



Stephan Stoica, BSc

Verbesserung der Video-Extensometrie durch laserbasierte Messung von nicht-planaren Translationsbewegungen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Technische Physik

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Phys. Dr.rer.nat. Wolfgang Sprengel

Institut für Materialphysik

Graz, Februar 2016

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Herrn Professor Sprengel für die Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit bedanken. Außerdem möchte ich die gute Zusammenarbeit mit dem Institut für Materialphysik hervorheben.

Des weiteren gilt mein besonderer Dank der Firma Messphysik Materials Testing GmbH, ohne deren Kooperation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Ich danke Herrn Peter Ruchti für die Bereitstellung der Ressourcen und Herrn Oliver Spinka für die fachliche Betreuung.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The uploaded text document in TUGRAZonline is identical with the present master thesis.

Graz, _____

Date

Signature

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, _____

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Eine immer wiederkehrende Herausforderung bei der Analyse von Zugversuchen in der Materialprüfung mit optischen Messsystemen sind Fehler, die durch Bewegung der Probe von und zu der Kamera hervorgerufen werden. Die Distanzänderung lässt ein Objekt am Detektor größer oder kleiner erscheinen. Diese Änderung der Objektgröße überlagert sich mit der Dehnung und das verfälscht die Messergebnisse. Ohne zusätzliche Hilfsmittel ist dieser Fehler nicht korrigierbar, wodurch der Einsatz dieser Messmethode limitiert ist.

In dieser Arbeit wurde eine verbesserte Messmethode entwickelt, mit der zusätzlich zur Dehnung die Distanzänderung der zu prüfenden Oberfläche zur Kamera direkt und kontinuierlich gemessen werden kann, und somit eine Korrekturmöglichkeit über einfache trigonometrische Rechnungen erlaubt. Realisiert wurde ein Prototyp, mit dem an zwei verschiedenen Prüfmaschinen Messungen mit verschiedenen Parametern durchgeführt wurden. Die Distanzänderung zwischen Kamera und Probe konnte mit einer Genauigkeit von $30\ \mu\text{m}$ gemessen werden.

Am Beispiel einer simulierten Korrektur einer realen Dehnungsmessung wird die hervorragenden Verbesserung demonstriert, die mit dieser Methode erzielt werden kann. Weiters wurde aufgezeigt, dass mit einfachen Mitteln noch eine weitere Verbesserung um mindestens einen Faktor 5 erreicht werden kann. Dies und die einfache und günstige Integrationsmöglichkeit in bestehende kommerzielle Produkte bieten eine gute Basis für die Entwicklung eines neuen Messgerätes.

Abstract

A reoccurring challenge in the analysis of strain measurements in the field of materials testing with optical extensometers is the movement of the specimen towards and away from the camera during the deformation. The change in the distance translates into a change of the object size on the camera chip. This dimensional change adds to the elongation and thus corrupts the measurement results. It is not possible to correct this error without additional equipment.

In this thesis a method was developed which measures the change in the distance between the specimen and the camera directly and continuously and a mathematical correction based on simple trigonometry is provided. A prototype was developed and tested on two different material testing machines with varying parameter sets. The distance change could be measured with an accuracy of 30 μm .

Applied to a real measurement the simulated correction shows the remarkable results that can be achieved with this method. Furthermore, some simple adjustments were proposed which can improve the results at least by a factor of five. Considering this and the easy and efficient way this method can be integrated in an existing commercial measurement device, it is a promising start for the development of a new product.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Stand der Technik	5
2.1. Kontaktierende Aufnehmer	5
2.2. Nicht kontaktierende Aufnehmer	5
2.3. Methoden der Abstandskompensation	7
2.4. Methoden der Distanzmessung	8
2.5. Methoden der Abstandskompensation bei optischer Dehnungs- messung	10
3. Grundlagen	13
3.1. Verwendete Methode	13
3.2. Abschätzung des Fehlers durch Out-of-Plane (OOP) Bewegungen	14
3.3. Triangulation	17
3.4. Gesamtmessung	21
3.5. Möglichkeiten der Messung	25
3.6. Laser Speckles	26
4. Aufbau und Messergebnisse	29
4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes	29
4.2. Distanzmessung an Prüfmaschine	38
4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine	48
5. Auswertung	59
5.1. Messungen Prüfmaschine	59
5.2. Messungen Kalibriermaschine 1	67
5.3. Messungen Kalibriermaschine 2	74
5.4. Messung Kalibriermaschine Strich	81

6. Zusammenfassung und Ausblick	87
6.1. Zusammenfassung	87
6.2. Bewertung	90
6.3. Ausblick	93
Literatur	95
Anhang	99
A. Programmcode Matlab	99
A.1. Code zur Auflösungsbestimmung	99
A.2. Funktion zur Bestimmung der Plateaus	101
A.3. Funktion Fit der Kurven	103
A.4. Konstante Korrektur	105

Abbildungsverzeichnis

2.1. Laser Extensometer	6
2.2. Laser Speckle Pattern	7
2.3. Lasertriangulation	9
2.4. Konfokale Abstandsmessung	9
2.5. Telezentrisches Objektiv	11
3.1. Skizze Berechnung OOP-Bewegung	14
3.2. Skizze Berechnung Triangulation	17
3.3. Skizze Vergleich Triangulation Achsenparallel - unter Winkel . .	18
3.4. Verstärkungsfaktor T	20
3.5. Skizze Erhöhung Verstärkungsfaktor mit Umlenkspiegel	20
3.6. Genauigkeit der Gesamtmessung	22
3.7. Messarten	25
3.8. Definition der Achsen und Bewegungen im Kamerasystem . . .	27
4.1. Aufbau Phase 1	30
4.2. Astigmatismus eines Kantenemitters	31
4.3. Kamerabild mit 2 Laserpunkten mit Detail	32
4.4. Vortest Verschiebung	33
4.5. Auflösungsmessung 1	34
4.6. Auflösungsmessung 2	35
4.7. Auflösungsmessung 3	36
4.8. Kamerabild fokussiert und aufgefächert	36
4.9. Profil eines Laserpunktes	37
4.10. Aufbau Phase 2	39
4.11. Testreihe 2	43
4.12. Testreihe 3	44

Abbildungsverzeichnis

4.13. Testreihe 4	45
4.14. Testreihe 5	46
4.15. Testreihe 6	47
4.16. Renishaw Laser-Interferometer	49
4.17. Kalibriermaschine Aufbau	50
4.18. Auflösungs-messung Kalibriermaschine 1	51
4.19. Messreihe 1	52
4.20. Auflösungs-messung Kalibriermaschine 2	54
4.21. Messreihe 2	55
4.22. Laserlinie im Auswertebild	57
4.23. Auflösungs-messung Kalibriermaschine Strich	57
4.24. Messreihe Strich	58
5.1. Erkennung der Plateaus	62
5.2. Korrektur um konstanten Faktor	63
5.3. Abweichung der konstanten Korrektur	63
5.4. Abweichung der linearen Regression	64
5.5. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit	65
5.6. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit 2	66
5.7. Korrektur um konstanten Faktor KM1	69
5.8. Abweichung der konstanten Korrektur KM1	69
5.9. Abweichung der linearen Regression KM1	70
5.10. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit KM1	71
5.11. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit 2 KM1	72
5.12. Korrektur um konstanten Faktor KM2	75
5.13. Abweichung der konstanten Korrektur KM2	75
5.14. Abweichung der linearen Regression KM1	76
5.15. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit KM2	77
5.16. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit 2 KM2	78
5.17. Speckle Veränderung	79
5.18. Korrektur um konstanten Faktor KMS	82
5.19. Abweichung der konstanten Korrektur KMS	83
5.20. Abweichung der linearen Regression KMS	83
5.21. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit KMS	84
5.22. Korrigierte Messungen Reproduzierbarkeit 2 KMS	85

6.1. Zusammenfassung Messergebnisse	89
6.2. Auswirkungen der Verschiebung auf Messung	92
6.3. Kostenvergleich verschiedener Messprinzipien	94

1. Motivation

Fortschritt ist die Maxime der Gegenwart. Wissen und Technik schreiten mit der Arbeit der Universitäten und Forschungslabore ständig voran. Unternehmen für den Consumer-Markt entwerfen Produkte, die in ihren Dimensionen immer weiter abnehmen aber funktionell komplexer werden. Architekten entwerfen Gebäude, die über einen Kilometer hoch sind. Die Grundlagenforschung benötigt immer exotischere Materialien, um ihre Theorien überprüfen zu können.

Um diese Entwicklungen zu ermöglichen werden auch immer höhere Anforderungen an die verfügbaren Werkstoffe gestellt, wodurch der Materialentwicklung und -forschung eine bedeutende wirtschaftliche Rolle zukommt. Mechanische Materialprüfung ist einer der Eckpfeiler, die eine Entwicklung neuer Materialien ermöglicht. Mit ihr können gewünschte Materialeigenschaften optimiert und die verschiedenen Produktionsverfahren verglichen und verbessert werden. Bei Anwendungen mit Anspruch auf hohe Qualität oder Sicherheit ist die ständige Überprüfung kritischer Materialparameter notwendig, um erforderliche Normen und Standards erfüllen zu können.

Lange Zeit wurde die mechanische Materialprüfung von rein mechanischen Methoden geprägt. Erste systematische Untersuchungen an Metalldrähten wurden schon von Leonardo da Vinci (1452 - 1519) durchgeführt, indem er die Last bestimmte, unter der ein Draht reißt [KL83]. Größere Bedeutung wurde in der Zeit der Industrialisierung erlangt, als schwere Unfälle zum Beispiel mit Dampfmaschinen zahlreiche Todesopfer forderten und deshalb regelmäßige Überprüfungen staatlich angeordnet wurden [Blu03].

