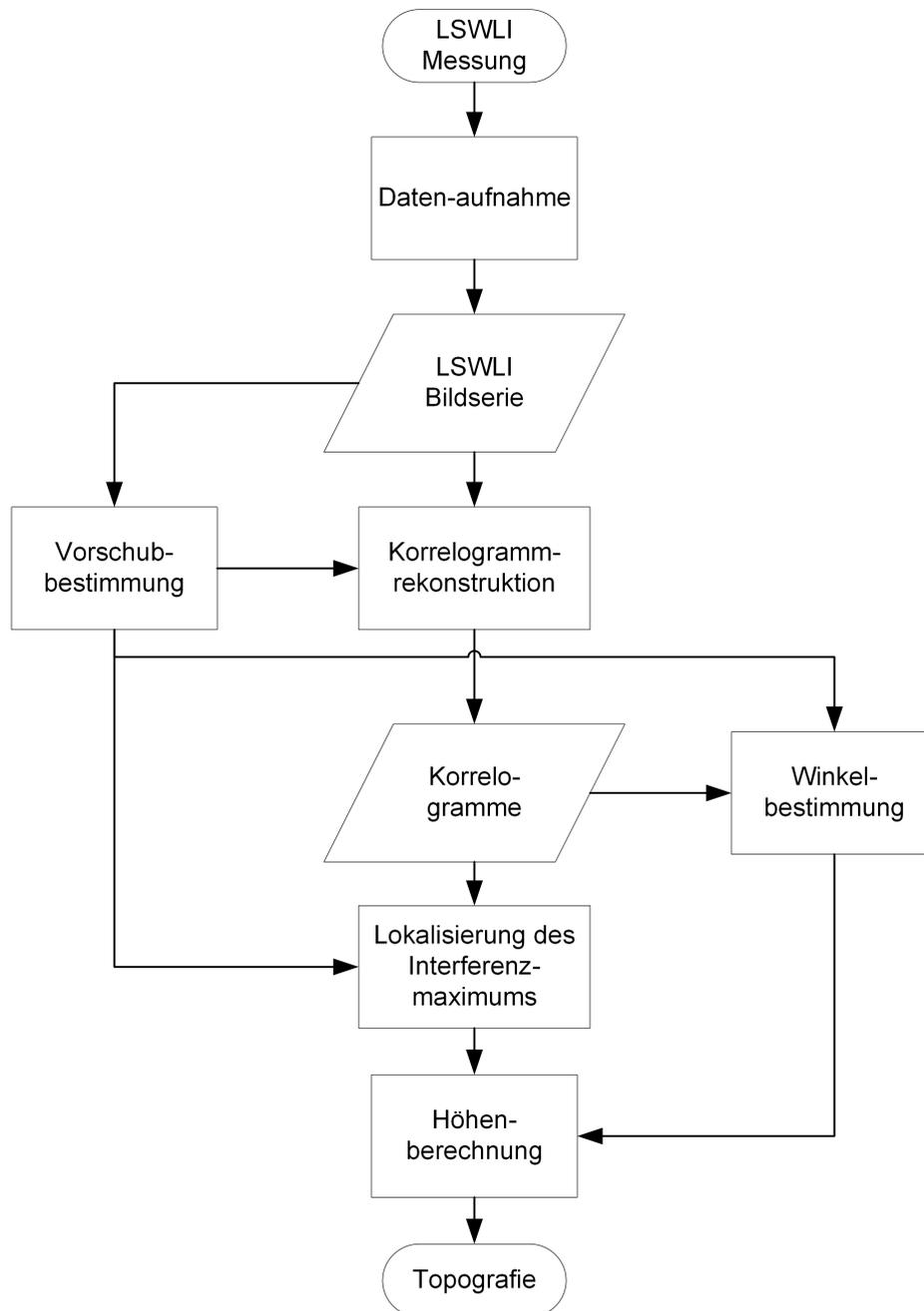


Abbildung 3.3: Übersicht über die Auswertepipeline einer LSWLI-Messung. Start/Ende abgerundet. Prozesse rechteckig, Daten Parallelogramm.

3.1.2.1 Datenaufnahmemodi

Das Bindeglied zwischen experimentellem Setup und der Datenauswertung ist die Datenaufnahme. Bei der Datenaufnahme geht es darum, die Korrelogramme der Messobjektoberfläche aufzunehmen. Die Aufnahme erfolgt mit einer Kamera, wodurch pro Bildaufnahme für jeden Messoberflächenpunkt im pixelgerasterten FOV der Kamera ein Stützpunkt seines Korrelogramms aufgezeichnet wird. Durch den lateralen Scan wird aufgrund des gekrümmten Scanpfads der vertikale Abstand zwischen Messobjekt und Objektiv variiert. Nachdem sich das Messobjekt weiterbewegt hat, wird erneut eine Aufnahme gemacht für die nächsten Stützpunkte. Beim lateralen Scan tritt stets eine neue Pixellinie neuer Messobjektoberflächenpunkte in das FOV ein, von denen ein erster Stützpunkt aufgenommen wird, und andere verlassen am gegenüberliegenden Ende das FOV, nachdem ihr letzter Stützpunkt aufgenommen wurde. So entsteht ein kontinuierlicher Strom an Korrelogrammen von Messoberflächenpunkten.

Im Folgenden werden die Aufnahmemodi nach Bewegungsart des Objektes unterschieden, welche entweder schrittweise oder kontinuierlich ist. Eng verbunden mit der Scanbewegung ist auch die für die Auswertung essentielle Bestimmung der lateralen Verschiebung zwischen den Einzelaufnahmen.

Bei schrittweiser Bewegung wird das Objekt nur zwischen den Aufnahmen bewegt. So werden Einflüsse der Bewegung, wie Bewegungsunschärfe oder Geschwindigkeitsschwankungen minimiert, allerdings steigt der Einfluss der Positionierungsunsicherheit. Bei prozessnahen Anwendungen ist eine schrittweise Bewegung in der Regel nicht möglich, weshalb dort kontinuierliche Scanbewegungen bevorzugt werden - so auch in den Experimenten dieser Arbeit. Hierbei sei erwähnt, dass sich der Begriff "kontinuierlich" in dieser Arbeit nur auf die Bewegung bezieht - die Bilder sind immer Momentaufnahmen aus einer Kamera, welche mit einer definierten Rate aufgenommen werden und das Geschehen über die Dauer einer Belichtungszeit festhalten.

Bei Messungen an Objekten mit präzise einstellbaren Rotationsgeräten, sind Messungen ohne ergänzende Messdaten der Verschiebung möglich. Da Verschiebungen um ganze Pixel die geringsten Diskretisierungsabweichungen zur Messunsicherheit beitragen, werden bei diesem Aufnahmemodus die Bildaufnahme rate der Kamera und die Drehzahl der Messobjektrotation so abgestimmt, dass zwischen aufeinander folgenden Bildern eine ganzzahlige Verschiebung in Pixeln eintritt. Dieser Aufnahmemodus ist in der technischen Ausführung simpel, allerdings wirkt sich jegliche Abweichung von der Sollbewegung ohne Ausgleichsmöglichkeit auf die Korrelogramme und damit die Höhenunsicherheit aus. Ist der Antrieb nicht gleichmäßig oder wird die Kamera nicht in einem festen Takt ausgelöst (z. B. durch CPU-lastabhängige Laufzeiten einer in Schleife laufenden Softwaretriggerung), so müssen die Positionsdaten aus der Antriebseinheit (über sog. "Positions- oder Rotationsencoder") oder durch eine externe Positionsmessung bestimmt werden.

Im Fall der translatorischen LSWLI können die Schritte der Scanachse direkt verwendet werden. Sie müssen lediglich entsprechend des Abbildungsmaßstabs des WLIs in Pixel umgerechnet werden. Der Positionsgeber des verwendeten PI-611L Rotationstisches [60] gibt relative und absolute Winkel aus. Diese können nur dann zur Verfolgung der Oberflächenverschiebung verwendet werden, wenn der Radius des Scanpfads bekannt ist. Der Scanpfa-

dradius stimmt bei zylindrischen Messobjekten mit dem Messobjektradius überein, welcher durch eine aufwendige Radiusmessung mit einem Koordinatenmessgerät bestimmt werden müsste.

Die flexibelste Variante der Verschiebungsmessung ist daher die direkte, optische Messung mit Hilfe von Bildkorrelationstechniken, da sie unabhängig vom Messobjektradius funktioniert. In dieser Arbeit wurde ein digitales Specklemesssystem in den WLI-Aufbau integriert. Die Integration der Verschiebungsmessung verringert bzw. eliminiert den Einfluss der Synchronizität zwischen WLI-Daten und Verschiebungsdaten. Die Funktionsweise und Eigenschaften dieses DSC-Systems werden in Abschnitt 3.2 im Detail beschrieben.

Entkoppelter Modus Der entkoppelte Aufnahmemodus wird speziell für LSWLI-Messungen an schnell rotierenden Objekten verwendet. Bei den zuvor beschriebenen Aufnahmemodi lagen die Verschiebungen zwischen den Einzelbildern in der Größenordnung von $0,5\ \mu\text{m}$ - $2,5\ \mu\text{m}$, was bei den üblicherweise eingestellten Scanfadkippwinkeln von 1° - 2° eine Abtastung der Korrelogramme mit 20 Stützpunkten pro Periode der Interferenzstreifen erlaubt. Da die verwendete Kamera bei voller Auflösung mit maximal 165 Hz aufnehmen kann, ist die Oberflächenverschiebungsgeschwindigkeit, bei der Topografiemessungen möglich sind, in diesen Modi auf ca. $0,46\ \text{mms}^{-1}$ beschränkt. Dies ist für In-Prozess-Messungen in den meisten technischen Anwendungsszenarien zu langsam. Die Oberflächengeschwindigkeiten in den Anwendungen aus Abschnitt 1.1 liegen meist oberhalb von $50\ \text{mms}^{-1}$, also mehr als 100x schneller als das bisherige LSWLI Geschwindigkeitslimit.

In dieser Arbeit konnte diese Limitierung der rotatorischen LSWLI durch Entkoppeln der Scanbewegung von der Oberflächenbewegung überwunden werden. Dies wurde durch ein integriertes Verschiebungsmesssystem ermöglicht, wodurch die globalen Aufnahmepositionen der Einzelbilder zueinander bekannt sind. Der Ansatz ist, die Oberfläche nicht während der Scanbewegung innerhalb einer einzigen Umdrehung aufzunehmen, sondern die Aufnahme der Oberfläche auf mehrere Umdrehungen des Messobjektes aufzuteilen. Erreicht wird dies mit einer Positionstriggerung, welche einmal pro Umdrehung auslöst. Das Funktionsschema des entkoppelten Modus ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

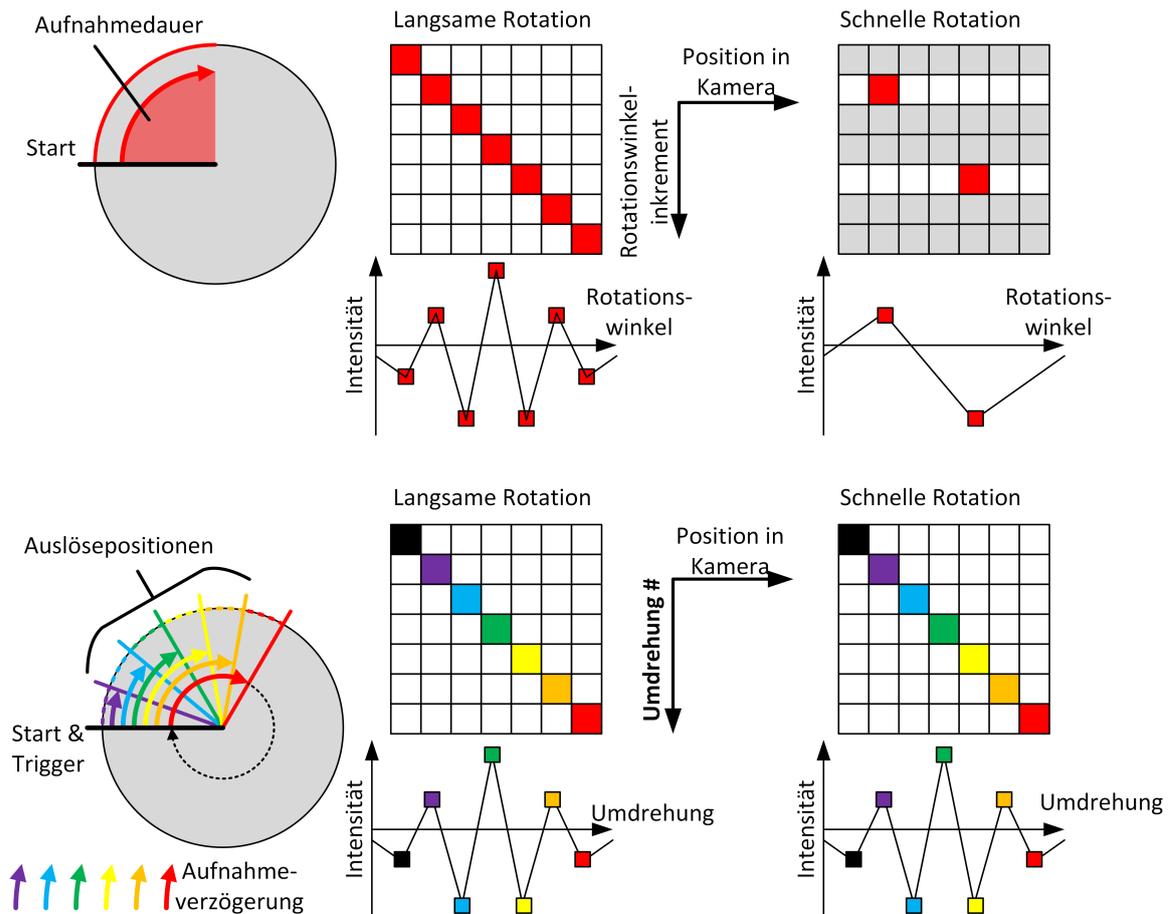


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des kontinuierlichen und des entkoppelten Scanmodus. Oben: Kontinuierlicher Scanmodus. Links: Die Kamera nimmt ab dem Aufnahmestart (schwarze Linie) kontinuierlich mit einer festen Bildrate auf. Mitte: Bei langsamer Rotation ändert der Oberflächenpunkt (rote Quadrate) von Bild # zu Bild # seine Position in der Kamera nur gering und es kann bei jedem Rotationswinkelinkrement eine Aufnahme gemacht werden. Der Auftrag der Signalintensität über den Rotationswinkel ergibt ein ausreichend abgetastetes Korrelogramm. Rechts: Bei schneller Rotation ändert der Oberflächenpunkt (rote Quadrate) von Bild # zu Bild # seine Position in der Kamera stärker. Aufgrund der höheren Geschwindigkeit werden nicht bei allen Rotationswinkelinkrementen Bilder aufgenommen, die Inkrementszeilen werden übersprungen. Dadurch entsteht beim Auftrag der Intensität über den Rotationswinkel ein unterabgetastetes Korrelogramm. Unten: Entkoppelter Scanmodus. Links: Die Kamera nimmt ab dem Aufnahmestart nach jeder Umdrehung mit einer inkrementell ansteigenden Verzögerung auf. Entsprechend der Dauer des Verzögerungszeitinkrements ändern die Oberflächenpunkte ihre Position in der Kamera mit jeder Umdrehung um die gleiche Strecke. Mitte und Rechts: Da die Schrittweite nur von der Dauer des Verzögerungsinkrements abhängt, kann sowohl bei langsamer als auch bei schneller Rotation ein ausreichend abgetastetes Korrelogramm aufgenommen werden. Ähnliche Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Fischer et al. 2022 [61].

Beim kontinuierlichen Scan werden in einem Winkelbereich mit kontinuierlicher Aufnahmezeitdauer Bilder aufgenommen. Bei langsamer Rotationsgeschwindigkeit wird eine höhere Korrelogrammabtastung erreicht, als bei schnelleren Rotationsgeschwindigkeiten. Bei diesem entkoppelten Scan wird das Korrelogramm der Oberfläche über viele Umdrehungen aufgenommen. Daher ist die Abtastung des Korrelogramms unabhängig von der Bildrate der Kamera, was das Messen bei hohen Oberflächengeschwindigkeiten ermöglicht. Ein

zusätzlicher Positionstrigger gibt pro Umdrehung des Objektes ein Signal an einen Mikrocontroller weiter. Als Trigger dient eine Lichtschranke bestehend aus einer Photodiode und einer schwarzen Markierung auf dem rotierenden Objekt.

Die Aufgabe des Mikrocontrollers besteht darin, bei jedem Eingang des Positionstriggersignals die Kamera und ggf. Beleuchtung des WLI auszulösen. Um damit eine Scanbewegung zu realisieren, wird die Auslösung der WLI-Geräte mit jeder Umdrehung um ein Zeitinkrement länger verzögert. Durch die zunehmende Verzögerung der Auslösung verschiebt sich die aufgenommene Oberfläche immer weiter von der Triggerposition weg. Solange die Drehzahl des Objektes vom Zeitpunkt des Triggersignals und dem Bildaufnahmezeitpunkt konstant bleibt, kann bei langsamen und schnellen Oberflächengeschwindigkeiten eine gleichmäßige Verschiebung realisiert werden.

3.1.2.2 Korrelogrammrekonstruktion durch Bildstabilisierung

Mit Hilfe der Verschiebungsdaten müssen aus den Rohdaten einer LSWLI-Messung, bestehend aus einem Bildstapel, zunächst die Korrelogramme der Oberflächenpunkte rekonstruiert werden. Für eine erfolgreiche Rekonstruktion sind die Verschiebungsdaten essentiell, da die Oberflächenpunkte lateral durch den Bildstapel wandern (also z. B. von links ins Bild wandern und viele Einzelbilder später nach rechts aus dem Bild herauswandern) und somit in jedem Bild ein anderer Pixelindex ausgelesen werden muss, um die Intensitätswerte eines Oberflächenpunktes an jeder Stützstelle seiner lateralen Bewegung durchs FOV zu erhalten. Die Korrelogrammrekonstruktion ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt.

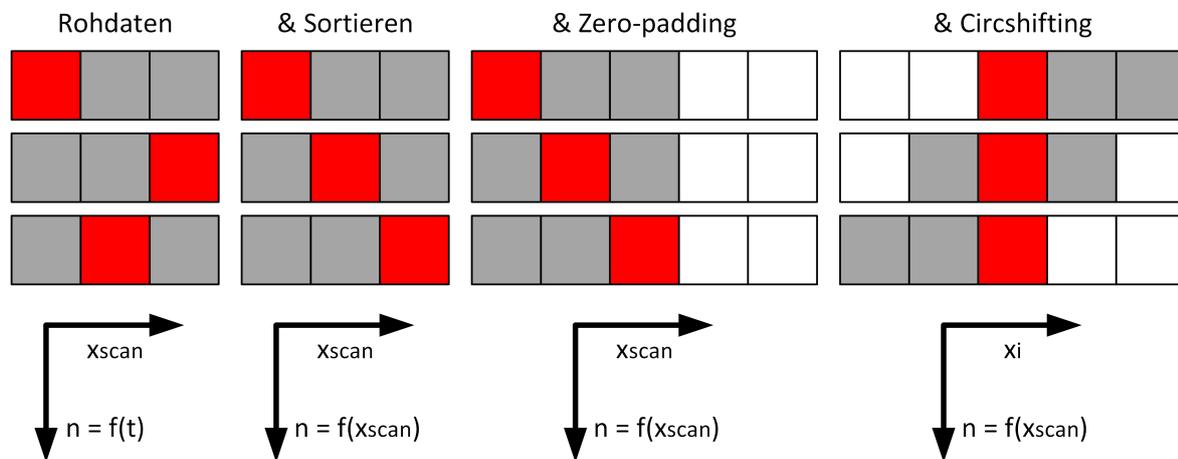


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der Korrelogrammrekonstruktion aus einer lateral gescannten Bildserie. Rote Kästchen stehen für die Stützpunkte eines Korrelogramms für einen Oberflächenpunkt. Graue Kästchen sind Stützpunkte von Korrelogrammen anderer Oberflächenpunkte. Weiße Kästchen sind Füllinträge und enthalten keine Oberflächeninformation. Die Achsenbeschriftungen zeigen die durchgeführten Transformationen an. Durch die Sortierung wird die chronologische Reihenfolge $n = f(t)$ in die monoton ortsabhängige Reihenfolge $n = f(x_{scan})$ geändert. x_{scan} bezeichnet die x -Richtung im lateralen Scankoordinatensystem, welche am Ende der Rekonstruktion zu x_i transformiert ist, wobei i den Oberflächenpunkt bezeichnet.

Prinzipiell gibt es zwei Wege, die Korrelogramme auszulesen. Eine ist, jeden Pixel im Bildstapel einzeln abzufragen und in eine Korrelogrammmatrix zu schreiben. Dies ist, zu-

mindest in der verwendeten Matlabumgebung, mit sehr vielen Einzelbildaufrufen und Kopieroperationen verbunden, was einen erheblich größeren Rechenaufwand bedeutet im Vergleich zur anderen, favorisierten Methode. Diese ist, den gesamten Bildstapel in eine $X \times Y \times n$ große Matrix zu schreiben und die Bilder entsprechend ihrer Gesamtverschiebung zum ersten Bild des Stapels so zu verschieben, dass alle Intensitätswerte der Oberflächenpunkte $I(x_i|y_i)$ über alle n Bilder auch tatsächlich an der gleichen Arrayposition $(x_i|y_i)$ entlang der n -Dimension zu finden sind. Dies lässt sich in Matlab einfacher adressieren und ist mit weniger Kopieroperationen verbunden. Zudem können die Positionen $(x_i|y_i)$ für den Rest der Auswertung als Basis für das Koordinatensystem der Oberflächentopografie weiterverwendet werden. Die Einzelbilder müssen nur zu Beginn einmal geladen werden. Die Rohdaten werden chronologisch in den Bildstapel geladen. Wandern die Oberflächenpunkte nicht monoton in eine Richtung, so muss der Bildstapel vor weiteren Bearbeitungsschritten umsortiert werden, sodass die Gesamtverschiebung monoton in Scanrichtung ansteigt. Um die Bilder überlagerungsfrei verschieben zu können, wird der Bildstapel zunächst um die maximale Gesamtverschiebung, also der Verschiebung des letzten Bildes zum ersten Bild, mit Nullen erweitert („Zero-Padding“). Anschließend kann jedes Bild des Bildstapels entsprechend seiner Gesamtverschiebung gegenüber dem ersten Bild auf ganze Pixel gerundet zirkulär in x und y verschoben werden („Circshift“). Da Bilder im Auswertearray nur um ganze Pixel, also ganzzahlige Arrayplätze verschoben werden können, kommen an dieser Stelle der Datenverarbeitung zufällige Abweichungen durch die Diskretheit der Daten in das Messsystem. Die Größenordnung der Abweichung liegt im Bereich der Rundungsoperation, also $\pm 0,5$ Pixel. Sofern es sich um eine Messung mit kontrollierter Bewegung handelt, ist daher eine Verschiebung anzustreben, der einer möglichst ganzzahligen Pixelanzahl entspricht.

Sortierung Besonders bei Anwendungen im industriellen Umfeld, wo die Scanantriebe sich nicht so gleichmäßig bewegen wie im Labor, besteht eine erhöhte Chance, dass die Oberfläche in der Bildserie nicht monoton in eine Richtung wandert und sie sich so z. B. aufgrund von Bewegungsschwankungen vor- und zurück zu bewegen scheint. Dieser Effekt kann insbesondere im entkoppelten Aufnahmemodus auftreten, da die Verschiebung zwar zeitlich konstant ist, die zugrundeliegende Drehbewegung allerdings bei jedem Umlauf von zufälligen Schwankungen beeinflusst wird.

Die Monotonie der Scanbewegung kann durch nachträgliches Sortieren des Bildstapels hergestellt werden. Mit Hilfe der berechneten Verschiebungen zwischen den Bildern lassen sich die Bilder so sortieren, dass die Gesamtverschiebung über den neu sortierten Stapel monoton ansteigt. Der Sortierschritt ist in Abbildung 3.5 enthalten. Er erfolgt nach Berechnung der Verschiebungen aus den Rohdaten. Durch die Sortierung wird die Chronologie der Bildserie, also $n = f(t)$ aufgelöst und durch eine ortsabhängige Reihenfolge ersetzt $n = f(x_{\text{scan}})$. Das Prinzip der Sortierung lässt sich auch bei der VSWLI anwenden. Voraussetzungen hierbei sind eine ausreichend glatte Oberfläche und eine leichte Neigung dieser. Mittels DIC kann dann gemessen werden, wie sich ein zusammenhängendes Interferenzstreifenmuster aufgrund der Neigung der Oberfläche während des z -Scans durch das FOV bewegt. Die Bewegung sollte monoton sein, wenn sie nicht durch Vibrationen oder andere

ungewollte Bewegungen in Z-Richtung gestört wird. Die Monotonie kann auch hier durch Sortierung von $n = f(t)$ zu $n = f(z_{\text{scan}})$ hergestellt werden. Die Anwendung und Eignung der Sortierung zur Messung auf schnell rotierenden Messobjekten wird in Abschnitt 5.2 vorgestellt.

3.1.2.3 Korrelogrammanalyse

In dieser Arbeit wurden Methoden implementiert, welche auf der Auswertung der Hüllkurve der Korrelogramme basieren. Eine Auswertung auf Basis der Hüllkurve erlaubt auch bei stärker verrauschten Signalen (z. B. in Abschnitt 5.2), bei denen die Phaseninformationen gestört sind, eine plausible Abschätzung der Lage des Interferenzmaximums, da sie die Phaseninformationen nicht benötigt. Ein Nachteil der hüllkurvenbasierten Auswertung ist, dass bei guten Signalen mit sauberer Phaseninformation eben genau diese nicht mitgenutzt wird. Ein Ablaufplan zur Übersicht über die implementierten Auswertemethoden ist in Abbildung 3.6 gegeben.

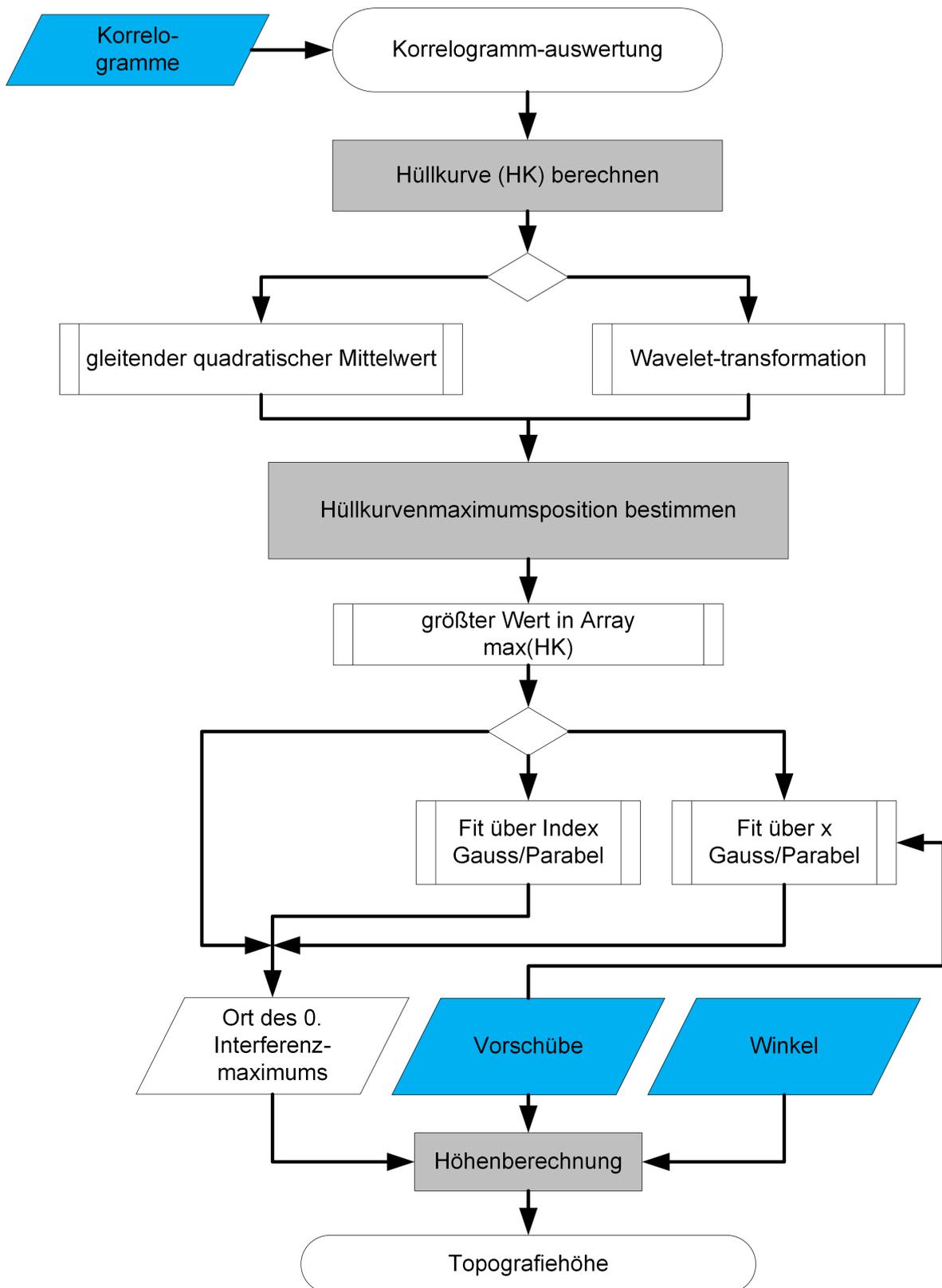


Abbildung 3.6: Übersicht über die Auswertemethoden zur Correlogrammanalyse. Blau: Dateneingabe. Grau: Hauptprozesse. Pfeilrichtung gibt Datenflussrichtung an. Die Raute markiert Verzweigungen zu mehreren Alternativmethoden.

Der dargestellte Ablaufplan ist von oben nach unten zu lesen. Blau gefärbte Parallelogramme stellen einzugebende Daten dar. Graue Kästchen stehen für Hauptprozesse. Die kleinen weißen Kästchen sind die Subprozesse. Sind die Kästchen auf gleicher Hö-

he dargestellt, stellen sie Alternativen zueinander dar. Zur Hüllkurvenanalyse gehören die zwei Hauptprozesse Hüllkurvenberechnung und Hüllkurvenmaximumsbestimmung. Ebenfalls in Abbildung 3.6 inkludiert ist die Höhenberechnung. Diese wird gesondert in Abschnitt 3.1.2.5 beschrieben. Eng mit der Höhenberechnung verbunden ist auch die Bestimmung der Winkel, bzw. die Bestimmung der Scanpfadform, welche ebenfalls gesondert in Abschnitt 3.1.2.4 beschrieben wird.

Hüllkurvenberechnung Die Berechnung der Hüllkurve wurde in dieser Arbeit mit zwei Methoden bestimmt. Die zuerst entwickelte Methode basiert auf der Berechnung des gleitenden quadratischen Mittelwertes ("moving rms"). Diese Methode arbeitet schnell und ist parallelisierbar, allerdings ist Vorwissen nötig, um die optimale Fensterweite des moving-rms Algorithmus einzustellen. Eine ungeeignete Fensterweite führt zu Abweichungen in den nachfolgenden Analysen. Diese Methode stellt die erste Evolutionsstufe der LSWLI Auswertung dar. Ergebnisse, welche mit dieser Methode erzielt wurden werden in Abschnitt 4.2.1 kurz vorgestellt.

Die zweite Evolutionsstufe der Hüllkurvenberechnung, welche hauptsächlich bei der Auswertung der Experimente dieser Arbeit eingesetzt wurde, basiert auf der kontinuierlichen Wavelettransformation (CWT). Die CWT ist ein numerisches Werkzeug zur Zeit-Frequenz-Analyse. Im Gegensatz zur Fourier-Transformation liefert sie nicht nur die Frequenzanteile, die im Signal vorhanden sind, sondern auch die Orte, an denen die Frequenzen auftreten. Begünstigend für eine Hüllkurvenberechnung mittels CWT ist, dass die Interferenzen stärker ausgeprägt sind als alle anderen Signalanteile und der Frequenzbereich der Interferenzen auf ein enges, zusammenhängendes Spektrum (je nach Winkeln des Scanpfads) begrenzt ist.

Zur Ermittlung der Hüllkurve wird die CWT eines Korrelogramms gebildet. Hieraus erhält man die komplexwertigen Wavelet-Koeffizienten wt_{CWT} an jedem Stützpunkt des Korrelogramms, welche im Betrag der Signalamplitude entsprechen. Dazu erhält man die Frequenzwerte f_{CWT} in der Einheit 1/Stützpunkt, die zu den jeweiligen Koeffizienten gehören. Die CWT-Anteile, welche zum höchsten Produkt $|wt_{CWT}| \cdot f_{CWT}$ gehören, bilden die Hüllkurve. Die verwendete Implementation der Wavelettransformation in Matlab basiert auf den Generalized Morse Wavelets von Lilly und Olhede [62], bei der die sog. generalisierte Morse Wavelets der allgemeinen Form im Fourier Raum

$$\Psi_{P,\gamma}(\omega) = U(\omega) \cdot a_{P,\gamma} \cdot \omega^{\frac{P^2}{\gamma}} \cdot e^{-\omega^\gamma} \quad (3.1)$$

verwendet werden. Hierbei ist ω die Frequenz, $U(\omega)$ das Signalelement, $a_{P,\gamma}$ ein Normalisierungsfaktor, P^2 das Zeit-Bandbreite Produkt und γ ein Symmetriefaktor. Für die Auswertung werden die Faktoren γ, P angepasst, um die Wavelets auf die Asymmetrie von Korrelogrammen gekrümmter Flächen anzupassen. Ebenfalls wird die Frequenzauflösung in "Voices per Octave", also in Frequenzschritten pro Verdoppelung der Signalfrequenz, heuristisch angepasst.

In Abbildung 3.7 ist das dominante Morse Wavelet (rot) eines idealen Korrelogramms (schwarz) gezeigt. Die Einhüllende berechnet sich aus den lokalen Maxima des Produkts

aus Waveletkoeffizienten und Frequenz, welche der Interferenz zugeordnet können. Die Morse Wavelets lassen sich in ihrer Gestalt, Einhüllenden und Schwingungsverhalten durch geeignete Parameterwahl gut auf die Korrelogramme anpassen, weshalb sie als geeignetes Wavelet für die Auswertung gewählt wurden.

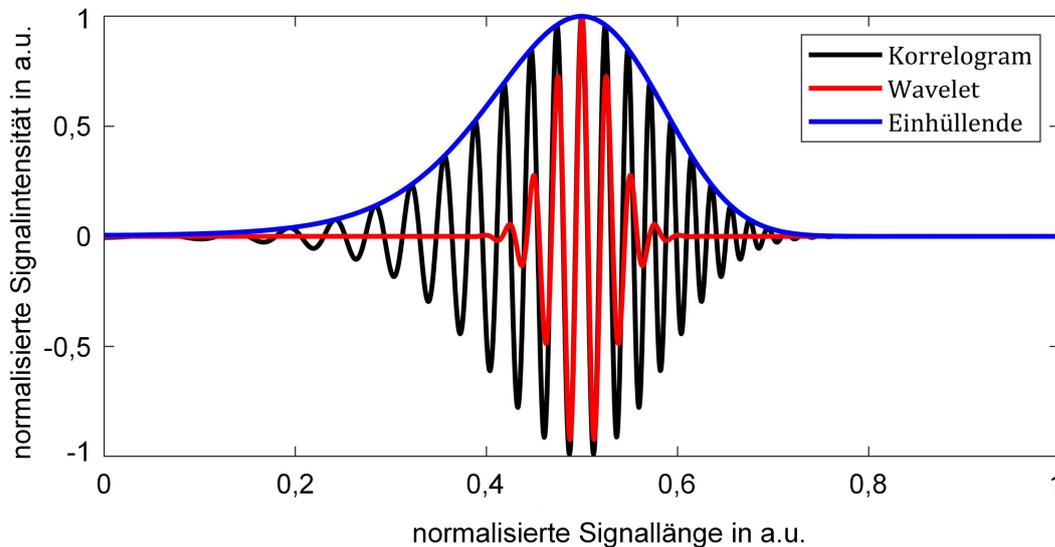


Abbildung 3.7: Ideales Korrelogrammsignal, Beispielwavelet und Einhüllende.

Bei nicht-idealen, rauschbehafteten Signalen ist die Auswahl eines passenden Frequenzbereichs eine nicht-triviale Aufgabe. Aktuell wird dabei das im Bezug auf Speicherbedarf und Auflösung optimale Frequenzspektrum heuristisch manuell ausgewählt.

Interferenzmaximum Anhand der zuvor berechneten Hüllkurven wird die Position des nullten Maximums des Korrelogramms bestimmt.

Eine erste Annäherung zur Eingrenzung des Auswertebereichs wird durch Auslesen des höchstwertigen Eintrags im Korrelogrammsignal erreicht. Dies ist das Hüllkurvenmaximum auf Pixelindexbasis, welches für die Untersuchungen der physischen Auflösungen bei Variation der Messposition in Abschnitt 4.2.1 verwendet wurde. Mit den 30-60 Stützpunkten links und rechts dieser ersten Maximumsabschätzung wird ein Fit ausgeführt, um die Maximalsposition genauer zu bestimmen. Falls die Abtastrate des Korrelogramms hinreichend konstant ist, reicht es, die Intensitäten über den Stützpunktindex zu fitten. Da es jedoch keinen Garantien für eine gleichmäßige Abtastung gibt und die lateralen Aufnahmepositionen schon aus der Korrelogrammrekonstruktion bekannt sind, werden die Intensitäten über die laterale x -Position gefittet. Hierfür wurden sowohl Gaußsche als auch Parabelansätze verfolgt, wobei sich der Parabelfit aufgrund der deutlich kürzeren Berechnungszeit bei fast gleichem Topografieresultat durchsetzte.

Sowohl Gauß- als auch Parabelapproximation verschätzen die wahre Position des Maximums in Richtung des Scheitelpunktes. Begründet ist dies in der Verzerrung des dargestellten Korrelogramms. Da die Korrelogramme zu einer gekrümmten Oberfläche gehören, sind sie entsprechend der Oberflächenkrümmung in Richtung des Scheitelpunktes gestreckt. Je

näher am Scheitelpunkt gemessen wird, desto geringer ist die Höhenänderung im FOV, also desto geringer ist auch die Korrelogrammfrequenz.

Die qualitativen und quantitativen Unterschiede im Topografieergebnis im Hinblick auf die Oberflächenkrümmung wird simulativ und experimentell im Abschnitt 4 untersucht. Insbesondere bei größeren Scanpfadwinkeln macht sich die Verzerrung der Hüllkurven durch stärkere Höhenänderung bemerkbar. Durch passende Wahl der Fitgrenzen zur Maximumbestimmung kann der Einfluss reduziert werden.

3.1.2.4 Winkelbestimmung

Die Winkelbestimmung ist unabhängig von der Korrelogrammauswertung durchführbar. Die Winkelbestimmung basiert auf dem Ansatz von Munteanu [32], welcher sowohl für translatorische Scanpfade mit konstantem Winkel als auch für rotatorische Scanpfade mit ansteigenden Winkeln gültig ist. Die Implementation der Methode durchlief zwei Evolutionsstufen. In der ersten Stufe werden die Winkel anhand der bereits rekonstruierten Korrelogramme bestimmt. In der zweiten Evolutionsstufe werden die Winkel direkt aus den Interferenzstreifen der Rohbilder berechnet, was eine Notwendigkeit ist bei stark gestörten Korrelogrammen, aus denen keine Frequenzen mehr extrahierbar sind. In Abbildung 3.8 ist der Ablaufplan der Winkelbestimmung dargestellt.