Im letzten Jahrhundert, bedingt durch den Siegeszug der Elektronik, wurde auch die Messtechnik immer weiter digitalisiert. Diese Digitalisierung der Prüftechnik bringt immer modernere, vielseitigere Testverfahren. War man früher

1. Motivation

auf Todgewichte und Hebelarme angewiesen, um ein spezifisches Gewicht aufzubringen, kann heutzutage mit elektrischen und hydraulischen Maschinen nahezu jede beliebige Kraft eingeleitet werden, welche mit entsprechenden Sensoren in der Genauigkeitsklasse 0.1¹ gemessen werden können [HBM15]. Entsprechend verbesserte sich die Technik von Messungen mit Messschiebern nach einem Versuch hin zu hochpräzisen lokalen Erfassung mit Dehnmessstreifen. Nicht nur die Genauigkeit wurde erhöht, auch die Datenerfassung kann nun in Echtzeit erfolgen. Diese ermöglicht Analysen und Einflussnahme noch während der Prüfung.

Ein weiterer Schritt in der Entwicklung ist die optische Dehnungsmessung. Sie erlaubt die exakte Vermessung der Probe während des Versuchs mithilfe der Kamertechnik. Die Vorteile dieses Verfahrens sind vielfach. Im Gegensatz zu den gängigen Methoden wird nicht kontaktierend gearbeitet. Es wird weder durch mechanischen Kontakt noch durch Klebstoff oder andere Bindemittel Einfluss auf die Probe genommen. Umgekehrt kann die Probe auch keinen Einfluss auf das Messgerät nehmen. Speziell bei Bruch können extreme Kräfte frei werden, die kontaktierende Extensometer beschädigen oder zerstören können. Des Weiteren können Prüfungen unter schwierigen äußeren Einflüssen vorgenommen werden. Als Beispiele seien hier Prüfungen unter Hochtemperatur (>1000 °C), an radioaktiven Proben und korrosiven Atmosphären genannt. Auch Mikroproben², die durch ihre kleinen Dimensionen eine besondere Herausforderung für kontaktierende Aufnehmer darstellen, sind gut zu vermessen.

Abgesehen von diesen rein prüftechnischen Vorteilen offeriert die optische Dehnungsmessung eine vollkommen neue Art der Dehnungserfassung. Mit Dehnmessstreifen wird über einen kleinen Bereich der Probe gemittelt, mit Messfühlern wird über 2 spezifische Punkte der Probe eine gemittelte Dehnung errechnet. Diese Messung an zwei bestimmten Punkten der Probe war lange und ist auch jetzt noch die erste Wahl bei vielen optischen Prüfungen. Mit der wachsenden Rechenleistung von Computern und der Möglichkeit Bilder aufzuzeichnen kann aber auch eine automatische Auswertung an der Stelle höchster Dehnung³, ein Wiederholen des Tests mit veränderter Messlänge und

¹Genauigkeitsklassen wie in ISO 9513:2012 definiert

²Beispiele: Drähte mit 0,2 mm Durchmesser, Folien mit 0,1 mm Dicke

³mit der Option „Dehnungsverteilung“ in der *videoXtens* Software

Messposition⁴ oder gar eine komplette Berechnung der Dehnung über die gesamte Probenfläche mithilfe von Digital Image Correlation (DIC)⁵ erfolgen.

Video-Extensometer sind heutzutage in der Lage, kontaktierende Verfahren in den meisten Fällen zu ersetzen. Abgesehen von den wirtschaftlichen und versuchsbedingten Voraussetzungen muss hierbei vor allem die entsprechende Messgenauigkeit erreicht werden. Abhängig von den Materialien und der Prüfungsart definiert die Prüfnorm ein Genauigkeit, welche einzuhalten ist. Die Genauigkeit eines optischen Extensometers ist von vielen Parametern abhängig. Dazu zählen:

- Der Abstand zur Probe
- Die Auflösung des Sensors
- Die Brennweite der Linse
- Die Auflösung der Linse
- Die Abbildungsfehler des Gesamtsystems
- Umgebungseinflüsse⁶
- Qualität der Markierung
- Fähigkeit der Auswertalgorithmen
- Die Kalibration des Systems

Die Firma Messphysik Materials Testing GmbH mit Sitz in Altenmarkt 180, 8280 Fürstenfeld ist ein anerkannter Hersteller optischer Extensometer. Die produzierten Messgeräte gehören zu den besten am Markt, und sind in der Lage, die meisten gängigen Normen in der Materialprüfung zu erfüllen. Ein wiederkehrendes Problem bei den Messungen sind Out-of-Plane-Bewegungen (OOP-Bewegungen)⁷.

⁴mit der Option „Test ReRun“ in der *videoXtens* Software

⁵mit der Option „DIC“ in der *videoXtens* Software

⁶Erschütterungen, Luftströmungen unterschiedlicher Dichte, Umgebungslicht

⁷Abschnitt 3.2

1. Motivation

Im Moment besitzt das System noch keine Möglichkeit, die dadurch entstehenden Messfehler zu erkennen und zu quantifizieren. Ziel dieser Arbeit ist das Erproben eines Lösungsansatzes, der eine ausreichende Quantifizierung der OOP-Bewegung und eine wirtschaftliche Implementation in das bestehende System erlaubt.

2. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Dehnungsmessung gegeben, und welche Möglichkeiten der Abstandskompensation bei der optischen Extensometrie bestehen. Außerdem wird ein kurzer Überblick über Möglichkeiten der Distanzmessung gegeben und dabei ausgeführt, welche Methoden für diese Anwendung anwendbar sind.

Es wird gleich darauf hingewiesen, dass hier in erster Linie auf Messmethoden, die in uniaxialen Zug- und Druckversuchen ihre Anwendung finden, eingegangen wird.

2.1. Kontaktierende Aufnehmer

Da hier die Dehnung direkt am Probenkörper gemessen wird, ist in aller Regel keine Abstandskompensation nötig. Dehnungsmessstreifen werden direkt auf den Probenkörper aufgebracht. Weiters kann die Dehnung über 2 Messfühler an einen Sensor weitergegeben werden.

2.2. Nicht kontaktierende Aufnehmer

Nicht kontaktierende Extensometer werden nach Funktionsprinzip in verschiedenen Klassen eingeteilt¹.

¹Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

2. Stand der Technik

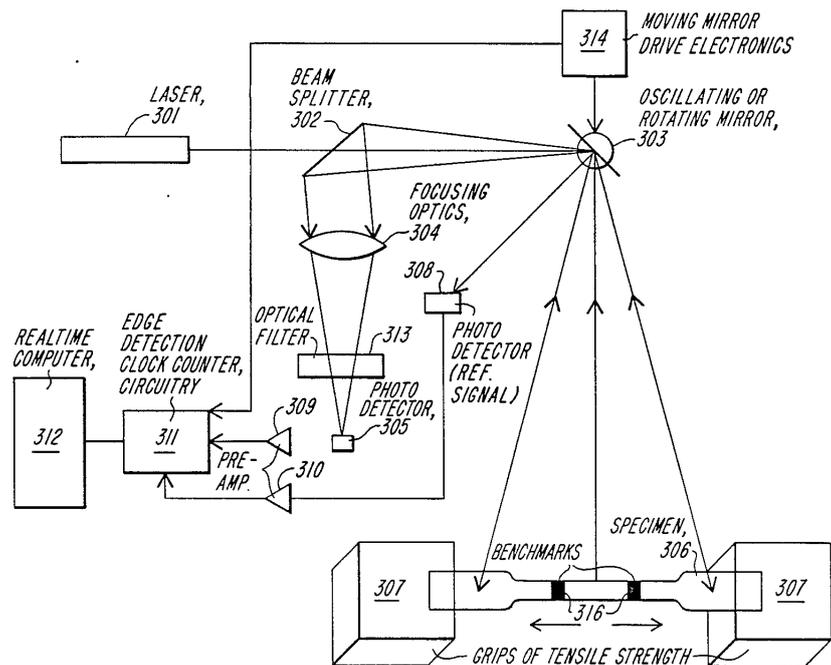


Abbildung 2.1.: Aufbau eines Laser Extensometers, entnommen aus [KK89] Fig.3.

Laser Extensometer sind die früheste Entwicklung von Dehnungsmessern auf Laser-Basis. Sie bestehen aus einem Laser, der mithilfe eines rotierenden Strahlumlenkers über die Probe geführt wird. An ausgewählten Stellen befinden sich reflektierende Marken auf der Probe. Der reflektierte Strahl wird über einen Photosensor registriert, und über den Rotationswinkel kann auf die Position der Marke zurückgerechnet werden. Für Genaueres siehe auch Abbildung 2.1, [KK89], [FOE07].

Laser Speckle Extensometer sind die heutzutage am weitesten verbreitete Form der laserbasierten Messgeräte, da eine höhere Präzision erreicht wird. Hier wird die Probe mit einem aufgefächerten Laser beleuchtet. Da die meisten Oberflächen optisch rau² sind, entsteht bei der Betrachtung der Probe ein Interferenzmuster (auch Speckle Pattern, siehe Abbildung 2.2). Bei einem Zugversuch korrelieren die Bewegung der Speckle und der Oberfläche derart, dass mit speziellen Algorithmen die Dehnung berechnet

²Die Oberfläche besitzt Unebenheiten, die gleich oder größer der Wellenlänge, jedoch kleiner als die Kohärenzlänge des Lasers sind.

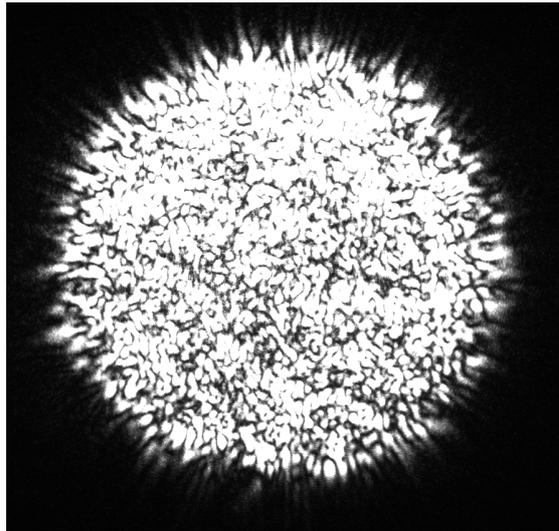


Abbildung 2.2.: Ein typisches Speckle Pattern entstanden durch einen fokussierten Laserpunkt aufgenommen mit einer Kamera.

werden kann. Für weitere Informationen siehe [Kam00], [Mes15] und [Spi13].

Video Extensometer bestehen im einfachsten Fall aus einer Videokamera. Da hier kein Muster von einem Laser erzeugt wird, ist man auf Markierungen angewiesen. Bei Proben mit strukturierten Oberflächen kann diese Struktur selbst als Referenz genommen werden, und mit einem entsprechenden Korrelationsalgorithmus ausgewertet werden. Es kann auch auf verschiedenste Arten ein stochastisches Muster aufgebracht werden. Alternativ dazu können Linien- oder Punktmarker aufgeklebt werden, Codes gedruckt werden oder Metalldraht aufgeklemmt werden und vieles mehr. Einen guten Überblick gibt [Tes15].

2.3. Methoden der Abstandskompensation

Hier werden einige Methoden angegeben, wie bei optischen Messungen eine OOP-Bewegung des Prüflings kompensiert werden kann. Diese Beispiele beziehen sich nicht nur auf den Bereich der Dehnungsmessung, sondern beinhaltet

2. *Stand der Technik*

auch Methoden, die in der Dehnungsmessung eingesetzt werden können.

Photogrammetrie stellt mithilfe mehrerer Einzelbilder aus unterschiedlichen Perspektiven und eindeutigen Linien in einem Bild Informationen über die 3D-Dimensionen einzelner Objekte zur Verfügung. Eine ausführliche Diskussion zu diesem Thema ist in [Maa97] gegeben.

Lichtschnittverfahren: Hier wird mithilfe eines schräg einfallenden Linienlasers ein Höhenprofil eines beliebigen Gegenstandes erstellt. Das Höhenprofil wird nur an einer Stelle vermessen. Um Informationen über die ganze Probe zu bekommen, muss entweder der Strahl über die ganze Probe geführt werden, oder aber, welches der Hauptanwendungsbereich ist, die Probe unter dem Strahl hindurchgeführt werden. Diese Methode wird häufig an Fließbändern eingesetzt. Weiter Informationen sind in [Pfe93] gegeben.

Streifenprojektion ist ein Verfahren benannt, bei welchem ein bestimmtes Muster auf ein Objekt projiziert wird, und mit einer oder mehreren Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen wird. Durch Auswerten der Schnittlinien kann die Ausdehnung des Objektes berechnet werden. Eine praktische Anwendung dieses Verfahrens ist in [BTW00] beschrieben.

Lasertriangulation ist die wohl älteste genannte Methode der Abstandsmessung. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, wird mit einem Laser eine Oberfläche beleuchtet, die mit einem Bildsensor unter einem Winkel beobachtet wird. Je nach Abstand der Oberfläche wird der Laserpunkt in einer anderen Position am Sensor registriert. Sie bildet auch die Grundlage der Streifenprojektion und des Lichtschnittverfahrens.

2.4. Methoden der Distanzmessung

Hier werden noch einige Methoden der Distanzmessung genannt, deren Einsatz in der optischen Dehnungsmessung als Abstandskompensation von der Genauigkeit her denkbar sind, aber von der Implementation her als sehr schwierig gesehen werden.

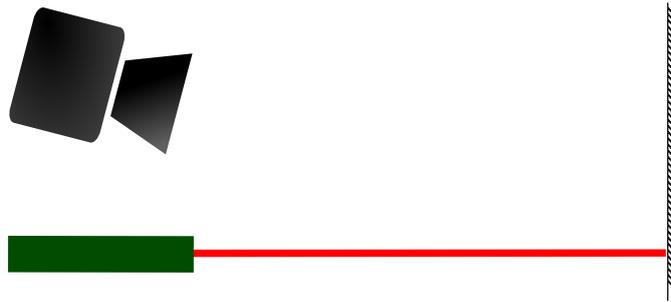


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung der Lasertriangulation mit Hilfe eines Laserpointers und einer Kamera.

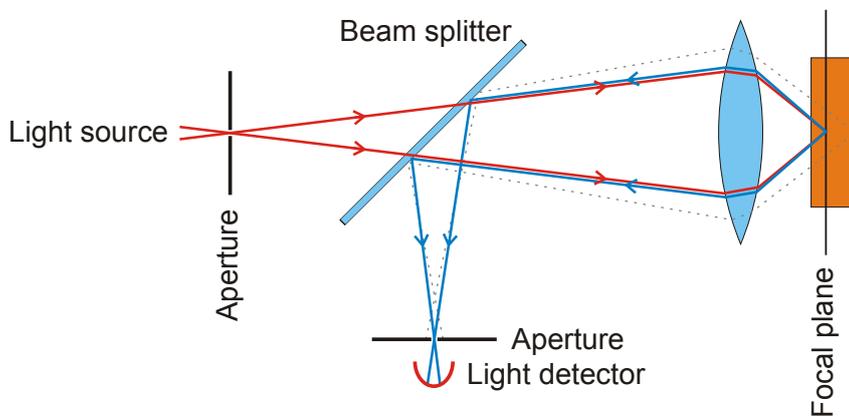


Abbildung 2.4.: Funktionsprinzip eines konfokalen Aufbaues. [Dan06]

Konfokale Abstandsmessung ist eine Methode, die vor allem in der Mikroskopie eingesetzt wird. Hier wird (wie in Abbildung 2.4 dargestellt) eine Lichtquelle durch eine Blende und eine Linse auf ein Objekt abgebildet. Von diesem Objekt wird das Licht zurückgestreut, durch die Linse gebündelt und von einem Strahlteiler durch eine zweite Blende auf einen Sensor gelenkt. Da sich die beiden Blenden in gleichem optischen Abstand befinden, wird die Intensität am Sensor maximal, wenn das Objekt sich genau in der Fokusebene befindet. In der Patentschrift [Chr04] wurde eine Methode vorgestellt, wie dieses Prinzip mithilfe von Zoomobjektiven auch für verschiedene Arbeitsabstände funktionieren kann. Einen allgemeinen Überblick gibt [Paw06].

2. Stand der Technik

Interferometer können Verschiebungen gegenüber einer Referenzebene auf Bruchteile der verwendeten Wellenlänge messen. Breiten Einsatz findet diese Methode zum Beispiel in der Laser-Dilatometrie, bei der Volumenänderungen auf eine Dimension (Längenmessung) reduziert und gemessen werden. Diese erreichen Auflösungen welche kleiner als 1 nm sind ([Dro82]). Einen guten Überblick über die Technik und Anwendung bietet [Har07].

2.5. Methoden der Abstandskompensation bei optischer Dehnungsmessung

Bei der Firma Messphysik sind derzeit zwei Methoden bekannt, um Messfehler durch Out-of-plane Bewegungen zu verringern. Einerseits werden telezentrische Objektive verwendet, andererseits wird ein beidseitiger Aufbau verwendet. Diese beiden Konzepte werden hier kurz erläutert.

Telezentrische Objektive sind eine spezielle Bauart, die objektseitig einen parallelen Strahlengang aufweisen. Der große Vorteil dieser Konstruktion ist, dass Objekte dadurch unabhängig vom Abstand immer gleich groß dargestellt werden. Weiters kommt es zu keinen perspektivischen Verzerrungen. Leicht ersichtlich sind diese Eigenschaften in Abbildung 2.5. Ihr Einsatz bietet aber auch einige Nachteile. Aufgrund des Strahlenganges ist das Gesichtsfeld auf die Öffnung des Objektivs beschränkt. Ein Objektiv mit einem Durchmesser von 40 mm kann also auch Objekte mit maximal dieser Ausdehnung erfassen. Dadurch sind sie sehr groß und schwer. Die großen optischen Elemente treiben auch den Preis in die Höhe, der ein mehrfaches eines normalen Objektivs beträgt. Optisch sind sie sehr lichtschwach und besitzen eine sehr geringe Tiefenschärfe.

Beim beidseitigen Aufbau werden zwei Messköpfe diametral aufgestellt, womit ein Messkopf auf der Vorderseite und der andere auf der Rückseite misst. Treten nun Abstandsänderungen auf, ergibt das gemittelte Signal den richtigen Messwert. Der Nachteil liegt hier im erhöhten Platzbedarf. In

2.5. Methoden der Abstandskompensation bei optischer Dehnungsmessung

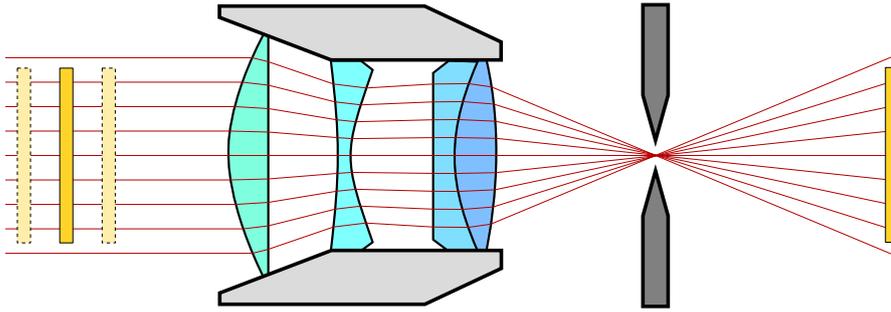


Abbildung 2.5.: Funktionsprinzip einer objektseitig telezentrischen Linse. Unabhängig von der Distanz des Objekts (links) wird dieses in der Bildebene (rechts) immer gleich groß dargestellt. Basierend auf [Bau13].

vielen Fällen ist die Probe nicht von beiden Seiten zugänglich. Außerdem verdoppelt sich der Preis der Ausrüstung.

3. Grundlagen

3.1. Verwendete Methode

In Kapitel 2 wurden verschiedene Ansätze diskutiert, die eine Abstandskorrektur für optische Messungen ermöglicht. In dieser Arbeit wird die Distanzkomensation mithilfe der Lasertriangulation behandelt. Sie wird schon in zahlreichen optischen Messverfahren erfolgreich angewendet¹ und kann mit einer Genauigkeit betrieben werden, die für diese Anwendung benötigt wird. Weiters sind bis auf einen Laser schon alle Komponenten, die zur Messung einer Laser-Triangulation nötig sind, in dem zu erweiterten System vorhanden. Somit ist sowohl bezüglich der Software als auch der Hardware der geringste Implementationsaufwand zu erwarten. Dies sollte auch eine wirtschaftlich sinnvolle Integration ermöglichen.