Die beiden Methoden unterscheiden sich hauptsächlich durch die sekundären Operationen, mit denen die berechneten Winkel den Kamerapixeln zugeordnet werden. Dies ist bei der auf den Rohdaten fußenden Methode trivial, da gar keine Transformation notwendig ist. Bei der Methode basierend auf den Korrelogrammen muss die Verschiebungskompensation zurückgerechnet werden, um die Winkel an den Scankoordinaten auf die Kamerapixelkoordinaten zurückzuführen.

Die Hauptoperationen bei beiden Methoden sind gleich. Es wird zunächst ein mittleres Korrelogramm quer zur Scanrichtung berechnet. Das mittlere Korrelogramm der Messung ist die beste Approximation des Interferenzmusters eines idealen Zylinders auf dem Scanpfad. Am mittleren Korrelogramm wird eine Wavelettransformation durchgeführt. Das Ergebnis der Wavelettransformation ist eine pixelweise aufgelöste Karte der Frequenzanteile des Interferenzmusters (ein sog. Scalogram). Das Scalogram eines idealen Korrelogramms (vgl. Abbildung 3.7) ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

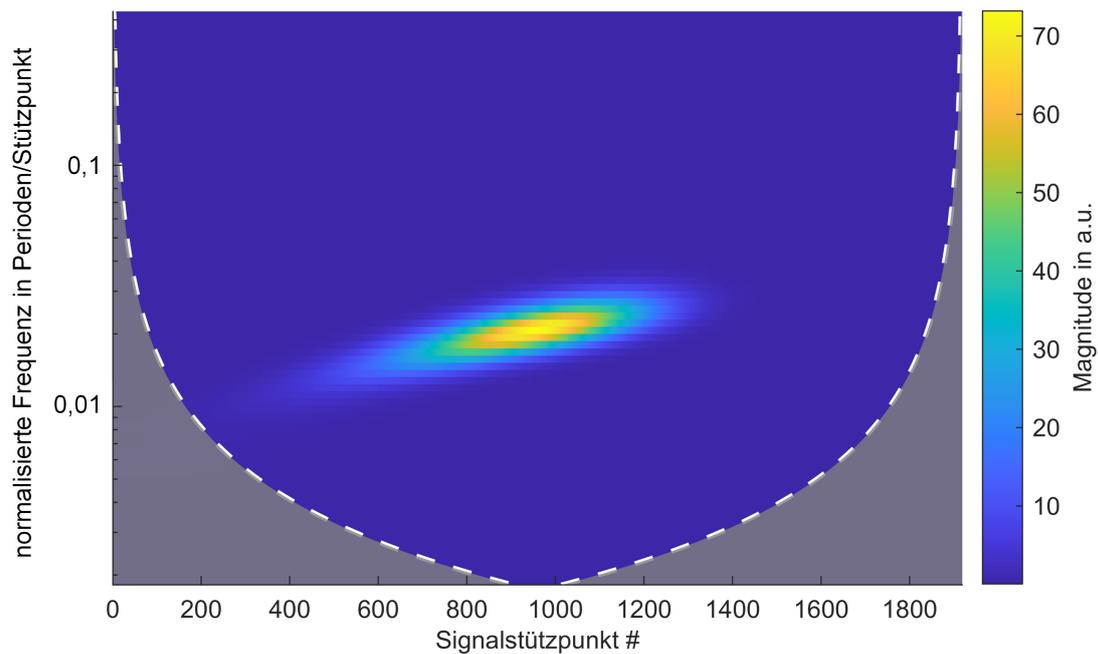


Abbildung 3.9: Scalogram des idealen Korrelogramms aus Abbildung 3.7. Das Signal besteht aus 2000 Stützpunkten. Die Gewichtungen, Magnituden, der Frequenzanteile sind farblich dargestellt. An der Signalposition des Korrelogrammmaximums bei Signalstützpunkt # 1000 ist die Frequenz mit der stärksten Magnitude vorzufinden.

Das Signal besteht aus 2000 Stützpunkten. Die Gewichtungen der Frequenzanteile (Magnituden) sind farblich dargestellt. An der Signalposition des Korrelogrammmaximums bei Signalstützpunkt # 1000 ist die Frequenz mit der stärksten Magnitude vorzufinden. Das Farbmuster gibt eine von links nach rechts ansteigende Frequenz an. Dies steht im direkten Zusammenhang mit der Krümmung der betrachteten Oberfläche, bzw. des Scanpfads bei zylindrischen Bauteilen. Durch die lokalen Magnitudenmaxima wird eine Gerade gelegt, an der eine lineare Regression durchgeführt wird. Da die Winkel, bei denen gemessen wird, unter 8° liegen, ist unter Annahme der Validität der Kleinwinkelnäherung $\sin(x) = x$ die lineare Regression ausreichend. Die Koeffizienten der Regression werden mittels Munteanus Gleichung in lokale Winkel umgerechnet. Hieraus werden für die Höhenberechnung die lokalen Winkeln an den Hüllkurvenmaximalpositionen berechnet. Daneben können mit den Winkeln auch weitere, zusätzliche geometrische Messsysteminformationen abgeschätzt werden, wie z. B. dem Objektradius und dem Abstand der Messposition vom Scheitelpunkt. Dies wird im Abschnitt 4.2.2 gezeigt.

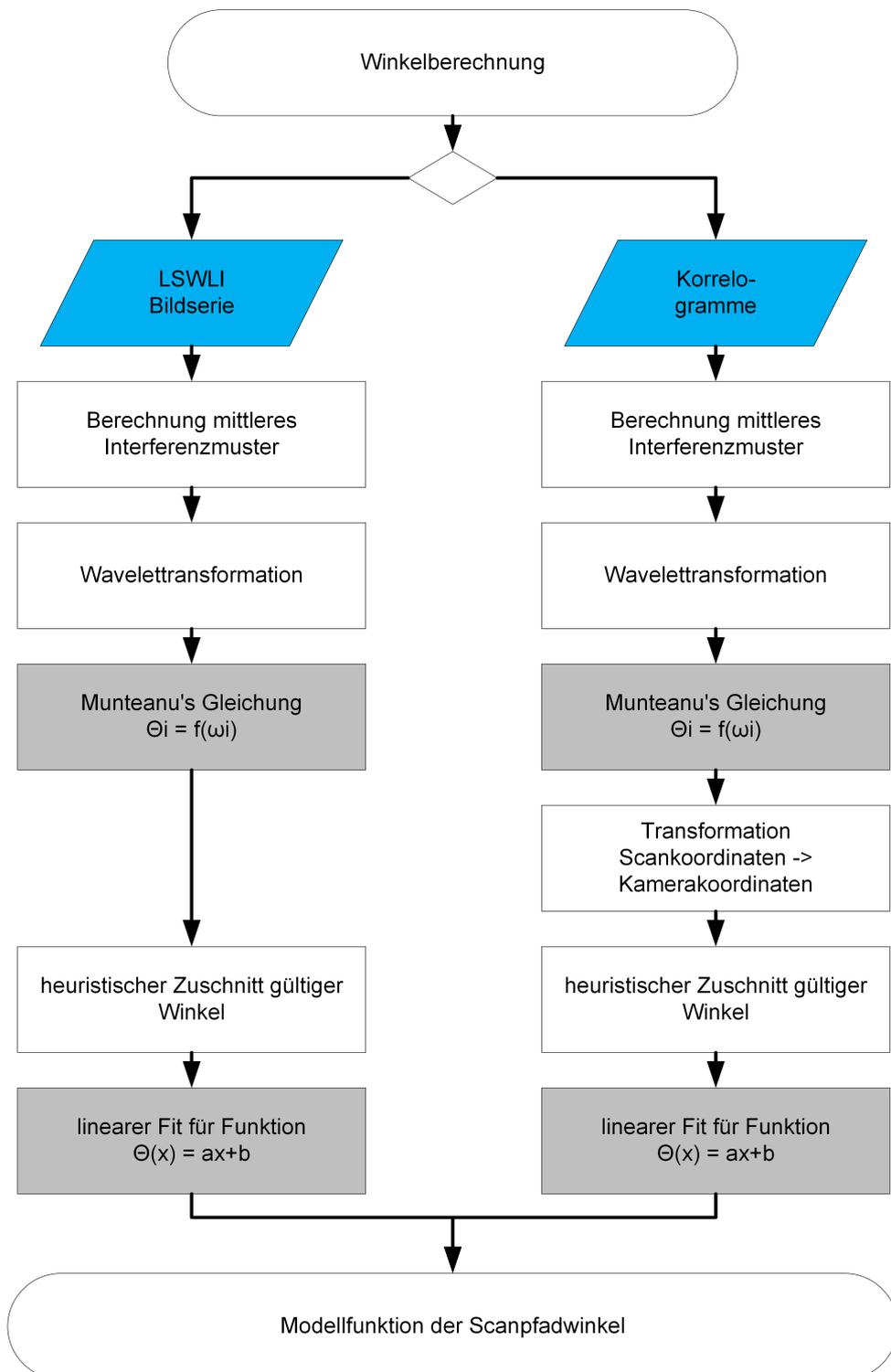


Abbildung 3.8: Übersicht über die Auswertemethoden zur Winkelbestimmung. Blau: Dateneingabe. Grau: Hauptprozesse. Pfeilrichtung gibt Datenflussrichtung an.

3.1.2.5 Höhenberechnung

Für die Höhenberechnung werden, wie in Abbildung 3.6 gezeigt, die Verschiebungswerte, die Winkel und die Orte der Korrelogrammmaxima benötigt. Zunächst werden mit Hilfe der Verschiebungen und den bekannten Größen der Kamera die Orte der Maxima von Scankoordinaten umgerechnet in Kamerakoordinaten.

Die Höhe jedes aufgenommenen Punktes erfolgt anschließend mit den FOV-Koordinaten und den unter dem FOV vorliegenden lokalen Winkeln des Scanpfads. Die Gleichung für die Höhe wurde beschrieben in Abschnitt 2.1.3 mit Gleichung 2.10. Hierbei wird ein Punkt mit x_1, Θ_1 als konstanter Referenzpunkt, befindlich in der Mitte des WLI-FOVs, festgelegt. Die berechneten Orte der Interferenzmaxima und die Frequenz an diesem Ort werden als x_2 und Θ_2 übergeben.

3.2 Integration digitaler Speckle-Korrelation

Für eine erfolgreiche LSWLI-Messung ist es unabdingbar zu wissen, wie weit die betrachtete Oberfläche zwischen zwei Bildaufnahmen verschoben wurde. Ohne exakte Verschiebungsdaten können die zur Topografieberechnung benötigten Korrelogramme nicht korrekt rekonstruiert werden, da Signale verschiedener Oberflächenpunkte vermischt werden. In Abschnitt 2.2 wurden die Vorzüge eines integrierten DSC-Verschiebungsmesssystems erörtert. In diesem Abschnitt folgt nun die praktische Umsetzung dieses Lösungsansatzes.

Da die Interferenzstreifen das Ergebnis der DSC Messung beeinflussen und umgekehrt die Speckle die WLI Messung beeinflussen, wurden die beiden Messungen auf zwei getrennte Bereiche der Kamera ("regions of interest ROIs) durch den Einbau von optischen Filtern in das Messsystem aufgeteilt. Deckt man einen Teil des Kamerasensors mit einem weißlichtblockenden optischen Filter ab, so erscheinen keine Interferenzstreifen mehr in diesem Bereich der Kamera. Tatsächlich bleibt dieser Bereich nun komplett dunkel. Er kann nun also eine externe Lichtquelle erfassen, welche nicht durch das Mirau-Objektiv zur Interferenz gebracht wird. Durch die Beleuchtung der Messobjektoberfläche von außerhalb ist die Erzeugung der Speckle ohne Interferenzen durch das Mirau-Objektiv möglich. Um das Signal des Weißlichtbereichs dabei nicht mit dem Licht des Speckle-Lasers zu überstrahlen, wird weiterhin ein optischer Filter vor den WLI Bereich gesetzt, welcher wiederum das Speckle-Licht nicht hindurchlässt.

Das Resultat der Integration des DSC-Verschiebungsmesssystems in den LSWLI-Aufbau ist die Trennung der Kamera in zwei Regions of Interest (ROIs), eine große Region für die Weißlichtinterferometrie und eine kleine Region für die digitale Specklekorrelation. In Abbildung 3.10 ist eine Beispielaufnahme aus der Kamera des Demonstrators mit den zwei ROIs dargestellt.

Das Rohbild zeigt einen Scanschritt einer LSWLI-Messung auf einem zylindrischen Messobjekt. Die Scanrichtung des Messobjekts durch das Bild ist senkrecht von unten nach oben. Das Messobjekt ist eben genug, dass die Interferenzstreifen über die gesamte Bildbreite als relativ ununterbrochene gerade Linien erscheinen. Die Rotationsachse des Messobjektes wurde bei dieser Messung so ausgerichtet, dass die Interferenzstreifen horizontal im Bild liegen. In der Aufnahme sind die ROI-Größen so gewählt, dass ein Großteil der

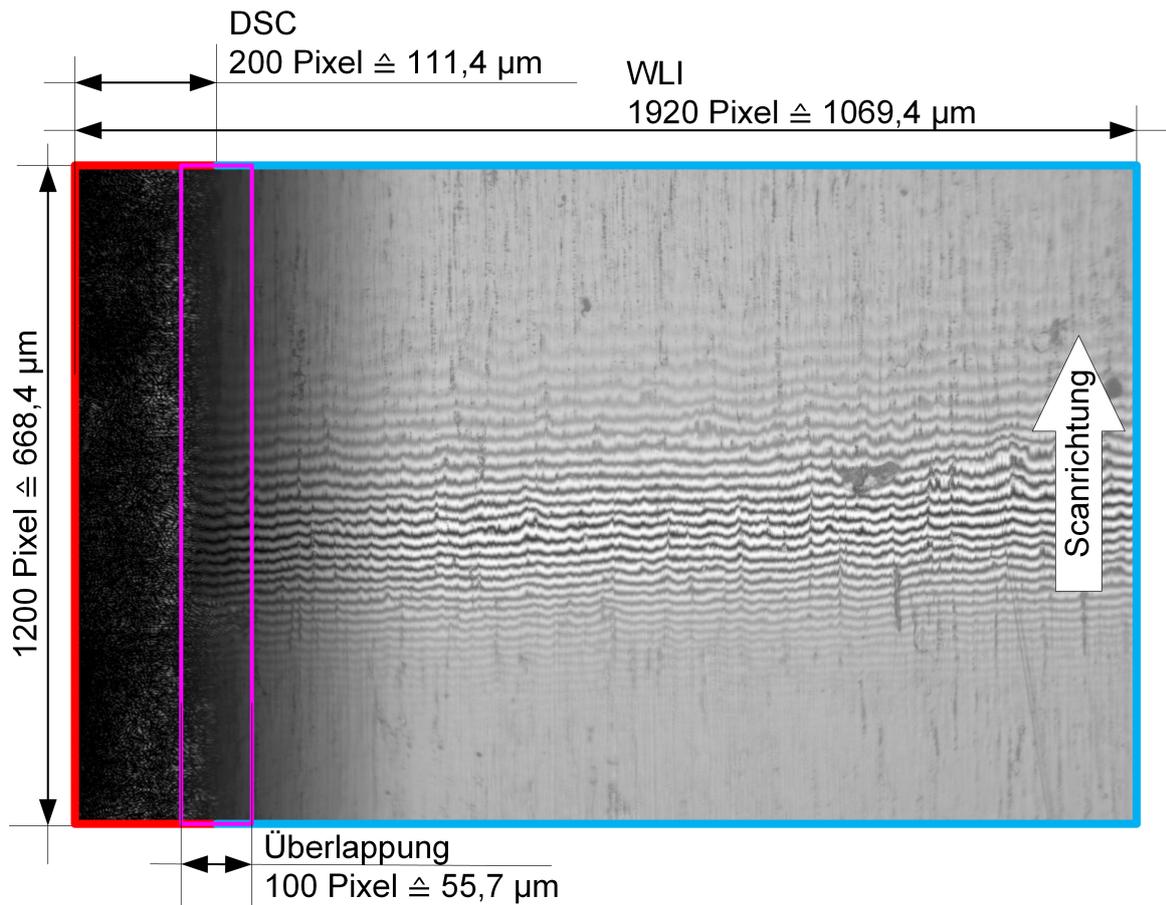


Abbildung 3.10: Rohaufnahme der LSWLI-Kamera mit den zwei Regions of Interest für Weißlichtinterferometrie (blau umrahmt) und für die digitale Specklekorrelation (rot umrahmt). Es existiert ein Überlappungsbereich (violett eingerahmt), in dem sowohl Speckle als auch Interferenzstreifen sichtbar sind.

Fläche für die Weißlichtinterferometrie (blau umrahmt) zur Verfügung steht. Für die DSC-Verschiebungsmessung reicht ein kleineres ROI aus (rot umrahmt). Zwischen den ROIs befindet sich ein Überlappungsbereich (violett eingerahmt), in dem beide Signale erscheinen.

3.2.1 DSC Komponenten

Das fertige Gesamtsystem aus LSWLI und DSC ist in Abbildung 3.1 schematisch und fotografisch dargestellt. Es folgen Ausführungen zu den einzelnen Komponenten für das zusätzliche, integrierte DSC-Verschiebungsmesssystem.

Die Integration des Specklemesssystems in die Optik des WLIs kann nur mit geeigneter Wahl der Beleuchtungsspektren und der dazugehörigen Filter gelingen. Die Spektren der Lichtquellen sollten hierbei einerseits keine Überlappung aufweisen und andererseits beide innerhalb der spektralen Sensitivität des Kamerachips liegen. Die verwendeten Spektren von Beleuchtung und Filtern sind zur Übersicht in Abbildung 3.11 gemeinsam dargestellt.

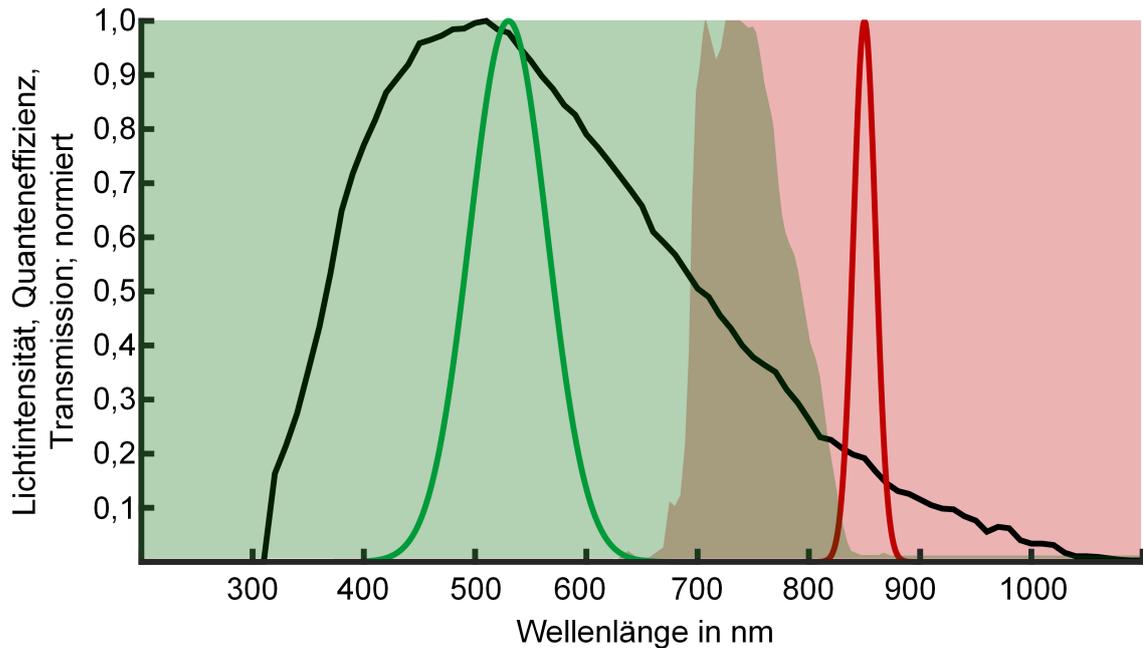


Abbildung 3.11: Übersicht über die im Versuchsaufbau verwendeten Spektren. Schwarzer Graph: Sensitivitätskurve des Kamerachips Sony IMX174 [63]. Grüner Graph: Spektrum der grünen WLI-LED [55, 56]. Roter Graph: Spektrum der IR-Laserdiode zur Specklebeleuchtung [64]. Hellgrüne Fläche: 800 nm Low-Pass-Filter-Spektrum für WLI-ROI [65]. Hellrote Fläche: 650 nm High-Pass-Filter-Spektrum für Speckle-ROI [66].

Der Aufbau ohne Speckle-Beleuchtung arbeitet mit LEDs mit einer zentralen Wellenlänge von 520 nm bis 530 nm und einem Spektrum mit ca. 70 nm Halbwertsbreite, was in etwa mit dem Sensitivitätsmaximum des Kamerachips übereinfällt. Diese hohe Sensitivität sollte für das bestmögliche Interferenzsignal erhalten bleiben. Daher muss die Speckle-Beleuchtung mit einer deutlich anderen Wellenlänge erfolgen, um beide Bereiche mit optischen Filtern trennen zu können.

Ein deutlicher spektraler Abstand zum WLI-Spektrum wird mit nahem Infrarot gewahrt. Zwar ist die Kamera nicht mehr so sensitiv auf dieses Licht wie auf das WLI-Licht, allerdings kann mit kommerziell erhältlichen Diodenlasern dennoch selbst bei Belichtungszeiten im Bereich weniger μs eine ausreichende Beleuchtungsintensität auf den Pixeln des Sensors erreicht werden. Daher wurde eine dimmbare 40 mW Laserdiode (Laserklasse 3) mit einer Wellenlänge von 850 nm ausgewählt. Die Abhängigkeit der Specklegröße von der Laserwellenlänge, siehe Abschnitt 2.2.2, spielt bei der Auswahl des Lasers eine untergeordnete Rolle.

Die Laserdiode darf nicht wie eine klassische Auflichtquelle durch das Mirau-Objektiv auf die Oberfläche geleitet werden, da dies zu Interferenz des Laser-Lichts führen würde. Stattdessen muss das IR-Licht von außerhalb auf die Probe gelenkt werden und sollte dabei für eine gute Ausleuchtung so steil wie möglich auf die vom Objektiv erfasste Oberfläche scheinen. Hierzu wurde eine Halterung gefertigt, die sich als Kragen an die Mirau-Objektive klemmen lässt. Die Halterung ist in Abbildung 3.12 schematisch dargestellt. Am Haltekragen befindet sich ein Spiegel, die den Laserstrahl so umlenkt, dass er in einem steileren Winkel auf die Oberfläche trifft. Die Laseroptik konnte aufgrund mangelnden Bauraums nicht selbst steiler ausgerichtet werden. Es ist eine Linienoptik verbaut, durch welche der

Laserstrahl in einer schmalen Linie auf die Oberfläche trifft. Durch die Aufweitung zu einer Linie wird eine gleichmäßige IR-Beleuchtung über die vollständige Breite der vom Objektiv erfassten Oberfläche erreicht. Die Laserlinie ist, wie der DSC-Bereich, parallel zur Bewegungsrichtung ausgerichtet. Dies ist der Ausrichtung quer zur Bewegung vorzuziehen, da bei der Parallelausrichtung mehr Speckle in Bewegungsrichtung im Bild vorhanden sind und so insbesondere bei steilen Scanpfaden, bei denen die Höhenänderungen durch das FOV größer sind als der Fokusbereich, immer zumindest ein Teil des DSC-Bereichs im Fokus ist.

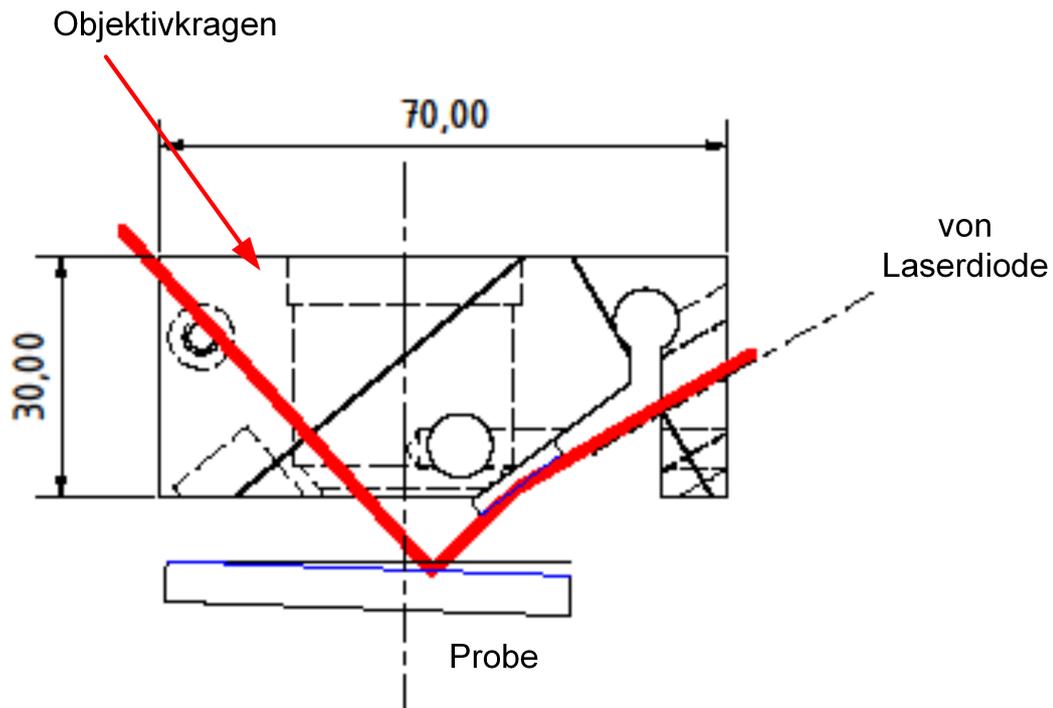


Abbildung 3.12: Technische Zeichnung des Laserhalters (Bemaßung in mm). Der Strahlengang des Lasers in rot gekennzeichnet.

Zur spektralen Trennung der beiden Messbereiche kommen optische Filtergläser zum Einsatz. Der DSC-Bereich des Kamerasensors wird durch einen 650 nm Langpassfilter frei von Weißlicht gehalten. Umgekehrt wird der WLI-Bereich mit einem 800 nm Kurzpassfilter vor IR-Licht geschützt. Die Filter werden in einem Metallgehäuse fixiert, welches zwischen Kamera und Tubus eingesetzt wird. Die Lage der Filterbox ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Eine detaillierte Zeichnung des Filtergehäuses wird in Abbildung 3.13 gezeigt. Wie der Zeichnung zu entnehmen ist, sind die Filter um 45° gekippt. Dies verhindert Reflexionen im optischen Aufbau, verringert die Fläche des Filtergehäuses und erhöht seine Bauhöhe, wodurch mehr Platz für die Stellschraube und die zugehörige Rückstellfeder bleibt. Die zusätzliche Distanz zwischen Tubus und Kamera verschiebt die Abbildungsebene des optischen Aufbaus, was sich durch Einsetzen bzw. Entfernen von Distanzstücken auf der Kameraseite oder auf der Objektivseite korrigieren lässt. Zu beachten ist bei der Korrektur, dass sich Fokusebene und Interferenzebene voneinander trennen können. Bei den verwendeten Mirau-Objektiven von Nikon lässt sich die Lage der Interferenzebene gegenüber dem Fokus händisch nachjustieren.

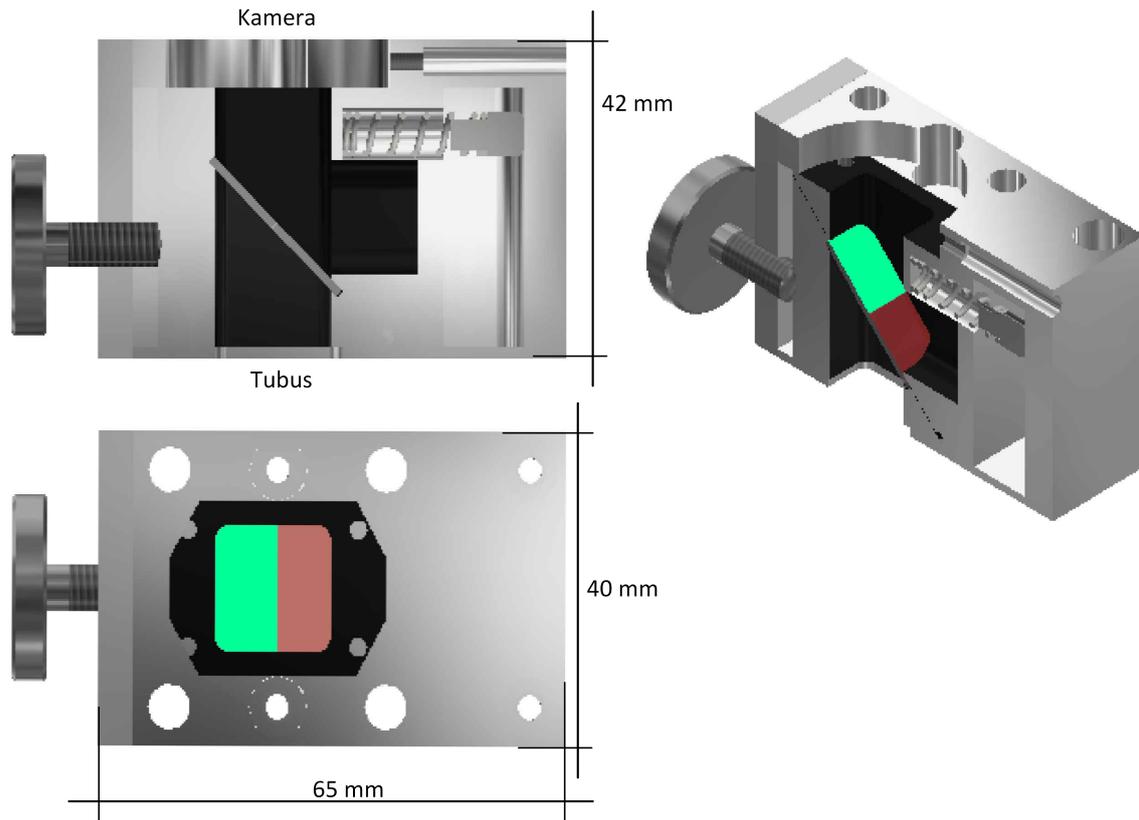


Abbildung 3.13: CAD-Render der Filterbox. Links oben: Seitenansicht. Links unten: Untenansicht. Rechts: Perspektivische Darstellung.

Die Filter (rote und grüne Scheiben in Abbildung 3.13) sind in einer Halterung befestigt, welche sich mittels einer Stellschraube verschieben lässt. So kann der Flächenanteil für DSC und WLI auf der Kamera eingestellt werden. Ein schmaler Streifen von 200 Pixeln reicht i.d.R. aus, um zuverlässige Verschiebungswerte aus dem DSC-Bereich zu erhalten. Konstruktionsbedingt überlappen sich die beiden Filter, sodass ein schmaler Streifen in der Größenordnung von ca. 100 Pixeln Breite des Kamerachips von beiden Lichtquellen unterbelichtet wird und damit unverwendbar bleibt.

3.2.2 DSC Auswertalgorithmen

Bei LSWLI-Messungen mit integriertem DSC-System ändert sich im Vergleich zur Messung ohne DSC-System nichts an der Bildakquisition. Da die komplette Sensorfläche der Kamera im Global-Shutter Verfahren gleichzeitig ausgelesen wird, sind die WLI Messung und die DSC Messung ohne weitere Maßnahmen zueinander synchron.

Die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Bildausschnitte verläuft getrennt voneinander. Da eine Live-Auswertung der Topografie aufgrund der großen Datenmengen mit aktuellen Rechnern nicht realisierbar ist, werden die Rohbilder auf einem Datenträger zwischengespeichert. Die beiden ROIs werden von den jeweiligen Auswerteskripten gezielt verarbeitet. Die Verarbeitung des WLI-ROIs wird in Abschnitt 3.1.2 behandelt.

Die Auswertung des DSC-ROIs basiert auf der Kreuzkorrelation zweier DSC-Bilder. Da die betrachteten Oberflächen starr sind, also während der Messung ihre Gestalt nicht än-

dem, kann die Positionsänderung der Oberfläche durch das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen zwei Bildern der Oberfläche gefunden werden.

Die Umsetzung der Bildkreuzkorrelation basiert auf dem von Guizar-Sicairos et al. [43] beschriebenen Algorithmus. Der Algorithmus ist auf eine besonders schnelle Auswertung von Bildverschiebungen mit Sub-Pixel Genauigkeit ausgelegt (siehe Abschnitt 2.2.1). Zur Berechnung der Verschiebung existieren zwei Verarbeitungsfolgen der Einzelbilder. Die Kreuzkorrelation kann entweder jeweils zum nächsten "Nachbarbild" berechnet werden oder zu "Masterbildern", welche ggf. nach einer festgelegten Relativverschiebung gewechselt werden.

Das Verfahren "Nachbarbild": In einer for-Schleife werden nacheinander alle Bilder miteinander verglichen. Das früher aufgenommene Bild I_f wird mit dem nachfolgenden Bild I_g kreuzkorreliert. Nach Berechnung der Verschiebung wird das alte I_g zum neuen I_f und ein neues Bild wird als I_g geladen. So befinden sich zu jedem Zeitpunkt nur zwei Bilder im Arbeitsspeicher, weswegen die Verschiebungsberechnung an beliebig großen Aufnahmeserien angewendet werden kann. Die Verschiebungen entlang und quer zur Scanrichtung werden in Vektoren gespeichert. Zur Weiterverarbeitung werden die Vektoren in kumulative Verschiebungswerte, also der Verschiebung zum allerersten Bild, umgerechnet.

Das Verfahren "Masterbild": Das außerhalb der Schleife geladene Masterbild I_f wird mit den wechselnden Folgebildern I_g kreuzkorreliert und die Gesamtverschiebung zum ersten und zum aktuellen Masterbild aufgezeichnet. Wird eine heuristisch gewählte maximale Verschiebung erreicht, so wird das Masterbild ausgetauscht gegen eines der letzten ca. 5 Folgebilder. Es wird dasjenige Folgebild auserwählt, welches am wahrscheinlichsten nicht während eines Verschiebungsausreißers, z. B. während eines Stoßes, aufgenommen wurde. Dies kann anhand der mittleren Verschiebung und dessen Standardabweichung in der Umgebung der Bilderauswahl abgeschätzt werden, wobei prinzipbedingt nur Daten der vorherigen Bilder berücksichtigt werden können. Unter der Annahme, dass Ausreißer durch Stöße eher die Ausnahme als die Regel sind, wird dasjenige Bild zugehörig zur lokal geringsten Abweichung von der mittleren Verschiebung als neues Masterbild erwählt.

Unter Werkstattbedingungen sind Verschiebungsschwankungen aufgrund von Vibrationen oder Schlägen zu erwarten, die so stark sind, dass sich die Bewegungsrichtung des Scans kurzzeitig für einzelne Bilder umkehrt. Solange die Geschwindigkeiten der Oberfläche nicht durch diese Störbewegungen über das von der Belichtungszeit vorgegebene Geschwindigkeitslimit bezüglich der Bewegungsunschärfe hinaus beschleunigt werden und die Verschiebungsschritte nicht größer als die halbe Bildbreite sind, können diese Schwankungen mittels der DSC-Daten ausgeglichen werden. Dafür wird der initialen Berechnung der Verschiebungen mittels Kreuzkorrelation eine Sortierung der Einzelbilder nachgeschaltet. Die Sortierung erfolgt nach der Gesamtverschiebung der Oberfläche im Vergleich zum ersten Bild.

Für die Weiterverarbeitung wird beim sortierenden Algorithmus nicht nur die Verschiebung an nachfolgende Auswerteschritte weitergegeben, sondern auch die neue Reihenfolge der aufgenommenen Rohbilder. Der Einfluss der Sortierung auf die Auswertbarkeit stark verwackelter Scans wird im Abschnitt 5.2 demonstriert.

4 Charakterisierung und Validierung

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften des rotatorischen LSWLI-DSC-Messsystems charakterisiert. Die vorgestellten Modelle und Methoden zur rotatorischen LSWLI und zur integrierten DSC-Verschiebungsmessung werden validiert. Zunächst werden in Abschnitt 4.1 per Monte-Carlo-Simulation Querempfindlichkeiten auf die Unsicherheit der Topografiemessung abgeschätzt. Die tatsächlich mit dem Messsystem erreichbaren Messunsicherheiten werden anschließend in Abschnitt 4.2 experimentell untersucht.

4.1 Unsicherheitsbetrachtung mittels Monte-Carlo-Simulation

Die Unsicherheit der Höhe $u(h_{AB})$ nach Gleichung 2.10 für die rotatorische LSWLI nach den Regeln der Unsicherheitsfortpflanzung gemäß „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ [67] lautet unter Berücksichtigung der Varianzen und Kovarianzen der Positionen x_i und der Winkel Θ_i

$$u(h_{AB}) = \sqrt{\begin{aligned} &\text{var}(x_1) + \text{var}(x_2) + \text{var}(\Theta_1) + \text{var}(\Theta_2) + \\ &2 \cdot (\text{cov}(x_1, x_2) + \text{cov}(\Theta_1, \Theta_2) + \\ &\text{cov}(x_1, \Theta_1) + \text{cov}(x_1, \Theta_2) + \\ &\text{cov}(x_2, \Theta_1) + \text{cov}(x_2, \Theta_2)) \end{aligned}}. \quad (4.1)$$

Da die jeweiligen Größen x_i, Θ_i aus den selben Korrelogrammen entnommen werden, können die Kovarianzterme nicht als nullwertig angenommen werden. Hierdurch ist eine (semi-) analytische Lösung der Unsicherheit $u(h_{AB})$ unpraktisch, zumal unbekannt ist, welcher Wahrscheinlichkeitsverteilung das Ergebnis für h_{AB} durch die Aufnahme und Auswertung der Daten folgt, weshalb die Unsicherheit im Folgenden gemäß GUM Supplement 1 [68] mit einem simulativen Monte-Carlo Ansatz abgeschätzt wird. Um damit die Unsicherheitsbeiträge zur Höhenmessung der Messposition und den Abweichungen der Verschiebung sowie der Verschiebungsmessung abzuschätzen, wird ein Modell der Messdatenaufnahme und Auswertung in Matlab simulativ nachgebildet.

4.1.1 Signalmodell

Der Kern der Monte-Carlo-Simulation für die Schätzung von $u(h_{AB})$ ist ein idealisiertes Korrelogramm-Signalmodell. Das Signalmodell basiert auf der ungestörten Lichtintensität $I(z_j)$ nach dem Modell für WLI-Korrelogramme [37]

$$I(z_j) = I_0 \cdot \left(\exp\left(-4 \cdot \left(\frac{z_j - z_{\text{ref}}}{l_c}\right)^2\right) \cdot \cos\left(4\pi \left(\frac{z_j - z_{\text{ref}}}{\lambda_0}\right)\right) \right), \quad (4.2)$$

wobei l_c die Kohärenzlänge, λ_0 die zentrale Wellenlänge des Weißlichts und z_{ref} die Höhe ist, in der die optische Weglängendifferenz Null ist. Bei rotatorischer LSWLI ändern sich die vertikalen Koordinaten z während des lateralen Scans, der einem gekrümmten Pfad folgt, wodurch die Bewegungen in x - und z -Richtung kombiniert sind. Für einen kreisförmig gekrümmten Scanpfad gilt die geometrische Beziehung

$$z_j - z_{ref} = x_j \cdot \tan(\Theta_j) - x_{ref} \cdot \tan(\Theta_{ref}), \quad (4.3)$$

wobei jedes $x_j, j = 1, \dots, n$, für eine Position im Korrelogramm steht. Während die möglichen Korrelogrammpositionen x_j auf das Koordinatensystem des FOVs beschränkt sind, hat die Kamera selbst eine eigene Offset-Position in Bezug auf den Scheitelpunkt des rotatorischen Scanpfads. Der Offset wird berücksichtigt, indem x_{offset} zu den x -Koordinaten des Korrelogramms im FOV addiert wird gemäß dem Zusammenhang $x'_j = x_j + x_{offset}$. Die z -Koordinaten eines simulierten Zylinders, der im virtuellen FOV beobachtet wird, werden aus den absoluten Koordinaten x'_j des Scanpfads und dem Radius r unter Verwendung der geometrischen Beziehung $z_j = r - \sqrt{r^2 - x'^2_j}$ berechnet.