Diese Vorteile sprechen für eine Eigenentwicklung und gegen ein kommerzielles Gerät, welches die erforderliche Genauigkeit erreicht. Abgesehen von dem höheren Anschaffungskosten gibt es noch andere Nachteile. So haben diese Geräte einen spezifischen Arbeitsabstand, der meist auf kürzere Distanzen ausgelegt ist, ein großes Gehäuse, welches nicht in bestehende Messsysteme integriert werden kann und außerdem müssen sie über eine eigene Schnittstelle in das System integriert werden.

¹Beispiele: Höhenprofile von Bauteilen [HL97], Positionieren von Maschinenelementen [Tho+98], 3D-Vermessung von Objekten [Mal94]

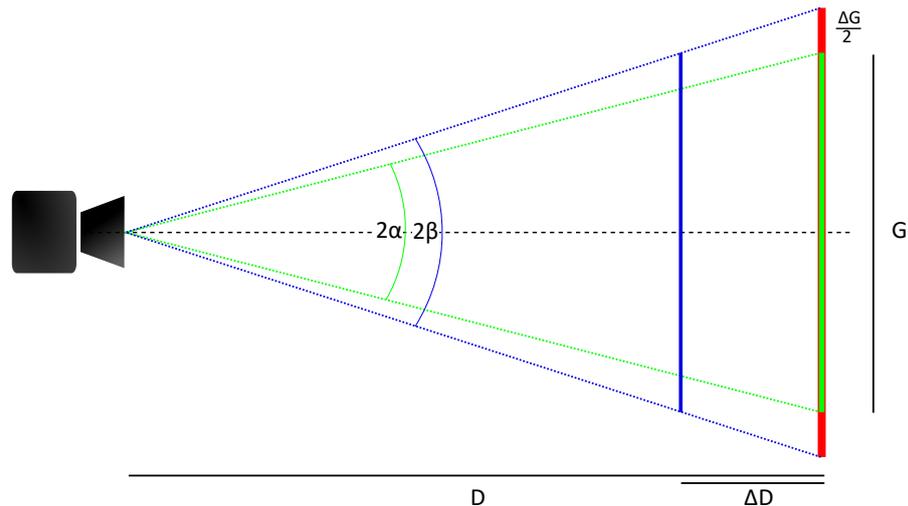


Abbildung 3.1.: Skizze zur Berechnung der Änderung der scheinbaren Länge bei Parallelbewegung zur Kameraachse.

3.2. Abschätzung des Fehlers durch Out-of-Plane (OOP) Bewegungen

Hier wird die Berechnung für die scheinbare Längenänderung durch Bewegungen der Probe parallel zur Kameraachse durchgeführt (siehe Abbildung 3.1). Ausgegangen wird hier von einer Probe (in Grün dargestellt) mit der Länge G die sich im Abstand D von der Kamera befindet. Die Probe wird von der Kamera unter einen Winkel 2α gesehen.

Nach einer Bewegung um ΔD zur Kamera hin (OOP-Bewegung) erscheint die Probe (nun Blau dargestellt) unter einem neuen Winkel 2β . Wird dieser zurück in die ursprüngliche (kalibrierte) Ebene projiziert ergibt sich die jetzt von der Kamera gesehene neue Länge $G + \Delta G$ (nun in Rot dargestellt). Da sich ja die ursprüngliche Länge nicht geändert hat bezeichnet ΔG den Fehler in der Längenbestimmung.

Der Öffnungswinkel α kann über den Tangens bestimmt werden. Hier bildet die halbe Probenlänge $G/2$ die Gegenkathete und der Abstand D die Ankathete.

$$\tan \alpha = \frac{G/2}{D} \quad (3.1)$$

3.2. Abschätzung des Fehlers durch Out-of-Plane (OOP) Bewegungen

Wird der Abstand D nun verringert, vergrößert sich der Öffnungswinkel. Der Tangens des neuen Winkels β kann nun entweder mit der verkürzten Distanz $D - \Delta D$ und der halben Objektgröße $G/2$ dargestellt werden (3.2) oder aber mit dem ursprünglichen Abstand D und der projizierten halben Objektgröße $G/2 + \Delta G/2$ (3.3).

$$\tan \beta = \frac{G/2}{D - \Delta D} = \frac{G}{2(D - \Delta D)} \quad (3.2)$$

$$\tan \beta = \frac{G/2 + \Delta G/2}{D} = \frac{G + \Delta G}{2D} \quad (3.3)$$

Durch Gleichsetzen dieser beiden Gleichungen bekommt man die scheinbare Längenänderung ΔG für bestimmte laterale Verschiebungen ΔD bei einem vorgegeben Abstand D .

$$\Delta G = \frac{G\Delta D}{D - \Delta D} \quad (3.4)$$

Desgleichen kann man auch die OOP-Bewegung berechnen, die maximal stattfinden darf, damit der Fehler einen gewissen Wert nicht übersteigt.

$$\Delta D = \frac{D\Delta G}{G + \Delta G} \quad (3.5)$$

3.2.1. Schnelle Abschätzung OOP-Bewegung

Eine schnelle Abschätzung, die bei kleinen Schwankungen von ΔD sehr genau ist, lässt sich einfach mit dem Verhältnis R der Bildgröße G zum Abstand der Kamera D finden.

$$\Delta G = \frac{G\Delta D}{D - \Delta D} \xrightarrow{\Delta D \ll D} \Delta G = \frac{G\Delta D}{D} \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta D}{\Delta G} = \frac{D}{G} = R \quad (3.7)$$

3. Grundlagen

3.2.2. Beispiele OOP

Als Beispiel werden hier die Daten eines kommerziellen Messgerätes betrachtet. Das videoXtens HP hat einen Arbeitsabstand D von 430 mm und Objektive mit einer festen Brennweite von 35 mm. Daraus ergibt sich eine Bildgröße G von ungefähr 60 mm. Aus (3.4) ist zu sehen, dass bei einer Lateralbewegung ΔD von 1 mm ein Messfehler ΔG von 140 μm entsteht.

$$\Delta G = \frac{G\Delta D}{D - \Delta D} = \frac{60 \text{ mm}^2}{430 \text{ mm}} \approx 140 \mu\text{m} \quad (3.8)$$

Um den Fehler der Messung ΔG auf 1 μm zu begrenzen, muss nach (3.5) die OOP-Bewegung ΔD auf 7,2 μm genau bestimmt werden.

$$\Delta D = \frac{D\Delta G}{G + \Delta G} = \frac{430 \text{ mm} * 1 \mu\text{m}}{60,001 \text{ mm}} \approx 7,2 \mu\text{m} \quad (3.9)$$

Für diese kleinen Abweichungen kann auch die Abschätzung aus Unterabschnitt 3.2.1 (3.7) verwendet werden. Diese ergibt:

$$R = \frac{D}{G} = \frac{430}{60} \approx 7,2 \quad \frac{1}{R} \approx 0,14 \quad (3.10)$$

$$\Delta D = R * \Delta G = 7,2 * 1 \mu\text{m} = 7,2 \mu\text{m} \quad (3.11)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta D}{R} = \frac{1 \text{ mm}}{7,2} \approx 140 \mu\text{m} \quad (3.12)$$

Die Abweichung dieser Näherung zur exakten Berechnung beträgt gerade einmal 0,002 %. Geht man aber von größeren Abweichungen aus, steigt dieser Fehler rasch. Bei selbem Messgerät und einer Bewegung ΔD von 20 mm ist der Fehler durch die Näherung schon größer als 5 %.

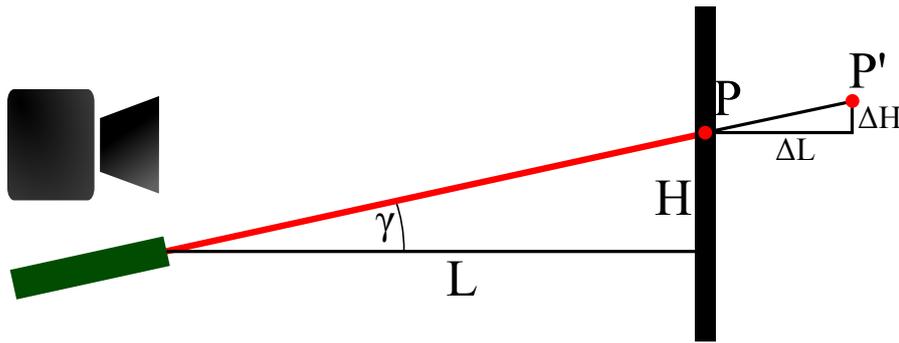


Abbildung 3.2.: Skizze zur Berechnung der Genauigkeit einer Triangulationsmessung.

3.2.3. Fazit OOP

Aus der obigen Betrachtung der Out-of-Plane-Bewegung lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Eine Korrektur des Fehlers entstehend durch laterale Bewegung funktioniert umso besser, je größer das Verhältnis R ist. Dies liegt einfach daran, dass das Verhältnis R indirekt proportional zum Öffnungswinkel 2α ist. Ein größerer Öffnungswinkel bewirkt einen größeren Fehler bei gleichem lateralen Versatz. Durch den Zusammenhang von R zum Öffnungswinkel ergibt sich eine direkte Proportionalität zur Fokusslänge des Objektivs.
2. Um bei einem videoXtens HP den absoluten Messfehler kleiner als $1\ \mu\text{m}$ zu halten, muss man den Abstand auf $7,2\ \mu\text{m}$ genau halten. Eine Auflösung des Systems von $10\ \mu\text{m}$ wird auf jeden Fall erforderlich sein.

3.3. Triangulation

In diesem Kapitel wird die Basis der Triangulationsmessung anhand Abbildung 3.2 dargestellt. Auch hier handelt es sich um reine Dreiecksberechnungen, die mit Hilfe der Trigonometrie gelöst werden können.

Ausgegangen wird hier von einer Kamera, deren Achse normal auf die Oberfläche der Probe ausgerichtet ist. Dies ist notwendig, um eine optimale Messung

3. Grundlagen

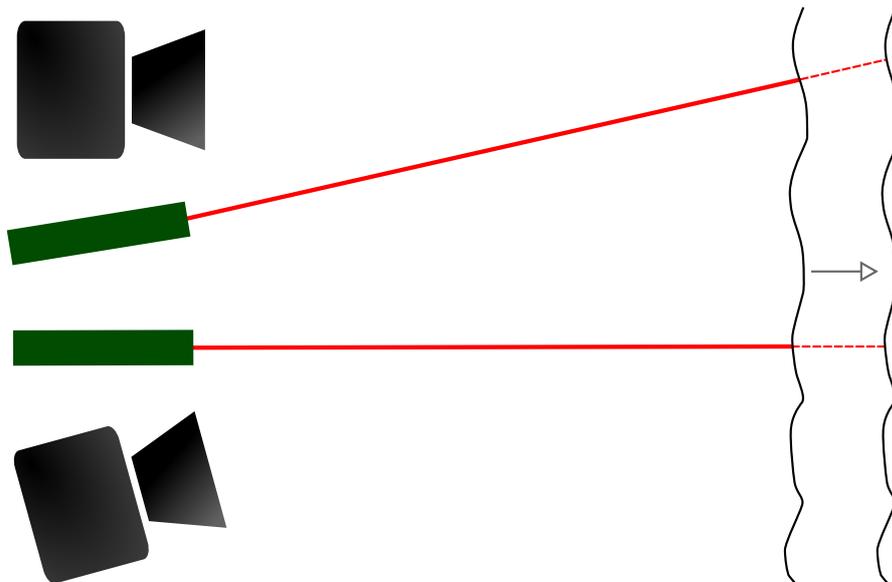


Abbildung 3.3.: Vergleich der Triangulation mit Laser unter Einfallswinkel und achsenparallelen Laser. Im ersten Fall wandert der Punkt bei parallelem Verschiebung, im zweiten Fall wird am selben Punkt gemessen.

bei einem Zugversuch zu ermöglichen. Diese Anordnung entspricht nicht der üblichen Konfiguration (siehe Abbildung 2.3) in der Abstandsmessung. Dies bringt einen Vorteil und einen Nachteil.

Als nachteilig wirkt sich der Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Probe aus. Der Grund warum kommerzielle Lasertriangulationsmessgeräte vorwiegend mit einem achsenparallelen Laser produziert werden liegt darin, dass sich bei einem Annähern an die Probe die Messposition auf dieser nicht ändert. Es wird also immer an der selben Stelle gemessen, wenn nur axiale Bewegungen durchgeführt werden. Dies hat den großen Vorteil, dass auch Proben, die keine ebene Oberfläche haben besser bestimmt werden können (siehe Abbildung 3.3). In diesem Aufbau wandert der Punkt bei einer OOP-Bewegung auf der Probe mit. Da aber der Einsatz der Technik bei Dehnungsversuchen geplant ist und die Oberfläche sich sowieso bewegt, sollte dieser Nachteil nicht schlagend sein.

Der Vorteil an dieser Anordnung ist, dass in den Strahlengang des Lasers noch optische Elemente eingefügt werden können, um Eigenschaften der Messung

zu beeinflussen.

Mit der Triangulationsmessung kann man mithilfe eines Punktes einen Abstand messen. Für die Betrachtung hier wird von einem ebenen Objekt ausgegangen, welches parallel zur Kameraachse liegt. Für eine relative Verschiebung ΔL muss nur der Einfallswinkel γ bekannt sein. Die mathematische Beziehung lautet:

$$\tan \gamma = \frac{H}{L} = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (3.13)$$

$$\Delta L = \frac{\Delta H}{\tan \gamma} \quad (3.14)$$

3.3.1. Verstärkungsfaktor T

$\tan(\gamma)$ kann als Verstärkungsfaktor T angesehen werden. Er gibt an wie sich die Querverschiebung der Markierung ΔH im Verhältnis zur Verschiebung ΔL der Ebene verhält. Bei großem Verstärkungsfaktor bewirkt schon eine kleine Verschiebung ΔL eine große Verschiebung ΔH , was sich positiv auf eine Messung auswirken wird. Der Verstärkungsfaktor T wird ab einem Einfallswinkel von 45° größer als 1.

$$T = \tan \gamma \quad (3.15)$$

Gleichung (3.14) für die Verschiebung ΔL vereinfacht sich also zu:

$$\Delta L = \frac{\Delta H}{T} \quad (3.16)$$

Der Verstärkungsfaktor T wirkt sich direkt auf die Messung aus. Eine Verdoppelung von T hat also eine doppelte Genauigkeit der Abstandsmessung zur Folge. Folglich wird es ein Ziel sein, diesen Faktor möglichst groß zu machen. In Abbildung 3.5 ist eine Möglichkeit dargestellt, wie man den Aufbau des videoXtens HP mit Spiegel nutzen könnte, um eine Vergrößerung des Einfallswinkel zu erreichen.

3. Grundlagen

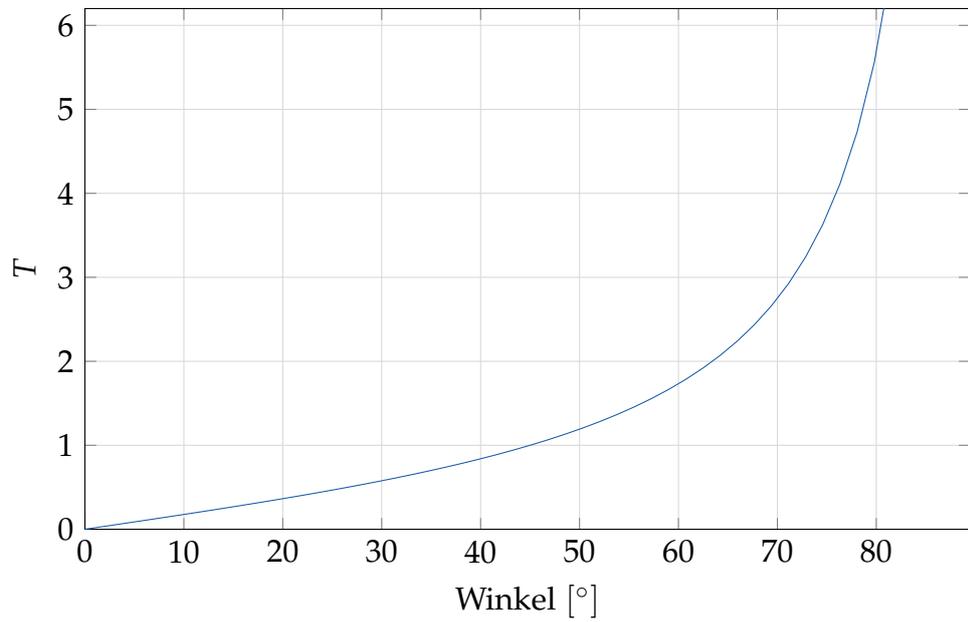


Abbildung 3.4.: Verstärkungsfaktor T in Abhängigkeit vom Einfallswinkel γ .

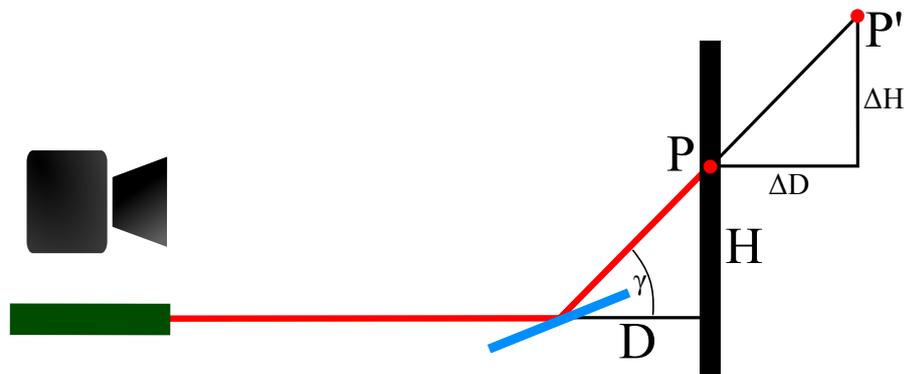


Abbildung 3.5.: Skizze zur Erhöhung des Verstärkungsfaktors T mithilfe eines Umlenkspiegels.

3.4. Gesamtmessung

Für die Berechnung der Genauigkeit der Gesamtmessung sind jetzt sowohl die Berechnung der OOP-Bewegung (Abschnitt 3.2) als auch die Berechnung der Triangulation (Abschnitt 3.3) zu kombinieren. Als Orientierungshilfe dient Abbildung 3.6.

3.4.1. Genauigkeit der Gesamtmessung

Wenn bei einer Dehnungsmessung ein lateraler Versatz ΔD auftritt, wird das mithilfe einer Verschiebung des Laserstrahles ΔH gemessen. Mit (3.16) lässt sich diese Bewegung berechnen. Der Fehler der in der Messung entsteht kann mithilfe von (3.7) ausgewertet werden. Nach Berücksichtigung der Tatsache, dass ΔL gleich groß sein muss wie ΔD , da beides am selben Objekt gemessen wird, können beide Gleichungen zusammengefasst werden.

$$\Delta L = \frac{\Delta H}{T} \quad \text{und} \quad \Delta G = \frac{\Delta D}{R} \quad (3.17)$$

$$\Delta L = \Delta D \quad (3.18)$$

$$\Delta G = \frac{\Delta H}{T \cdot R} \quad (3.19)$$

Die Lage des Laserpunktes kann natürlich nicht ohne Fehler gemessen werden. Es wird immer ein Strecke $\Delta H + dH$ gemessen werden. Der Fehler auf das Gesamtergebnis kann folgendermaßen abgeschätzt werden:

$$dG = \frac{dH}{T \cdot R} \quad (3.20)$$

Um eine genaue Messung zu erhalten, sollte also die Position des Laserpunktes möglichst genau bestimmt werden können und gleichzeitig der Verstärkungsfaktor T und das Verhältnis R möglichst groß sein.