Zur Abschätzung von $u(h_{AB})$ ist das idealisierte Korrelogramm-Signalmodell mit Unsicherheitsquellen versehen. Die erste Unsicherheitsquelle ist die Bewegungsunsicherheit $u(x_{motion})$, mit welcher ungleichmäßige Scanbewegungen simuliert werden, die in der Praxis z. B. durch einen ungleichmäßigen Rotationsantrieb oder zeitliche Schwankungen in der Auslösung der Kamera verursacht werden. Hierzu wird jedes x_j mit additivem weißen Rauschen überlagert, welches einen Mittelwert von Null und eine Standardabweichung von $u(x_{motion})$ aufweist. Wie in der Realität existiert die Bewegungsunsicherheit kausal bereits vor der Entstehung des Intensitätssignals, denn auch in der Simulation entstehen die Intensitätswerte der Korrelogramme aus den mit Bewegungsunsicherheit beaufschlagten x_j -Positionen.

Als zweite Unsicherheitsquelle wird das Bildrauschen hinzugefügt, welches eine Zusammenfassung aus Wechselwirkungen zwischen Kamera und Licht (z. B. Schrotrauschen) und anderen natürlichen Helligkeitsschwankungen (Beleuchtungsintensitätsschwankungen oder Reflektivitätsschwankungen des Messobjekts) darstellt. Hierzu wird auf das Intensitätssignal $I(z_j)$ ein weißes Gaußsches Rauschen addiert, welches einen Mittelwert von Null und eine Standardabweichung von $u(I)$ besitzt.

Die dritte Unsicherheitsquelle gilt der Positionsmessung $u(x_{mess})$. Dieser Einfluss wird in der Simulation des Messdatenflusses durch einen Zufallsprozess dargestellt. Die Intensitätswerte $I(z_j)$ werden an der zufallsbehafteten Scanposition $x_j \pm u(x_{mess})$ abgefragt, wobei x_j der Mittelwert und $u(x_{mess})$ die Standardabweichung einer Gaußschen Verteilung sind. Der Einfluss der gerasterten Aufnahme des digitalen Kamerasensors wird hierbei durch eine Rundungsoperation auf die nächste ganzzahlige Pixelposition im simulierten Kameraraster umgesetzt.

Das Korrelogramm $I(z_j)$ ist nun beaufschlagt mit den drei Unsicherheitsbeiträgen, $u(I)$ vom Bildrauschen, $u(x_{motion})$ von der Bewegung und $u(x_{mess})$ von der Positionsmessung und kann für Untersuchungen der aus diesen Beiträgen beeinflussten Höhenunsicherheit $u(h_{AB})$ eingesetzt werden.

Für die Durchführung der Simulation werden weitere Annahmen getroffen:

- Die vom Messobjekt auf den Kamerasensor projizierte Fläche ändert sich vernachlässigbar aufgrund des gekrümmten Scanpfads innerhalb des Bildausschnitts. Beispielrechnung: Ist die Oberfläche an einem Ende des Bildausschnitts um 0° und am anderen Ende des Bildes um 5° geneigt, so werden auf den Pixel am 5° -Ende gerade 100,38 % der Fläche projiziert, die am 0° -Ende abgebildet wurde.
- Der Intensitätsgradient entlang des Bildausschnitts bedingt durch die winkelabhängige Lambertsche Reflexion im untersuchten Winkelbereich ist vernachlässigbar.
- Die Oberfläche bewegt sich ausschließlich entlang der Scanrichtung x . Es gibt keine Querbewegungen in y -Richtung. So kann ein zweidimensionales X-Z-Modell verwendet werden.
- Die Maxima der idealen Korrelogramme sind auf die Mitte der Signallänge zentriert.

Das zuvor beschriebene Signalmodell mit Berücksichtigung von $u(x_{\text{motion}})$, $u(x_{\text{mess}})$ und $u(I)$ wird verwendet, um eine große Anzahl Korrelogramme zu generieren. Die Möglichkeiten der Vektor- und Array-Manipulation von Matlab werden ausgenutzt, um die Berechnungszeiten so weit wie möglich zu verkürzen.

4.1.2 Simulationsergebnisse

Im ersten Teil der Simulationsergebnisse wird der Einfluss des Bildrauschens und des Objektradius auf die Höhenunsicherheit untersucht. Hierzu werden Korrelogramme aus geometrischen Daten mit unterschiedlichen Radien und Scheitelpunktabständen generiert. Die Variation des Bildrauschens wird durch Veränderung des Rauschparameters realisiert.

Im zweiten Teil der Simulationsergebnisse wird sich speziell den Auswirkungen von Bewegungs- und Bewegungsmessunsicherheit gewidmet. Das simulierte Objekt ist ein idealer Zylinder mit einem Radius von $r = 65,3$ mm, der dem Radius des Messobjekts im Experiment in Abschnitt 4.2.3 entspricht. Die Korrelogramme werden mit einer maximalen Amplitude von 100 Counts synthetisiert, um den experimentellen Aufbau nachzuahmen. Das hinzugefügte Intensitätsrauschen hat eine Unsicherheit von $u(I) = 4$ Counts, was ebenfalls mit beobachteten Rauschwerten des Sensors vergleichbar ist. Die simulierte Abtastung des Korrelogramms wird mit einer Auflösung von 1 Pixel durchgeführt. Die Simulation wird so eingestellt, dass 10000 Wiederholungen mit zufälligen Unsicherheitsanteilen in einem Bereich von $u(x_{\text{motion}}) = 0,1 \dots 0,4$ Pixel und $u(x_{\text{mess}}) = 0,02 \dots 0,05$ Pixel durchgeführt werden, wobei jeweils der andere Unsicherheitsanteil auf Null gesetzt wird. Die physikalische Größe eines Pixels wird auf $0,557 \mu\text{m}$ festgelegt, basierend auf der Kamera und der vergrößernden Optik, die in der realen Versuchsanordnung vorhanden sind. Jede Kombination von Unsicherheiten wurde für 14 Scheitelpunktabstände von 0,1 mm bis 2,5 mm in Bezug auf den scheitelpunktnäheren Rand des FOVs simuliert.

4.1.2.1 Einfluss des Bildrauschens und des Objektradius

In der Realität ist die Intensität des Bildrauschens abhängig von den Eigenschaften und Einstellungen der Kamera und der Beleuchtung. Eine feste Größe ist hierbei z. B. die Quan-

teneffizienz des Sensors. Veränderliche Einstellungen sind z. B. die Belichtungszeit und die Beleuchtungsintensität, bzw. zusammengefasst der Photonenstrom auf den Sensor.

In der Simulation werden diese komplexen optischen Zusammenhänge vereinfacht umgesetzt indem das Intensitätsrauschen als gaußsches Rauschen auf das reine Signal addiert wird. Mit dem WLI-Aufbau konnten im Labor bei Signalamplituden von über 100 8-Bit Counts Rauschamplituden von vier 8-Bit Counts realisiert werden. Jenseits dieses realen Rauschwertes wurde der Einfluss des Rauschens auf ein ansonsten ideales Signal mit Rauschamplituden von 0 bis 100 Counts, bei einer konstanten maximalen Signalstärke von 100 Counts, simuliert. Das Ergebnis in Abhängigkeit vom Scheitelpunktsabstand ist in Abbildung 4.1 links dargestellt. Bei kleinen Rauschamplituden bis 10 Counts liegen die zufälligen Höhenabweichungen bis zu einem Scheitelpunktsabstand von 3 mm unter 30 nm. Bei höheren Rauschamplituden über 20 Counts liegt eine mit wachsendem Scheitelpunkt zunehmende Abweichung vor. Sollen Höhenunsicherheiten unter 50 nm erreicht werden, müssen zunehmend kleinere Abstände zum Scheitelpunkt bei steigender Rauschamplitude eingestellt werden.

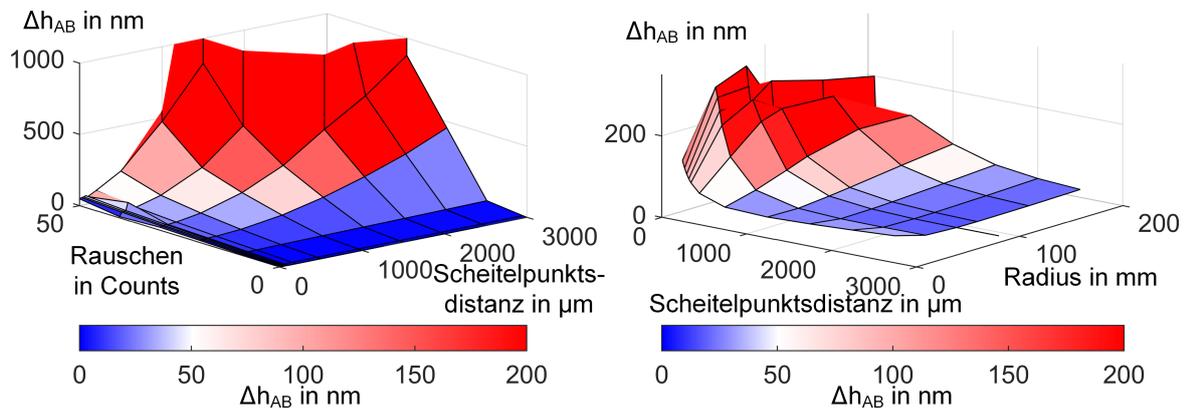


Abbildung 4.1: Links: Resultierende Höhenunsicherheit Δh_{AB} aufgrund des Intensitätsrauschens. Simuliert für Scheitelpunktsabstände von 0 mm bis 3 mm und Rauschamplituden von 0 bis 100 Counts, bei 100 Counts Signalmaximum. Rechts: Resultierende Höhenunsicherheit aufgrund des Objektradius. Simuliert für Scheitelpunktsabstände von 0 mm bis 3 mm und Radien von 20 mm bis 200 mm.

Während der Einfluss des Rauschens den zufälligen Messabweichungen zugerechnet wird, ist der Einfluss des Radius den systematischen Messabweichungen zuzuordnen. Den systematischen Einfluss der Oberflächenkrümmung macht eine simulative Untersuchung der Höhenunsicherheit unter Variation des Objektradius bei ansonsten idealem Signal ($u(I) = 0$) deutlich. Das Ergebnis in Abhängigkeit vom Objektradius ist in Abbildung 4.1 rechts dargestellt. Gezeigt ist die mittlere berechnete Höhenabweichung für Scheitelpunktsabstände von 0 mm bis 3 mm und Radien von 20 mm bis 200 mm. Die mittlere Abweichung ist bei einem Scheitelpunktsabstand von 0 mm maximal und nimmt mit zunehmendem Abstand ab auf einen Wert von ca. 16,3 nm. Diese systematische Höhenabweichung ist auf den Auswertalgorithmus zurückzuführen, bei welchem ein Gaußfit (in der Praxis als Näherung Parabelfit) des Signals über die laterale Position der Stützpunkte durchgeführt wird. Hierbei wird ein symmetrisches Signal angenommen, was aber nicht dem vorliegendem Signal

entspricht. Das Signal ist abhängig von den unter dem FOV befindlichen Oberflächenkrümmungen zum Scheitelpunkt hin gestreckt, da dort geringere Höhenänderungen vorzufinden sind. Durch geschicktes setzen von Fit-Grenzen in der Nähe des Korrelogrammmaximums konnte der Effekt in der Praxis reduziert werden. Ein weiterer Ansatz, welcher die Verzerrung der Korrelogramme theoretisch vollständig ausgleicht, ist der Auftrag der Intensitäten über die z -Achse. Dieser Ansatz wurde nicht realisiert, jedoch in den Ausblick 6.3 aufgenommen.

4.1.2.2 Einfluss der Bewegung, der Bewegungsmessung und der Messposition

Die mit der Monte-Carlo-Simulation berechnete Höhenunsicherheit $u(h_{AB})$ ist in Abbildung 4.2 für verschiedene Niveaus der Bewegungsunsicherheit $u(x_{\text{motion}})$ und der Verschiebungsmessunsicherheit $u(x_{\text{mess}})$ über die Entfernung des Sichtfelds zum Scheitelpunkt des kreisförmigen Scanpfads dargestellt. Das obere Diagramm in Abbildung 4.2 zeigt den Einfluss der Verschiebungsmessunsicherheit $u(x_{\text{mess}})$ auf die Höhenunsicherheit $u(h_{AB})$ ohne die Bewegungsunsicherheit $u(x_{\text{motion}})$. Das untere Diagramm zeigt die geschätzte Höhenunsicherheit für den umgekehrten Fall, d.h. kein $u(x_{\text{mess}})$, aber verschiedene Stufen von $u(x_{\text{motion}})$. Für beide simulierten Fälle nimmt die Standardabweichung der Höhe mit zunehmender Scheitelpunktsentfernung zu. Wie zuvor beschrieben, hängen die Messunsicherheit und der Messbereich bei der LSWLI zusammen. Es muss immer ein Kompromiss zwischen den beiden gefunden werden, welcher zu den Anforderungen der jeweiligen Messaufgabe passt. Die Messung bei minimaler Scheitelpunktsentfernung und geringer Höhenunsicherheit ist zum Beispiel nicht optimal, wenn ein größerer Messbereich erforderlich ist.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass es eine untere Unsicherheitsgrenze gibt, die durch das Bildrauschen bestimmt wird (dunkelgrau in Abbildung 4.2). Das ist in der Realität unvermeidbar, kann aber durch eine sorgfältige Einstellung der Optik und der Kamera minimiert werden. Eine für diesen Arbeit aufgestellte Anforderung an ein geeignetes Verschiebungsmesssystem ist, dass die Gesamthöhenunsicherheit die hellgrauen Bereiche in den Abbildungen nicht überschreiten sollte, die eine Gesamthöhenunsicherheit markieren, die doppelt so hoch ist wie der reine Beitrag des Intensitätsrauschens. In dem oben in Abbildung 4.2 dargestellten Fall, der den Einfluss der Verschiebungsmessung isoliert zeigt, wird die gesetzte Unsicherheitsgrenze für alle betrachteten Scheitelpunktsabstände nur mit $u(x_{\text{mess}}) \leq 0,02$ Pixeln erfüllt. Aufnahmen mit Verschiebungsmessunsicherheiten über 0,05 Pixel sind nur bei sehr geringen Scheitelpunktsabständen nutzbar, die aufgrund des dort geringen Messbereichs nicht praktikabel sind. Die Kurve für $u(x_{\text{mess}}) = 0,04$ Pixel schneidet die obere Grenze der festgelegten Unsicherheitsgrenze bei einem Scheitelpunktsabstand von 1,5 mm, welcher als die Obergrenze für den Kompromiss zwischen Höhenunsicherheit und Messbereich in dieser Untersuchung angesehen wird. In dem unten in Abbildung 4.2 dargestellten, umgekehrten Fall mit perfekter Verschiebungsmessung und Bewegungsunsicherheiten kann die gleiche Unsicherheitsobergrenze für Höhenmessungen bis $u(x_{\text{motion}}) = 0,2$ Pixeln eingehalten werden.

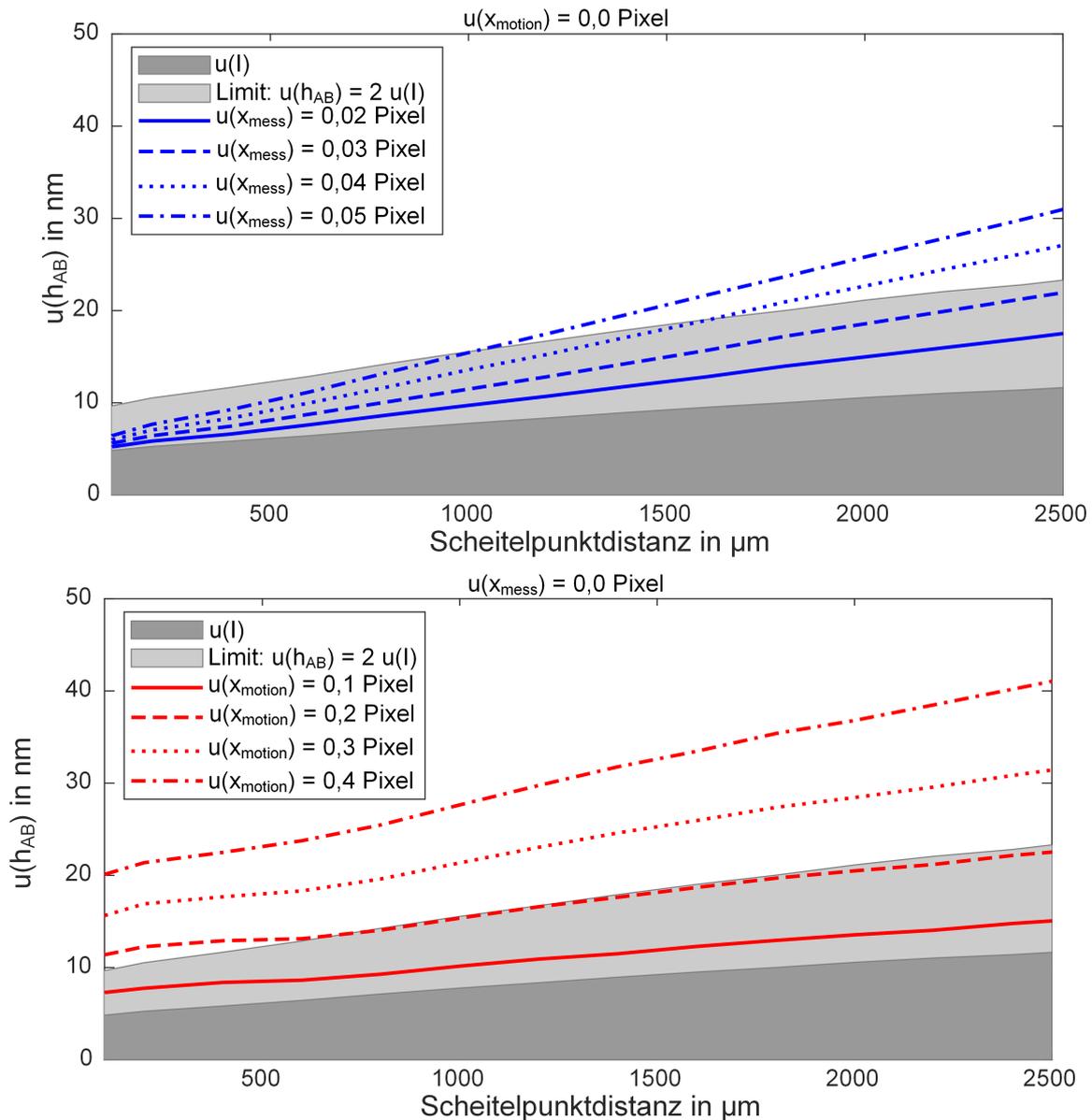


Abbildung 4.2: Resultierende Höhenunsicherheit aufgrund der Verschiebungsmessung und der Bewegungsunsicherheit. Der dunkelgraue Bereich markiert die Unsicherheit, die nur aus Intensitätsrauschen resultiert. Der hellgraue Bereich markiert den Grenzwert der Gesamthöhenunsicherheit, der dem doppelten Beitrag des Beitrag des Intensitätsrauschens entspricht. Oben: Die blauen Linien stellen Höhenunsicherheiten dar, die durch Verschiebungsmessunsicherheiten verursacht werden. Unten: Die roten Linien zeigen Höhenunsicherheiten, die durch unterschiedliche Anteile der Bewegungsunsicherheit verursacht werden. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2021 [53].

Ein Vergleich beider simulierten Fälle zeigt, dass die Unsicherheit der Verschiebungsmessung einen wesentlich größeren Einfluss auf die Höhenunsicherheit hat als die Bewegungsunsicherheit. Es ist also wichtig für das Erreichen der geforderten Topografiemessunsicherheit, dass das DSC-Verschiebungsmesssystem, das in den LSWLI Aufbau integriert wird, eine Unsicherheit $u(x_{\text{mess}})$ von deutlich unter 0,04 Pixel aufweist.

4.2 Charakterisierung des Messsystems im Labor

Dieser Abschnitt befasst sich mit der experimentellen Untersuchung der Charakteristiken des Messsystems unter Laborbedingungen. Hierbei sollen auch die in Abschnitt 4.1 berechneten Simulationsergebnisse validiert werden. Die grundlegenden Kenndaten des LSWLI-Demonstrators wurden im Abschnitt 3.1 vorgestellt. Die im Folgenden diskutierten Eigenschaften des Messgerätes entstammen Forschungsfragen, welche für die Realisierung des rotatorisch messenden LSWLI Systems beantwortet werden müssen.

4.2.1 Einfluss der Oberflächenkrümmung

Der Einfluss der Oberflächenkrümmung bei der VSWLI im Allgemeinen wurde in der Literatur u.a. von Lehmann et al. beschrieben [40]. Im Gegensatz zur VSWLI ist bei der LSWLI eine Neigung oder Krümmung des Scanpfads eine zentrale Eigenschaft des Messsystems. Durch die Neigung (translatorisch) oder Krümmung (rotatorisch) des Scanpfads entsteht innerhalb des FOVs des WLIs eine Höhenänderung, welche das Interferenzmuster beeinflusst - der Messeffekt. Im Folgenden werden Untersuchungen zum Einfluss der Scanpfadform bei rotatorischen Scans auf das Interferenzmuster und auf die Unsicherheit der Höhe vorgestellt.

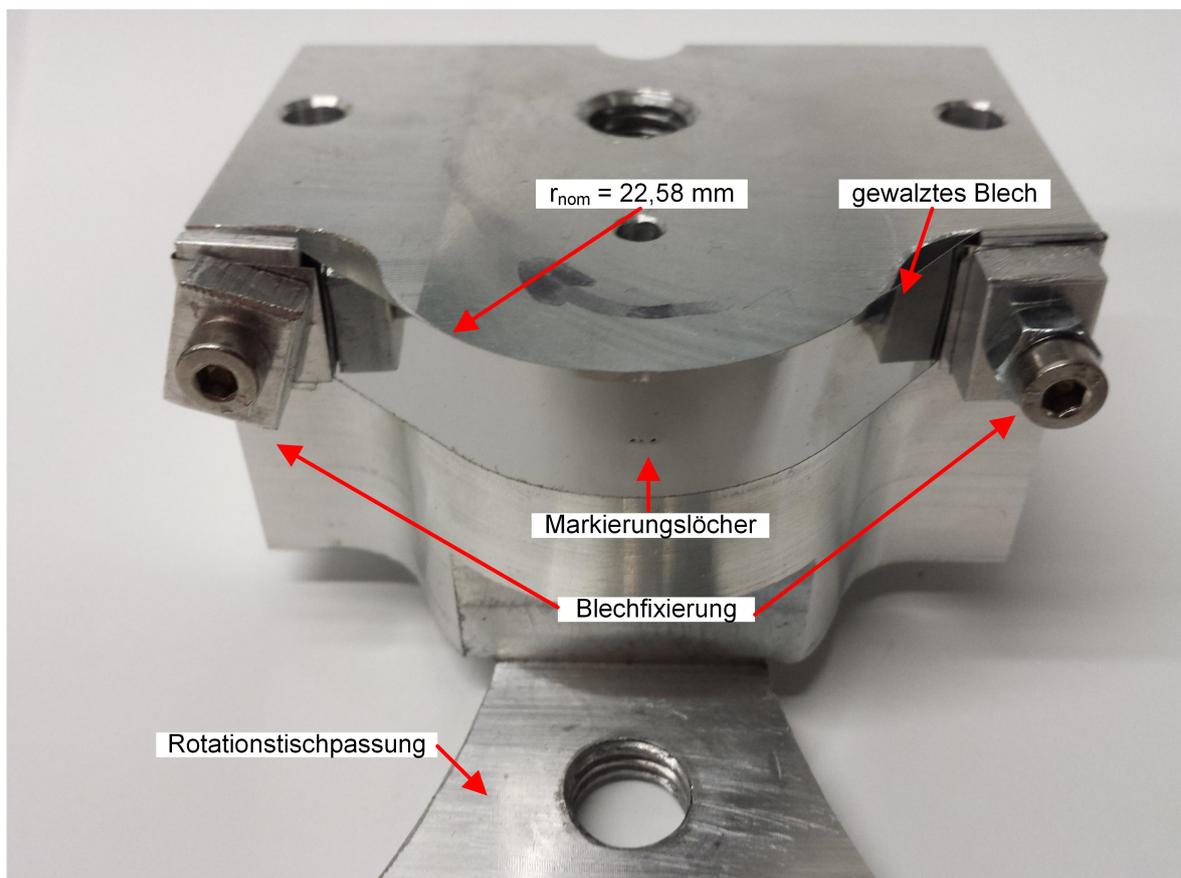


Abbildung 4.3: Messobjekt für die Untersuchung des Einflusses der Oberflächenkrümmung. Das Objekt besteht aus einer gefrästen Aluminiumhalterung und einem darauf gespannten Blechstreifen, welcher die Messoberfläche darstellt. Der mit einem taktilen Koordinatenmessgerät bestimmte Radius der Probe beträgt 22,58 mm.

Zur Untersuchung des Einflusses der Neigung und Krümmung bei der rotatorischen LSWLI wird das in Abbildung 4.3 abgebildete Messobjekt verwendet. Es besteht aus einem reflektierenden, gewalzten Blechstreifen, der auf die gewölbte Seite einer gefrästen Halterung geklemmt wird. Der Radius des auf der Grundplatte montierten Blechs beträgt $22,58 \text{ mm} \pm 8 \mu\text{m}$, was mit einem taktilen Koordinatenmessgerät ermittelt wurde. In den Metallstreifen wurden drei Markierungslöcher gestanzt, um verschiedene Messungen desselben Oberflächenbereichs für Vergleiche leichter wiederfinden zu können. Die Topografien werden direkt neben diesen Löchern aufgezeichnet.

Um die für dieses Messobjekt nutzbaren Messpositionen abzuschätzen, werden die theoretischen Erkenntnisse zu den winkelabhängigen Limits aus Abschnitt 2.1.3 zusammen mit den Demonstratorparametern aus Abschnitt 3.1 verwendet. Abbildung 4.4 zeigt das daraus resultierende vom LSWLI-Demonstrator nutzbare Messfenster (graue Fläche) für verschiedene Scanfadradien, wobei der Radius der Probe aus Abbildung 4.3 schwarz gestrichelt markiert ist.

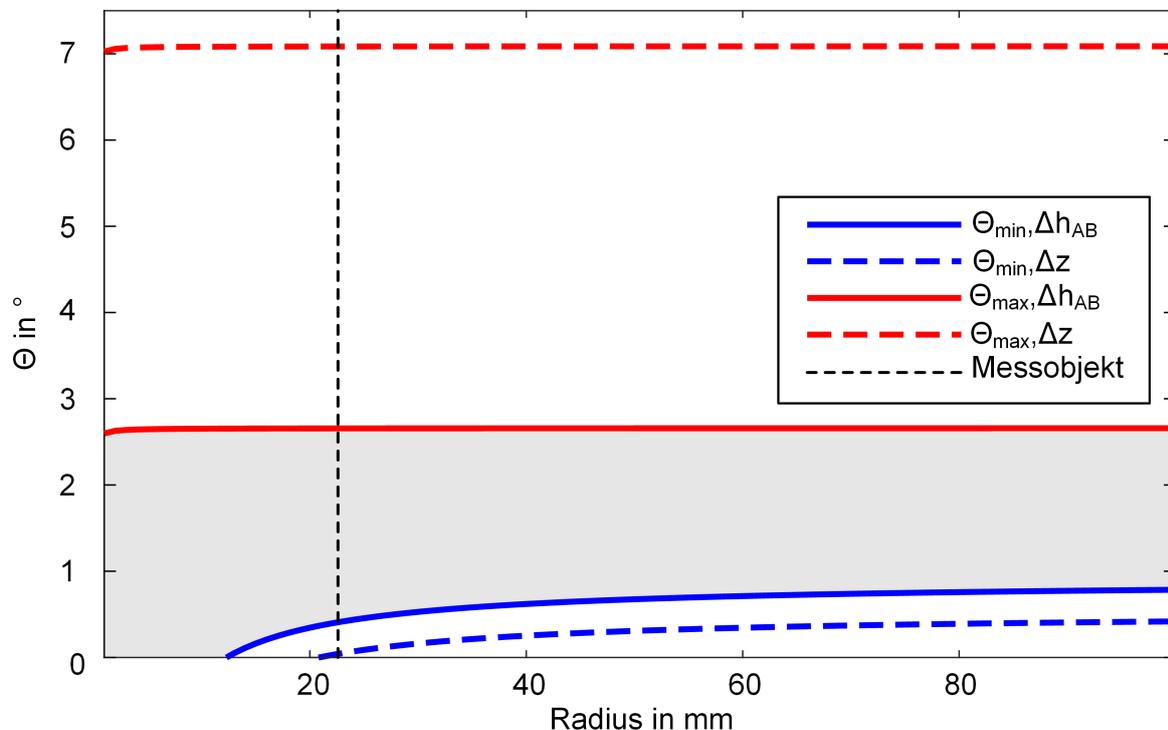


Abbildung 4.4: Minimale und maximale Scanfadwinkel, die zur Messung der Probe genutzt werden können (durchgezogene Linien) und die Grenzen des LSWLI (gestrichelte Linien). Die schwarze gestrichelte Linie gibt den Radius des untersuchten Probekörpers an. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Die demonstratorspezifischen Ober- und Untergrenzen der Tangentenwinkel entsprechend der Gleichungen 2.13 und 2.15 sind als gestrichelte Linien dargestellt. Für diesen Aufbau und den Probenradius von $22,6 \text{ mm}$ beträgt die untere Grenze $\Theta_{\min, \Delta z} = 0,07^\circ$ und die obere Grenze $\Theta_{\max, \Delta z} = 7,09^\circ$. Die minimalen und maximalen Tangentenwinkel, die erforderlich sind, um einen Höhenmessbereich von $6 \mu\text{m}$ mit einer Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ gemäß den Gleichungen 2.12 und 2.14 zu erreichen, sind als durchgezogene Linien dargestellt und betragen für die Probe $\Theta_{\min, \Delta h_{AB}} = 0,45^\circ$ und $\Theta_{\max, \Delta h_{AB}} = 2,66^\circ$. Die minimalen und maximalen Tangentenwinkel liegen innerhalb der demonstratorspezifischen Grenzen, sodass

die gewünschte Auflösung und der Messbereich mit der verwendeten Messkonfiguration erreicht werden kann.

Um den Einfluss der Tangentenwinkel auf das Messergebnis zu untersuchen, wird derselbe Bereich der Probenoberfläche mit fünf verschiedenen Messpositionen mit darunterliegenden Scanpfadwinkeln zwischen $0,2^\circ$ und 4° gemessen (Messpositionen A-E). Dies wird erreicht, indem die Betrachtungsposition des LSWLI in Bezug auf den Scheitelpunkt in x -Richtung verschoben wird. Da sich dabei der z -Abstand ändert, wird der Fokus entsprechend angepasst, vgl. Abbildung 3.2 zur mechanischen Einstellung der Messposition. Die Messpositionen sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Zu beachten ist, dass die Messposition E ($\Theta \approx 4^\circ$) die gewählte obere, probenabhängige Tangentenwinkelgrenze nach 2.14 sogar überschreitet. Folglich ist der Messbereich für Messreihe E erweitert, wobei die geforderte Messauflösung allerdings nicht mehr erreicht wird.

Tabelle 4.1: Messpositionen A-E und ihr Abstand zum Scheitelpunkt des Scanpfads.

Messposition	A	B	C	D	E
Abstand zum Scheitelpunkt in μm	250	450	600	750	1600

Die aus den Messungen an den Messpositionen A-E resultierenden Topografien werden unter Verwendung der Methoden aus den Abschnitten 3.1.2.3 und 3.1.2.4 berechnet. Ein einzelnes Oberflächenprofil jeder LSWLI-Messreihe zusammen mit den VSWLI-Referenzdaten ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

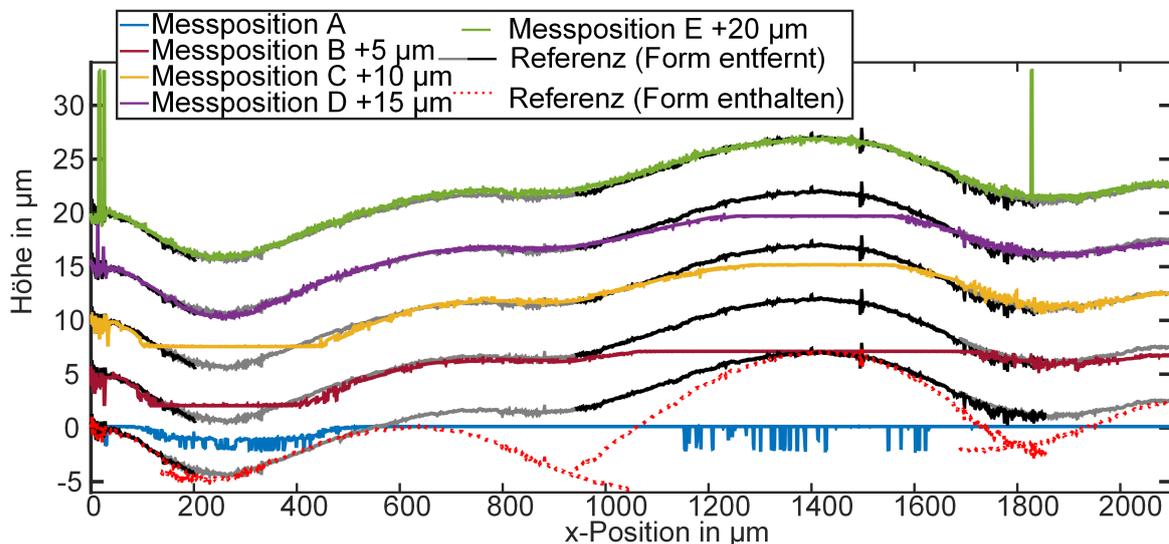


Abbildung 4.5: Profillinien der Messungen an den Messpositionen A-E und der Referenzmessungen. Die Profile sind zur besseren Sichtbarkeit vertikal versetzt. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Die gemessenen LSWLI-Höhenprofile sind manuell horizontal zueinander ausgerichtet und zur besseren Übersicht vertikal versetzt worden. Das Referenzprofil besteht aus vier einzelnen VSWLI-Topografiemessungen, die manuell gesticht und an die LSWLI-Messungen ausgerichtet wurden. In Abbildung 4.5 sind drei Hauptunterschiede zwischen VSWLI- und LSWLI-Topografien auszumachen:

- Die VSWLI-Referenzmessung enthält ursprünglich die zylindrische Form (gestrichelte rote Linie), die im Post-Processing auf der Grundlage des angegebenen Radius der Probe numerisch entfernt werden musste. Im Gegensatz zur VSWLI-Messung enthält die mit LSWLI aufgenommene Oberflächentopografie von vornherein nicht die globale zylindrische Form, denn die resultierenden LSWLI Profile sind eine Abwicklung der Oberfläche des vom Scanfad umrundeten Zylinders.
- Eine Betrachtung des VSWLI-Referenzprofils (abwechselnd grau-schwarze durchgezogene Linie) in Abbildung 4.5 offenbart Stitching-Artefakte an den x -Positionen $x = 200\mu\text{m}$, $x = 900\mu\text{m}$ und $x = 1800\mu\text{m}$, da die Referenzmessungen nicht perfekt zueinander ausgerichtet sind. Die LSWLI-Topografien weisen solche Artefakte nicht auf, da sie während eines einzigen Messscans erfasst wurden.
- Die VSWLI hat eine feste vertikale Auflösung und ihr Höhenmessbereich ist nur durch den Hub des axialen Scanning-Mechanismus begrenzt, wohingegen bei der LSWLI ein Kompromiss zwischen Messbereich und Auflösung eingegangen werden muss, da beide von der Größe des FOV und den Scanfadwinkeln abhängen.

Die fünf Messpositionen A-E zeigen den Einfluss des Kompromisses zwischen Messbereich und Auflösung auf die Topografiemessung. Mit Messposition A wurden die wenigsten Oberflächenstrukturen aufgenommen, da der Messbereich zu klein ist, um alle Strukturen der Probe zu erfassen. Die Messposition E ergibt den größten Höhenmessbereich, und kann so fast alle Oberflächenstrukturen erfassen, ohne Spitzenhöhen abzuschneiden.

Während mit Messposition D das erste Tal bei $x = 300\mu\text{m}$, im Gegensatz zu den Messpositionen A-C, vollständig aufgenommen wird, kann die Erhöhung bei $x = 1500\mu\text{m}$ nicht erfasst werden, welcher wiederum von Messposition C etwas vollständiger aufgenommen wird. Die Messbereiche der Messpositionen sind nicht ideal zueinander zentriert, was auch Tabelle 4.2 zu entnehmen ist.

Die durch Sensorgröße und lokale Tangentenwinkel gegebenen physischen Ausdehnungen der Messbereiche werden in Tabelle 4.2 mit den tatsächlich beobachteten Messbereichen der fünf Messpositionen A-E verglichen. Zusätzlich wird der Bereich der möglichen physikalischen Auflösung bei jeder Messung angegeben. Zu beachten ist, dass für die Referenzmessung der theoretische Messbereich dem gesamten nutzbaren Hub des z -Antriebs entspricht und dass die gemessenen Höhen des Objektes hier als Höhenbereich deklariert werden. Die genannte physische Auflösung der Referenzmessung entspricht dem vertikalen Scanschritt des VSWLI.

Tabelle 4.2: Theoretisch mögliche und praktisch genutzte Messbereiche sowie physische Auflösungen der Messpositionen A-E und der VSWLI Referenzmessung

Messposition	theo. Messbereich, μm	prakt. Messbereich, μm	phys. Auflösung, nm
A	3,086	2,151	0,83 - 9,63
B	5,992	5,639	4,85 - 13,87
C	9,019	8,396	9,62 - 18,57
D	13,300	12,410	15,98 - 25,59
E	26,269	24,211	36,31 - 45,83
Referenz	300	12,107	66,5

Die tatsächlich vorliegenden Messbereiche sind bei allen Messungen kleiner als die theoretisch erreichbaren Messbereiche. Dies lässt sich anhand der tatsächlichen Position der z_{OPD} -Ebene erklären. Wenn sie nicht so positioniert ist, dass die mittlere Höhe der Messobjektoberfläche die z_{OPD} -Ebene in der Mitte des Messbereichs (= der Mitte des FOVs) schneidet, geht ein Teil des Messbereichs verloren. In den Bildstapeln zeigt sich das darin, dass die Interferenzregion nicht innerhalb der FOV-Ränder hin- und her driftet, sondern das FOV über einen Rand hinausgehend verlässt.