3. Grundlagen

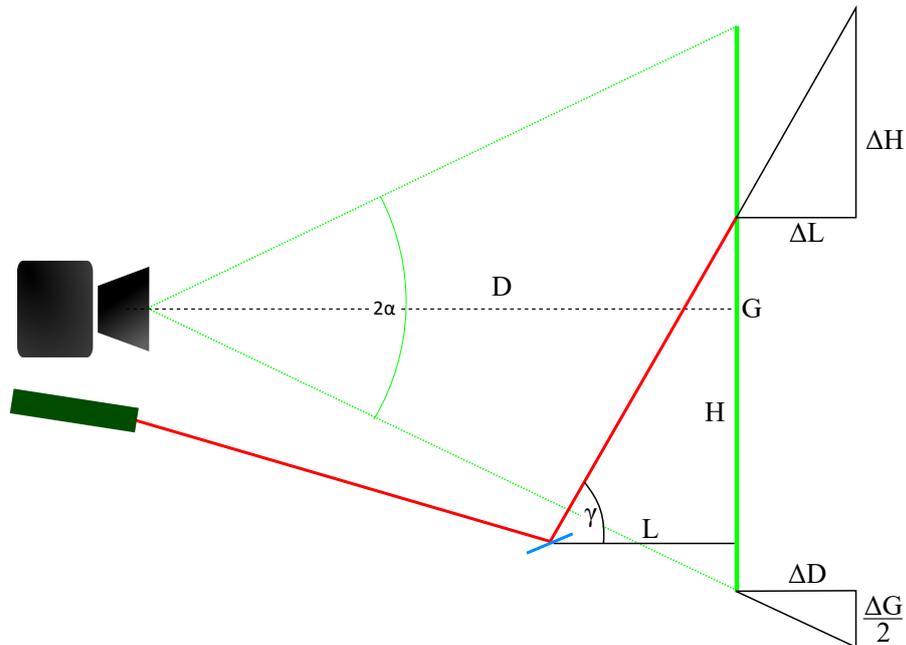


Abbildung 3.6.: Skizze zur Berechnung der Genauigkeit bei der Gesamtmessung. Bei einer Verschiebung um ΔD treten die im Bild eingezeichneten Verschiebungen ΔH und ΔG auf.

3.4.2. Fehler der Gesamtmessung

In obiger Betrachtung (3.20) wird schon davon ausgegangen, dass der Fehler von T und R nach einer Kalibrierung vernachlässigbar ist. Für eine vollständige Fehlerabschätzung muss diese jedoch berücksichtigt werden. Diese hat folgende Gestalt:

$$dG = \frac{dH(T \cdot R) + H(T \cdot dR + dT \cdot R)}{(T \cdot R)^2} = \frac{dH + H \left(\frac{dR}{R} + \frac{dT}{T} \right)}{T \cdot R} \quad (3.21)$$

Die Fehler dR und dT lassen sich über ihre Definition noch weiter auswerten. Die Fehler der Ausgangsgrößen G, H, D, L sind den Fehlern der Werte $\Delta G, \Delta H, \Delta D$ und ΔL ident. Deshalb wird hier für beide das selbe Symbol verwendet².

²Beispiel: $d(\Delta H) = d(H) \equiv dH$

$$\begin{aligned}
 R = \frac{D}{G} &\implies dR = \frac{dD \cdot G - dG \cdot D}{G^2} = \frac{dD}{G} - \frac{D}{G} \frac{dG}{G} \\
 T = \frac{H}{L} &\implies dT = \frac{dH \cdot L - dL \cdot H}{L^2} = \frac{dH}{L} - \frac{H}{L} \frac{dL}{L}
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

Einsetzen in die Ausgangsgleichung ergibt folgenden Fehler:

$$dG = \underbrace{\frac{dH}{T \cdot R}}_{dG_1} - \underbrace{\frac{H}{T \cdot R} \left[\frac{dD}{G \cdot R} - \frac{D}{G \cdot R} \frac{dG}{G} \right]}_{dG_2} - \underbrace{\frac{H}{T \cdot R} \left[\frac{dH}{L \cdot T} - \frac{H}{L \cdot T} \frac{dL}{L} \right]}_{dG_3} \tag{3.23}$$

Somit lässt sich der gesamte Fehler in drei Terme einteilen. Bevor diese drei Terme diskutiert werden, wird noch auf folgenden Umstand hingewiesen: Alle hier angegebenen Fehler besitzen einen systematischen und einen statistischen Anteil. Der systematische Fehler bei dD kann zum Beispiel ein falsch gemessener Abstand von der Kamera zur Probe sein. Dieser bleibt über die Zeit konstant, liefert also einen stets gleichen Fehlerbeitrag zu jeder Messung. Da in unserer Anordnung nach Kalibration der statistische Fehler eliminiert ist, wird hier nur von zufälligen Fehlern gesprochen.

Term 1: dG_1 ergibt den Fehler der Gegenstandsgröße rein durch den Ablesefehler der Position des Laserstrahls. Dies ist, wie schon in der ersten Abschätzung (3.20) bemerkt der Teil, der letztendlich die Auflösung des Gesamtsystems bestimmt.

Term 2: dG_2 beschreibt die Fehler, die aus der Bewegung des Objektes³ entstehen. Dabei bezeichnet der erste Teil eine OOP-Bewegung und der zweite Teil den Fehler in der Objektgröße.

$$dG_2 = \frac{H}{T \cdot R} \left[\underbrace{\frac{dD}{G \cdot R}}_1 - \underbrace{\frac{D}{G \cdot R} \frac{dG}{G}}_2 \right] \tag{3.24}$$

³Mit Objekt ist immer das gerade gemessene Objekt zu verstehen. In diesem Fall also die Messmarken am Prüfling

3. Grundlagen

Teil 1: Hier ist der Anteil der OOP-Bewegung angegeben, der keine proportionale Auswirkung auf die Triangulation besitzt⁴. Dies könnte beispielsweise eine Biegung, Drehung oder Vibration des Prüflings sein.

Teil 2: Hier ist der Fehler durch die Änderung der Objektgröße selbst gegeben. Die Objektgröße kann sich durch Temperatur oder Kräfteinflüsse ändern. Dies ist aber eine gewollte Veränderung, die gemessen wird. Als Fehler tritt hier also nur der Messfehler des videoXtens-Systems auf.

Term 3: dG_3 beschreibt die Fehler, die durch die Triangulationsmessung entstehen.

$$dG_3 = \frac{H}{T \cdot R} \left[\underbrace{\frac{dH}{L \cdot T}}_1 - \underbrace{\frac{H}{L \cdot T} \frac{dL}{L}}_2 \right] \quad (3.25)$$

Teil 1: Hier ist eine zusätzliche Verschiebung ΔH beschrieben, die ohne eine Verschiebung ΔD zustande kommt. Dies kann durch vibrieren oder rotieren des Spiegels geschehen.

Teil 2: Hier kommt es ähnlich wie in Term 1 Teil 2 zu einem Fehler durch Verringerung der Distanz zwischen Spiegel und Objekt. Auch hier können Bewegungen des Spiegels verantwortlich sein.

Die in Term 2 und 3 beinhalteten Fehler sind Auswirkungen eines nicht idealen Prüfaufbaus. Sie können minimiert werden indem zum Beispiel eine Schwingungsübertragung von der Prüfmaschine auf das Messgerät minimiert wird oder die Ausrichtung der Maschine gut erfolgt. Da sich diese Arbeit insbesondere auf die Genauigkeit der Triangulationsmessung konzentriert, ist eine isolierte Betrachtung des Term 1 (3.20) gerechtfertigt. Infolge wird in dieser Arbeit dG_1 als dG identifiziert.

$$dG_1 \equiv dG \quad (3.26)$$

⁴da es ein Ergebnis der partiellen Ableitung von R ist

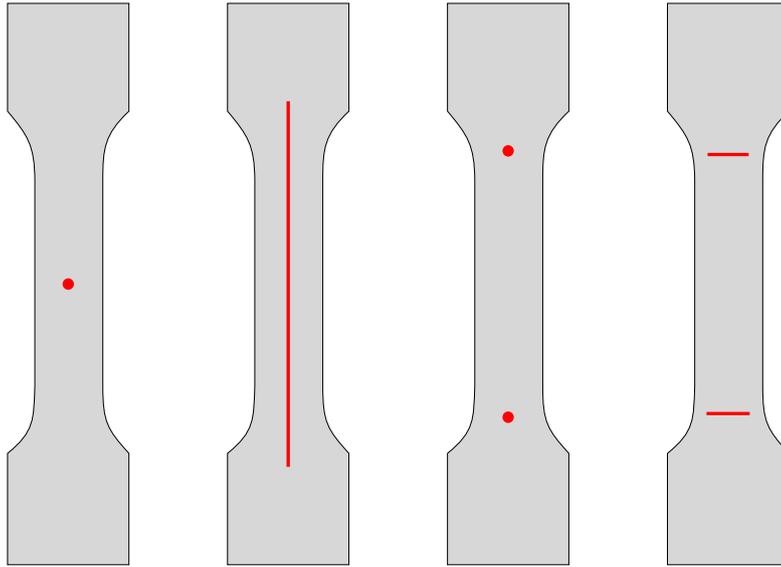


Abbildung 3.7.: Darstellung verschiedener möglichen Messmethoden mithilfe der Lasertriangulation.

3.5. Möglichkeiten der Messung

Mithilfe der Triangulation gibt es einige Möglichkeiten den Abstand während einer Prüfung zu kontrollieren. Einige Beispiele sind in Abbildung 3.7 dargestellt. In Abbildung 3.8 werden die Definitionen für horizontale und vertikale Achse sowie den jeweiligen Biege- und Kippbewegungen gegeben.

Die erste Probe zeigt die Messung mit einem Punkt. Hier kann die Distanz der Probe über den Punkt gemessen werden, woraus sich mehrere Schwierigkeiten ergeben. Da eine Dehnungsmessung üblicherweise an zwei symmetrisch angebrachten Markierungen erfolgt, ist es am sinnvollsten, den Laserpunkt genau in der Mitte zu positionieren. Dabei muss dann aber die Annahme gelten, dass die Probe perfekt normal zur Kameraachse liegt. Eine Drehung zur Kameraachse ergibt einen nicht korrigierbaren Fehler. Genauso ist natürlich eine gekrümmte Fläche nicht erfassbar und führt zu einem Fehler.

Die zweite Probe zeigt die Messung mit einem vertikalen Strich. Man hat den großen Vorteil, dass die Verschiebung über die ganze Probe gemessen werden kann. Damit werden Verkippungen und Biegungen in der vertikalen Achse

3. Grundlagen

registriert. Alle Effekte in der horizontalen Ebene führen aber wiederum zu einem Fehler. Hinzu kommt noch die aufwändigerer Erfassung der Linie im Gegensatz zum Punkt.

Bei der dritten Probe wird die Messung mit zwei Punkten durchgeführt. Der Vorteil gegenüber der Messung mit einem Punkt ist, dass nun Verkippungen in der vertikalen Achse registriert werden können. Dies ist eine Bewegung die bei nicht gut ausgerichteten Maschinen häufig vorkommt. Weiters können die Laserpunkte nahe an den Positionen der Längsdehnungsmessung liegen. Alle Bewegungen in der horizontalen Achse bleiben nicht quantifizierbar. Außerdem ist eine vertikale Biegung nicht messbar.

Im vierten Fall werden statt den Punkten zwei Linien verwendet. Dies gibt nun zusätzlich die Möglichkeit eine Verkippung oder Biegung in der horizontalen Achse zu messen.

Diese Messmethoden lassen sich um eine beliebige Anzahl an Punkten und Linien ergänzen. Ein Grenze setzt hier nur die Komplexität des Aufbaus und die Leistung des Auswertesystems. In dieser Arbeit wird vor allem Methode 3 und 4 aus Abbildung 3.7 verwendet werden.

3.6. Laser Speckles

In jeder Anwendung in der kohärentes Licht verwendet wird, muss man sich auch Gedanken über sogenannte „Speckles“ machen. Hier wird ein kurzer Überblick über die Entstehung und den Eigenschaften der Speckles gegeben, der aus [HL97] und [Dai75] zusammengetragen ist.

Leuchtet man mit einen Laser auf ein Blatt Papier, sieht man keinen homogen ausgeleuchteten Punkt sondern ein grieseliges Bild wie man es vom Fernsehen ohne Empfang gewohnt ist. Der Grund dafür ist, dass die Photonen, die vom Auge auf den selben Punkt abgebildet werden, durch den unterschiedlichen Weg den sie zurückgelegt haben eine Phasenverschiebung aufweisen. Dadurch kommt es zu Interferenzerscheinungen. Je nach Beschaffenheit der Oberfläche

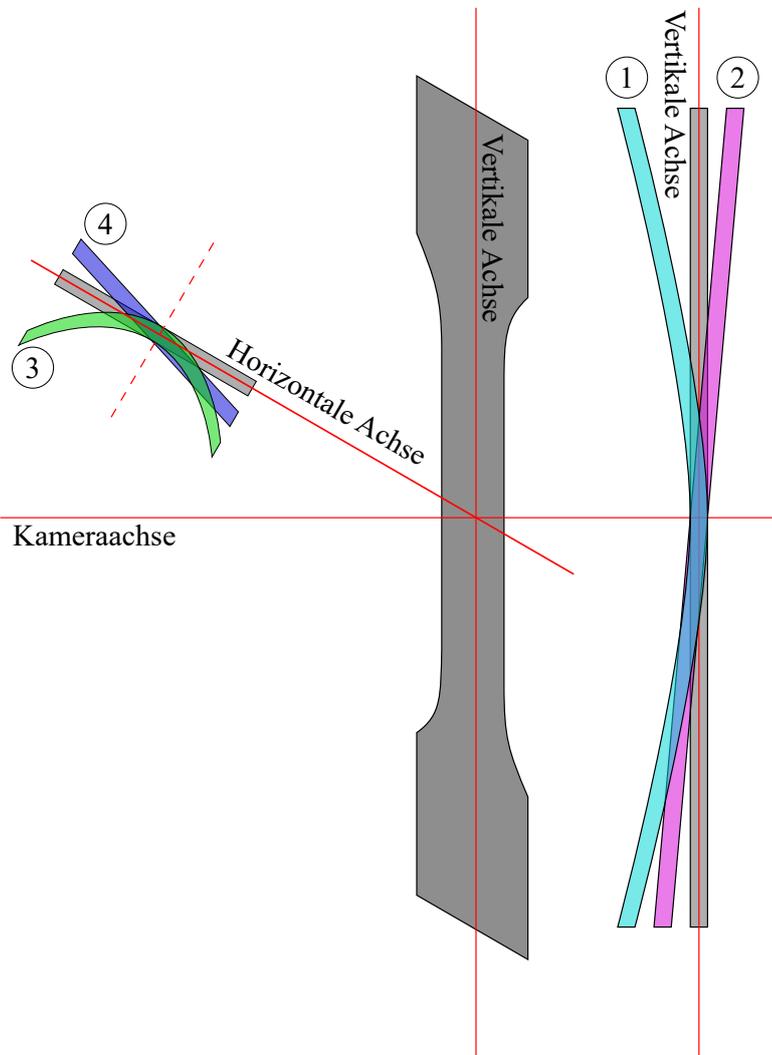


Abbildung 3.8.: Abbildung der verschiedenen Achsen in einem Kamerasystem wie sie in dieser Arbeit verwendet werden. Abgebildet sind zudem ① vertikale Biegung, ② vertikale Verkippung, ③ horizontale Biegung und ④ horizontale Verkippung.

3. Grundlagen

und des abbildenden Systems kommt es zu destruktiver (dunkler Fleck) oder konstruktiver Überlagerung (heller Fleck) der Strahlung.

Speckle treten nur auf Oberflächen auf, die genügend rau sind. Im idealen Fall einer perfekt ebenen Fläche beleuchtet mit kohärentem Licht sieht man Interferenzringe. Mit zunehmender Rauigkeit der Oberfläche werden die Ringe von einem Specklemuster überlagert. Ab einer Rautiefe von $\approx \lambda/4$ sieht man nur noch das Muster.

Diese Art der Speckle werden auch subjektive Speckle genannt, da ihr Erscheinungsbild nicht nur von der Oberfläche, sondern auch von den Eigenschaften des Beobachters abhängen. Steht der Beobachter still und die Oberfläche verschiebt sich, dann bewegt sich auch das Specklemuster. Ein kurzsichtiger Mensch sieht dabei in der Regel eine Bewegung des Musters mit der Oberfläche, während es sich für eine weitsichtige Person entgegen der Verschiebungsrichtung bewegt. Genauso verändert sich das Muster, wenn sich der Beobachter bewegt oder sich seine Blenden- bzw. Pupillenöffnung verändert.

Ist der Faktor zwischen den Bewegungen bekannt, kann dies zur Dehnungsmessung, wie beim Laser Speckle Extensometer in Abschnitt 2.2 ausgeführt wurde, verwendet werden. Im Falle der Triangulationsmessung führt dies aber unweigerlich zu Fehlern. Hier soll die Bewegung des Laserpunktes an sich verfolgt werden. Durch die Laser-Speckle verändert sich das Aussehen des Punktes während der Bewegung, wodurch eine genaue Lokalisation des Punktes unmöglich wird. Dieses Verhalten wird kohärentes Rauschen genannt. Eine Abschätzung des Fehlers ist durch (3.27) gegeben. Dabei ist dz die Unsicherheit der Triangulationsmessung, C der Speckle-Kontrast, der bei Laser gleich 1 ist, λ ist die Wellenlänge des Lasers, $\sin u$ ist die numerische Apertur des abbildenden Systems und θ ist der Winkel zwischen den Strahlengängen.

$$dz = \frac{C\lambda}{2\pi \cdot \sin u \cdot \sin \theta} \quad (3.27)$$

Wie schon in Unterabschnitt 3.3.1 diskutiert kann mit einem großen Einfallswinkel die Unsicherheit verringert werden. Weiters hilft eine möglichst große numerische Apertur, das heißt eine möglichst offenen Blende, den negativen Effekt der Speckles zu reduzieren.

4. Aufbau und Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen präsentiert. Der praktische Teil der Arbeit besteht aus 3 Phasen denen jeweils ein Unterabschnitt gewidmet ist. Diese sind wiederum in die Erklärung des Aufbaus und der Messergebnisse unterteilt.

4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes

In der ersten Phase wurde die Genauigkeit, mit der ein Laserpunkt von der *videoXtens*-Software erfasst werden kann vermessen.

4.1.1. Aufbau

Der Aufbau für diese Messung besteht aus einer Kamera und zwei Laserpointern. Die Kamera ist über eine USB 3.0 Schnittstelle mit dem PC verbunden, auf dem *videoXtens* 6.6.0.0 läuft (Abbildung 4.1). Als Messebene wurde eine beliebig verschiebbare Fläche mit gleichmäßiger Oberfläche verwendet.

Die Laserpointer sind zwei einfache Dioden-Laser mit einer Wellenlänge von 650 nm. Es handelt sich um Kantenemittern, was sich in einem ellipsenförmigen Strahlprofil zeigt. Durch die asymmetrische Austrittsfläche (circa $1 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$) ergeben sich aufgrund der Beugung unterschiedliche Divergenzen für den horizontalen (θ_{\perp}) und den vertikalen Anteil (θ_{\parallel}) der Strahlung (siehe Abbildung 4.2). Dies kann zwar mithilfe von Linsen korrigiert werden, aufgrund der

4. Aufbau und Messergebnisse

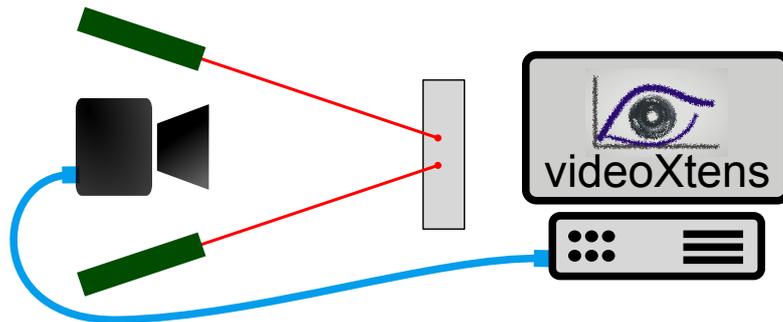


Abbildung 4.1.: Aufbau zur Phase 1: Zwei Laser erzeugen einen Punkt auf einer Oberfläche, dessen Position mithilfe einer Kamera und der Auswertesoftware *videoXtens* möglichst genau bestimmt werden soll.

unterschiedlichen Beugungsmaßzahl M^2 bleibt aber immer ein Astigmatismus erhalten. Diese Eigenschaft ist nachteilig für die Messung, da die Software auf runde Objekte optimiert ist. Die Ausgangsleistung ist auf 1 mW begrenzt, wodurch dieser Laser in die Schutzklasse 2 fällt¹.