Wenn die Bereiche, in denen die Oberfläche die z_{OPD} -Ebene schneidet, während der Messung das FOV auf einer Seite verlassen (vgl. Messposition A oben in Abbildung 4.5), zeigt sich dies im Messergebnis als Plateau, wie bei allen Messpositionen außer der Messposition E an den x -Positionen zwischen ca. 1200 μm und 1600 μm zu sehen. Messposition E ist die einzige, deren Höhenmessbereich mit 26,27 μm deutlich größer ist als der Höhenbereich des Objekts (12,107 μm). Das Messobjekt hätte auch mit Messposition D vollständig erfasst werden können, wenn bei ihr die Ausrichtung der z_{OPD} -Ebene optimiert worden wäre. Bei der Messvorbereitung muss also nicht nur ein geeigneter Abstand zum Scheitelpunkt gewählt werden. Um den beschränkten Höhenmessbereich der LSWLI-Methode optimal auszunutzen, muss zudem der Höhenmessbereich so auf die Objektoberfläche ausgerichtet werden, dass möglichst alle Höhenänderungen der Oberfläche im Höhenmessbereich erfasst werden können.

Die physischen Auflösungen werden mit den zunehmenden lokalen Tangentenwinkeln von A zu E größer. Die feinere Auflösung entspricht der Seite des FOV, die näher am Scheitelpunkt liegt, die gröbere Auflösung der vom Scheitelpunkt entfernten Seite. Mit der nahen FOV-Seite der Messung A wird sogar eine Sub-Nanometer-Auflösung erreicht. Die erreichte Auflösung ist prinzipiell ausreichend, da kommerzielle VSWLIs Algorithmen verwenden, die mit physikalischen Auflösungen von $\lambda/8 \approx 66,5$ nm arbeiten. Die Verarbeitung dieser Aufnahmen mit fortschrittlichen Interpolations- und Fit-Algorithmen ermöglicht es, Topografieauflösungen und -unsicherheiten im Sub-Nanometerbereich zu erreichen. Diese Anforderungen an die physische Auflösung kann rein von der Qualität der aufgenommenen Daten sogar mit der Messung E erfüllt werden.

Im Hinblick auf die Steigungen der Profile an den Rändern der jeweiligen Höhenmessbereiche ist ein Unterschied zwischen den entfernteren Messpositionen (zwischen 1000 μm und 1800 μm Scheitelpunktsabstand) und näheren Messpositionen (zwischen 100 μm und

500 μm Scheitelpunktsabstand) festzustellen: An den unteren Rändern werden die Profile im Vergleich zur Referenz steiler, während sie an den oberen Rändern flacher werden. Dieser Effekt ist auf die nicht-äquidistante Abtastung der Höhen im gesamten FOV zurückzuführen. Am Ende des FOV, wo die steileren Winkel während der Messung vorhanden sind, ist die Abtastung nicht so fein wie am anderen Ende. Wenn Oberflächenpunkte durch den Algorithmus zur Auswertung des Korrelogramms den Pixeln am steilen Rand des FOV zugewiesen werden, werden sie grob aufgelöst, was zu einem stufenförmigen Erscheinungsbild führt. Der gegenteilige Effekt tritt am anderen Rand des FOV auf, wo die Abtastung feiner ist, was wiederum einen flacheren Gradienten zwischen den Oberflächenpunkten verursacht, die diesem Rand zugeordnet sind. Zusätzlich zu den korrekt ausgewerteten Punkten an den Rändern des FOV gibt es auch Oberflächenpunkte, die fälschlicherweise den Rändern zugeordnet sind; diese sind in der Abbildung als Spitzen sichtbar.

Die Oberflächendetails der Messreihen D und E werden miteinander und mit der VSWLI-Referenz verglichen, um den Einfluss der Messposition auf die Auflösung der Topografiemessung zu untersuchen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Messposition D wurde gewählt, weil sie die Oberflächentopografie mit der größten Ähnlichkeit zur VSWLI-Referenz erfasst. Die Messposition E wurde gewählt, weil sie einen Extremfall hinsichtlich der an ihrer Messposition vorhandenen Winkel darstellt, welche sogar den maximalen Winkel, der in Abbildung 4.4 als Auflösungslimit markiert ist, hinausgeht. Die Scanrichtung der LSWLI-Messungen ist von links nach rechts. Der ausgewählte Bereich enthält mehrere für die Blechfertigung spezifische Strukturen wie die horizontalen Streckmarken und einen auffälligen faltigen Bereich in der rechten unteren Ecke der Detailtopografien, die beide darauf hinweisen, dass die Walzrichtung des Metalls ebenfalls in x -Richtung verlief.

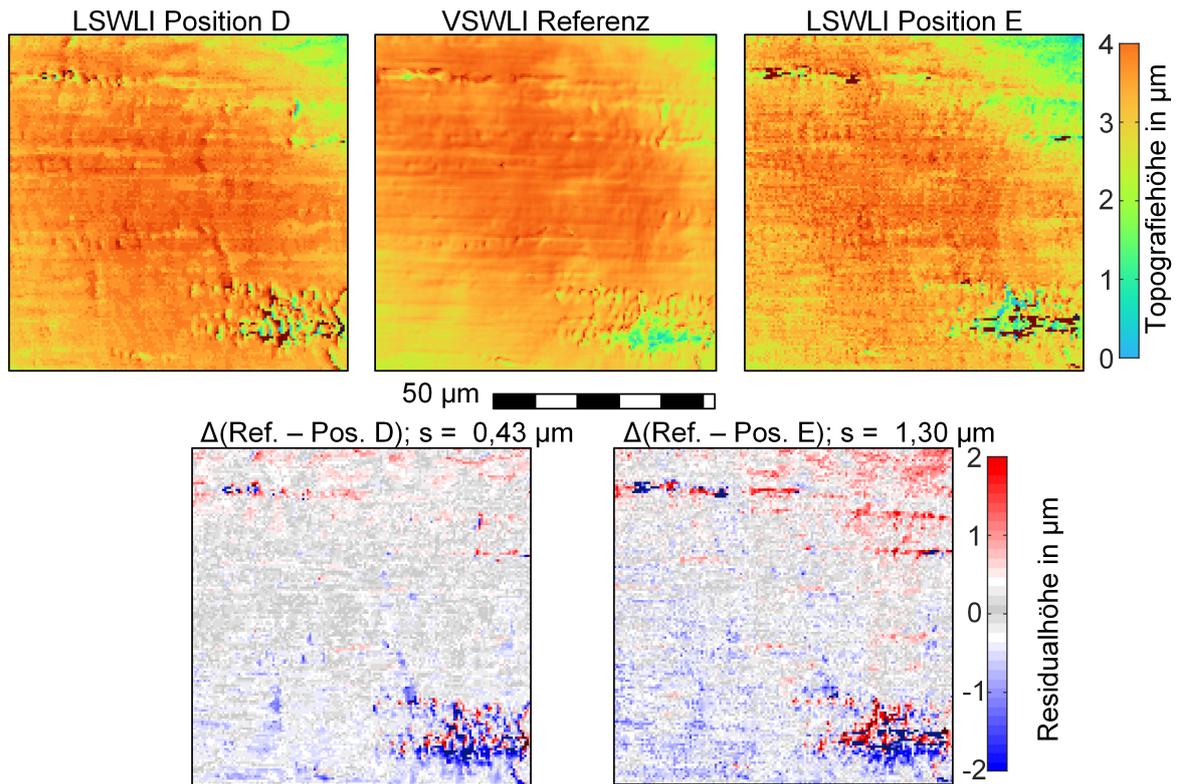


Abbildung 4.6: Oben: Detail der Oberflächentopografien aus den LSWLI-Messpositionen D und E und der VSWLI-Referenz. Unten: Residualhöhe nach Subtraktion der LSWLI-Messungen von der VSWLI-Referenz. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

Während mit Messposition D ein Topografiemessergebnis entstand, das viele der gleichen Merkmale aufweist, die auch in der Referenz zu sehen sind, sind die Merkmale aus Messposition E schwieriger zu erkennen. Wenn jede LSWLI-Topografie von der Referenz subtrahiert wird, erhält man die Residualhöhen, welche unten in Abbildung 4.6 gezeigt werden. Mit den Standardabweichungen dieser Residualhöhen wird quantifiziert, wie gut die Messungen mit der Referenz übereinstimmen. Die Topografie aus Messposition D ($s = 0,43 \mu\text{m}$) hat nur etwa ein Drittel der Standardabweichung des Residuums der Topografie aus Messposition E ($s = 1,30 \mu\text{m}$). Dies deutet darauf hin, dass die Auflösung einer LSWLI-Topografie mit zunehmendem Abstand zum Scheitelpunkt abnimmt, was mit den theoretischen Überlegungen in Abschnitt 2.1.3 übereinstimmt.

Der Unterschied in der räumlichen Auflösung der LSWLI-Messungen und der Referenz kann mit der unterschiedlichen Hardware zwischen dem kommerziellen VSWLI und dem LSWLI im Versuchsstadium erklärt werden. Da das Referenz-VSWLI über einen viel größeren Kamerasensor und einen 0,5-fachen Tubus verfügt, kann ein $20\times$ Objektiv verwendet werden und so eine feinere laterale Auflösung erzielt werden als mit dem $10\times$ Objektiv des experimentellen LSWLI Aufbaus (VSWLI: $0,48 \mu\text{m}$ vs. LSWLI: $0,557 \mu\text{m}$). Um die Residualhöhen durch Subtraktion berechnen zu können, müssen die LSWLI- und die VSWLI-Topografien auf die gleiche Größe resamplet werden und anschließend passgenau zueinander ausgerichtet werden. Die Ausrichtungsunsicherheit in der X-Y-Ebene wird mit $\pm 0,5$ Pixel abgeschätzt. Die Ausrichtung erfolgte durch manuelle Eingabe der Ausrichtungskoordinaten zur Minimierung der Residualhöhen.

Als weiterer Grund für die Abweichungen zwischen LSWLI und VSWLI-Referenz ist die Auswertalgorithmik anzuführen. Die LSWLI-Topografien wurden für diese Untersuchungen nur grob aus den Indizes der Hüllkurvenmaxima gebildet, während die VSWLI-Referenztopografie mit feineren Algorithmen berechnet wurde, bei denen nicht nur Fitting-Methoden zur genaueren Lokalisation der Maxima verwendet, sondern auch die Phase des Interferenzsignals in die Berechnung miteinbezogen wird. Trotz der groben Auswertung konnten bereits Sub-Mikrometer Höhenmessunsicherheiten erreicht werden. Dies zeigt, dass auch mit simplen Auswertalgorithmen valide Topografien gemessen werden können, wenn die Aufnahme der Korrelogramme mit einem für die Messaufgabe geeigneten Scanpfad mit einer möglichst feinen Höhenabtastung und einem möglichst großen Messbereich erfolgt.

Die Ziele dieser Untersuchungen waren die Validierung des rotatorischen Scanmodus und Demonstration des Einflusses der Messposition, dessen Verhalten in in Abschnitt 2.1.3 erläutert wird. Diese Ziele konnten erreicht werden; der rotatorische LSWLI-Modus wird als validiert betrachtet.

4.2.2 Validierung der lokalen Winkelauswertung

Zur Validierung des Ansatzes zur Bestimmung der lokalen Scanpfadtangentenwinkel aus den Messdaten nach Munteanus Methode (siehe Abschnitt 3.1.2.4 mit der Erweiterung für gekrümmte Scanpfade werden die lokalen Winkel, welche für die Topografieberechnung für die Messpositionen A-E verwendet wurden zur Berechnung des Messobjektradius verwendet.

Die für die Methode benötigten lokalen Korrelogrammfrequenzen werden durch eine CWT-Analyse bestimmt. Bei jeder Messposition A-E wird derselbe Bereich der Probenoberfläche aufgenommen, nur die Betrachtungsposition ist geändert, was zu unterschiedlichen Winkeln unter dem FOV durch die gekrümmten Scanpfade führt. Um die Winkelauswertung mit der lokalen Frequenzanalyse per CWT für die Anwendung auf gekrümmten Oberflächen zu validieren, werden die Tangentenwinkel in Abbildung 4.7 gegen den Abstand der Messposition zum Scheitelpunkt aufgetragen.

Die Tangentenwinkel werden nach Gleichung 2.5 berechnet. Die dargestellten Winkel wurden auf Basis der Mittelwerte von 3300 Korrelogrammen pro Messposition berechnet. Der resultierende 2σ -Unsicherheitsintervall der Daten ist jeweils als hellgraue Fläche dargestellt. Im Allgemeinen werden die Unsicherheiten kleiner, je näher die Messposition am Scheitelpunkt liegt. Die durchgezogene graue Linie zeigt den Zusammenhang zwischen Tangentenwinkel und Scheitelpunktabstand für den Nennradius des Messobjekts von $r = 22,58$ mm. Ein linearer Fit durch alle Messdaten (gepunktete schwarze Linie) ergibt einen Radius von $r = 22,8$ mm ($R^2 = 0,9987$). Der Radius wird mit dem Mittelwert über alle Positionen x von $r = x / \sin(\Theta(x))$ berechnet. Die hohe Güte des Fits ist ein Indikator dafür, dass tatsächlich derselbe Bereich der Probe an allen Messpositionen aufgenommen wird und dass die Drehbewegung bei jeder Messung sehr ähnlich abläuft. Die Abweichung zwischen dem nominalen und dem beobachteten Radius ist auch auf lokale Oberflächenmerkmale, wie Welligkeit, und/oder eine exzentrische Drehung der Messobjektoberfläche aufgrund einer nicht ideal-konzentrischen Montage auf den Rotationstisch zurückzuführen,

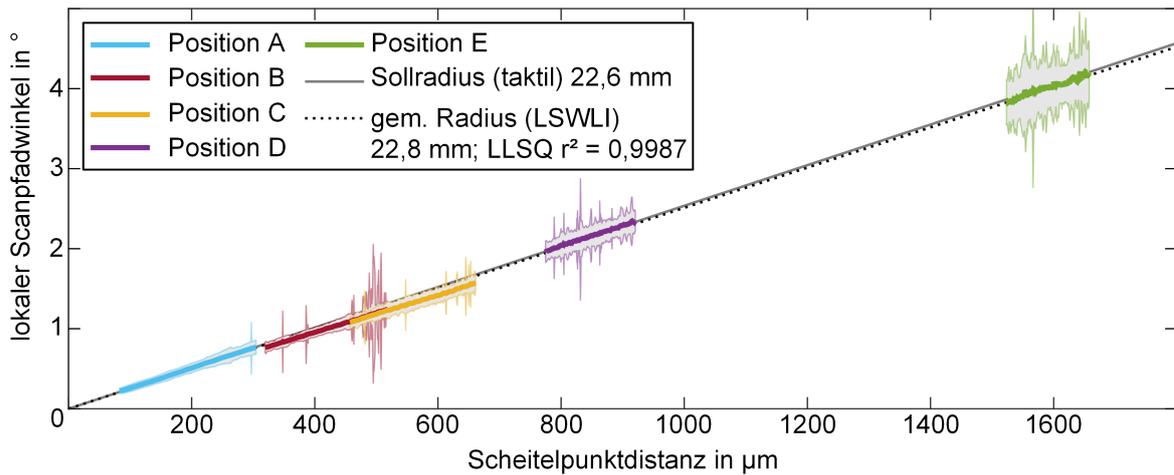


Abbildung 4.7: Winkel und Absolutdistanzen zum Scheitelpunkt des Scanpfads bei den Messpositionen A-E. Gestrichelte Linie: Nomineller Radius. Gepunktete Linie: Aus LSWLI-Messungen berechneter Radius. Graue Flächen: 2σ -Unsicherheitsintervall. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [39].

da während des Scannens eine seitliche Bewegung der Interferenzstreifen im FOV beobachtet wurde.

Radien werden in der Regel anhand von Koordinatenmessdaten einer vollständigen Drehung des Werkstücks berechnet. In Anbetracht der Tatsache, dass in diesem Fall nur etwa eine zusammenhängende Spur von 2 mm des Gesamtumfangs von 142 mm, also nur 1,4 %, zur Berechnung des Radius verwendet werden, ist das Ergebnis als plausibel zu werten. Zudem ist die Radiusberechnung aus den Winkelinformationen eine erste, rudimentäre Anwendung von LSWLI-Daten zur Bestimmung einer makrogeometrischen Objekteigenschaft, nämlich dem Radius.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird die Verwendung von Munteanus Methode mit CWT-basierter lokaler Frequenz-Analyse zur Bewertung der für rotatorische LSWLI-Topografien erforderlichen Tangentenwinkel als valide angesehen. Die erhaltenen linearen Fits der Winkel für jede der Messpositionen A-E wurden zur Berechnung der Topografien der aufgezzeichneten Regionen verwendet. Die sich daraus ergebenden Topografien wurden in Abschnitt 4.2.1 vorgestellt und diskutiert.

4.2.3 Validierung der DSC-Verschiebungsmessung

Die erreichbaren Messunsicherheiten des integrierten DSC-Systems werden experimentell bestimmt. Zunächst wird das DSC-System alleine, ohne WLI Beleuchtung, auf einem Piezolinientisch mit hoher Positionierwiederholbarkeit gemessen. Anschließend erfolgt eine Validierungsmessung mit WLI Beleuchtung zur Eignung des DSC-Ansatzes für LSWLI-Topografiemessungen.

Für diese Messungen wird das in Abbildung 4.8 gezeigte Messobjekt verwendet. Bei dem Messobjekt für die experimentelle Validierung handelt es sich um einen Abschnitt eines linearen Encoderstreifens, der auf einer aus Aluminium gefrästen Zylindersektion befestigt ist. Inklusive der Dicke des Encoderstreifens ergibt sich ein Oberflächenradius von 65,3 mm. Die Topografie wurde mit einem handelsüblichen VSWLI referenziert. Die Oberfläche des

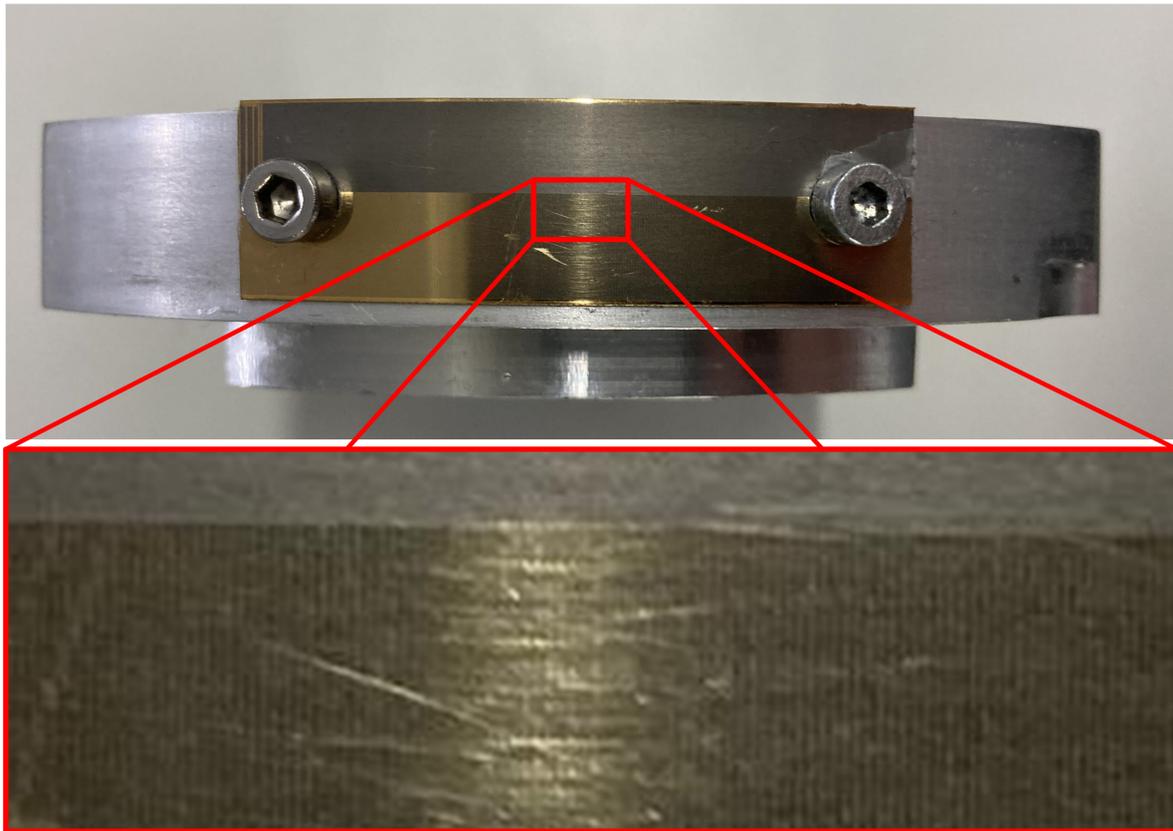


Abbildung 4.8: Messobjekt für die Analyse des integrierten DSC-Verschiebungsmesssystems. Der aufgespannte Blechstreifen entstammt einem optischen Linearencodersystem. In der Detailaufnahme sind die abwechselnd hellen und dunklen Streifen (Periodenlänge $100\ \mu\text{m}$) zu erkennen. Der nominelle Radius der Oberfläche beträgt $65,3\ \text{mm}$.

Encoderstreifens besteht aus abwechselnd glatten und rauen Bereichen, die durch einen Ätzprozess hergestellt wurden. Der Encoderstreifen wurde gewählt, weil seine glatten Bereiche den Oberflächen ähneln, für die das LSWLI verwendet werden soll, wie z. B. gewalzte Bleche und den dazugehörigen Walzwerkzeugen. Der Wechsel zwischen glatten und rauen Bereichen ermöglicht eine einfache visuelle Bestätigung, dass die Verschiebung korrekt gemessen und in die Auswertung einbezogen wurde.

4.2.3.1 Validierung der DSC-Verschiebungsmessung bei reinen Verschiebungsmessungen

Bevor das DSC-Messsystem als Hilfsmittel für eine tatsächliche LSWLI-Topografiemessung verwendet wird, werden seine Fähigkeiten durch eigenständige Verschiebungsmessungen auf einem Piezolineartisch mit einer linearen Positionierwiederholbarkeit von $\pm 1\ \text{nm}$ getestet. Der Aufbau des LSWLI-Systems ist identisch zum Aufbau für Topografiemessungen, lediglich die WLI-Beleuchtung ist ausgeschaltet. Der Objektstisch wird in 50 Positionen mit einer Sollverschiebung von einem Pixel ($557\ \text{nm}$) bewegt. An jeder Position werden 100 DSC-Bilder aufgenommen, um den Einfluss von Vibrationen auf die gemessene Verschiebung statistisch durch Mittelung zu reduzieren.

Aus den aufgezeichneten 5000 Bildern werden 100 Verschiebungsmessungen synthetisiert, wobei eine Messreihe aus einer resultierenden Verschiebung für jede der 50 Positionen

besteht. Die Sollverschiebung, der für alle Bewegungen 1 Pixel beträgt, wurde von allen gemessenen Verschiebungen subtrahiert, was die Verschiebungsabweichung für jede einzelne Messung ergab. Ausreißer werden mit einem Ausreißer-Entfernungs-Algorithmus, der den Grubbs-Test anwendet (basierend auf [69]), herausgefiltert. Anschließend wird die Standardabweichung der Verschiebungsabweichung berechnet, die der empirischen Messunsicherheit des DSC-Verschiebungsmesssystems entspricht. Die Messunsicherheit wurde zu $u(x_{\text{Messung}}) = 0,02$ Pixel bestimmt, was unter Verwendung der Pixelgröße und dem Abbildungsmaßstab der Optik $u(x_{\text{Messung}}) = 11,14$ nm entspricht. Die im Experiment erreichte Unsicherheit scheint gering, ist aber plausibel, da die für die Korrelation verwendeten Auswertefenster eine große Größe von 1200×100 Pixeln haben, was eine hohe Anzahl korrelierbarer Speckledaten zur Berechnung statistisch fundierter Verschiebungswerte liefert. Unter der Annahme, dass bei dem Validierungsexperiment kein Einfluss von $u(x_{\text{Bewegung}})$ vorhanden ist, liegt die Messunsicherheit des integrierten DSC-Systems somit unterhalb der in Abschnitt 4.1 nach Simulationsergebnissen festgelegten Unsicherheitsgrenze, um die für rotatorische LSWLI-Messungen bei allen simulierten Scheitelpunktabständen zu erfüllen.

Für Topografiemessungen wird das Messobjekt mit einem Rotationstisch (PI L-611 [60]) bewegt, dessen unidirektionale Wiederholbarkeit schlechter ist als die des Piezolineartisches. Aus diesem Grund unterliegt der Messscan sowohl $u(x_{\text{mess}})$ als auch $u(x_{\text{motion}})$. Die Bewegungsunsicherheit erhöht sich zusätzlich, wenn das Objekt nicht perfekt zentriert montiert ist, was zu einer unbekanntem exzentrischen Bewegung der beobachteten Oberfläche führt. Außerdem enthält die Objektoberfläche Formabweichungen wie z. B. Welligkeit, die eine scheinbare Abweichung der Umfangsgeschwindigkeit aufgrund lokaler Änderungen des Objektradius verursacht. Die gemessenen mittleren Verschiebungen betragen $0,9748$ Pixel/Bild in x -Richtung und $0,003$ Pixel/Bild in y -Richtung. Da die y -Verschiebung weit unter der Auflösung sowohl des DSC-Systems als auch des Algorithmus zur Rekonstruktion des Korrelogramms liegt, wird sie für diese Studie als vernachlässigbar angesehen. Die Standardabweichung der Verschiebungsmessungen für 3000 Bilder, die für die Topografiemessungen aufgenommen wurden, ist mit einem Wert von $0,26$ Pixeln mehr als zehnmal größer als die Unsicherheit, die im Test auf dem Piezolineartisch ermittelt wurde. Da die Beleuchtungsbedingungen des DSC-ROI bei beiden DSC-Messungen gleich sind, kann diese erhöhte Verschiebungsunsicherheit der rotatorischen LSWLI-Messung hauptsächlich auf den Einfluss der Bewegungsunsicherheit $u(x_{\text{motion}})$ zurückgeführt werden. Entsprechend der Simulationsergebnisse zur Bewegungsabhängigkeit der Höhenunsicherheit in Abschnitt 4.1 ist aufgrund der Bewegungsunsicherheit trotz der als gut zu bewerteten Verschiebungsmessung mit einer Höhenunsicherheit zu rechnen, welche oberhalb der in Abbildung 4.2 markierten Grenzen liegt.

Ein Vergleich der DSC-Verschiebungsdaten mit den Verschiebungsdaten, die aus den übermittelten Winkelinkrementen aus dem Rotationsencoder des Rotationstisches berechnet werden können, ist in Abbildung 4.9 gezeigt.

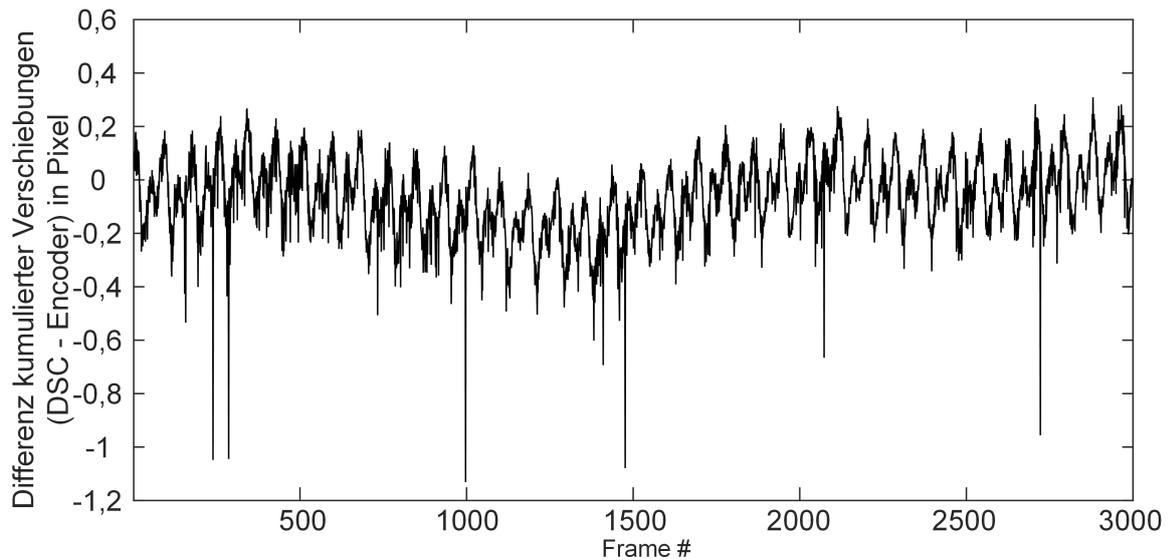


Abbildung 4.9: Differenz der kumulierten Verschiebungen zwischen DSC- und Encodermessung über eine 3000 Bilder lange LSWLI-Messung.

Die Verschiebungsdaten aus der DSC-Messung liegen, bedingt durch die Auswertung von Bildern des Messobjektes, automatisch in der korrekten Skalierung, Pixel im LSWLI Bildmaßstab, vor. Während also die DSC-Verschiebungen direkt an die Auswertepipeline weitergegeben werden können, ist für die gleiche Weiterverwendung der Encoder-Verschiebungsdaten ein Umrechnungsschritt nötig, welcher eine weitere Unsicherheit in das Messsystem einbringt. Der Rotationsencoder liefert die absoluten Rotationswinkel im Bezugssystem des Rotationstisches, welche noch in Pixel umgerechnet werden müssen. Hierzu wird der Radius des Scanpfads benötigt und die Projektion der Rotationsbewegung auf die Kameraebene. In der Praxis ist der Radius nur im Mittel für das ganze Messobjekt bekannt. Ist das Objekt nicht perfekt zylindrisch oder ist nicht konzentrisch zur Rotationsachse eingespannt, so wird mit dem Radius eine falsche Verschiebung berechnet werden. Für die in Abbildung 4.9 gezeigte Verschiebungsdifferenz wurden die Winkelinformationen des Encoders mit Hilfe der mittleren DSC-Verschiebungen in Pixel umgerechnet, um einen Vergleich überhaupt zu ermöglichen. Diese Skalierungsmethode für das Encodersystem setzt also ein weiteres Verschiebungsmesssystem voraus, wohingegen das DSC-System unabhängig von externen Skalierungsfaktoren funktioniert.

Aufgrund der Skalierung der Encoderdaten sind in Abbildung 4.9 keine systematischen Abweichungen in Form von Offsets zu erkennen. Allerdings schwankt die Verschiebungsdifferenz sehr gleichmäßig um Null. Dieses Schwingen ist Triggerabweichungen zuzuschreiben. Die Kameratriggerung und die Encoderabfragen wurden mit einem seriellen Skript ausgeführt, sodass die Bildaufnahmen und die Encodermessungen immer etwas zeitversetzt zueinander durchgeführt wurden. Das Durchlaufen der Schleifeniterationen, in denen Bildtriggerung und Encoderabfrage durchgeführt werden, erfolgt nicht mit einer konstanten Laufzeit. Dadurch ist der Zeitversatz zwischen Encoder- und DSC-Aufnahme nicht konstant, was eine weitere Erklärung für die Schwankungen ist. Gemäß Aufnahmeskript wird sowohl direkt vor als auch direkt nach der Bildaufnahme eine Encoderabfrage durchgeführt. Der Verlauf des Verschiebungsdifferenzgraphen ist mit beiden Encoderabfragen

qualitativ gleich, weshalb an dieser Stelle auf die redundante Darstellung mit beiden Graphen verzichtet wird. Dieser durch die serielle Programmierung entstandene Effekt verdeutlicht eine weitere Stärke des integrierten DSC-Messsystems gegenüber Systemen des Stands der Technik, wie dem Encodersystem, nämlich eine perfekte Synchronizität zwischen Verschiebungsmessung und LSWLI-Aufnahme.

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, dass das DSC-Verschiebungsmesssystem laterale Bewegungen mit einer geringen Unsicherheit von 0,02 Pixeln bzw. 11,14 nm messen kann. Es misst die Verschiebungen dort, wo auch die WLI-Daten aufgenommen werden, und seine Daten liegen ohne Umrechnungsschritt in der richtigen Skalierung zur WLI vor. Zudem misst es die Verschiebungen synchron zu den WLI-Daten. All diese Punkte zeigen, dass das integrierte DSC-Verschiebungsmesssystem eine valide Quelle von Verschiebungsdaten für LSWLI-Messungen darstellt.

4.2.3.2 Validierung des DSC-Verschiebungsmesssystems bei Topografiemessungen

Um den Einfluss der Verschiebungsdaten auf die Berechnung der Topografie zu zeigen, werden die Aufnahmen des LSWLIROI mit den DSC-Verschiebungsdaten und den in Verschiebung umgerechneten Rotationswinkeldaten aus dem Rotationsencoder ausgewertet. Die Topografien werden jeweils mit den gleichen Einstellungen gemäß den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden ausgewertet.

Abbildung 4.10 zeigt oben links die Topografie, die anhand der DSC-Verschiebungsmessung berechnet wurde, oben rechts die selbe Topografie, die mit Daten des Rotationsencoders berechnet wurde, und unten die Topografie desselben Objektausschnitts, die mit einem VSWLI mit 50x-Objektiv als Referenzmessung aufgenommen wurde. Man beachte, dass die in Abbildung 4.10 gezeigte VSWLI-Topografie ohne Stitching aufgenommen wurde. Für die Darstellung der Referenzmessung wurde die Krümmung der Oberfläche des zylindrischen Messobjektes vom VSWLI-Ergebnis subtrahiert. Die Krümmung wurde durch einen parabolischen Fit über ein gemittelttes Profil in Scanrichtung entfernt. Zusätzlich wurden alle LSWLI- und VSWLI-Messungen durch einen linearen Fit über gemittelte Profile in x - und y -Richtung nivelliert.

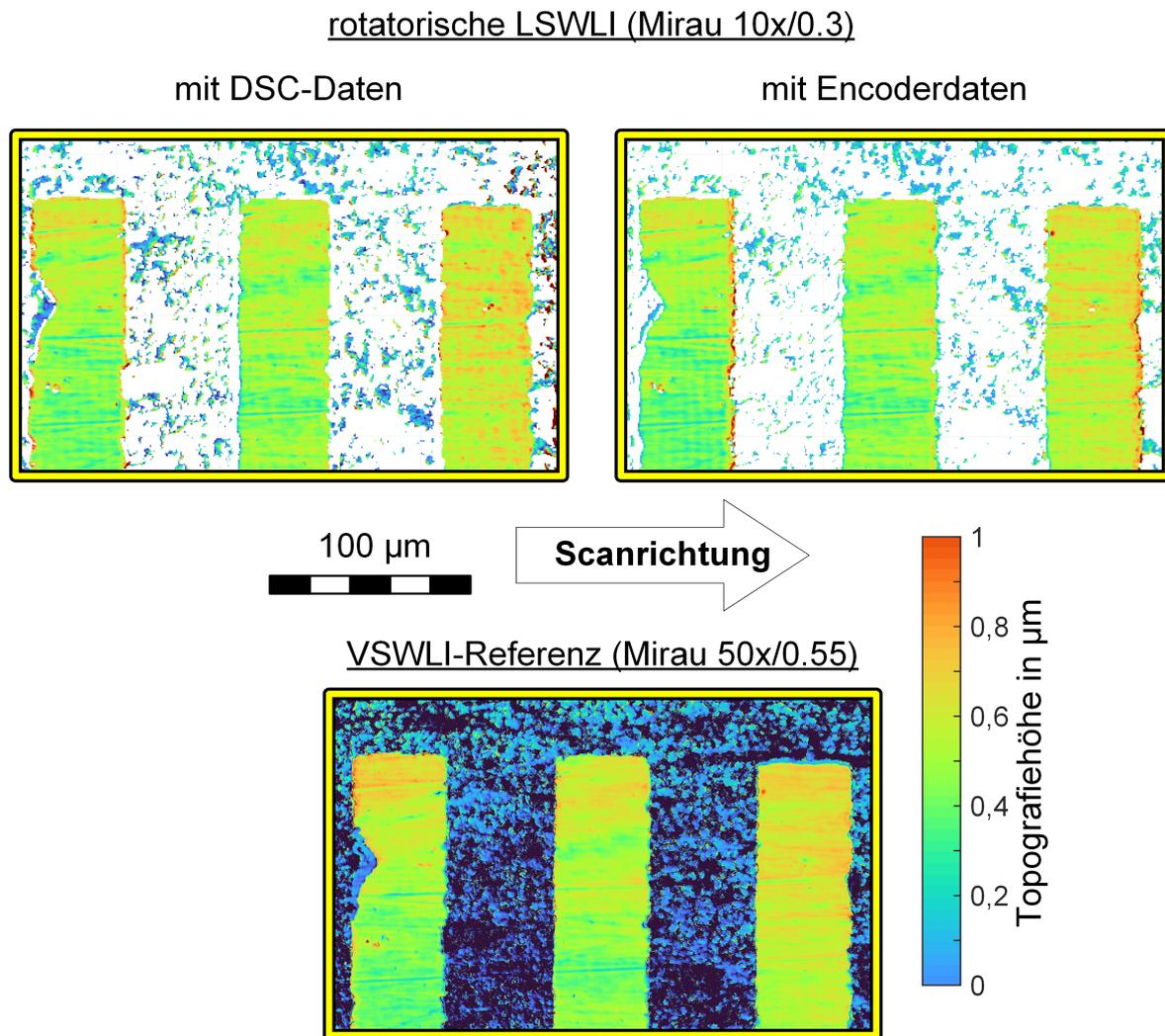


Abbildung 4.10: Berechnete Topografien. Oben links: Rotatorische LSWLI mit DSC-Verschiebung. Oben rechts: Rotatorische LSWLI mit Encoderverschiebung. unten: VSWLI Referenzmessung. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Behrends et al. 2020 [53].

In allen resultierenden Topografien sind die charakteristischen Merkmale des Messobjekts sichtbar. Die Objektoberfläche besteht aus glatten Streifen, welche von einem rauen Bereich umgeben sind, der durch einen Ätzprozess hergestellt wurde. Während die VSWLI sowohl den rauen als auch den glatten Teil erfassen kann, liefert die LSWLI nur für den glatten Teil Topografiedaten. Dies ist auf die unterschiedlichen Messbereiche der beiden Messgeräte zurückzuführen. Das VSWLI hat einen vertikalen Messbereich von einigen hundert µm und kann beide Oberflächenteile erfassen. Das LSWLI hatte in diesem Experiment einen Höhenmessbereich von etwa 15 µm und konnte daher nur die glatten Bereiche erfassen und nicht die tieferliegenden geätzten Strukturen. Es gibt dennoch vereinzelte Stellen in den rauen Bereichen der Oberfläche, die ausgewertet werden konnten. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Bereiche, die während des Ätzvorgangs nicht so stark abgetragen wurden. Diese kleinen Regionen im rauen Bereich des Objekts zeichnen sich durch ihre steilen Kanten aus. Steile Kanten stellen eine Herausforderung für die WLI-Auswertung dar, da weniger Licht in die WLI-Optik zurückgestreut und so das Korrelogrammsignal schwächer wird. Für Oberflächenpunkte an diesen Kanten ist es daher besonders wichtig, eine gerin-

ge Verschiebungsunsicherheit zu haben, um trotz der geringeren Lichtintensitäten, die von diesen Regionen empfangen werden, auswertbare Korrelogramme rekonstruieren zu können. Der visuelle Vergleich der beiden LSWLI Auswertungen zeigt, dass es mit den DSC-Verschiebungsdaten möglich ist, mehr Topografiedaten aus den Bereichen mit schwacher Signalstärke zu berechnen. Die Vorteile zeigen sich an der größeren Fläche des rauen Bereiches, der bei der DSC-Auswertung mit Topografiedaten gefüllt werden konnte. Ein weiteres Merkmal ist die Kerbe beim linken glatten Streifen, welcher bei der DSC-Auswertung ebenfalls ausgefüllter ist als bei der Encoderauswertung.

Schließlich wird die LSWLI-Topografie, welche mittels der DSC-Verschiebungsdaten berechnet wurde, quantitativ mit einer VSWLI-Referenzmessung verglichen, um die erzielte Höhenmessunsicherheit zu bewerten. Als Maß für die Übereinstimmung der Ergebnisse wird die Standardabweichung der Höhendifferenzen zwischen dem LSWLI-Ergebnis und der VSWLI-Referenz auf den drei in Abbildung 4.10 sichtbaren glatten Streifen berechnet. Zusätzlich werden die Standardabweichungen, als Ersatzgröße für den Oberflächenrauheitsparameter S_q , für acht der glatten Streifen berechnet, die mit dem LSWLI mit seinem 10x/0.3 Objektiv und dem VSWLI mit einem 10x/0.3 und einem 50x/0.55 Objektiv aufgenommen wurden. Bei 50x wurde die Topografie mit einer Überlappung von 40 % gestitcht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Standardabweichungen der Höhendifferenzen zwischen der LSWLI-Topografie und der VSWLI-Referenztopografie. Die Standardabweichung jeder Topografie für sich genommen wird als Kennzahl für die Oberflächenrauheit angegeben.

Höhendifferenz	$s(\Delta h_{AB})$ in nm
LSWLI - Referenz	37,5
Oberflächenrauheit	S_q in nm
LSWLI	$55,9 \pm 5,3$
Referenz 50x/0.55	$57,5 \pm 6,9$
Referenz 10x/0.3	$52,5 \pm 10,7$

Die LSWLI-Messung wurde etwa 1,2 mm vom Scheitelpunkt des Scanpfads entfernt durchgeführt, was, wie in Abschnitt 4.1 per Monte-Carlo Simulation ermittelt, zu einer Höhenunsicherheit von ca. $u(h_{AB}) \approx 23$ nm führen sollte. Allerdings wurde für die in den Experimenten gemessene Topografie anhand der Höhendifferenzen zwischen der rotatorischen LSWLI-Messung und einer VSWLI-Referenzmessung der selben Oberfläche eine durch die Standardabweichung angenäherte Höhenunsicherheit von $u(\Delta h_{AB}) = 37,5$ nm bestimmt, welche durch manuelles Ausrichten der beiden Topografien zueinander erreicht wurde.

Die experimentell erreichte Topografiemessunsicherheit ist somit 14,5 nm bzw. rund 1,6-fach größer als von der Monte-Carlo Simulation vorhergesagt. Es wurden vier Gründe identifiziert, warum die experimentelle Höhenunsicherheit höher ist als von der Simulation vorausgesagt.

- Die VSWLI-Referenz wurde mit einem 50x/0.55-Objektiv an einem 0.5x-Tubus aufgenommen, während die LSWLI-Messung mit einem 10x/0.3-Objektiv an einem 1x-Tubus durchgeführt wurde. Obwohl die Referenztopografie für den Vergleich mit der

LSWLI basierten Topografie heruntergerechnet werden musste, wurden ihre Rohdaten mit einer höheren lateralen Auflösung abgetastet und haben daher eine bessere Abbildung kleiner Oberflächenmerkmale ($< 1 \mu\text{m}$ Durchmesser) und steiler Kanten gegenüber den LSWLI-Daten, was sich auf die Berechnung der Topografie auswirkt. Für den Vergleich selbst wurden die beiden Topografien manuell mit einer Abweichung $\pm 0,5$ Pixel ausgerichtet, die durch die Auflösung der beiden Pixelraster verbleibt. Durch ein optimiertes Resampling der VSWLI-Referenztopografie auf die gleiche Abbildungsgröße der LSWLI-Topografie könnte die Abweichung weiter verringert werden.

- Die Aufnahmeperspektiven des LSWLI und des VSWLI unterscheiden sich. Das LSWLI zeichnet die Oberfläche des rotierenden Objekts 1,2 mm vom Scheitelpunkt des Scanpfads entfernt auf, was bedeutet, dass die Oberfläche in einem Winkelbereich von ca. $0,9^\circ - 1,4^\circ$ beobachtet wird. Die sich ergebende Topografie des rotierenden LSWLI ist eine Abwicklung der Manteloberfläche der Probe, die keine Krümmung aufweist, sondern nur die Welligkeit und Rauheit der originalen Oberfläche. Das VSWLI hingegen zeichnete an einer festen Position direkt über dem Scheitelpunkt des Objektes auf. Aufgrund der Krümmung der Oberfläche wird die Topografie einschließlich der zylindrischen Form des Objekts aufgezeichnet, die numerisch entfernt werden muss, was zu Abweichungen in der resultierenden VSWLI-Topografie führen kann.
- Die im Experiment gemessene Oberfläche ist nicht ideal glatt, wie in der Simulation angenommen. Die Einflüsse von Rauheit, Welligkeit und anderen Abweichungen von der idealen Zylinderform wurden in der Simulation nicht berücksichtigt.
- Die VSWLI-Topografie wurde mit einem fertig entwickelten, kommerziellen Messsystem gemessen und nicht mit einem LSWLI im Versuchsstadium. Das fertige VSWLI-System ist aktiv schwingungsgedämpft und es gibt durch den Einsatz eines präzisen Objektivscanantriebs kaum Einflüsse von ungewollten Bewegungen auf die Messunsicherheit. Die Auswertesoftware des VSWLIs berücksichtigt zudem nicht nur die Hüllkurve der Korrelogramme sondern auch die Phaseninformationen der Korrelogramme, was die Topografiemessunsicherheit verringern kann.

Die oben erwähnten Vergleichbarkeitsprobleme der rotatorischen LSWLI-Topografie mit der VSWLI-Referenztopografie können eine Erklärung dafür sein, dass die Höhenunsicherheit schlechter ist als aus der Simulation abgeschätzt. Die ermittelte experimentelle Unsicherheit von $u(\Delta h_{AB}) = 37,5 \text{ nm}$ der LSWLI-Messung aus dem Vergleich mit der VSWLI-Referenz liegt dennoch unterhalb der berechneten Rauheitswerte, welche in der Größenordnung von 55 nm sind. Dies lässt den Schluss zu, dass die LSWLI für Rauheitsmessungen auf dieser Art von Oberfläche verwendet werden kann. Ein weiteres Indiz für die Anwendbarkeit des LSWLI-Systems für diese Art von glatter Oberfläche ist, dass sich die Konfidenzintervalle der LSWLI- und der beiden VSWLI-Messungen, die bei unterschiedlichen Vergrößerungen vorgenommen wurden, überschneiden.

Die erreichte Höhenunsicherheit von $u(h_{AB})_{\text{real}} < 40 \text{ nm}$ kann für ein LSWLI im Entwicklungsstadium an einem realen Objekt mit Unvollkommenheiten (z. B. Welligkeit oder

Rauheit), die in den Simulationen nicht berücksichtigt wurden, als Erfolg gewertet werden. Der Ansatz des in die Optik des WLIs integrierten DSC-Verschiebungsmesssystems zur Befähigung des LSWLI-Demonstrators zu von externen Informationen unabhängigen Topografiemessungen auf rotierenden, zylindrischen Oberflächen wird damit als valide betrachtet.

4.2.3.3 Einfluss der Schrittweite auf Korrelogramme

Mit Unterstützung des DSC-Verschiebungsmesssystems lassen sich anhand echter Messdaten Aussagen über den Einfluss der Scanschrittweite auf die Korrelogrammauswertbarkeit machen. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Schrittweite auf die Verschiebungsmessung, sowie die Korrelogrammbildung und -auswertung auswirkt.

Die Untersuchungen dieses Einflusses erfolgen anhand eines LSWLI-Bildstapels, welcher mit einer hohen Abtastrate aufgenommen wurde und bei dem mit dem integrierten DSC-System die Verschiebung gemessen wurde. Es handelt sich um den Bildstapel mit 5674 Einzelbildern, welcher auch für Abschnitt 4.2.3.2 verwendet wurde. Der Bildstapel wurde mit konstanter (bzw. vernachlässigbar gering schwankender) Rotationsgeschwindigkeit und Bildrate aufgenommen, so dass pro Bild die Oberfläche um 1 Pixel in Scanrichtung weiter verschoben wurde. Bei diesem Bildstapel konnte eine Standardabweichung der Verschiebungen von 0,26 Pixeln festgestellt werden, wie in Abschnitt 4.2.3.1 beschrieben. Wegen der gleichmäßigen Verschiebung kann die Abtastschrittweite virtuell variiert werden, indem gezielt Bilder übersprungen werden. Da die Daten für alle Schrittweitenvariationen aus dem selben Rohdatensatz generiert wurden, ist eine Vergleichbarkeit der Variationen gegeben.

Zunächst wird der Einfluss der Abtastschrittweite auf die Auswertung der DSC-Verschiebungsmessung untersucht. Hierzu wird für alle Schrittweitenvariationen die Verschiebung zwischen den für die jeweiligen Variationen verwendeten Bildern aus den darin enthaltenen Speckle-ROIs berechnet. Hierzu werden die Einzelverschiebungen der Schrittweitenvariationen verglichen mit der entsprechenden Summe der Verschiebungen der vollen Abtastung, welche die gleichen Start- und Zielbilder haben, wie die Variationen. Beispiel: Die berechnete Verschiebung von Bild 1 direkt auf Bild 10 wird verglichen mit der Summe der Verschiebungen von Bild 1 zu Bild 2, zu Bild 3,..., zu Bild 10. Die Ergebnisse der DSC-Auswertung bei dieser Untersuchung sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

Dargestellt ist die mittlere Verschiebungsabweichung der Verschiebungsvariationen von der Vollabtastung mit Schrittweite 1. Die mittleren Abweichungen bleiben im betrachteten Bereich bis zu einer Schrittweite von 100 Bildern unterhalb von 0,1 Pixeln. Die Standardabweichung der Schrittweitenvariationen steigt an von 0,0053 Pixeln bei Schrittweite 2 zu 0,04 Pixeln bei Schrittweite 100. In Abschnitt 4.2.3.1 konnte gezeigt werden, dass die Messunsicherheit der DSC-Methode mit 0,02 Pixeln gering ist. Wird nun angenommen, dass die Messunsicherheit der Methode im betrachteten Bereich unabhängig von der zu messenden Verschiebung so gering ist, steigt die Unsicherheit bei der Schrittweitenvariation hauptsächlich dadurch an, dass sich die Abweichungen der Vollabtastung aufsummieren, was bei größerer Schrittweite nicht der Fall ist, da dort nur eine Messung für die größeren Schritte gemacht wird. Der Einfluss der Bildauswahl ist vernachlässigbar, da die Wahl anderer Bil-

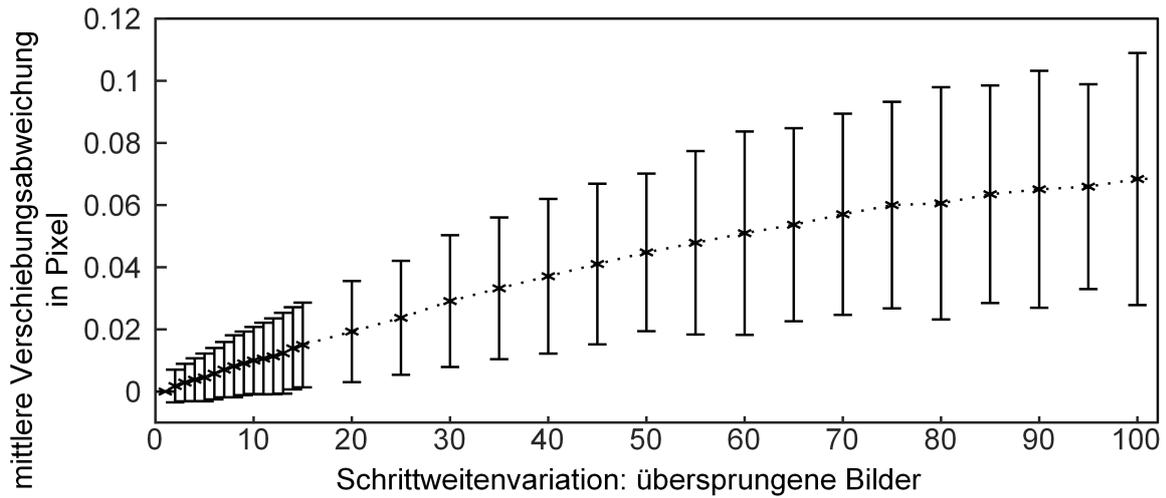


Abbildung 4.11: Einfluss der Abtastweiten auf die Verschiebungsmessung. Mittlere Verschiebungsabweichung der Schrittweitenvariationen von Schrittweite 1 (Vollabtastung) mit Standardabweichungen. Die Untersuchung basiert auf einem Bildstapel mit 5674 Einzelbildern mit einer Sollverschiebung von 1 Pixel pro Bild.

der des Stapels (durch Änderung des Startbildes) zu fast identisch verlaufenden Graphen führt, wodurch diese Systematik korrigierbar wäre.

Der Einfluss der Schrittweite und damit der Verschiebung zwischen Aufnahmen auf die Verschiebungsmessung ist also insgesamt als gering zu bewerten, da der Einfluss geringer ist als die Verschiebungsschwankungen, welche durch ungleichmäßige Bewegungen verursacht wird. Die Verschiebungen werden genutzt, um aus den Bilddaten Korrelogramme zu generieren und den Einfluss der Schrittweite auf die Korrelogramme zu untersuchen. In Abbildung 4.12 sind für den Bildstapel repräsentative Korrelogramme des selben Oberflächenpunktes bei variierten Schrittweiten dargestellt.

Auf der linken Ordinate sind die Intensitätswerte der rohen Korrelogrammsignale und der Hüllkurven aufgetragen. Auf der rechten Ordinate sind die lokalen Korrelogrammfrequenzen aufgetragen. Als ergänzende Information sind in Tabelle 4.4 die den Korrelogrammen zugehörigen Maximumspositionen, die dort vorliegenden lokalen Scanpfadwinkel und der daraus zusammengesetzt nach Gleichung 2.10 berechneten Höhe des Oberflächenpunktes zusammengetragen.

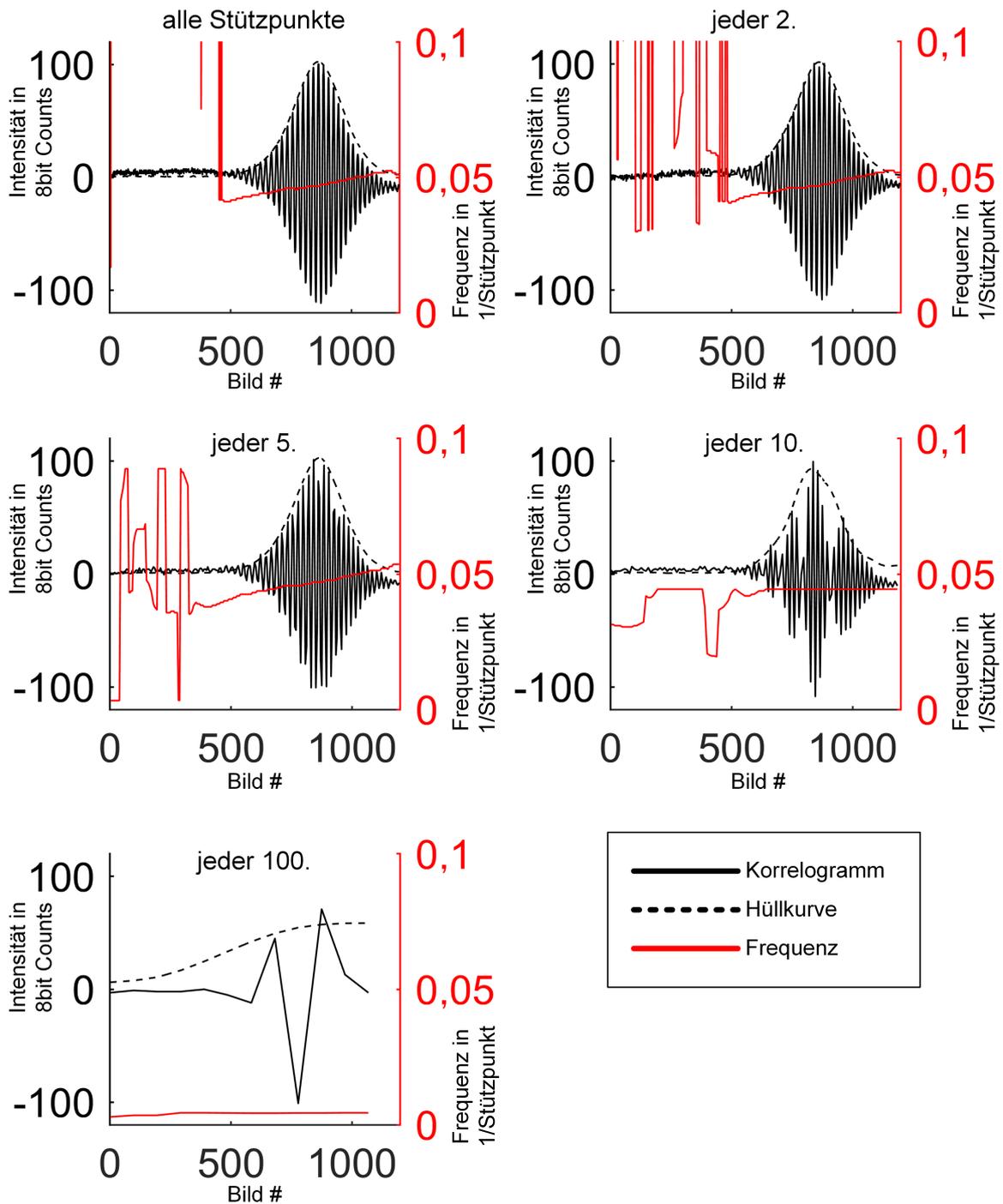


Abbildung 4.12: Einfluss der Abtastweiten auf die Korrelogramme. Die fünf Graphen zeigen fünf Variationen, welche durch Auslassen von Stützpunkten eines eng abgetasteten Korrelogramms gebildet wurden. Das Auslassen von Stützpunkten entspricht einer Erhöhung der Abtastweite des Scans. Die Abszisse gibt die Stützpunkt # an, welche fest den Stützpunkten des vollständig abgetasteten Korrelogramms (oben links) zugeordnet sind. Bei den Korrelogrammen mit erhöhter Abtastweite sind die übersprungenen Stützpunkt # freigelassen. An den linken, schwarzen Ordinaten sind die Intensitäten der mittelwertfreien Korrelogramme (durchgezogene Linien) und Hüllkurven (gestrichelte Linien) aufgetragen. Auf den rechten, roten Ordinaten sind die lokalen Frequenzen der Korrelogramme aufgetragen, welche mit einer CWT-Analyse berechnet wurden.

Tabelle 4.4: Auswerteergebnisse eines Korrelogramms bei variiertem Schrittweite. Maximumsposition bezogen auf die Sensorgröße in Scanrichtung (1200 Pixel). Frequenz umgerechnet in Vollabtastung. Höhendifferenz bezogen auf die geringste Schrittweite.

Abtastweite	1	2	5	10	100
Maximumsposition #	889,544	890,174	893,375	876,618	1169,698
Maximumswinkel Θ_B in $^\circ$	1,2809	1,2806	1,2766	1,1997	0,1200
Höhendifferenz in nm	—	16,60	185,69	-743,24	8154,97

Wie in Abbildung 4.12 die mit ansteigender Schrittweite zunehmende Degeneration des Signals zu sehen ist, ist auch in der Tabelle in den Auswerte(-zwischen-)ergebnissen eine stetig steigende Abweichung von den Ergebnissen der Vollabtastung zu beobachten. Bei einer Schrittweite von 2 Bildern, also bei Nutzung der Hälfte des Datensatzes, liegt die Abweichung von der Vollabtastung im zweistelligen Nanometerbereich. Bei einer Schrittweite von 5 Bildern hat sich die Abweichung gegenüber der Schrittweite von 2 Bildern mehr als verzehnfacht. Ab der Abtastweite von 5 Bildern sind Signalartefakte in Form von fehlenden Signalspitzen aufgrund von Unterabtastung zu erkennen. Dennoch konnten Hüllkurven und Frequenzen aus dem Signal generiert werden, welche sich zumindest qualitativ von den geringeren Abtastweiten wenig unterscheiden. Bei einem breiteren Interferenzmuster, beispielsweise bei einem flacheren Scanpfadwinkelbereich, wäre die Höhenabweichung geringer, allerdings auch der Messbereich kleiner. Jenseits der Abtastweite von 10 Pixeln, was bei diesem Signal über der Abtastgrenze nach Nyquist liegt (die Periodenlänge der Interferenz ist hier nur 2 Stützpunkte lang), ist eine sinnvolle Höhenauswertung nicht mehr möglich. Zwar kann noch immer eine qualitativ zum Signal passende Hüllkurve bestimmt werden, plausible Frequenzen können aufgrund der Unterabtastung jedoch nicht mehr bestimmt werden. Sie werden als konstant ausgegeben, da die Frequenzänderung geringer als die Abtastweite ist. Die Frequenzbestimmung kann damit als Flaschenhals der Topografiemessung ohne externe Hilfsmessungen angesehen werden. Wenn auch die Verschiebungen bei einer Schrittweite von 100 Bildern noch verlässlich bestimmt werden konnten, so werden die Korrelogramme stark unterabgetastet.

Es ist also eine Mindestabtastung erforderlich um Korrelogramme für eine Höhenauswertung mit geringer Unsicherheit aufzunehmen. Die Wahl der Mindestabtastrate sollte sich an der höchsten Korrelogrammfrequenz orientieren. Gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem sollte die Abtastrate also mindestens das Doppelte der höchsten Korrelogrammfrequenz betragen. Bei den in dieser Arbeit im Labor aufgenommenen Korrelogrammen liegt die Abtastung in der Größenordnung von ca. 20 Stützpunkten pro Periode.

Dieser Bedarf an Stützpunkten erweist sich als Problem bei LSWLI-Messungen bei hohen Messobjektgeschwindigkeiten. Nimmt man als Grenze für die auswertbaren Verschiebungen 5 Pixel pro Stützpunkt an, was für die Verschiebungsmessung kein Problem darstellt, so wäre mit dem verwendeten Setup mit 165 Hz Aufnahmezeit bei einer Messobjektgeschwindigkeit von rund $460 \mu\text{m s}^{-1}$ keine Topografiemessung mehr möglich. Aus diesem Grund wird bei hohen Messobjektgeschwindigkeiten der entkoppelte Scanmodus verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.2.1).

5 Anwendungsszenarien

In Kapitel 4 wurde gezeigt, dass das LSWLI-Demonstratormesssystem in der Lage ist, unter Laborbedingungen auf rotierenden, zylindrischen Messobjekten Topografien zu messen. In diesem Kapitel wird nun anhand von anwendungsnahen Beispielen untersucht, wie gut das Demonstratormesssystem an kontinuierlich rotierenden Objekten wie Kugellagerinnenringen und Dressierwalzen messen kann. Hierbei wird auch untersucht, wie sich in der industriellen Umgebung auftretende Einflüsse auf die Topografiemessungen auswirken. Dazu werden in dieser Arbeit insbesondere unpräzise bzw. unbekannte Scanbewegungen, sowie Vibrationen und Erschütterungen betrachtet.

5.1 Rotierende Wälzlager

Ein Forschungsgebiet, welches sich mit kontinuierlichen Topografiemessungen an rotierenden Objekten eröffnet, ist die Untersuchung von Verschleißmechanismen von rotierenden Bauteilen wie Wälzlagern oder Verzahnungen. Durch eine zeitlich und örtlich hochaufgelöste, flächenhafte, kontinuierliche Messung der beanspruchten Oberflächen können Verschleißmechanismen bereits in frühen Stadien erkannt werden. Dieses Wissen kann zur Optimierung der Bauteile hinsichtlich Lebensdauer und Materialeinsatz genutzt werden. Bislang werden derartige Verschleißuntersuchungen nach dem Prozess durchgeführt [70].

Im Folgenden wird die Machbarkeit einer theoretisch unendlich langen, kontinuierlichen Messung untersucht. Die Messung an einem Wälzlager dient zunächst der Demonstration der Machbarkeit kontinuierlicher Messungen in einer kontrollierten Laborumgebung ohne Störeinflüsse. Eine Voraussetzung für die geplanten Endlosmessungen ist ein dauerhaft im Messbereich des LSWLI befindliches Messobjekt. Das Messobjekt muss daher sowohl sehr zylindrisch sein, als auch sehr konzentrisch zur Drehachse des Rotationstisches eingespannt werden. Da der vertikale Messbereich des LSWLIs im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ bis $30\ \mu\text{m}$ liegt, wird für diese Machbarkeitsstudie ein Kugellagerinnenring verwendet, welcher aufgrund enger Fertigungstoleranzen sehr zylindrisch ist, wodurch sehr lange Scans bis zum vollständigen Umlauf ermöglicht werden, und welcher sich einfach mit Hilfe eines Dreibackenfußers auf den Rotationstisch montieren lässt. Zudem wurde ein Wälzlager gewählt, da es sich um ein relevantes Bauteil für den Maschinenbau handelt, an dem weiterhin geforscht wird [71]. In Abbildung 5.1 ist ein auf den Rotationstisch montierter Kugellagerinnenring abgebildet. Der Innenring stammt aus einem SKF 6209 Rillenkugellager mit einem Innenringschulterdurchmesser von $57,6\ \text{mm}$ [72]. Gemessen wurde in der Mitte der Kugelbahn, wo der Durchmesser $52,5\ \text{mm}$ beträgt. Das Kugellager war gebraucht und wurde zersägt, um an den Innenring zu gelangen.

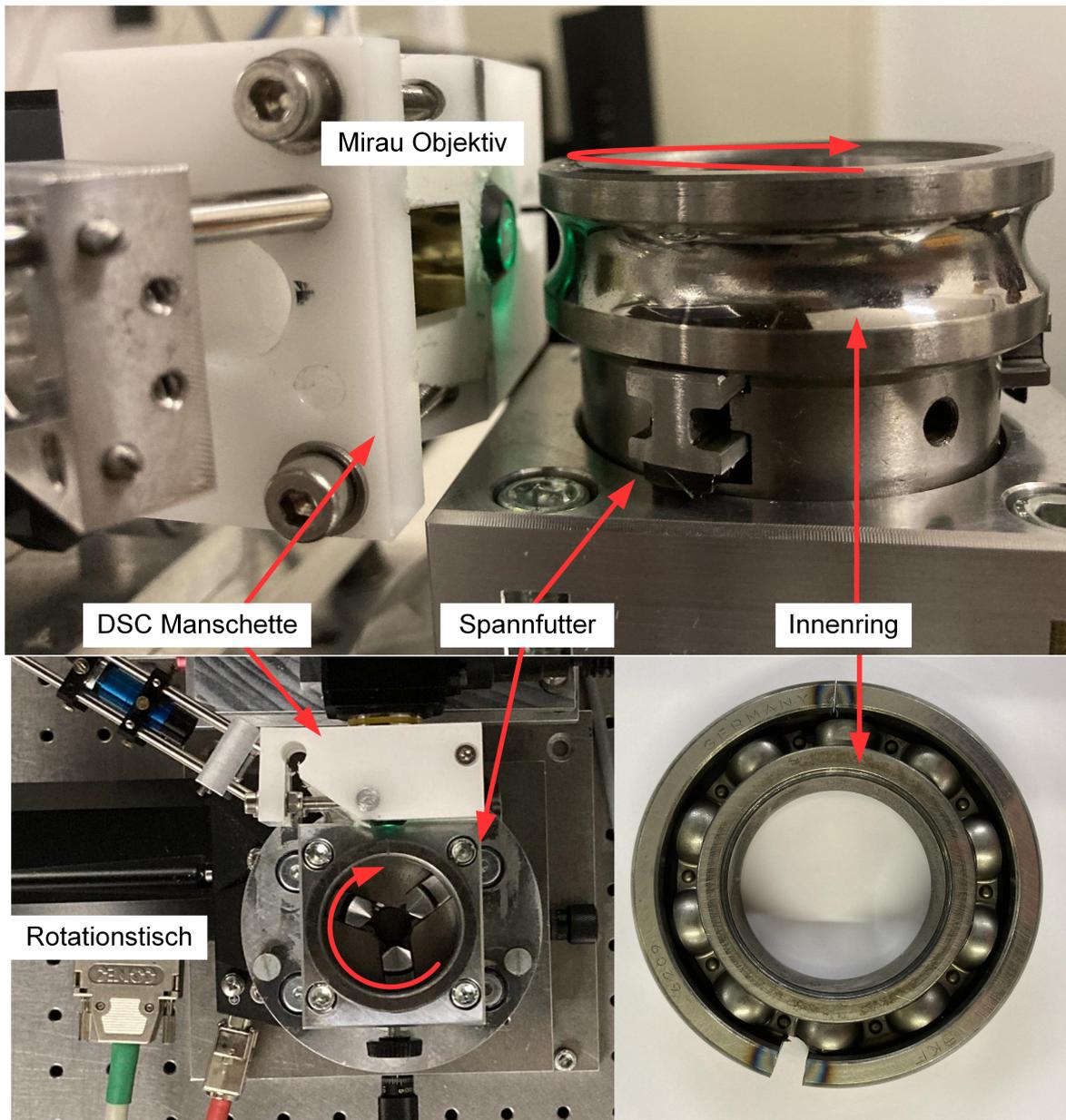


Abbildung 5.1: Mit Hilfe eines Dreibackenfutters auf den PI L611 Rotationstisch montierter Kugellagerinnenring zum Test von Endlosmessungen. Oben: Die Seitenansicht zeigt die Öffnung des Objektivs, welches auf die Rille des Innenrings gerichtet ist. Um das Objektiv ist die DSC-Manschette gelegt. Unten links: Obenansicht. An der DSC-Manschette ist der DSC-Laser mit Linienoptik befestigt, der auf den Innenring gerichtet ist. Der Innenring ist mit einem Drei-Backen-Spannfutter auf den Rotationstisch gespannt. Unten rechts: Der Innenring wurde aus einem ausgemusterten SKF-6209 Rillenkugellager ausgebaut.

Die konzentrische Ausrichtung des Messobjektes erfolgt von Hand. Eine Möglichkeit zum automatischen Nachjustieren während der Messung, sodass sich das Messobjekt trotz imperfekter Ausrichtung dauerhaft im Messbereich des WLI befindet, wurde nicht realisiert.

Die Messung eines vollständigen Umlaufs des Innenrings wurde mit einer Sollverschiebung von 5 Pixel pro Bild bei kontinuierlicher Rotation und einer Bildaufnahme rate von 10 Hz durchgeführt. Die Verschiebungsdaten des DSC-Systems sind in Abbildung 5.2 dargestellt. Die beiden Graphen zeigen jeweils die differentielle (Bild-für-Bild) und kumulative Verschiebung; Oben in Scanrichtung, unten quer zur Scanrichtung. Den Daten lässt sich ent-

nehmen, dass die Rotation des Messobjektes gleichmäßig vollzogen wurde. Die mittleren Verschiebungen und deren Standardabweichungen sind in Scanrichtung $5,1 \pm 1,04$ Pixel und quer zur Scanrichtung $0,071 \pm 0,018$ Pixel. Es gibt nur zwei auffällige Abweichungen bei den Bildindizes 10000 und 55770. Die Abweichungen erstrecken sich über nur diese einzelnen Bilder. Da die Abweichungen zudem in beiden mit DSC beobachteten Richtungen auftreten, handelt es sich bei den Quellen der Abweichungen um Ereignisse, die während der Messung auftraten und nicht um Auswertartefakte. Der erste Sprung ist mit ± 20 Pixeln nicht sehr ausgeprägt und in den Rohbildern kaum wahrnehmbar. Der zweite größere Sprung ist allerdings beim Betrachten der Rohbilder mit bloßem Auge zu erkennen. Die Messung hatte an diesen Stellen vermutlich einen Aussetzer in Bewegung oder Aufnahme. Ein physischer Schlag auf oder in der Nähe des Messsetups ist wahrscheinlich nicht die Ursache, da selbst kurze Schläge länger im Messsystem nachschwingen und nicht innerhalb nur eines Bildes (also begrenzt auf 0,1 s bei 10 Hz Aufnahmezeit) zu beobachten wären.

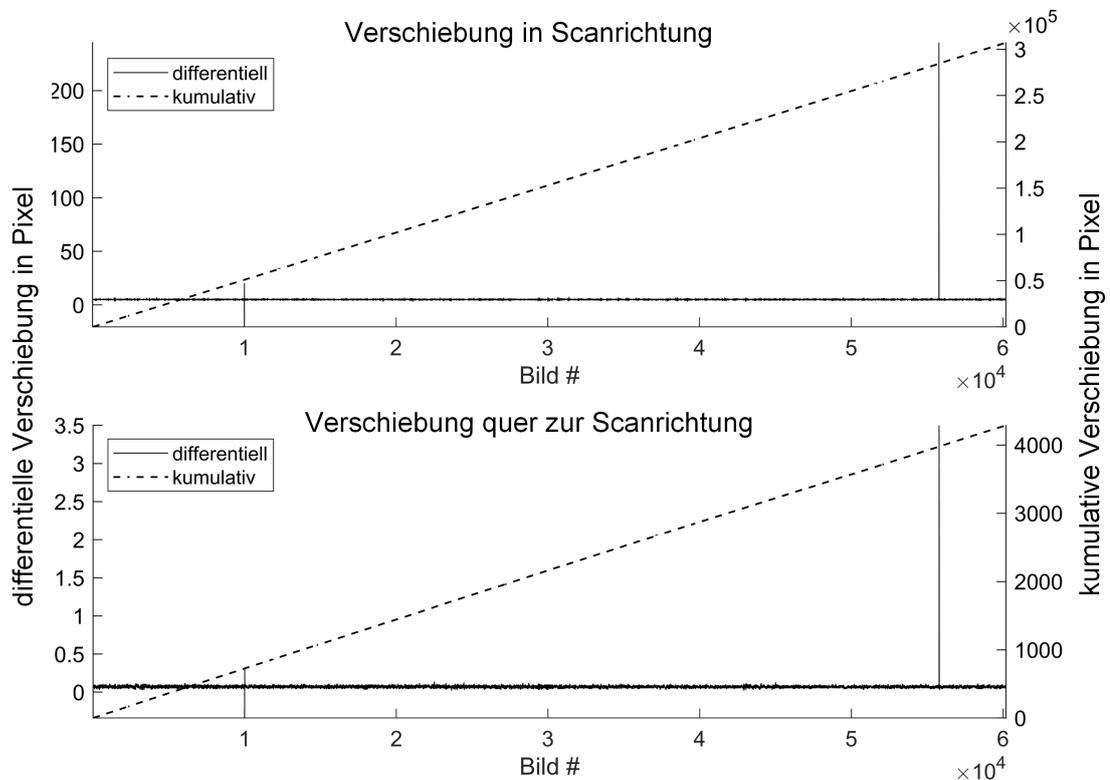


Abbildung 5.2: Mit Hilfe des DSC-Verschiebungsmesssystems aufgenommene Verschiebungen des Rotationstisches über eine volle Rotation des Innenrings aus Abbildung 5.1 mit einem Umfang von ca. 164,94 mm = 296110,62 Pixel.

Insgesamt wurde über 60202 Bilder eine Verschiebung in Scanrichtung von aufgerundet 307067 Pixeln realisiert. Gleichzeitig beträgt der Versatz quer zur Scanrichtung aufgerundet 4288 Pixel. Wie der Abbildung 5.2 zu entnehmen ist, nimmt die Querverschiebung monoton zu. Es handelt sich dabei also nicht um eine wirkliche Querbewegung des Messobjektes, sondern um einen Effekt durch die nicht perfekte Ausrichtung der Kamera. Wäre das Pixelraster ideal ausgerichtet, so läge die kumulative Querverschiebung im Mittel bei null. Da er aber ansteigt, muss die Kamera leicht gedreht sein. Eine Abschätzung mit Hilfe der geometrischen Beziehung $\alpha_{\text{Kamera}} = \arctan\left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}}\right)$, ergibt eine Drehung der Kamera um die z-Achse

von $\alpha_{\text{Kamera}} = 0,8^\circ$, was für eine manuelle Ausrichtung ein realistisch erreichbarer Wert ist. Bei der Rekonstruktion der Korrelogramme werden beide lateralen Richtungen in der Ebene berücksichtigt.

Über die gesamte Messung werden mit einem Kameraausschnitt von 1200×576 Pixeln, also mit einer effektiven Messspurweite von 300 Pixeln bzw. $167 \mu\text{m}$, vollständige Korrelogramme von rund 91 Millionen individuellen Oberflächenpunkten aufgenommen. Da die Korrelogramme eine Signallänge von rund 240 Stützpunkten haben ergibt sich bei einer Bittiefe von 8 Bit eine Datenmenge von 22 GB an Topografierohdaten, die verarbeitet werden müssten. Aufgrund der umfangreichen Datenverarbeitung und insbesondere durch die Padding-Operationen, kann diese Datenmenge aktuell nicht in einem Stück vom vorhandenen PC-System mit 64 GB Arbeitsspeicher verarbeitet werden.

Da eine 91 Megapixel umfassende Abbildung der Topografie für eine Diskussion nur wenig Mehrwert bietet, werden in diesem Abschnitt zwei Positionen der Topografiekarte, der Anfang der Messung und die erste Wiederholung der Topografie nach einer vollen Umdrehung gezeigt. Sie sind in vollem Umfang mit den Methoden aus Abschnitt 3.1.2 ausgewertet worden und werden in Abbildung 5.3 dargestellt.

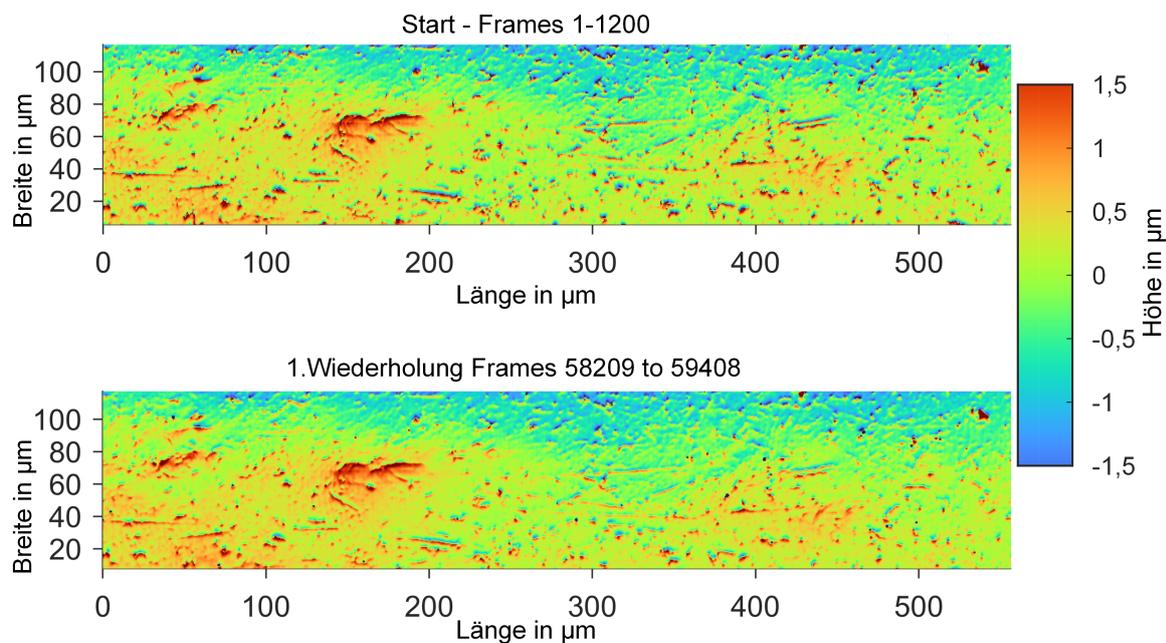


Abbildung 5.3: Innenringtopografie. Oben: Am Anfang des Scans. Unten: Nach einer Umdrehung.

Die beiden Topografieabbildungen zeigen den gleichen Ausschnitt der Messobjektfläche. Aus Gründen der Erkennbarkeit werden nur 220×1000 Pixel der insgesamt berechneten und ausgewerteten 220×4000 Pixel großen Topografien gezeigt. Die Topografien wurden in ihrer Breite von 393 Pixeln auf 220 Pixel zugeschnitten, um die Ränder, welche durch die Querbewegung der Oberfläche entstehen, zu entfernen. Zur Bildung der Höhendifferenz wurde die Topografie der ersten Wiederholung mit bilinearer Interpolation 16-fach vergrößert und manuell verschoben, sodass beide Topografien sich maximal überlagern und anschließend wieder verkleinert, um die Differenz beider Messungen zu berechnen. Als Maß für die Übereinstimmung beider Topografien wird die Standardabweichung verwendet. Die Standardabweichung der Höhendifferenz der 220×4000 Punkte wurde bestimmt zu

$s = 95,5$ nm, wobei 1,6 % der Punkte per Grubbstest [69] als Ausreißer ausgeschlossen wurden.

Die in diesem Vergleich zweier LSWLI-Messungen erreichte Standardabweichung ist somit etwas mehr als 2,5 mal größer als die Standardabweichung in Abschnitt 4.2.3.2, in dem eine LSWLI-Messung mit einer VSWLI-Messung der gleichen Oberfläche verglichen wurde. Im Vergleich zur Oberfläche in Abschnitt 4.2.3.2, welche eine geringe Rauheit von rund 55 nm aufwies (vgl. Tabelle 4.3), liegt die Rauheit des Kugellagerinnenrings in der Größenordnung 350 nm und ist geprägt von vielen schmalen und steilen Kratzerstrukturen. An diesen Kratzerstrukturen treten die größten Abweichungen zwischen beiden Messungen auf. Da die Abtastung bei beiden Scans nicht gleich war, also nicht wirklich genau die selben Oberflächenpunkte getroffen wurden, kann von einer Restverschiebung der beiden Topografien zueinander ausgegangen werden. Diese Abweichung macht sich besonders bei den dünnen Kratzerstrukturen bemerkbar, die durch die unterschiedliche Abtastung und der daraus resultierenden mangelhaften Überdeckung in der Differenz mehr Fläche einnehmen, als sie eigentlich groß sind. Dies wirkt sich besonders dadurch negativ auf die Differenz aus, da die steilen Flanken der Strukturen ein schlechteres Intensitätssignal aufweisen und damit aus Korrelogrammen mit schlechterem SNR berechnet werden.

Der Scan des gesamten Umfangs zeigt, dass eine kontinuierliche Messung eines Objektes prinzipiell möglich ist. Wiederholungsmessungen über mehrere Umdrehungen sind mit Standardabweichungen von unter 100 nm möglich, wobei die Übereinstimmung der so gemessenen Topografien durch die zufällige Abtastung der Oberfläche bei jeder Umdrehung begrenzt wird. Für eine Anwendung in der Praxis ist zudem bei diesem Scanmodus die bewältigbare Oberflächengeschwindigkeit für viele Prozesse zu gering. Die meisten Rotationsprozesse sind schneller als die hier verwendeten $6 \mu\text{ms}^{-1}$. Daher ist ein Messmodus für schnelle Oberflächengeschwindigkeiten notwendig.

In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass die Wiederholbarkeit von Topografie-messungen über mehrere Umdrehungen gegeben ist. Diese Wiederholbarkeit ist eine Voraussetzung für den in Abschnitt 3.1.2.1 beschriebenen entkoppelten Scanmodus, bei dem ein Schritt weitergegangen wird und die Aufnahme der Korrelogramme auf mehrere Umdrehungen aufgeteilt wird. Dies setzt voraus, dass die Interferenzerscheinungen sich bei jeder Umdrehung wiederholen. Dies wird im nächsten Abschnitt untersucht und prozessnah eingesetzt.

5.2 Rotierende Walzen

Anhand des Beispiels der rotierenden Dressierwalzen wird in diesem Abschnitt eine Möglichkeit zur Messung von schnell rotierenden Objekten untersucht. In vorherigen Abschnitten konnten zwar schon rotierende Objekte aufgenommen werden, allerdings ist mit dem zuvor verwendeten Scanmodus die Rotationsgeschwindigkeit auf wenige $100 \mu\text{ms}^{-1}$ begrenzt, da die für auswertbare Korrelogramme benötigte Abtastrate jenseits dieser Geschwindigkeiten nicht mehr erreicht wird (vgl. Abschnitt 4.2.3.3). Um dennoch die Walzen bei realen Geschwindigkeiten über 100mms^{-1} messen zu können, wird der entkoppelte Modus aus Abschnitt 3.1.2.1 eingesetzt. Er kann als Weiterführung der Wiederholungsmes-

sungen aus dem vorherigen Abschnitt 5.1 verstanden werden. Da während einer einzigen Umdrehung die Oberfläche nicht schnell genug mit einer ausreichend hohen Abtastrate aufgenommen werden kann, wird der Scanvorgang mit dem entkoppelten Modus auf mehrere Umdrehungen aufgeteilt. Aufgrund der guten Wiederholbarkeit, welche in Abschnitt 5.1 festgestellt wurde, wird angenommen, dass sich auch Korrelogramme aus einem auf mehrere Rotationen aufgeteilten Scan zusammenfügen lassen.

5.2.1 Messung auf Walzen am in-situ Analogversuch

Um sich dem langfristigen Ziel der Messbarkeit von Topografien schnell rotierender Objekte mittels LSWLI im stoß- und vibrationsstarken Industrieumfeld zu nähern, wurde ein Analogversuch im Labor durchgeführt. Der Aufbau des Analogversuchs ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

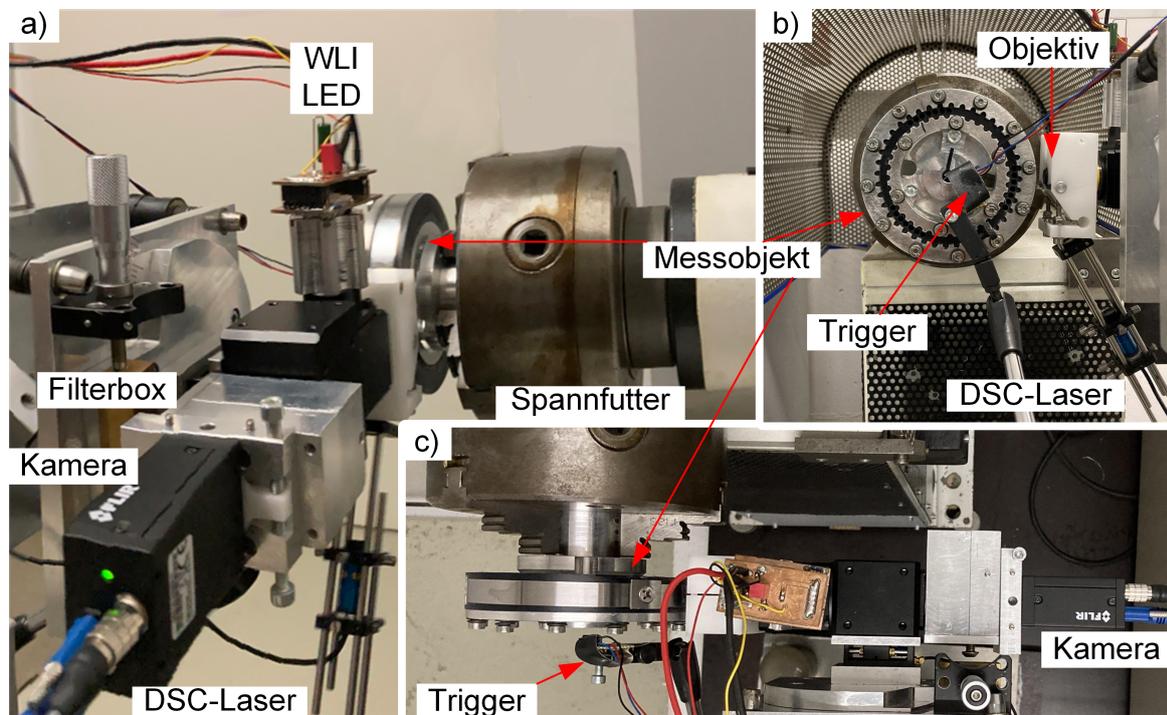


Abbildung 5.4: Fotografische Dokumentation des in-situ-Analogversuchs. a) Seitenansicht. b) Vorderansicht. c) Draufsicht. Am WLI-DSC-Sensor sind keine Änderungen gegenüber der Laborversion vorgenommen worden. Das Messobjekt ist ein Blechstreifen, welcher auf einen zylindrischen Halter gespannt wurde. Der Trigger ist eine Photodiode, welche auf eine schwarze Farbmarkierung auf dem Halter reagiert. Ähnliche Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Fischer et al. 2022 [61].

Der Aufbau ist angelehnt an eine spätere Anwendung des Messsystems an einer Läppbank für Dressierwalzen. Als Analogon für die Walzenoberfläche wird ein Blechstreifen, ähnlich dem aus Abschnitt 4.2.1, als Messobjekt verwendet. Er verfügt über eine nominelle Oberflächenrauheit von $Sq = 160 \text{ nm}$ und wurde auf den Umfang eines zylindrischen Halters mit einem Durchmesser von 120 mm montiert, welcher eingespannt in ein Dreibackenfutter von einem einfachen Elektromotor per Keilriemen in Rotation versetzt wird. Diese Art des Antrieb ist aus der Sicht der LSWLI anspruchsvoll, da das Messobjekt sich bei einer Soll-Drehzahl von 20 U/min mit einer Oberflächengeschwindigkeit von 125 mm s^{-1}

rotierend bewegt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Rotation nicht so gleichmäßig und bekannt ist, wie bei dem PI Rotationstisch, welcher zuvor verwendet wurde.

Das DSC-LSWLI-Messsystem ist gegenüber den vorherigen Experimenten im Kern unverändert. Es wurde starr am Aufbau befestigt und beobachtet das Metallband auf dem rotierenden zylindrischen Halter. Die Sensorhalterung lässt seitliche Vibrationen zu, die im Bereich von $50\ \mu\text{m}$ liegen können, während Vibrationen in der axialen Beobachtungsrichtung minimiert werden. Der rotierende Halter bietet mechanische Einstellmöglichkeiten, um die Exzentrizität des rotierenden Werkstücks auf weniger als $5\ \mu\text{m}$ zu reduzieren, was zu vernachlässigbaren axialen Oberflächendriffs während Oberflächenscans führt. Für die Geschwindigkeitsentkopplung wird der Aufbau um eine Photodiode als Signalgeber und einen Mikrocontroller zur Verzögerung des Triggersignals für die Kamera ergänzt. Auf der Stirnfläche des zylindrischen Halters ist zudem als Triggermarkierung ein schwarzer Klebestreifen aufgebracht, auf welchen die Photodiode ausgerichtet ist. Mit jedem Eingang eines Signals der Photodiode in den Mikrocontroller wird die Weitergabe des Triggersignals an das LSWLI-Messsystem um weitere $22,5\ \mu\text{s}$ verzögert. Diese mit jeder Umdrehung des Messobjekts längere Verzögerung der Signalweitergabe führt zu einem lateralen Scan der Oberfläche, welcher mit einer Bildaufnahme pro Umdrehung von der Oberflächengeschwindigkeit entkoppelt ist.

Aufgrund des weniger präzisen Antriebs dieses Versuchsaufbaus, den damit verbundenen Schwankungen der Oberflächengeschwindigkeit und in Verbindung mit der getriggerten Aufnahmeauslösung, scheinen die Aufnahmen, wenn sie wie zuvor chronologisch betrachtet werden, starken, zufälligen Vor- und Zurückbewegungen unterworfen zu sein. Durch die in Abschnitt 3.2.2 beschriebene Sortierung kann dieser Effekt ausgeglichen werden. Die während einer Messung aufgenommenen unsortierten und sortierten kumulierten Verschiebungen werden in Abbildung 5.5 gezeigt.

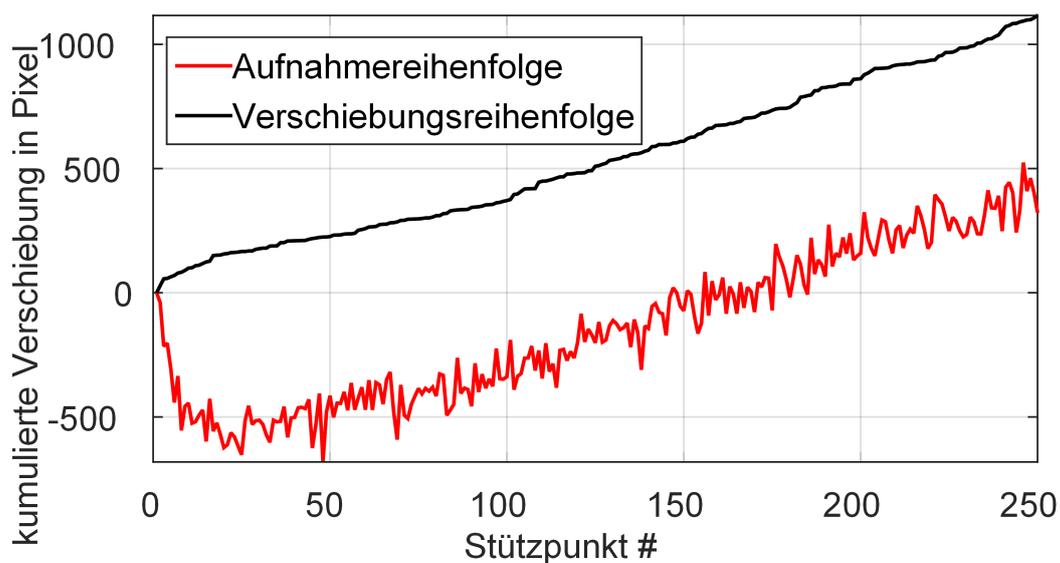


Abbildung 5.5: Unsortierte und sortierte kumulierte Oberflächenverschiebung für 250 Scanschritte, gemessen mittels integrierter DSC-Verschiebungsmessung in Pixel über Stützpunkt #. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Fischer et al. 2022 [61].

Die aufgenommenen Bilder in der ursprünglichen, unsortierten Aufnahmereihenfolge (rote Linie) unterliegen erheblichen lateralen Abweichungen, was sich in der Standardabweichung der Verschiebungen pro Scanschritt widerspiegelt, die 111,3 Pixel beträgt. In den ersten 20 aufgenommenen Bildern treten Verschiebungen in entgegengesetzter Richtung zur geplanten Richtung auf. Hier nimmt vermutlich die Drehgeschwindigkeit des Messobjekts ab, bevor sie sich für den Rest der Messungen mit einer linear ansteigenden kumulierten Verschiebung stabilisiert. Mit der Sortierung zur lateralen Schwingungskompensation werden die Bilder in eine neue Verschiebungsreihenfolge gebracht, bei der eine monoton ansteigende kumulative Verschiebung entsteht (schwarze Linie). Die durch Vibrationen und Drehgeschwindigkeitsschwankungen verursachten lateralen Verschiebungsschwankungen werden um mehr als eine Größenordnung auf eine Standardabweichung von nur 6,5 Pixeln pro Scanschritt reduziert. Diese verbleibenden Abweichungen vom idealen gleichmäßigen Scan werden bei der Erstellung der Korrelogramme weiter berücksichtigt.

Die Wirkung der Verschiebungskompensation auf die Zusammensetzung der Korrelogramme wird in Abbildung 5.6 durch den Vergleich zweier Beispielkorrelogramme desselben Oberflächenelements gezeigt. Das Korrelogramm aus der ursprünglichen, chronologischen Aufnahmereihenfolge ist oben in rot dargestellt. Dem wird unten in blau das Korrelogramm aus der nach Verschiebung sortierten Reihenfolge gegenübergestellt.

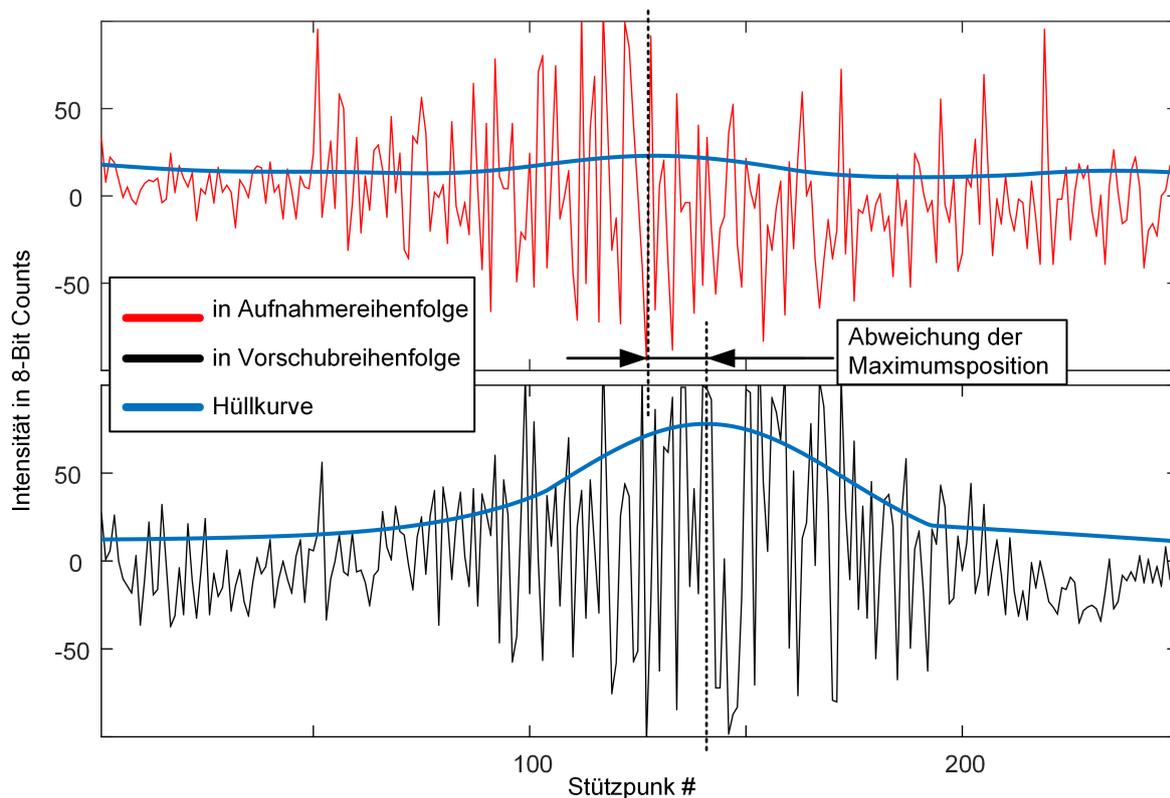


Abbildung 5.6: Beispielkorrelogramme eines Oberflächenpunktes, die aus den chronologischen (oben, rot) und sortierten (unten, schwarz) WLI-Aufnahmen zusammengesetzt wurden, einschließlich der jeweiligen berechneten Hüllkurven (blau) und ihrer Maximumpositionen (gestrichelt markiert). Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Fischer et al. 2022 [61].

Während die Intensitäten des kompensierten Korrelogramms die erwartete Gaußform bilden, ist die Form des ursprünglichen Korrelogramms stark verfälscht. Dementsprechend kommt es zu einer deutlichen Abweichung zwischen den Positionen der berechneten Hüllkurvenmaxima, was zu einer Abweichung der daraus berechneten Höhe des Oberflächenelements führt. Die Hüllkurve des kompensierten Datensatzes hat ein deutlich stärker ausgeprägteres Maximum, was die Approximation der Hüllkurve mit höherer Güte erlaubt. Diese visuell erkennbare Verbesserung der Korrelogrammgüte ist der Nachweis für das Funktionieren der angewandten Methoden, der Entkopplung von Mess- und Rotationsgeschwindigkeit sowie der Kompensation von lateralen Positionsabweichungen.

Die Qualität der Topografiemessungen von der schnell rotierenden Probe wird qualitativ mit einer VSWLI-Messung der gleichen Oberfläche im Stillstand verglichen. Beide Topografieergebnisse sind in Abbildung 5.7 dargestellt und zeigen die gleichen charakteristischen Kratzer, jedoch in unterschiedlichem Detailgrad.

Die Höhenauflösung der LSWLI-Messung auf einer schnell rotierenden Oberfläche ist reduziert gegenüber einer VSWLI Messung auf der selben Oberfläche im ruhenden, nicht vibrierenden Zustand. Die LSWLI-Messung konnte nur die tieferen Kratzer auflösen, die zudem mit einer geringeren Tiefe im Vergleich zur Referenz angegeben werden. Diese Tatsache spiegelt sich auch in der Differenz von 24 nm zwischen den berechneten Rauheitsparametern $Sq_{\text{ref}} = 159$ nm für die Referenz und $Sq_{\text{LSWLI}} = 135$ nm für die LSWLI-Aufnahme bei einer hohen Oberflächengeschwindigkeit wider.

Während die Berechnung des Sq-Wertes noch Werte in ähnlichen Größenordnungen zwischen VSWLI- und LSWLI-Topografien führt, zeigen sich beim direkten Vergleich der Topografien die Auswirkungen der trotz Kompensation gegenüber Laborkorrelogrammen geringere Korrelogrammqualität. Die LSWLI-Topografie ist geprägt von linienhaften Artefakten, welche auf die schlechter bestimmbare Maximumsposition der Korrelogramme zurückzuführen sind. Dennoch konnten mit der LSWLI-Messung Kratzer als Oberflächenstrukturen erfasst werden, welche in Abbildung 5.7 mit roten Pfeilen markiert wurden. Eine genauere Betrachtung der Kratzertiefen zeigt, dass die derzeitige Auflösungsgrenze der LSWLI bei Strukturturen < 30 nm liegt. Da dies ein Faktor von 10x größer ist als das, was bei einem kontrollierten Scan mit niedriger Geschwindigkeit, wie in Kapitel 4.2 aufgelöst werden konnte, wird dies auf verbleibende Einflüsse von räumlichen Positionsabweichungen während des lateralen Scans und die geringere Samplingdichte der Korrelogramme zurückgeführt. Besonders die axialen Positionsabweichungen stellen hier ein Problem dar, da diese mit derzeitigen Methoden und Scanmodi nicht kompensiert werden können. Eine Erhöhung der Auflösung ist prinzipiell denkbar mit einer kleineren Schrittweite des lateralen Scans (vgl. Abschnitt 4.2.3.3) und einem verbesserten Auswertungsalgorithmus, der die dann enger abgetasteten Korrelogramme bezüglich ihrer Phasenlage auswerten könnte. Dies setzt auch eine Kompensation axialer Störbewegungen voraus.

Die LSWLI-Topografien, die unter Vibrationseinfluss an einem schnell rotierenden Werkstück gemessen wurden, stellen die aus den Referenzmessungen bekannten Oberflächenstrukturen zwar erkennbar dar, allerdings ist die Auflösung der Topografie deutlich reduziert im Vergleich zu den im Labor unter kontrollierten Bedingungen erreichbaren. Die durchgeführten Maßnahmen zur Entkopplung des LSWLI-Scans von der Oberflächenro-

tation ermöglichen also prinzipiell die Anwendung der LSWLI bei hohen Oberflächengeschwindigkeiten, mit dem Auftreten von Bewegungsunschärfe als obere Limitierung. Für den verwendeten Aufbau stellt liegt die untersuchte Geschwindigkeit von 125 mm s^{-1} leicht jenseits der in Abschnitt 3.1.1 definierten Obergrenze zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe dar. Bei unkontrollierten Rotationsbewegungen, die auch unstetig sein können, ist es notwendig, die Bilder nach ihrer kumulativen Verschiebung zu sortieren, um die Auswirkungen der bei der Korrelogrammrekonstruktion relevanten lateralen Abweichungen zu reduzieren. Die realisierte Verschiebungskorrektur reduziert auch durch Vibrationen oder Stöße verursachte laterale Bewegungen. Es ist zu beachten, dass die vorgestellten Methoden, die Geschwindigkeitsentkopplung sowie die Bildsortierung und Bildverschiebungskompensation, nur durch die Integration des DSC-Verschiebungsmesssystems in den LSWLI-Aufbau realisiert werden konnten. Neben der weiteren Verwendung für LSWLI sind die als valide zu bewertenden Methoden und Technologien prinzipiell auch auf vertikal scannende WLI übertragbar, um ebenfalls von einem geringeren Einfluss unvermeidbarer und unerwünschter lateraler Bewegungen in Prozessumgebungen zu profitieren und die WLI-Prinzipien über ihre ursprünglichen Designgrenzen hinaus anzuwenden.

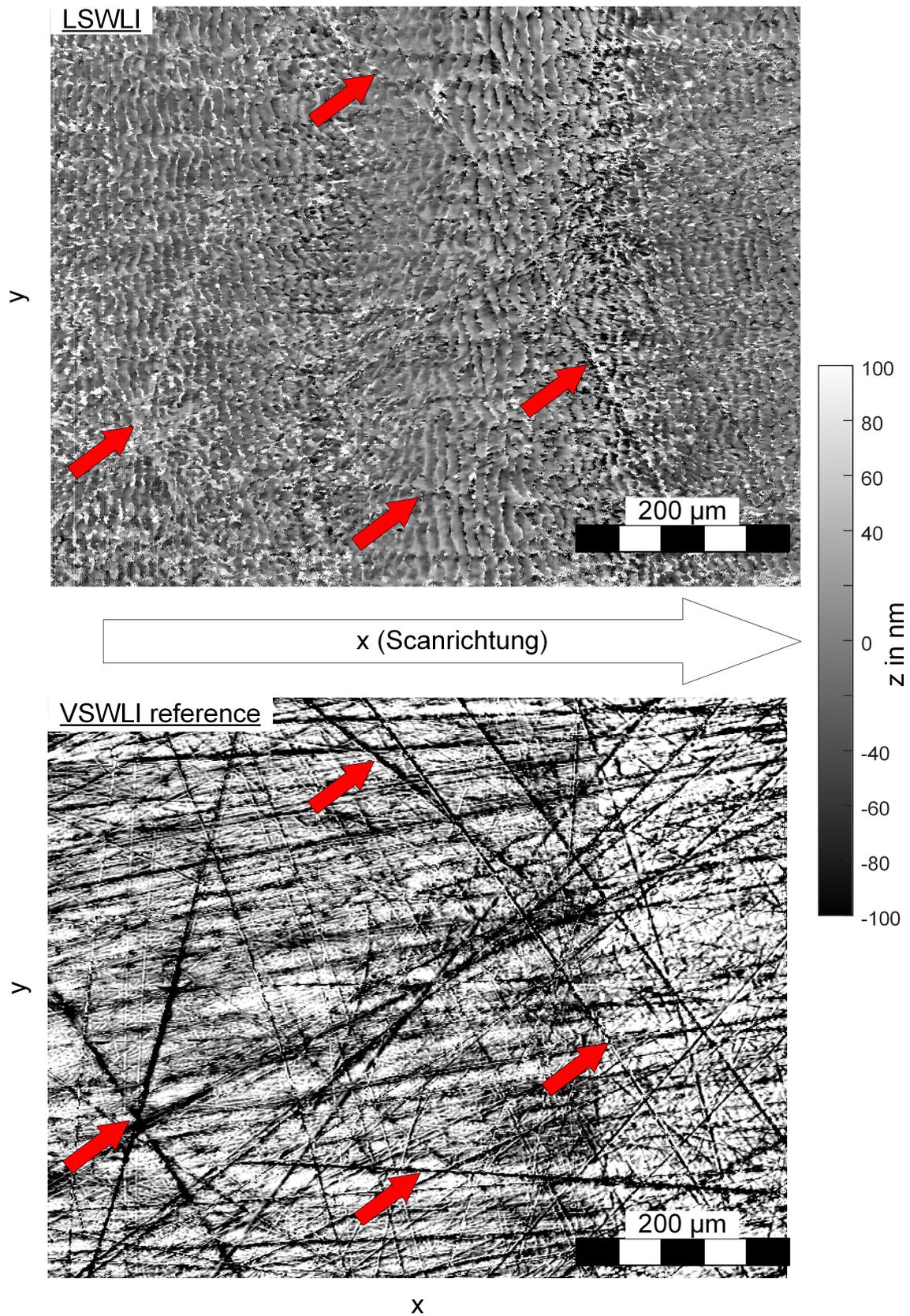


Abbildung 5.7: Topografie des Messobjekts für den in-situ Analogdemonstrator. Oben: LSWLI-Topografie, getriggert aufgenommen bei 125 mm s^{-1} . Unten: VSWLI Referenztopografie. Aufgenommen im aktiv schwingungs isolierten Stillstand. Rote Pfeile dienen der visuellen Orientierung. Abbildungsinhalte auch veröffentlicht in Fischer et al. 2022 [61].

5.2.2 Messung auf Walzen in der Werkhalle

Im vorangegangenen Abschnitt zur Messung schnell rotierender Walzen unter im Labor nachgestellten Messbedingungen konnte gezeigt werden, dass bei diesen Oberflächengeschwindigkeiten eine Messbarkeit gegeben ist. Allerdings ist dabei die Qualität des Topografiemessergebnisses verringert gegenüber Messungen unter optimalen Laborbedingungen.

In diesem Abschnitt der Arbeit wird nun untersucht, inwieweit das gebaute LSWLI-Demonstratormesssystem schon für das übergeordnete Ziel, den prozessnahen Einsatz zur Topografiemessung in einer Werkhalle, eingesetzt werden kann. Im Rahmen des Forschungsprojektes, in dem diese Arbeit entstand, konnte an einem Messtag das Messsystem unter realen Bedingungen in einem Kaltwalzwerk eingesetzt werden. Als Demonstrationsprozess für die Messung von Topografien dient das Lappen von Dressierwalzen aus dem Blechwalzprozess (vgl. Abschnitt 1.1). Die Dressierwalzen dienen im Walzwerk als Werkzeug für den letzten formgebenden Fertigungsschritt bevor weitere thermische oder chemische Oberflächenbehandlungen durchgeführt werden. Sie verleihen dem Blech seine Zielrauheit, welche für die betrachteten Walzen bei $Ra < 200$ nm liegen soll. Da die Walzen durch den Walzprozess ungleichmäßig abnutzen, ist eine regelmäßige Rekonditionierung der Walzenoberfläche vorgesehen. Bei der Rekonditionierung wird die Oberfläche durch Lappen geglättet. Das Lappen erfolgt an einer dafür ausgerüsteten Drehbank. Beim Lappen wird das Werkstück, die Walze, relativ zu einer Lappscheibe bewegt. Im engen Spalt zwischen Lappscheibe und Walze wirken die Lappkörner, welche im Lappmittel aus Wasser und Öl emulgiert sind, auf die Walzenoberfläche. Da die Komponenten des LSWLI-Demonstrators nicht flüssigkeitsdicht sind und mit erheblichen (optischen) Querempfindlichkeiten des LSWLI-Systems seitens des Lappmittels zu rechnen ist, erfolgen die Topografiemessungen nach dem Lappprozess auf der trockenen Walze. Zur Veranschaulichung des Messszenarios dient Abbildung 5.8.

Die Walzenmantelfläche ist nicht zylindrisch, sondern ballig geformt. Mit nur ca. 150 nm Steigung auf 1 mm Breite sind trotz des Höhenunterschieds keine Anpassungen des LSWLI-Messbereichs notwendig. Die Walze wird mit einer Drehzahl von 3,5 U/min rotiert, was der Mindestdrehzahl des Walzenlappstandes entspricht. Die Triggerung der Aufnahmen erfolgt, wie im Labor, mit einer Photodiode und einer dunklen Markierung, deren Signal mit dem Mikrocontroller zeitverzögert an die Kamera weitergegeben wird. Die Triggermarkierung wurde für diesen Testlauf direkt auf die Walze aufgebracht. Eine Anbringung an weniger fertigungskritischen Stellen (z. B. neben der Walze oder an dessen Stirnseite) ist denkbar. Das LSWLI-Demonstratormesssystem ist auf einer steifen Aluminiumkonstruktion befestigt, welche über manuelle Einstellmöglichkeiten zum Ausrichten des Messsystems verfügt. Zudem ist ein elektronischer Piezofeintrieb verbaut, mit dem, ohne das Messsystem durch Berührung ungewollt zu bewegen oder in Schwingung zu versetzen, auf die Oberfläche des Messobjekts fokussiert werden kann. Das Haltegestell des Demonstrators ist fest mit dem Schlitten der Lappbank verschraubt, was eine Querbewegung über die Breite der Walze ermöglicht. Durch die Verschraubung mit der schweren Lappmaschine (mit eigenem Fundament) wird zwar die Weiterleitung von Stößen und Vibrationen anderer Quellen innerhalb der Halle abgemildert, allerdings werden alle von der Lappmaschine selbst ausgehenden mechanischen Störbewegungen an das Messsystem weitergeleitet. Die vom Ge-

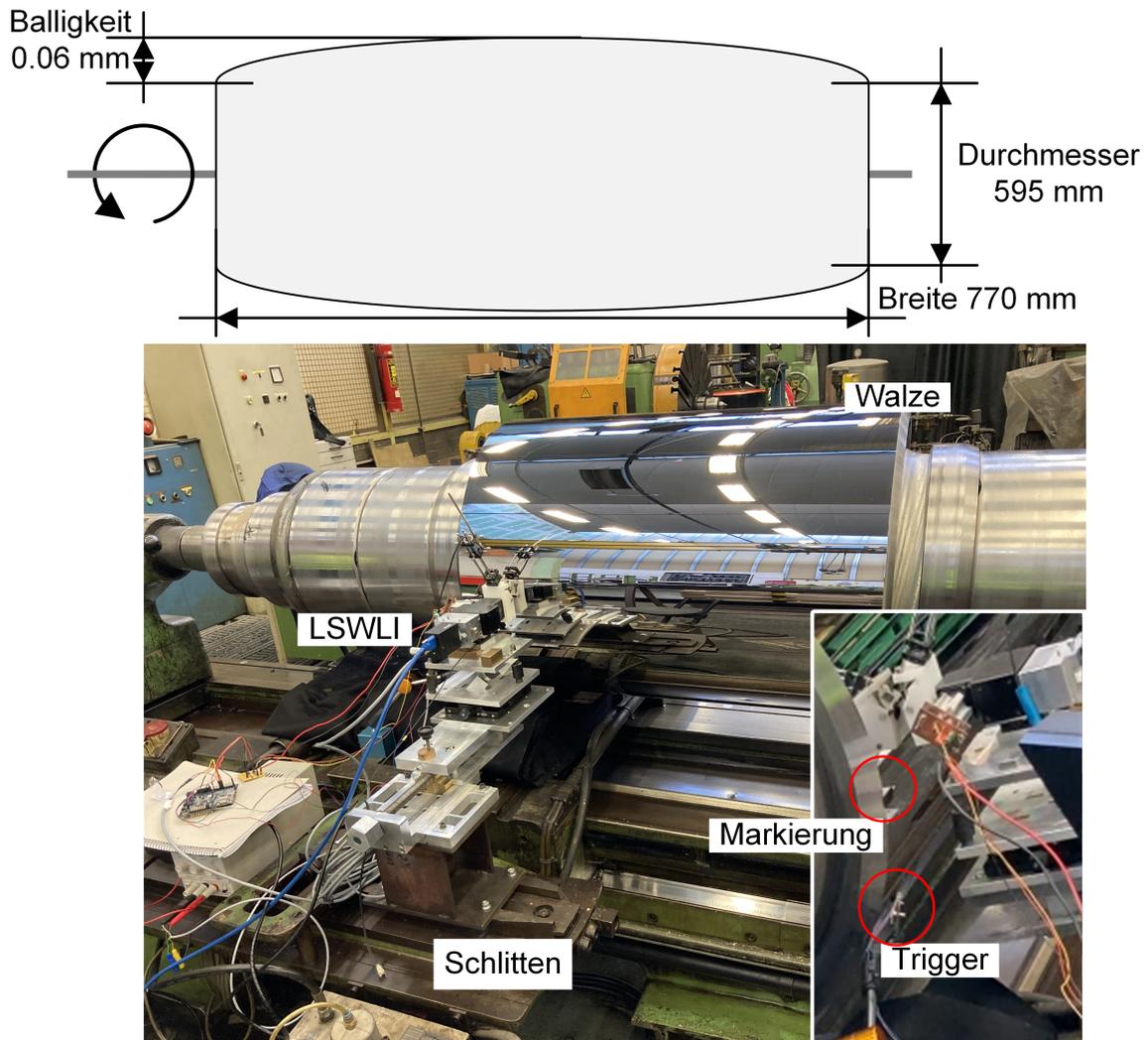


Abbildung 5.8: Messszenario für den Einsatz des LSWLI-Demonstrators für Walzen in einer Läppbank. Oben: Geometrie der Walze. Unten: Übersichtsfoto zur in die Drehbank eingespannten Walze und dem auf die Walze ausgerichteten LSWLI-Demonstrator. Unten rechts: Detailfoto mit der Triggervorrichtung aus Photodiode und auf die Walze geklebter Markierung.

triebe der Maschine erzeugten Vibrationen sind deutlich mit auf die Halterung aufgelegten Händen spürbar. Das Ausrichten des Demonstrators bei laufender Maschine (Getriebe im Leerlauf) ist nur mit heruntergesetzter Belichtungszeit (< 10 ms) möglich, da die Vibration eine hohe Bewegungsunschärfe der Bilder verursacht.

5.2.2.1 Abschätzung der Vibrationen in der Messumgebung

Die Stärke der Vibration wurde durch eine Aufnahme mit dem WLI bei Stillstand der Walze festgehalten. Die zeitlich aufgelöste laterale Bewegung zwischen Messobjekt und WLI ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Der schwarze und der rote Graph zeigen die lateralen Bewegungen entlang der X- bzw. Y-Achse und wurden aus den DSC-Daten berechnet. Der blaue Graph zeigt die axiale Bewegung entlang der Z-Achse und wurde anhand der Position des Interferenzmusters berechnet.

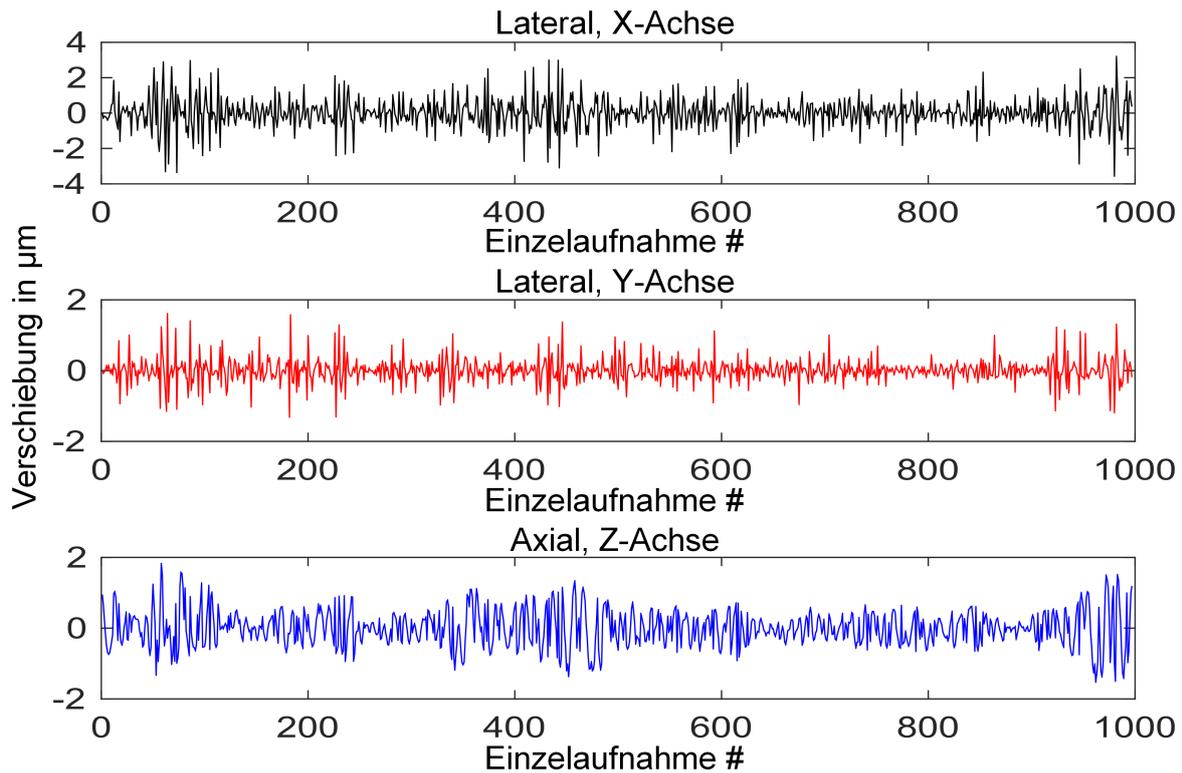


Abbildung 5.9: Laterale Relativbewegung bei Walzenstillstand aufgrund von Umgebungsvibration. Schwarz, Oben: Laterale Verschiebung in x -Richtung, DSC-basiert. Rot, Mitte: Laterale Verschiebung in y -Richtung, DSC-basiert. Blau, Unten: Axiale Verschiebung, interferenzmusterbasiert.

Die Amplituden der Verschiebungen wurden in μm umgerechnet, um einen Vergleich zwischen den Achsen zu ermöglichen. Im zeitlichen Verlauf sind Korrelationen zu erkennen. Größere Schläge auf das System verursachen in allen drei Richtungen Ausschläge. So zu sehen zu Beginn der Aufzeichnung um Bild # 80 oder am Ende um Bild # 950. Die Amplituden in den drei Raumrichtungen liegen in der gleichen Größenordnung. Bei den lateralen Verschiebungen liegen Amplituden im Bereich von μm vor, welche jedoch, wie zuvor gezeigt, durch die DSC-Messung kompensiert werden. Die im Prozessumfeld beobachteten lateralen Positionsschwankungen sind also um mehr als eine Größenordnung größer als im Labor, wo Schwankungen um 0,26 Pixel, also rund $0,15 \mu\text{m}$ beobachtet wurden (vgl. 4.2.3.2). Bei den axialen Verschiebungen, welche ebenfalls im Mikrometerbereich liegen, bewegt sich das Interferenzmuster im FOV der Kamera bereits um hunderte Pixel hin- und her. Es liegt somit kein monotoner Anstieg in z -Richtung mehr vor, welcher auch nicht durch eine Sortierung unter gleichsamer Berücksichtigung sowohl der lateralen und als auch der axialen Verschiebung hergestellt werden kann. Bei der herkömmlichen VSWLI können laterale und axiale Verschiebungen berücksichtigt werden, da während der gesamten Messung der gleiche Oberflächenausschnitt betrachtet wird. Für die LSWLI bedeutet dies jedoch derzeit, dass die Messfähigkeit während dieser Vibrationen stark eingeschränkt ist, da für jeden Oberflächenpunkt nur eine Aufnahme pro axialer und lateraler Position gemacht wird.

5.2.2.2 Topografiemessfähigkeit mittels WLI unter Vibration

Um eine generelle Messfähigkeit der Oberflächentopografie mit dem WLI-DSC-Messsystem feststellen zu können, wird die Oberfläche mit dem Demonstrator bei Stillstand der Walze aber mit Umgebungsvibration aufgenommen. Bei dieser Untersuchung wird eine vertikale Scanbewegung vom Piezofeintrieb durchgeführt. Der Demonstrator nimmt hier also zur ersten Feststellung der Messbarkeit per WLI unter den vorliegenden Prozessbedingungen nach dem VSWLI-Prinzip auf, da dieser Scanmodus weniger von den Vibrationen beeinflusst wird, als der laterale Scanmodus. Die folgenden Untersuchungen gelten aufgrund der schwierigen Messbedingungen nicht der Frage, mit welcher Messunsicherheit zu rechnen ist, sondern eher, ob das Messprinzip, die Aufnahme eines Korrelogramms aus der Bewegung der Oberfläche, welche (nach Sortierung) monoton in z-Richtung erfolgt, bei den vorliegenden starken Vibrationen überhaupt erfüllt werden kann.

Die Auswertung erfolgt mit den Methoden, welche auch für die LSWLI benutzt werden. Für beide Korrelogramme werden zunächst die Rohbilder mit Hilfe der DSC-Informationen lateral stabilisiert. In Abbildung 5.10 ist oben in rot ein Beispielkorrelogramm dargestellt, welches aus einer reinen lateralen Korrektur mittels der DSC-Verschiebungsdaten rekonstruiert wurde. Das darunter gezeigte blaue Korrelogramm basiert auf den gleichen Daten und wurde zusätzlich durch Sortierung in axialer Richtung korrigiert. Die axiale Korrektur erfolgte anhand der Lage der Interferenzmuster in den lateral stabilisierten Einzelbildern.

Die zusätzliche axiale Korrektur ist in diesem Fall der VSWLI-Messung aus mehreren Gründen möglich. Der Höhenscan erfolgt bei der VSWLI nur entlang der Z-Achse, wodurch fast alle Oberflächenpunkte während des gesamten Scans im FOV des Demonstrators verbleiben. Aufgrund der unabhängigen Scanbewegung in Z-Richtung können laterale und axiale Verschiebungen auch unabhängig voneinander korrigiert werden. Da die Oberfläche der Walze aufgrund ihrer Krümmung und der Ausrichtung des Messsystems nicht normal zur Scanachse steht, liegt im vom FOV erfassten Bereich eine Abstandsänderung in Z-Richtung vor. Aufgrund dieser Abstandsänderung entsteht im FOV ein Interferenzstreifenmuster, welches sich im Verlauf des Z-Scans vom einen Ende des FOVs zum anderen bewegt. Diese Bewegung der Interferenzstreifen ist im Idealfall monoton in eine Richtung und wird von Vibrationen gestört. Aufgrund der glatten Oberfläche der Walze ändert das Streifenmuster während des Scans sein Aussehen nur geringfügig, was eine Anwendung der DIC-Methode (Abschnitt 3.2.2) auf die Interferenzstreifen zur Messung der Verschiebung des Streifenmusters erlaubt. Da die Verschiebung des Streifenmusters nur von der axialen Position abhängt, kann eine axiale Korrektur der Messung anhand von DIC-Daten des Streifenmusters durchgeführt werden.

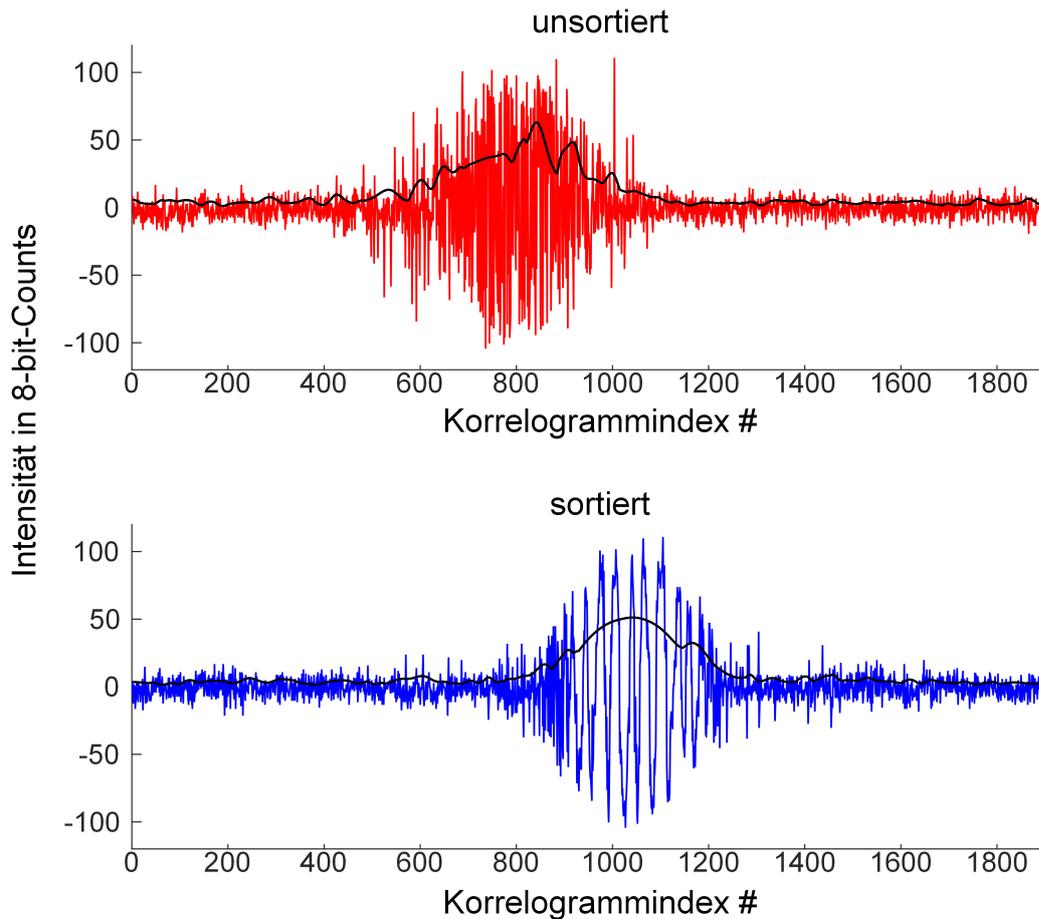


Abbildung 5.10: Korrelogramme eines Punktes bei der VSWLI in der Industrieumgebung. Oben/rot: Chronologisches Rohsignal. Unten/blau: nach Musterposition sortiertes Korrelogramm. Schwarz: Hüllkurve.

Die Qualität des nur lateral korrigierten Korrelogramms (rot) ist im Vergleich zu den vorherigen Laborkorrelogrammen stark verringert. Es ist keine klare Frequenzinformation zu erkennen, allerdings liegt das Signal größtenteils innerhalb einer Gaußförmigen Einhüllenden. Eine Auswertung der Topografie mittels des Hüllkurvenmaximums ist generell möglich, allerdings ist im Signal auch eine leichte Multimodalität erkennbar (min. zwei getrennte Spitzen, bspw. die zwischen Bild # 800 und # 1000), welche die Berechnung der Hüllkurve mittels CWT negativ beeinflusst. Methoden, die die Frequenz der Interferenz betrachten, sind auf dieses Signal nicht sinnvoll anwendbar, da die gesuchten Frequenzen im Rauschen untergehen.

Die Sortierung des Bildstapels nach der Position des Interferenzmusters ergibt ein Korrelogramm (blau), zu welchem eine qualitativ bessere Hüllkurve berechnet werden kann. Durch einen Parabelfit in der Umgebung des Maximumsindex ± 50 Pixel wird die bessere Qualität des sortierten blauen Korrelogramms durch ein höheres Bestimmtheitsmaß, $R^2_{\text{sortiert}} = 0,99$ gegenüber $R^2_{\text{unsortiert}} = 0,82$, der Hüllkurven bestätigt.

Zudem sind im sortierten Signal auch Perioden der Interferenz zu erkennen, sodass auch Frequenz- bzw. Phasenmethoden auf dieses Signal angewendet werden könnten. Die Maxima der Hüllkurven von diesen sortierten Signalen können bestimmt werden. Dass die Sortierung der Rohdaten zu einer Verbesserung von vibrationsbeeinflussten VSWLI-

Messungen führt, wurde auch in der Literatur z. B. von Tereschenko et al. [38] beschrieben. Der in diesem Kapitel verwendete Ansatz zur axialen Vibrationskompensation funktioniert aufgrund der besonderen Umstände der Messung und ist nicht universell auf andere Szenarien übertragbar. Das Interferenzmuster im FOV ist eng genug, um seine Bewegung durch das FOV während des Z-Scans per DIC zu verfolgen, und die Objektoberfläche ist glatt genug, dass während des Scans dauerhaft ein zusammenhängendes Interferenzstreifenmuster zu erkennen ist, dessen Streifen während der gesamten Messung ähnlich gerade bleiben.

Da bekannt ist, welcher Signalwert zu welchem Scanzzeitpunkt gehört, kann daraus eine Topografie berechnet werden, wenn die axiale Bewegung des Scans mit aufgezeichnet wird. In diesem Experiment fehlen diese Daten, da der Axialantrieb über keinen Bewegungscoder verfügte. Die nachfolgend in Abbildung 5.11 gezeigten Topografien aus beiden Korrelogrammen haben daher ersatzweise als Einheit für die Höhe den Korrelogrammindex des Hüllkurvenmaximums. Von beiden Topografien wurde mit der detrend-Funktion von Matlab ein linearer Höhentrend entfernt, sodass diese beide in der X-Y-Ebene liegen. Zur Orientierung auf der Oberfläche wird zusätzlich ein einzelnes Rohbild aus dem Scan gezeigt.

Alle drei Unterabbildungen zeigen den gleichen Oberflächenausschnitt. Die Oberfläche des Messobjekts ist glatt, bis auf wenige Oberflächendefekte. Zur Orientierungshilfe wurden markante Strukturen mit roten Kreisen markiert. Die feine kreuzende Kratzerstruktur wird mit roten Pfeilen angedeutet. Die drei im Rohbild umkreisten Flecken sind in der sortierten Topografie deutlich auszumachen und gehen kaum in den Streifenartefakten unter. Die feine Kratzerstruktur ist nur in der sortierten Topografie zu erkennen. Auch wenn das Ergebnis durch Sortieren subjektiv verbessert werden konnte, so sind auch im sortierten Ergebnis noch deutliche Artefakte in Form von vertikalen Streifen vorhanden, die fälschlicherweise eine Wellenstruktur vermuten lassen. Diese Streifen entstehen durch ungleichmäßige vertikale Abtastung aufgrund von Vibration und damit verbundenen Phasensprüngen im Signal aufgrund von Unterabtastung der Korrelogramme. Die Artefakte treten insbesondere am Rand der Messung auf, da dort weniger Stützpunkte für die Korrelogramme vorhanden sind. Dieser Vergleich der Topografieergebnisse aus sortierten und unsortierten Korrelogrammen zeigt, dass die Sortierung zu einer Verbesserung des Topografieergebnisses geführt hat. Dennoch sind auch bei diesem VSWLI-Versuch trotz Sortierung starke Störeinflüsse der Vibration zu beobachten.

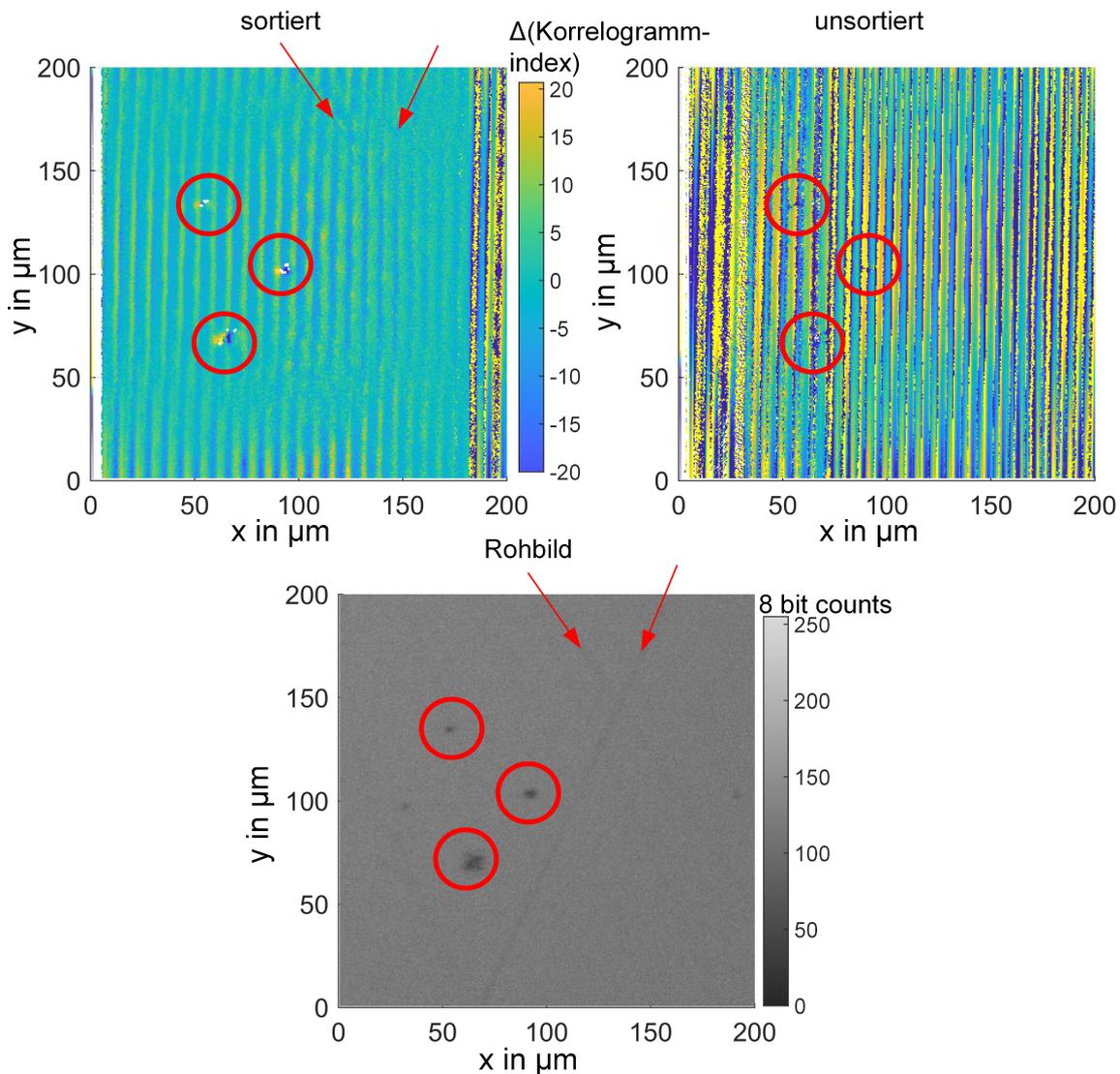


Abbildung 5.11: VSWLI-Topografien der Walze. Oben links: mit sortiertem Bildstapel. Oben rechts: mit unsortiertem Bildstapel. Unten: Rohbild. Rote Kreise: Orientierungspunkte. Rote Pfeile: Markierung der kreuzenden Kratzerstruktur.

5.2.2.3 Messfähigkeit des LSWLI-DSC-Demonstrators unter prozessnahen Bedingungen

Da die generelle Messbarkeit der Oberfläche im VSWLI-Modus bei Stillstand gegeben ist, wird im nächsten Schritt untersucht, inwieweit auch eine Messung der rotierenden Oberfläche mittels LSWLI möglich ist. Die mit dem VSWLI-Modus erzielten Ergebnisse werden mit der LSWLI-Messung der Walze qualitativ verglichen. Für die LSWLI-Messung wird der Demonstrator auf eine feste Position eingestellt und die Walze mit 3,5 U/min in Rotation versetzt. Die Aufnahmen werden über die in Abbildung 5.8 gezeigte Triggerhardware ausgelöst.

Zunächst werden die Messbedingungen hinsichtlich der in den Bildern festgehaltenen Positionsverschiebungen untersucht. Die analog zur Untersuchung der Vibration im Stillstand (vgl. Abbildung 5.9) berechneten Verschiebungen der tatsächlichen LSWLI-Messung sind in Abbildung 5.12 dargestellt.

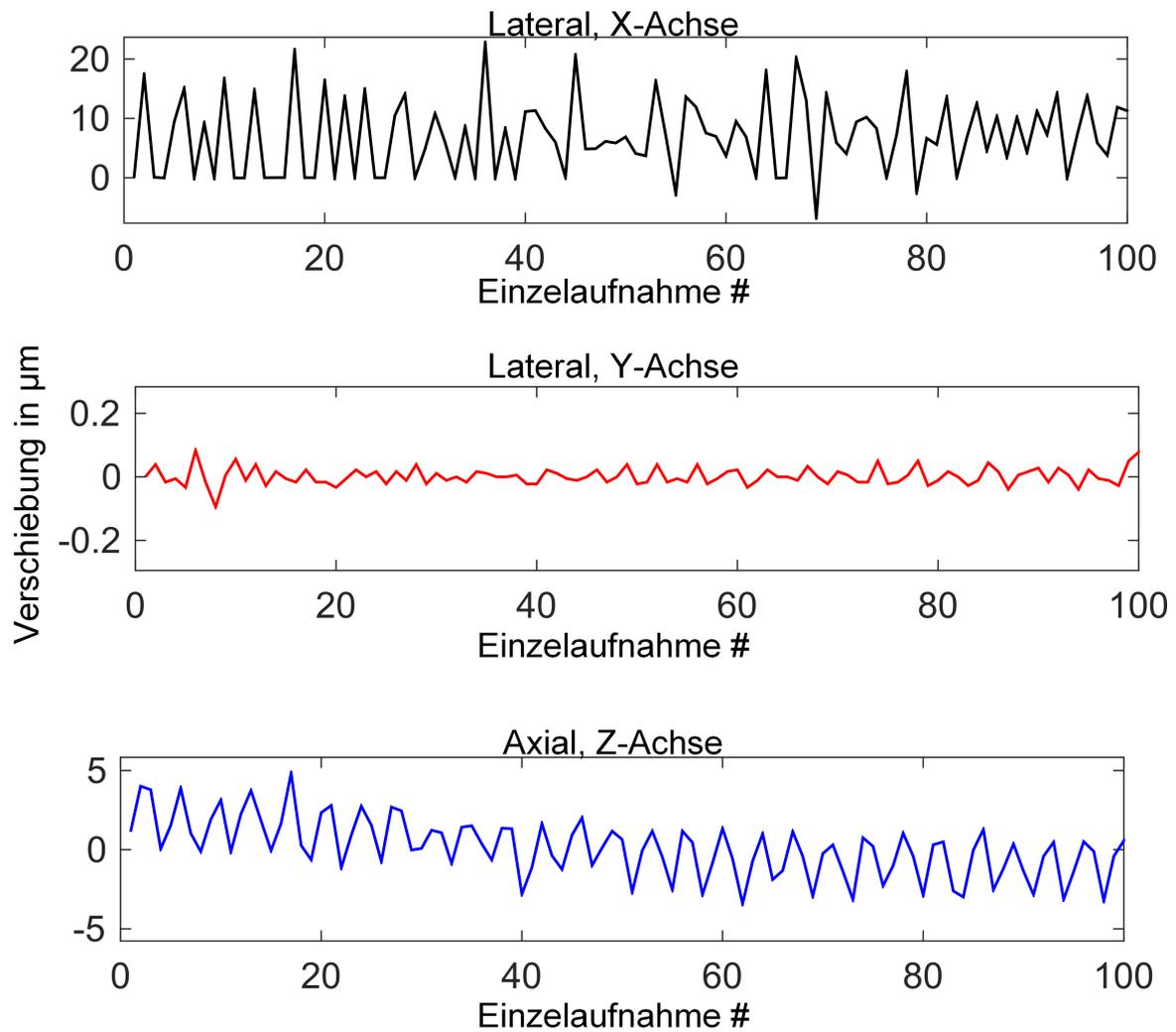


Abbildung 5.12: Vibrationen bei der entkoppelten LSWLI-Messung an der rotierenden Walze in der Werkhalle. Oben/schwarz: Vibration lateral in x -Richtung. Mitte/rot: Vibration lateral in y -Richtung. Unten/blau: Vibration axial in z -Richtung.

Gegenüber den Vibrationen im Stillstand sind in den Verschiebungen in Abbildung 5.12 neben der Vibration auch andere Einflüsse der Messobjektrotation enthalten, so z. B. Schwankungen des Bildaufnahmezeitpunktes bzw. Aufnahmeortes. Da in der Werkhalle die Laserleistung des DSC-Systems aus Arbeitsschutzgründen begrenzt werden musste und dadurch in Verbindung mit der notwendigen kurzen Belichtungszeit die Beleuchtungsintensität verringert ist, enthalten die DSC-ROIs nicht so eine große Anzahl an Speckle-Objekten wie im Labor bei voller Laserleistung, weshalb die Messung der lateralen Verschiebungen gegenüber Messungen unter Laborbedingungen eine geringere Güte aufweisen. Die Ergebnisse der lateralen Bewegungskompensation werden anhand von Abbildung 5.12 diskutiert. Die mittlere Verschiebung in x -Richtung beträgt $6,78 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $6,42 \mu\text{m}$. Die mittlere Verschiebung in y -Richtung beträgt $0,0012 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $0,029 \mu\text{m}$. Die geringere Anzahl und Intensität der Speckle äußern sich in Form einiger implausibler Null-Werte bei den Verschiebungen in x -Richtung (schwarzer Graph, oben). Außerdem sind die Verschiebungen in y -Richtung (roter Graph, Mitte) auffallend gering, was u.a. daran liegt, dass das DSC-ROI sehr schmal (nur 16 Pixel in y -Richtung)

gesetzt werden musste, um die Auswertefehler in die Hauptbewegungsrichtung entlang der x -Achse zu reduzieren.

In z -Richtung (blauer Graph, unten) wird nicht die Verschiebung sondern die Vibration dargestellt, da es in z -Richtung idealerweise gar keine Bewegung geben sollte. Die Bewegung in z -Richtung wurde wie bei der VSWLI Messung anhand der Position des Interferenzmusters in den Rohbildern bestimmt und hat einen Mittelwert von $1,9 \cdot 10^{-15} \mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von $1,87 \mu\text{m}$. Es liegt also eine Schwingung um $0 \mu\text{m}$ mit gleichbleibender Frequenz vor. Die Amplitude ist ebenfalls mit ca. $2 \mu\text{m}$ in der gleichen Größenordnung wie bei den Vibrationen im Stillstand. Zusätzlich zur Schwingung ist in z -Richtung ein negativer Drift zu erkennen. Der Drift ist keine Besonderheit des Einsatzes in der Werkhalle und ist auch zuvor im Labor beobachtet worden. Er ist ein Resultat der Oberflächenform und der Messgerätausrichtung. Die Walzenoberfläche rotiert nicht konzentrisch zur Drehachse, was dafür sorgt, dass sich die Oberfläche während des Scans vom Messgerät entfernt, wodurch das Interferenzmuster durch das WLI-FOV wandert. Im Unterschied zur Messung der Vibration im Stillstand (vgl. Abbildung 5.9) sind keine zeitlichen Korrelationen in Form von gleichzeitigen Ausschlägen in allen drei Achsen zu erkennen.

Die Messbedingungen bei der LSWLI sind also vergleichbar mit den vorherigen Bedingungen im Stillstand. Im Gegensatz zur zuvor diskutierten VSWLI-Messung bei Walzenstillstand kann im vorliegenden Fall der LSWLI bei rotierender Walze jedoch keine Kompensation der Störbewegungen in allen drei Raumrichtungen vorgenommen werden. Es ist nur eine Kompensation in lateraler Richtung möglich; die Vertikale kann nicht ausgeglichen werden, weil dazu Aufnahmen des exakt gleichen X-Y-Ausschnitts bei verschiedenen vertikalen Abständen notwendig wären. Es existiert bei der LSWLI prinzipbedingt nur eine Aufnahme pro X-Y-Ausschnitt bei einem zu Beginn der Messung festgelegtem vertikalen Abstand. Mit einem hybriden Scanmodus aus lateralen und axialen Scanbewegungen (z. B. durch mehrere laterale Scandurchgänge bei verschiedenen vertikalen Abständen) könnte dieser limitierende Umstand gelöst werden, siehe Abschnitt 6.3.

Die aktuellen Topografiemessfähigkeiten des LSWLI-DSC-Demonstrators mit entkoppeltem Scanmodus in prozessnaher Umgebung wird in Abbildung 5.13 vorgestellt, welches ein Rohbild der Messung (oben links), einen Schnitt entlang einer y -Zeile durch den lateral kompensierten Bildstapel (oben rechts), ein beispielhaftes Korrelogramm (unten rechts) sowie die berechneten Hüllkurvenmaxima aus der LSWLI-Messung (unten links) zeigt.

Im Rohbild, oben links, sind Strukturen, wahrscheinlich Staubkörner, sowie das Interferenzmuster enthalten. Die Umrisse der Strukturen und die Interferenzstreifen sind klar zu erkennen, was bedeutet, dass die Belichtungszeit der Kamera ausreichend kurz war, um Bewegungsunschärfe bei 110 mm s^{-1} Oberflächengeschwindigkeit minimal zu halten (vgl. Abschnitt 3.1.1). Oben rechts in Abbildung 5.13 ist ein Schnitt entlang einer y -Zeile des lateral kompensierten Bildstapels dargestellt. Der Schnitt zeigt eine Bildzeile (entlang der Abszisse) über alle aufgenommenen Bilder (entlang der Ordinate). Damit verbleiben die drei Dimensionen x -Richtung, Bildindex und Intensität, wodurch die bildliche Darstellung erleichtert wird. Es wurde eine Zeile gewählt, entlang der sich während des lateralen Scans eine der Strukturen, ein Staubkorn, durch das FOV bewegt. Das Staubkorn erscheint in der Abbildung als vertikaler blauer Bereich zwischen Bild # 100 und Bild # 200 und ändert seine

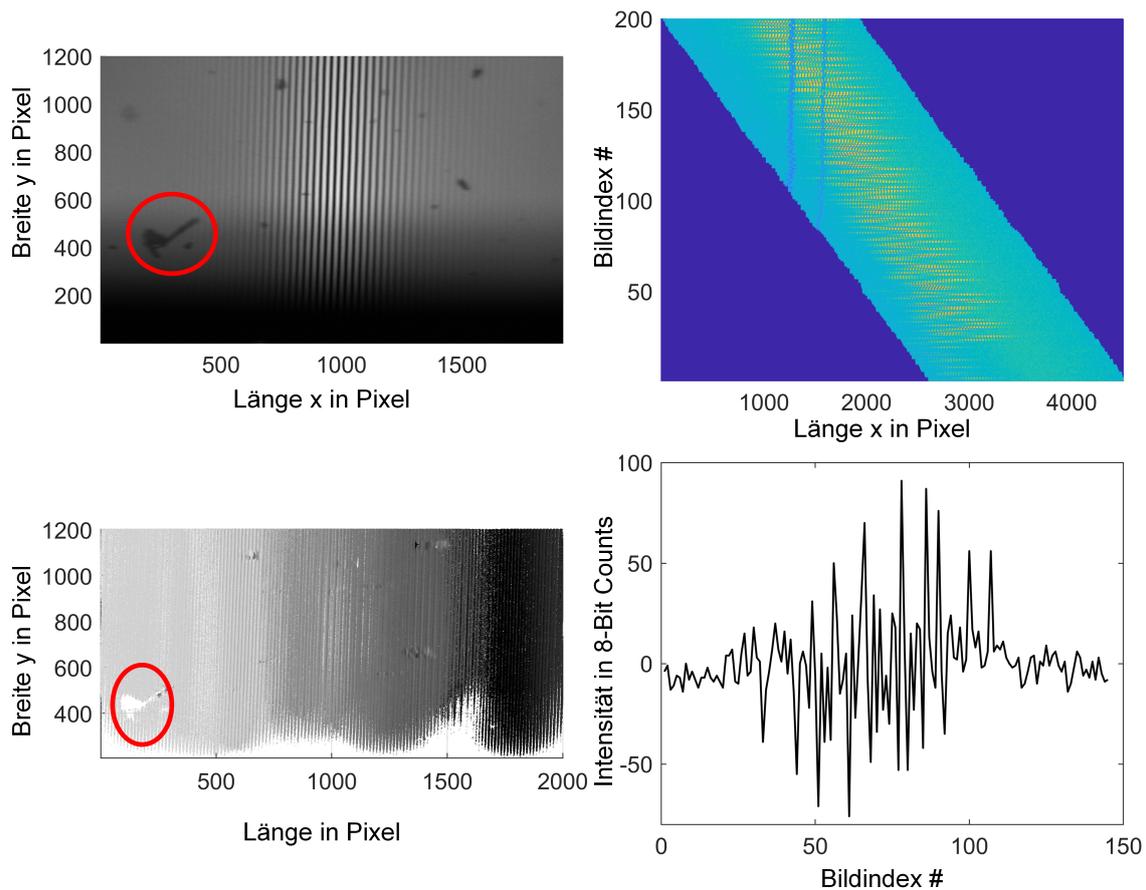


Abbildung 5.13: LSWLI-Messung an der rotierenden Dressierwalze im Kaltwalzwerk. Oben links: Rohbild aus der Messung. Oben rechts: y -Schnitt durch den lateral kompensierten Stapel. Unten links: berechnete Hüllkurvenmaxima. Unten rechts: Beispielhaftes Korrelogramm. Roter Kreis: Orientierungshilfe.

Helligkeit nicht beim lateralen Durchtreten der Interferenzstreifen, da seine Strukturhöhen außerhalb des Interferenzbereiches liegen. Die Kompensation der lateralen Störbewegungen der lateralen Bewegung sorgt dafür, dass die Wanderung des Staubkorns ausgeglichen wird und es über alle Bildindizes an der selben Stelle x im neuen globalen Koordinatensystem erscheint. Das Verbleiben der Staubkornstruktur an der gleichen x -Koordinate ist ein Indiz dafür, dass die laterale Kompensation mittels der aus dem Rohbild berechneten DSC-Verschiebungswerte funktioniert und die DSC-Verschiebungswerte daher valide sind.

Aus den beiden oberen Teilabbildungen kann auf die Schwierigkeit der LSWLI-Messung bei rotierender Walze geschlossen werden. Das Interferenzmuster verläuft im gezeigten Rohbild wie auch in den anderen Rohbildern sehr geradlinig, die Streifen sind fest senkrecht im Bild und werden kaum von Oberflächenstrukturen unterbrochen bzw. verzerrt. Sind die Muster in den Einzelbildern so geradlinig, spricht das für eine glatte Oberfläche, bei der zwischen den einzelnen Scanschritten keine großen lateralen Positionsänderungen des Interferenzmusters zu erwarten wären. Betrachtet man nun aber die Lage der Interferenzmuster im Schnitt rechts (gelber Bereich), so ist über die Bildindizes ein unstetes hin- und her in x -Richtung zu erkennen. Dies ist die Auswirkung der axialen Vibration zwischen Messgerät und Messobjekt. Als Vibrationsquelle ist insbesondere der Antrieb der Walze zu sehen, dessen Vibrationen sich über den Rahmen der Läppmaschine bis zum Messgerät übertragen.

Da bei diesem LSWLI-Scan nur ein Bild pro Scaninkrement in x -Richtung aufgenommen wurde, kann die axiale Vibration nicht durch eine Auswahl von Bildern ausgeglichen werden, die an der gleichen lateralen Stelle aufgenommen wurden und bei denen die axialen Vibrationen beispielsweise einen Nulldurchgang durchliefen.

Da die ungewollten axialen Bewegungen nicht kompensiert werden können, ist die Qualität der Korrelogramme der Messung stark verringert im Vergleich zu Labormessungen. Ein für diese Messung repräsentatives Korrelogramm wird unten rechts in Abbildung 5.13 gezeigt. Die prinzipielle Struktur eines Korrelogramms ist erkennbar: Außerhalb des kohärenten Bereichs liegt ein Rauschwert vor, im Kohärenzbereich wechseln sich konstruktive und destruktive Interferenzen ab, wobei deren Intensitäten innerhalb einer Gaußförmigen Einhüllenden liegen sollten. Die Korrelogramme dieser LSWLI-Messung weichen aus verschiedenen Gründen von der Idealvorstellung ab (vgl. Abbildung 2.2). Ein Grund ist die bereits angesprochene, mit dem aktuellen Demonstratormesssystem unkompensierbare, axiale Störbewegung. Durch diese Störbewegungen wird eine grundlegende Annahme aus Abschnitt 2.1.3 verletzt, nämlich der kreisförmige Scanpfad jedes Oberflächenpunktes um ein gemeinsames Rotationszentrum. Als ein weiterer Grund sei die geringe Abtastung des Korrelogramms genannt. Im Rohbild beträgt die Korrelogrammbreite ungefähr 600 Pixel mit einer Periodenlänge von rund 30 Pixeln. Bei Anwendung der Faustregel für die Mindestabtastungsschrittweite von $\lambda/8$, also acht Stützpunkten pro Interferenzperiode, dürfte die mittlere Schrittweite des lateralen Scans nicht größer sein als 3,75 Pixel pro Abtastschritt. Ein kompletter Durchlauf eines Objektpunktes durch das FOV sollte demnach $1920 \frac{\text{Pixel}}{\text{FOV}} / 3,75 \frac{\text{Pixel}}{\text{Abtastschritt}} = 512$ Abtastschritte beanspruchen. Tatsächlich wird das FOV allerdings innerhalb von 150 Bildern komplett durchschritten. Die Abtastweite war bei dieser Messung also zu weit, um dicht abgetastete Korrelogramme aufzunehmen und daraus Topografieauswertungen in der gleichen Qualität wie bei den Labormessungen in Abschnitt 4.2 zu erreichen. Eine engere Abtastung wäre mit dem Aufbau möglich durch eine kürzere Triggerverzögerungsdauer. Dies erhöht die Dauer der LSWLI-Messung pro Fläche, da bei kleineren lateralen Abtastschritten mehr Aufnahmen gemacht werden müssen, was beim entkoppelten Scanmodus nicht durch Erhöhen der Kameraaufnahmerate realisiert wird, sondern durch mehr Umdrehungen des Messobjekts. Eine Änderung der Triggereinstellungen war am Messtag im Walzwerk nicht möglich aufgrund von fehlendem Equipment zur Umprogrammierung des Mikrocontrollers. Zudem war die Messzeit auf der Walze durch den Schichtwechsel des Walzwerks begrenzt, weshalb keine längeren Messungen möglich waren.

Aufgrund der hohen Abtastschrittweite konnte mit nur 200 Bildern eine Topografie mit einer Länge von über 6000 Pixeln aufgenommen werden. Die Auswertung der Hüllkurven eines Bereichs von 2000 Pixeln Länge zeigt den in Abbildung 5.13 oben links abgebildeten Ausschnitt der Oberfläche. Zur Orientierung ist eine markante Struktur der Oberfläche mit einem roten Kreis gekennzeichnet. Sowohl diese Struktur als auch weitere Strukturen aus dem Rohbild lassen sich in der Darstellung der Hüllkurvenmaxima wiedererkennen. Diese Strukturen werden allerdings nicht korrekt wiedergegeben. Sie erscheinen deutlich breiter als sie sein sollten. Dies ist durch die axiale Vibration während der Messung zu erklären. Die Interferenzmaxima für diese Strukturen erscheinen an verschiedenen Stellen in

der lateralen Rekonstruktion, weshalb sie mehrfach auftauchen. Ein weiteres Artefakt in der Hüllkurvenauswertung sind die vertikalen Streifen, welche sich über die komplette Länge der Auswertung ausbreiten. Sie sind ein Effekt der Unterabtastung der Korrelogramme, welche sich durch Phasensprünge bemerkbar macht. Gegenüber der prozessnahen VSWLI-Messung hat die prozessnahe LSWLI-Messung größere Probleme mit unkompensierbaren axialen Störbewegungen, weshalb die Qualität der in Bewegung per LSWLI gemessenen Topografien derzeit den im Stillstand aufgenommenen VSWLI Topografien unterlegen ist. Allerdings wäre eine Messung an bewegten Objekten per VSWLI im klassischen Sinne gar nicht möglich.

Zusammenfassend konnten in diesem Abschnitt über den Einsatz des LSWLI-DSC-Demonstrators in der Werkhalle wertvolle Erkenntnisse über die aktuellen Fähigkeiten und Grenzen des Messsystems erlangt werden. Das System ist in der Lage, die Vibrationen des Gesamtsystems aus Messgerät und Messobjekt zu erfassen. Beim Einsatz als herkömmliches VSWLI konnte gezeigt werden, dass die Verbindung von lateraler Kompensation mittels DSC-Daten und einer anschließenden axialen Kompensation mittels der Interferenzpositionen im FOV, zu einer verbesserten Rekonstruktion der Korrelogramme aus den aufgenommenen Rohdaten führt. Dies äußert sich in der besseren Parabelform der Hüllkurve des durch Sortierung axial kompensierten Korrelogramms ($R^2_{\text{sortiert}} = 0,99$ gegenüber $R^2_{\text{unsortiert}} = 0,82$). Mit Hilfe des entkoppelten LSWLI-Scanmodus konnte die Walze aufgenommen werden, während sie sich drehte. Zwar sind die aufgenommenen Datensätze aufgrund von axialer Vibration und einer geringen Abtastrate in ihrer Qualität eingeschränkt, dennoch reichen sie aus, um den in dieser Arbeit erreichten Fortschritt an der LSWLI zu demonstrieren. Der Fokus galt dabei der lateralen Bewegung, im speziellen der integrierten DSC-Verschiebungsmessung und dem entkoppelten Messmodus für hohe Oberflächengeschwindigkeiten. Die lateralen Störbewegungen konnten sowohl im Stand bei VSWLI-Messungen als auch in Bewegung bei LSWLI-Messungen ausgeglichen werden. Gegen die axialen Störbewegungen wurde in dieser Arbeit nur für VSWLI-Messungen eine nachträglich Ausgleichsmethode umgesetzt. Für die LSWLI wurde keine Methode zum Ausgleich axialer Störbewegungen umgesetzt, da dies nicht ohne Erweiterungen der Datenaufnahme möglich ist. Das Messprinzip der rotatorischen LSWLI mit integrierter DSC-Verschiebungsmessung als solches funktioniert also auch prozessnah, doch es sind Schwächen insbesondere hinsichtlich der Vibrationsempfindlichkeit zu überwinden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

An allen chemischen, thermischen und mechanischen Prozessen an einem Objekt ist dessen Oberfläche beteiligt. Die Eigenschaften der Oberfläche als Schnittstelle zwischen Objekt und Umgebung müssen daher bei der Herstellung vieler Produkte berücksichtigt werden. Für eine wirtschaftliche Produktion ist es von Vorteil, wenn Produktionsfehler so früh wie möglich in der Herstellung erkannt werden, weshalb eine Messung der Oberflächeneigenschaften so nah wie möglich an den Fertigungsprozessen anzustreben ist.

In dieser Arbeit wurde eine Messtechnik für Oberflächen erarbeitet, die zu (rotierenden) zylindrischen Objekten gehören und dessen Rauheiten im Bereich $Sq = 10 \dots 100$ nm liegen. Um in-situ oder gar in-prozess Messungen an den Objekten durchführen zu können, sollte ein geeignetes Messsystem in der Lage sein, die Messobjekte messen zu können, während sie (prozessbedingt) rotieren. Zur Messung der hohen Oberflächengüten hat sich die Weißlichtinterferometrie (WLI) etablieren können. Mit ihr sind Messunsicherheiten der Oberflächentopografie in der Größenordnung einzelner Nanometer möglich. Die am weitesten verbreitete Umsetzung des WLI-Prinzips als Topografiemesssystem ist die vertikal scannende WLI. Mit ihr können die zuvor genannten Unsicherheiten erreicht werden, allerdings hat sie den für den zuvor definierten Anwendungsfall entscheidenden Nachteil, dass die Messobjekte während des vertikalen Scans stillstehen müssen.

Einen Lösungsansatz für WLI Messungen an sich bewegenden Oberflächen stellt die lateral scannende WLI dar. Diese Variante wurde bislang allerdings nur für laterale Bewegungen verwendet. Zwar gab es auch Versuche, bei denen auf rotierenden Objekten gemessen wurde, allerdings wurde dabei die Krümmung der Oberfläche vernachlässigt. Das Ziel der Arbeit ist es, die lateral scannende Weißlichtinterferometrie zu befähigen, nicht nur auf translatorisch bewegten, sondern auch auf kontinuierlich rotierenden Körpern messen zu können. Da eine Verschiebungsbestimmung bei der LSWLI für die Höhenauswertung zwingend erforderlich ist und um unabhängig von externen Sensoren zu funktionieren, d.h. als in sich geschlossenes Messsystem in-situ/in-prozess Oberflächenmessungen ausführen zu können, wurde zusätzlich eine integrierte Sensorik auf Basis der Specklemesstechnik zur Messung der Oberflächenverschiebung eingeführt. Mit den neuen Fähigkeiten des Topografiemesssystems wurden schließlich neue Anwendungsfelder wie die in-situ Messung an rotierenden Walzen und Wälzlagern aufgezeigt.

6.1 Ausgangslage der Arbeit

Als scannendes Messverfahren ist die lateral scannende WLI auf einen hinreichend bekannten Scanpfad angewiesen. Aus diesem Grund beschäftigen sich die meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema mit dem Einsatz der Technologie unter kontrollierbaren Laborbedingungen. Die Bewegungen werden kontrolliert durchgeführt, beispiels-

weise mit Nanomess- und Positioniermaschinen. Zudem sind die Messobjekte häufig sehr filigrane Bauteile, als typisches Beispiel seien hier optische Linsen genannt. Die Anwendung des Prinzips der LSWLI auf rotierenden Messobjekten ist in der Literatur beschrieben, allerdings auf äußerst große Messobjekte beschränkt und ohne Berücksichtigung des gekrümmten Scanpfads.

6.2 Wissenschaftlicher Fortschritt

Mit dem Ziel, die Ansätze der lateral scannenden Weißlichtinterferometrie zur Anwendung auf rotierenden, zylindrischen Messobjekten zu erweitern, konnten in dieser Arbeit einige wichtige Schritte umgesetzt werden.

Zunächst wurde das Prinzip der lateralen Weißlichtinterferometrie für Messungen auf rotierenden zylindrischen Körpern erweitert. Hierzu wurde die gekrümmte Scanpfadgeometrie für die Berechnung der Höhe mit einbezogen. Das geometrische Modell ist dabei nicht auf externe Zusatzinformationen angewiesen, sodass die Auswertung nur mit Parametern des Versuchsaufbaus und den gemessenen Korrelogrammen durchgeführt werden kann. Monte-Carlo-Simulationen zu den Eigenschaften des Scanpfads, der Scheitelpunktsdistanz und dem Objektradius, sowie dem gaußschen Intensitätsrauschen des Signals zeigten, dass diese einen Einfluss auf das Messergebnis haben. Das Rauschen führt jenseits von 10% der maximalen Beleuchtungsintensität zu zufälligen Abweichungen von mehr als 30 nm, weshalb die Rauschamplitude durch Einstellungen an Beleuchtung und Kamera minimiert werden sollte. Die Scheitelpunktsdistanz und der Radius haben einen systematischen Einfluss auf die Messunsicherheit. Zusammen mit der dem LSWLI inhärenten Verknüpfung von Höhenauflösung und Höhenmessbereich ist also vor einer rotatorischen LSWLI-Messung eine passende Messposition einzustellen, je nach Anforderungen an Auflösung und Messbereich. Aus den aufgenommenen Korrelogrammen werden die lateralen Positionen ihrer Hüllkurvenmaxima und die lokalen Krümmungswinkel des Scanpfads an den Positionen der Hüllkurvenmaxima benötigt. Die Maximumpositionen wurden aus den Hüllkurven der Korrelogramme ermittelt und die Bestimmung der lokalen Scanpfadkrümmungswinkel erfolgte über eine waveletbasierte Analyse der Ortsfrequenzen der Korrelogramme. Die Frequenz der Korrelogramme ist bei rotatorischen Messungen abhängig von der Messposition des WLI. Je näher das WLI am Scheitelpunkt des Scanpfads misst, desto geringer ist die Frequenz. Dieser Effekt ist so ausgeprägt, dass er schon auf den Rohbildern des WLI zu beobachten ist, sodass mit lokalen Frequenzen der Korrelogramme auch die (lokalen) Radien der Messobjekte abgeschätzt werden konnten.

Da die Position der Messobjektoberfläche im Scanverlauf bei der LSWLI einen besonders starken Einfluss auf die Topografiemessunsicherheit hat, wurde das LSWLI-Messsystem um ein integriertes Positionsmesssystem erweitert. Monte-Carlo-Simulationen zur Scanposition und dessen Messung zeigten, dass das Wissen um die Scanposition, an der die Punkte eines Korrelogramms aufgenommen wurden, einen größeren Einfluss auf die Topografiemessung hat, als eine genaue Bewegung des Messobjekts. Hieraus konnte geschlossen werden, dass ein hinreichend genaues Positionsmessgerät auch Topografiemessungen bei nicht idealen Scanbewegungen, z. B. bei nicht monoton in eine Richtung verlaufenden Scans, erlau-

ben würde. Das dazu realisierte Positionsmesssystem basiert auf dem Prinzip der digitalen Speckle-Korrelation und wurde durch Montieren einer IR-Laserdiode und optischen Filtern direkt in den Strahlengang des WLI-Setups integriert. Mit dieser unkomplizierten Ergänzung konnten die Aufnahmepositionen der WLI-Bilder mit Unsicherheiten von 0.02 Pixeln (entspricht beim verbauten Vergrößerungsfaktor einer Positionsmessunsicherheit von 11 nm zueinander positioniert werden. Diese Positionsmessunsicherheit erlaubt gemäß Monte-Carlo-Simulation eine Höhenmessunsicherheit von 23 nm. Experimentell konnte mit dem rotatorischen LSWLI-DSC-Demonstrator eine Höhenmessunsicherheit von 37,5 nm erzielt werden. Gründe für die Abweichungen sind vor allem die schwierige Überlagerbarkeit von LSWLI-Messung und VSWLI-Messung, sowie eine rauere reale Oberfläche im Vergleich zur idealen, glatten Oberfläche der Simulation.

Der integrierte DSC-Ansatz ermöglicht Verschiebungsmessungen ohne Vorwissen, ohne Änderungen am Messobjekt und ohne Zugriff auf dessen Rotationsantrieb. Während zuvor auf eine genaue Einstellung der zum jeweiligen Radius des Messobjektes passenden Rotationsgeschwindigkeit geachtet werden musste, um aus den Aufnahmen auswertbare Korrelogramme zu rekonstruieren zu können, ist nun eine freiere Geschwindigkeitswahl möglich. So konnten die Rotation des Messobjektes und die Bildaufnahme rate getrennt voneinander so eingestellt werden, dass eine höchstmögliche Aufnahmequalität erreicht wird. In Laborumgebungen wird dabei eine gleichmäßige, hohe Korrelogrammabtastrate angestrebt. Die laterale Scanschrittgröße wird dafür im einstelligen Pixel Bereich als nutzbar bewertet. Begrenzend ist dabei die Frequenz der Interferenzmuster im Einzelbild, welche im wesentlichen von der Krümmung des Scanpfads abhängig ist. Bei geringen Steigungen des Scanpfads, also einem breiten Muster, sind auch höhere Schrittweiten denkbar. Dies geht allerdings wieder zu Lasten des Höhenmessbereichs.

Es wurden zwei Anwendungsszenarien untersucht, bei denen die Neuheiten des LSWLI-DSC-Demonstrators vorgestellt werden konnten.

Im ersten Anwendungsszenario wurde die innere Laufbahn eines Typ 6209 Kugellagers untersucht. Der Innenring wurde hierzu auf einem präzisen Rotationstisch montiert. Mit einer Geschwindigkeit von rund $6 \mu\text{ms}^{-1}$ wurde das Objekt rotiert. Aufgrund der genau eingestellten Ausrichtung des Messobjektes konnte mehr als eine vollständige Umdrehung des Messobjektes ohne Unterbrechung aufgenommen werden. Der Datensatz, der dabei entstanden ist, umfasst über sechzigtausend Bilder mit einer Größe von 1200×576 Pixeln, wobei 300 der 576 Pixel für die WLI-Auswertung zur Verfügung standen. Bei vollständiger Auswertung der vorhandenen Daten würde eine Topografie mit einer Fläche von über 91 Megapixeln entstehen. Zur Demonstration der Fähigkeit des Demonstrators zu solch langen Messungen bei hoher Wiederholbarkeit des Messergebnis wurden zwei Detailbereiche ausgewertet - der Anfang der Topografiemessung und dessen Wiederholung nach einer Umdrehung. Der Vergleich zeigte, dass die Topografien eine große Übereinstimmung aufweisen. Nach Ausrichtung der beiden Topografien zueinander und Subtraktion voneinander verblieb eine Differenztopografie mit einer Standardabweichung von 95,5 nm, welche vor allem auf schmale und steile Oberflächenstrukturen zurückzuführen ist. Es sind also kontinuierliche, lange Messungen nicht nur möglich, sie haben auch eine hohe Wiederholbarkeit.

Im zweiten Anwendungsszenario wurde sich der Anwendbarkeit des LSWLI-DSC-Demonstrators auf schnell rotierende Objekte im Produktionsumfeld gewidmet. Das Szenario zielte auf die Anwendung des Messsystems auf den Dressierwalzen im Lappstand in einem Kaltwalzwerk ab. Vor der tatsächlichen Anwendung am Lappstand wurde zunächst ein schnell rotierender Objektantrieb im Labor realisiert. Mit diesem wurden die Rotationsbedingungen des Produktionsumfelds ohne zusätzliche Störeinflüsse nachgebildet. Die Rotationsgeschwindigkeit des Testobjektes war mit 125 mm s^{-1} zu schnell, um sie mit der normalen Aufnahmezeit der verwendeten Kamera aufzunehmen. Es wären dafür Bildaufnahmezeiten von mehreren 10 kHz nötig, um eine ausreichende Abtastdichte zu erreichen oder um überhaupt eine Überlappung der Einzelbilder zu realisieren. Einen Ausweg liefert die Steuerung der Aufnahme durch eine Triggerung. Durch Ergänzung des Demonstratormesssystems durch einen Trigger, welcher bei einem festen Rotationswinkel auslöst, sowie einem Mikrocontroller, welcher inkrementell ansteigend die Weiterleitung des Triggersignals an die Kamera verzögert, wird ein lateraler Scan durchgeführt, welcher von der Bewegung des Messobjekt entkoppelt ist. Die Schrittweite ist bei diesem Scanmodus durch das minimal realisierbare Triggerverzögerungssinkrement des Mikrocontrollers nach unten begrenzt. Die Objektgeschwindigkeit ist nach oben begrenzt durch die minimale Belichtungszeit der Kamera und der damit verbundenen Bewegungsunschärfe. Mit diesem neuen entkoppelten Scanmodus konnte die Oberfläche bei hohen Oberflächengeschwindigkeiten aufgenommen werden. Durch das Sortieren der Daten nach der lateralen Verschiebung konnten plausible Korrelogramme aus dem Bildstapel rekonstruiert werden. Aufgrund von nicht-kompensierbaren axialen Störbewegungen (vmtl. Vibrationen) und einer geringeren Abtastdichte verfügen diese jedoch nicht über die gleiche Qualität, wie die Korrelogramme aus den kontrollierten Laborbedingungen. Ihre Qualität ist ausreichend für eine Berechnung des Hüllkurvenmaximums. Zur Frequenzbestimmung können sie jedoch nicht benutzt werden - die Frequenzen wurden abweichend aus den Rohbildern abgeschätzt. Nachdem die Messfähigkeit im Labor grundsätzlich nachgewiesen werden konnte, wurde das LSWLI-DSC-Demonstratormesssystem am echten Prozess, an der Lappbank zur Regenerierung von Dressierwalzen, ausprobiert. Die Störbewegungen waren im tatsächlichen Prozess deutlich stärker als im Laborversuch. Während im Labor laterale Bewegungsschwankungen mit Standardabweichungen im Bereich $0,15 \mu\text{m}$ beobachtet wurden, waren diese im Prozessumfeld mit rund $2 \mu\text{m}$ über eine Größenordnung stärker. Auch axiale Positionsschwankungen durch Vibration spielten im Labor eine vernachlässigbare Rolle. Mit Hilfe des integrierten DSC-Verschiebungsmesssystems konnten die lateralen Bewegungen ausgeglichen und Korrelogramme rekonstruiert werden. Aufgrund der extremen axialen Vibrationen waren die Korrelogramme der lateralen Messung derartig degeneriert, dass nur eine sehr grobe Abschätzung der Topografie möglich war, bei der lediglich grobe Strukturen erkennbar waren. Bei einer VSWLI-Messung mit dem Demonstratormesssystem konnten Korrelogramme durch dreidimensionale Bewegungskompensation rekonstruiert werden, bei denen Auswertemethoden, welche den Frequenzanteil des Korrelogramms berücksichtigen, angewendet werden könnten. Die Anwendung am tatsächlichen Prozess zeigte, dass zwar auch dort bei hoher Oberflächengeschwindigkeit entkoppelt gescannt werden konnte und der Messfehler auch bei extremen Umgebungsvibrationen durch laterale Kompensation wiederherge-

stellt werden kann, allerdings sind aufgrund der bislang fehlenden axialen Kompensation keine qualitativ hochwertigen Korrelogramme rekonstruierbar. An dieser Stelle gibt es also weiteren Forschungsbedarf.

6.3 Weiterführender Forschungsbedarf

Die zuvor angesprochenen Fortschritte am LSWLI Prinzip brachten die Technologie einer in-prozess Anwendung bereits näher, allerdings wurden während der Bearbeitungszeit einige Grenzen erreicht, die zum einen durch weitere Investitionen verschoben werden könnten, und zum anderen, durch weiterführende Forschungsanstrengungen verschoben oder umgangen werden können. Dieser Abschnitt behandelt die offenen Forschungsthemen.

Ein entscheidender Beitrag zur Verbesserung des LSWLI-Ansatzes war die Integration der DSC-Positionsmessung in die WLI-Optik. Durch die synchrone, hochpräzise Messung der lateralen Oberflächenbewegung konnte nicht nur die Messunsicherheit unter Laborbedingungen verbessert werden, sondern auch eine Kompensation der lateralen Komponenten von unerwünschten Vibrationen und Erschütterungen erreicht werden. Eine Kompensation unerwünschter vertikaler Bewegungen wurde nicht umgesetzt. Mit den vorhandenen Mitteln, also dem WLI- und dem DSC-Signal ist eine Messung dieser vertikalen Bewegungen, also koaxial zur optischen Achse, denkbar. Die WLI-Information der Einzelbilder kann wie beim VSWLI-Test in Abschnitt 5.2.2 verwendet werden und vom DSC-Signal können auch axiale Informationen der Speckle genutzt werden, wie Tausendfreund et al. demonstrieren [73]. Für die VSWLI existieren Ansätze, bei denen weitere unterstützende Messtechnik zur Messung und Kompensation von Vibrationen zum Einsatz kommt [38]. Diese ergänzenden Systeme sind prinzipiell kompatibel zum aktuellen LSWLI-Demonstrator, weshalb die Integration weiterer Messtechnik zur Messung der vertikalen Bewegungskomponente ein sinnvoller Evolutionsschritt wäre. Ist die (unerwünschte) vertikale Bewegung messbar gemacht, ist zu untersuchen, wie diese Informationen bei der LSWLI weiter genutzt werden kann. Eine Änderung der vertikalen Messpositionen hat bei der LSWLI zur Folge, dass die Daten einen Höhengsprung enthalten können, dessen Lücken die Korrelogrammform verändern.

Ein weiteres Forschungspotenzial für den Fortschritt der WLI im Allgemeinen bietet der Einsatz von Waveletmethoden für die Auswertung der Korrelogramme. Die verwendeten Methoden aus der Matlab Wavelettoolbox erwiesen sich als äußerst robust gegenüber geringen SNRs und Verzerrungen der Korrelogramme und können mit wenigen Zusatzdaten eingesetzt werden. Aufgrund der Krümmung des Scanpfads bei rotatorischen Messungen werden die Korrelogramme, wenn sie über die Bildfolge oder die laterale Position aufgetragen werden, verzerrt dargestellt (vgl. 4.1.2.1). Bei einem Auftrag über die vertikale Position würde das Korrelogramm symmetrisch erscheinen, nur die Punktedichte in z -Richtung würde mit Entfernung vom Scheitelpunkt abnehmen. Die symmetrischen Signale müssten sich besser mit den Fit-Methoden bezüglich der Hüllkurvenmaximumsposition auswerten lassen, allerdings werden hierzu die z -Positionen des Scanpfads benötigt. Die z -Positionen werden auch aus den Korrelogrammen über eine Frequenzauswertung berechnet. Es ist eine

offene Forschungsfrage, wie sich die Messunsicherheit der z-Positionen auf die Höhenunsicherheit auswirkt, wenn sie früher in der Auswertungs-pipeline verwendet wird.

Wird die Messposition des WLI in allen drei Raumrichtungen mitgemessen, eröffnen sich weitere Möglichkeiten für neue Anwendungen und Scanmodi. Es sind prozessnähere Messungen möglich als bisher, da der Einfluss vertikaler Bewegungen ausgeglichen werden kann. Perspektivisch ist außerdem eine weitere Loslösung vom strengen Folgen eines (einzigen) definierten Scanpfads denkbar. In dieser Arbeit wurde noch am festen rotatorischen Scanpfad festgehalten und zunächst die strenge chronologische Aufnahmereihenfolge aufgelöst durch Sortieren nach per DSC gemessener Position (Abschnitt 5.2.2). Der nächste Schritt, ermöglicht durch Messen der vertikalen Position, ist das (dynamische) Wechseln des rotatorischen Scanpfads. So sind neben dem sequentiellen Scannen einer Oberfläche bei verschiedenen vertikalen Abständen auch hybride Scanmodi mit dynamisch nachgeführtem vertikalen Abstand denkbar. Durch diese zusätzliche Scanbewegung kann der bislang notwendige Kompromiss zwischen Messauflösung und Messbereich aufgelöst werden, da der Messbereich durch die vertikale Bewegung erweitert würde. Das dynamische Nachführen des Scanpfads eröffnet neue Anwendungsgebiete der WLI an komplexeren rotierenden Objekten, jenseits von einfachen Zylindern, beginnend bei ovalen Bauteilen, wie Nocken, bis zu komplexeren Geometrien mit stark vom Kreisprofil abweichenden Geometrien, wie Verzahnungen. Eine Forschungsfrage, welche insbesondere für komplexere Geometrien beantwortet werden müsste, ist, wie sich die Effekte einer abweichende Bewegung des Objektes, bspw. durch exzentrische Rotation oder Taumeln, von Effekten der Form des Messobjektes in den aufgenommenen Daten unterscheiden lassen. Formänderungen und Bewegungsänderungen unterscheiden sich in ihrem Einfluss auf die Gestalt des Interferenzsignals nicht offensichtlich, weshalb Forschungsansätze zur geometrisch/analytischen Untersuchung dieser Einflüsse bei zylindrischen Messobjekten oder für komplexere Messobjekte Untersuchungen zur Lösung dieses Problems mit Methoden der künstlichen Intelligenz verfolgt werden sollten.

Literaturverzeichnis

- [1] Milledge, J. J.: *The cleanability of stainless steel used as a food contact surface:an updated short review*. Fusion Science and Technology Vol.24(3), 2010.
- [2] Li, C., B. Fu, T. Zhu und Y. Li: *Roughness and Glossiness of SUS430 Stainless Steel in Cold Rolling*. Procedia Engineering, Vol. 81:167–172, 2014. 05.08.2022.
- [3] L. F. Folle, L. Schaeffer: *Effect of surface roughness and lubrication on the friction coefficient in deep drawing processes of aluminum alloy aa1100 with FEM analysis*. revista Matéria Vol.24(1), 2019;.
- [4] Xu, D., Q. Yang, X. Wang, H. He, Y. Sun und W. Li: *An Experimental Investigation of Steel Surface Topography Transfer by Cold Rolling*. Micromachines, 11(10), 2020, ISSN 2072-666X.
- [5] ASTM D523: *Test Method for Specular Gloss*.
- [6] ASTM E430: *Test Methods for Measurement of Gloss of High-Gloss Surfaces by Abridged Goniophotometry*.
- [7] DIN EN ISO 4287:2010-07 - *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. 2010.
- [8] DIN EN ISO 25178-1:2016-12 - *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 1: Angabe von Oberflächenbeschaffenheit*. 2016.
- [9] OptOChar Konsortium: *Projektsteckbrief: Optische Oberflächen-Charakterisierung im Fertigungsprozess Hardware (OPTOCHAR)*.
- [10] DIN EN ISO 3274:1998-04 - *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten*. 1998.
- [11] Wolfgang Osten, Christophe Gorecki und Erik L. Novak (Herausgeber): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV*, SPIE Proceedings. SPIE, 2005.
- [12] Mikulewitsch, M., A. von Freyberg und A. Fischer: *Confocal fluorescence microscopy for geometry parameter measurements of submerged micro-structures*. Optics Letters, 44(5):1237–1240, 2019, ISSN 1539-4794.
- [13] Aumann, S., S. Donner, J. Fischer und F. Müller: *High resolution imaging in microscopy and ophthalmology: New frontiers in biomedical optics*. Springer, Cham, 2019, ISBN 9783030166373.

- [14] Dupriez, N. D. und C. Truckenbrodt: *OCT for Efficient High Quality Laser Welding*. Laser Technik Journal, 13(3):37–41, 2016, ISSN 16137728.
- [15] Wang, J., R. K. Leach und X. Jiang: *Review of the mathematical foundations of data fusion techniques in surface metrology*. Surface Topography: Metrology and Properties, 3(2):023001, 2015, ISSN 2051-672X.
- [16] Strohmeier, M., M. Schröder und C. Faber: *Optical inline inspection detecting 3D defects on complex free-form surfaces in harsh production environments*. tm - Technisches Messen, 86(6):335–344, 2019, ISSN 0171-8096.
- [17] Leonhardt, K., U. Droste und H. J. Tiziani: *Microshape and rough-surface analysis by fringe projection*. Applied Optics, 33(31):7477–7488, 1994.
- [18] Yupeng, Z., L. Liayan, G. Weitao, Y. Haihua, W. Wei, Z. Chongying, W. Peng und U. Toshitsugu: *Autofocus System and Evaluation Methodologies: A Literature Review*. Sensors and Materials, Seite 1165, 2018, ISSN 0914-4935.
- [19] de Groot, P. J. und J. F. Biegen: *Interference microscope objectives for wide-field areal surface topography measurements*. Optical Engineering, 55(7):074110, 2016, ISSN 0091-3286.
- [20] Flournoy, P. A., R. W. McClure und G. Wyntjes: *White-light interferometric thickness gauge*. Applied Optics, 11(9):1907–1915, 1972.
- [21] Davidson, M., K. Kaufman, I. Mazor und F. Cohen: *An Application Of Interference Microscopy To Integrated Circuit Inspection And Metrology*. In: Monahan, Kevin M. (Herausgeber): *Integrated Circuit Metrology, Inspection, & Process Control*, SPIE Proceedings, Seite 233. SPIE, 1987.
- [22] Lee, B. S. und T. C. Strand: *Profilometry with a coherence scanning microscope*. Applied Optics, 29(26):3784–3788, 1990.
- [23] Kino, G. S. und S. S. Chim: *Mirau correlation microscope*. Applied Optics, 29(26):3775–3783, 1990.
- [24] de Groot, P. J.: *Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography*. Advances in Optics and Photonics, 7(1):1, 2015.
- [25] Wyant, J. C.: *White light interferometry*. In: Caulfield, H. John (Herausgeber): *Holography: A Tribute to Yuri Denisyuk and Emmett Leith*, SPIE Proceedings, Seiten 98–107. SPIE, 2002.
- [26] Lehmann, P.: *Vertical scanning white-light interference microscopy on curved microstructures*. Optics letters, 35(11):1768–1770, 2010.
- [27] Laubach, S., G. Ehret, J. Riebling und P. Lehmann: *Combination of a fast white-light interferometer with a phase shifting interferometric line sensor for form measurements of precision components*. In: Lehmann, P., W. Osten und A. Albertazzi Gonçalves (Herausgeber): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X*, SPIE Proceedings, Seite 103291D. SPIE, 2017.

- [28] Scheiding, S., A. Y. Yi, A. Gebhardt, L. Li, S. Risse, R. Eberhardt und A. Tünnermann: *Freeform manufacturing of a microoptical lens array on a steep curved substrate by use of a voice coil fast tool servo*. Optics express, 19(24):23938–23951, 2011.
- [29] Olszak, A.: *Lateral scanning white-light interferometer*. Applied Optics, 39(22):3906–3913, 2000.
- [30] Bahr, S., M.A. Otto, T. Domaschke und T. Schüppstuhl: *Continuous Digitalization of Rotationally Symmetrical Components With a Lateral Scanning White Light Interferometer*. In: Schüppstuhl, Thorsten, Jörg Franke und Kirsten Tracht (Herausgeber): *Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, Seiten 135–143. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017, ISBN 978-3-662-54440-2.
- [31] M. A. Otto: *Automated high-precision crack detection in airplane combustion chamber liners using white light interferometry*.
- [32] Munteanu, F.: *Self-calibrating lateral scanning white-light interferometer*. Applied Optics, 49(12):2371–2375, 2010.
- [33] Restle, J.: *Optimierung der Weißlichtinterferometrie für die Vermessung zylindrischer Objekte (Optimisation of White Light Interferometry for Measuring Cylindrical Objects)*. tm - Technisches Messen, 70(10):482–488, 2003, ISSN 0171-8096.
- [34] Kapusi, D., T. Machleidt, E. Manske, K. H. Franke und R. Jahn: *White light interferometry utilizing the large measuring volume of a nanopositioning and nanomeasuring machine*. Proceedings / Internationales Oberflächenkolloquium 12 2008 Chemnitz, Seiten 210–217, 2008.
- [35] Michelson, A. A. und E. W. Morley: *On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether*. American Journal of Science, s3-34(203):333–345, 1887, ISSN 0002-9599.
- [36] Mirau, A. H.: *Interferometer*. <https://patentimages.storage.googleapis.com/de/f3/c6/82ea6fd09befcd/US2612074.pdf>, 06.08.2022.
- [37] Kiselev, I., E. I. Kiselev, M. Drexel und M. Hauptmannl: *Noise robustness of interferometric surface topography evaluation methods. Correlogram correlation*. Surface Topography: Metrology and Properties, 5(4):045008, 2017, ISSN 2051-672X.
- [38] Tereschenko, S. und P. Lehmann: *Inline-fähige Weißlichtinterferometrie mit integrierter Schwingungskompensation*. tm - Technisches Messen, 86(4):197–207, 2019, ISSN 0171-8096.
- [39] Behrends, G., D. Stöbener und A. Fischer: *Lateral scanning white-light interferometry on rotating objects*. Surface Topography: Metrology and Properties, 8(3):035006, 2020, ISSN 2051-672X.
- [40] Lehmann, P., S. Tereschenko und W. Xie: *Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry*. Surface Topography: Metrology and Properties, 4(2):024004, 2016, ISSN 2051-672X.

- [41] Adrian, R. J. und J. Westerweel: *Particle image velocimetry*, Band 30 der Reihe *Cambridge aerospace series*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2011, ISBN 9780521440080.
- [42] McGorty, R., D. Kamiyama und B. Huang: *Active Microscope Stabilization in Three Dimensions Using Image Correlation*. *Optical Nanoscopy*, 2(1):1–7, 2013, ISSN 2192-2853.
- [43] Guizar-Sicairos, M., S. T. Thurman und J. R. Fienup: *Efficient subpixel image registration algorithms*. *Optics letters*, 33(2):156–158, 2008.
- [44] Evangelidis, G. D. und E. Z. Psarakis: *Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization*. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 30(10):1858–1865, 2008, ISSN 0162-8828.
- [45] Soummer, R., L. Pueyo, A. Sivaramakrishnan und R. J. Vanderbei: *Fast computation of Lyot-style coronagraph propagation*. *Optics Express*, 15(24):15935–15951, 2007, ISSN 1094-4087.
- [46] Tausendfreund, A., F. Frerichs, D. Stöbener und A. Fischer: *Experimental validation of workpiece deformation simulations by means of rigorous boundary condition analysis*. *Procedia CIRP*, 108:341–345, 2022, ISSN 22128271.
- [47] Schweickhardt, L., A. Tausendfreund, D. Stöbener und A. Fischer: *Noise reduction in high-resolution speckle displacement measurements through ensemble averaging*. *Applied Optics*, 60(7):1871–1880, 2021.
- [48] Dong, Y. L. und B. Pan: *A Review of Speckle Pattern Fabrication and Assessment for Digital Image Correlation*. *Experimental Mechanics*, 57(8):1161–1181, 2017, ISSN 1741-2765.
- [49] Cloud, G. L.: *Chapter 21 - Laser and White-Light Speckle Techniques: A Tutorial Review*. *Advancement of Optical Methods and Digital Image Correlation in Experimental Mechanics*, Vol.3 pp141–172, 2019;.
- [50] Gåsvis, K. J.: *Optical metrology*. Wiley, Chichester, 3. ed. Auflage, 2002, ISBN 0-470-84300-4.
- [51] Goodman, J. W.: *Speckle phenomena in optics: Theory and applications*. Roberts, Englewood, Colo., 2007, ISBN 0-9747077-9-1.
- [52] Fischer, A.: *Fundamental uncertainty limit for speckle displacement measurements*. *Applied Optics*, 56(25):7013–7019, 2017.
- [53] Behrends, G., D. Stöbener und A. Fischer: *Integrated, Speckle-Based Displacement Measurement for Lateral Scanning White Light Interferometry*. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(7), 2021.
- [54] Nikon: *Microscope Components for Reflective Light Applications*. Prospekt, 2010. 07.08.2022.
- [55] STEMMER IMAGING AG: *High-output Spotlights HLV2 Series*, 2018. <https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/illumination/12/121410-CCS-HLV2.pdf>, 07.08.2022.

- [56] Philips Lumileds: *Technical data for Luxeon Star Power LEDs*, 2006. 02.05.2022.
- [57] Teledyne FLIR LLC: *FLIR Grasshopper3 USB3, GS3-U3-23S6M-C*, 2021. <https://www.flir.de/products/grasshopper3-usb3/?model=GS3-U3-23S6M-C&vertical=optical+gas&segment=solutions>, 07.08.2022.
- [58] LINOS Photonics GmbH & Co. KG: *MS 30 Miniature Translation Stages with piezo electric inertial drive*, 2008. https://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/en/00006955_0.pdf.
- [59] Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG: *Piezo-Controller CF 30*, 2011. http://www.qioptiq-shop.com/out/Graphics/de/00110348_0.pdf, 07.08.2022.
- [60] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG: *Precision Rotation Stage L-611 Datasheet*, 2021. https://www.physikinstrumente.de/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/datasheets/L-611-Datasheet.pdf, 10.08.2022.
- [61] Fischer, A., D. Stöbener und G. Behrends: *A lateral-scanning white-light interferometer for topography measurements on rotating objects in process environments*. CIRP Annals, 71(1):437–440, 2022, ISSN 00078506.
- [62] Lilly, J. M. und S. C. Olhede: *Generalized Morse Wavelets as a Superfamily of Analytic Wavelets*. IEEE Transactions on Signal Processing, 60(11):6036–6041, 2012, ISSN 1053-587X.
- [63] Scientific Imaging, Inc.: *2.3MP Sony Pregius Gen1 Imager Based Camera*, 2022. <https://scientificimaging.com/shop/cmos-cameras/2-3mp-sony-pregius-gen1>, 07.08.2022.
- [64] Laser Components GmbH: *FLEXPOINT® Machine Vision Lasers MVnano Series (Edition 2017)*, 2017. <https://www.recurtoslaser.es/wp-content/uploads/modulo-laser-vision-artificial-mv-nano.pdf>, 07.08.2022.
- [65] Edmund Optics Inc.: *Coating Curve 800nm Dichroic Shortpass Filter*, 2012. <https://www.edmundoptics.de/document/download/358728>, 07.08.2022.
- [66] Edmund Optics Inc.: *Coating Curve 650 nm Dichroic Longpass Filter*, 2012. <https://www.edmundoptics.com/document/download/359086>, 07.08.2022.
- [67] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology: *JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008.
- [68] Joint Committee for Guides in Metrology: *JCGM 101:2008 - Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*. 2008.
- [69] Grubbs, F. E.: *Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples*. Technometrics, 11(1):1, 1969, ISSN 00401706.
- [70] Morales-Espejel, G. E., V. Brizmer und E. Piras: *Roughness evolution in mixed lubrication condition due to mild wear*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 229(11):1330–1346, 2015, ISSN 1350-6501.

- [71] Surm, H., T. Karsch, O. Keßler, F. Hoffmann und H. W. Zoch: *Rundheitsänderungen bei der ungleichmäßigen Erwärmung von Wälzlagerungen**. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 62(4):150–156, 2007, ISSN 1867-2493.
- [72] AB SKF: *6209 Rillenkugellager - Technische Spezifikationen*, 2022. <https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6209>, 08.08.2022.
- [73] Tausendfreund, A., D. Stöbener und A. Fischer: *In-Process Measurement of Three-Dimensional Deformations Based on Speckle Photography*. *Applied Sciences*, 11(11):4981, 2021.

Eigene Veröffentlichungen

Zeitschriften (mit Peer-Review)

- G. Behrends**, D. Stöbener, A. Fischer: Lateral scanning white-light interferometry on rotating objects. *Surface Topography: Metrology and Properties* 8(3):035006 (13 pp.), 2020. doi.org/10.1088/2051-672X/aba484
- G. Behrends**, D. Stöbener, A. Fischer: Integrated, speckle-based displacement measurement for lateral scanning white light interferometry. *Sensors* 21(7):2486 (17 pp.), 2021. doi.org/10.3390/s21072486
- A. Fischer, D. Stöbener, **G. Behrends**: A lateral-scanning white-light interferometer for topography measurements on rotating objects in process environments. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 71(1):437-440, 2022. doi.org/10.1016/j.cirp.2022.03.007

Konferenzbeiträge

- G. Behrends**, D. Stöbener, A. Fischer: Topografiemessung gekrümmter Oberflächen mittels lateral scannender Weißlichtinterferometrie. 120. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik e. V. (DGaO), Darmstadt, 11.-15.6.2019, No. B29 (2 pp.).
- G. Behrends**, D. Stöbener, A. Fischer: Lateral scanning white-light interferometry with integrated displacement measurements using laser speckles. Euspen's 21st International Conference & Exhibition, Copenhagen, 7.-10.6.2021, No. ICE21142 (4 pp.).
- G. Behrends**, D. Stöbener, A. Fischer: Digitale Speckle-Korrelation zur Vorschubbestimmung bei der lateral scannenden Weißlichtinterferometrie. 122. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik e. V. (DGaO), Bremen, 21.-23.9.2021, No. A8.
- A. Fischer, D. Stöbener, **G. Behrends**: A lateral-scanning white-light interferometer for topography measurements on rotating objects in process environments. 71th CIRP General Assembly, Bilbao, Spain, 21.-27.8.2021, No. P05.

Betreute studentische Arbeiten

Michael Arenz: Bachelorarbeit zum Thema: Optische Simulation eines lateral scannenden Weißlichtinterferometers. Abgabe am 19.01.2020.

Fabian Becke, Celine Höpfner, Oleg Botvinikov: Lehrprojekt Wirtschaftsingenieurwesen Produktionstechnik: Entwicklung eines Autofokussystems für die lateral scannende Weißlichtinterferometrie. Abgabe am 05.07.2022.