Aufgrund der nicht idealen Eigenschaften wurde auch ein grüner Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm betrachtet. Es handelt sich um den FireFly Mini von Global Laser. Dies ist ein DPSS-Modul² mit 5 mW Leistung und hat eine wesentlich bessere Strahlqualität als ein Diodenlaser. Jedoch war die Specklebildung so stark, dass keine Messungen durchgeführt werden konnten.

Bei der Kamera handelt es sich um eine Industriekamera von IDS vom Typ *UI-3243-M-GL MP*, welche auch in den kommerziellen Messgeräten eingesetzt wird. Sie ist mit einem 1/1,2 Zoll CMOS-Sensor mit 1,3 Megapixel Auflösung ausgestattet. Im Vollbildmodus wird eine Bildrate von 30 frames per second (fps) erreicht, während bei einem eingeschränkten Bildmodus (AOI - area of interest) bis zu 166 fps erreicht werden können. Sie ist mit einem 35 mm Objektiv von Tamron ausgestattet. Der Arbeitsabstand beträgt circa 400 mm, woraus sich ein Sichtfeld von ungefähr 100 mm ergibt.

¹OEVE/OENORM EN 60825-1:2015-08-01

²Diode-pumped solid-state: ein Laser, der durch das Pumpen eines Kristalls mithilfe einer Laserdiode funktioniert [EE10].

4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes

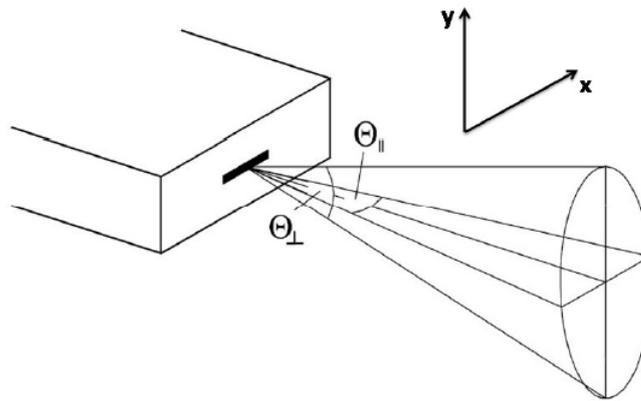


Abbildung 4.2.: Unterschiedliche Öffnungswinkel (Astigmatismus) θ_{\parallel} und θ_{\perp} aufgrund der Geometrie des Resonators bei einem kantenemittierenden Laser [HM06].

Die Kamera ist über ein USB 3.0 Kabel mit einem Workstation-PC verbunden. Die Auswertung erfolgt mit *testXpert*[®] und *videoXtens*. Hierbei ist *videoXtens* die von Messphysik Materials Testing GmbH entwickelte Software, die die Kamerabilder auswertet und daraus Positions- beziehungsweise Dehnungswerte ermittelt. Diese Werte werden dann an *testXpert*[®] (entwickelt von der Zwick Roell Gruppe) übergeben, die eine Aufzeichnung der Daten in verschiedene Kanäle und deren graphische Darstellung erlaubt. Auch sind grundlegende mathematische Operationen auf den Kanäle möglich, wie zum Beispiel Mittelwertbildung zweier Kanäle, Nullen eines Kanals zu Messbeginn oder multiplizieren mit einem konstanten Faktor. *testXpert*[®] ist auch zuständig für die Steuerung der Prüfmaschine.

Zur Positionsbestimmung der Punkte werden in der Software zwei Algorithmen verwendet. Zum einen wird die Open Source Bibliothek OpenCV verwendet. Mithilfe des BLOB-Detektors wird die Position und die Größe der einzelnen Punkte im Bild beim Start der Software erkannt (eine Beschreibung ist in [Mal15] zu finden). Nach Auswählen der richtigen Punkte durch den Benutzer übernimmt ein bei Messphysik entwickelter Algorithmus die genauere Bestimmung der Position des Punktes und das Tracking. Hier ist das Specklemuster der Punkte ein limitierender Faktor.

4. Aufbau und Messergebnisse

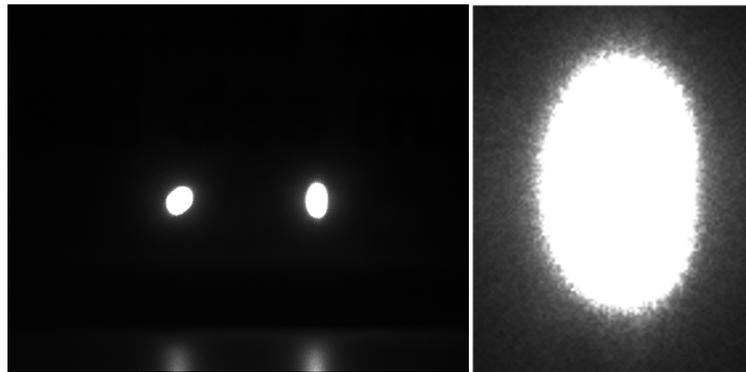


Abbildung 4.3.: Links: Von Kamera aufgenommenes Bild mit zwei Laserpunkten von 650 nm-Dioden. Rechts: Vergrößerte Darstellung des Laserpunktes.

4.1.2. Messung 1: Distanz

In Abbildung 4.3 ist das Bild des Laserpunktes zu sehen. Aufgrund der Überbelichtung sind keine Speckle zu sehen. Diese machen sich nur an den unregelmäßigen Rändern bemerkbar. Mit dieser Anordnung wurde eine Testmessung zur Verschiebung gemacht (siehe Abbildung 4.4). Dazu wurde die Messung gestartet, die Messebene um eine beliebige Distanz verschoben und dann wieder annähernd auf die selbe Position zurückgestellt.

4.1.3. Messung 2: Auflösung

Zur Messung der Auflösung muss das Rauschverhalten der Markierungen betrachtet werden. Eine korrekte Angabe der Auflösung erfolgt laut Norm³ folgendermaßen:

8.5.1.1 Die Auflösung, r , ist die kleinste Längenänderung, die an der Anzeigeeinrichtung der Längenänderungs-Messeinrichtung abgelesen werden kann.

³EN ISO 9513:2012, Kapitel 8.5

4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes

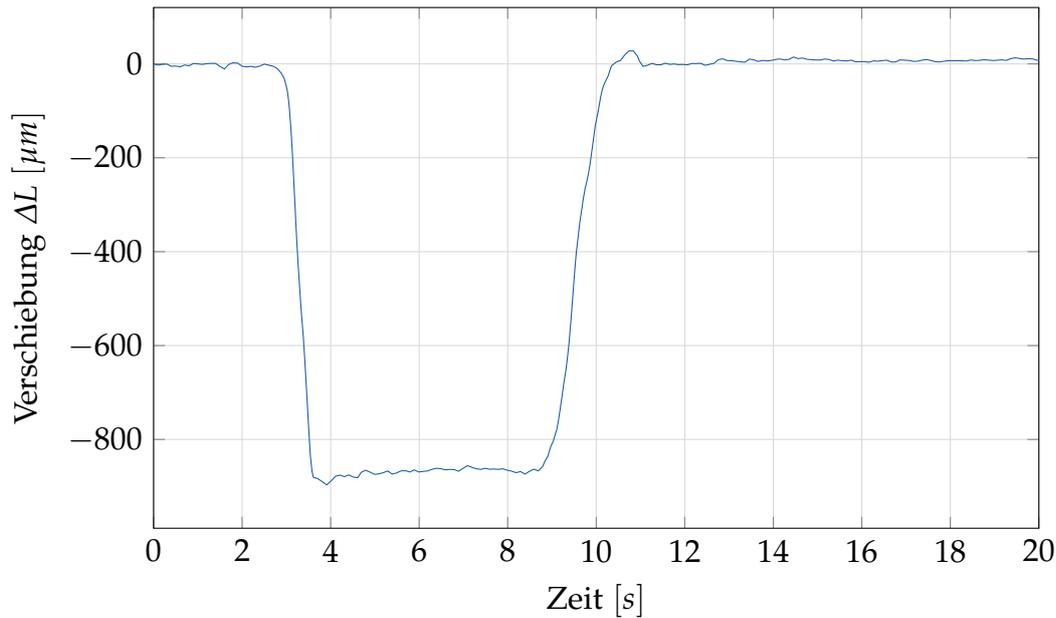


Abbildung 4.4.: Messung der Verschiebung des Laserpunktes im Kamerabild mit dem Testaufbau.

8.5.1.3 Für Längenänderungs-Messsysteme mit elektronischer Anzeige muss der Ausgabewert 10 s beobachtet werden, und der größte und kleinste Wert ist aufzuzeichnen. Die Hälfte der Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten beobachteten Wert muss ermittelt und als Auflösung, r , aufgezeichnet werden. Wenn der kleinste und größte Wert gleich sind, entspricht die Auflösung einer Stelle auf der Anzeige.

Hier wurden verschiedene Parameter abgestimmt, um ein gutes Ergebnis zu erreichen. Ausschlaggebend sind dabei die Belichtungszeit, die Blende und die Fokussierung des Laserstrahls. Mehrere Messungen über 20 Sekunden mit verschiedenen Parametern wurden gemacht. Anhand von drei aussagekräftigen Messungen wird die Parameterauswahl erklärt.

Die Blende sollte nach Möglichkeit so groß wie möglich gewählt werden, da eine kleine Blende den Speckle-Effekt verstärkt⁴. Bei den Messungen wurde

⁴Mit Blende ist immer die Blendenöffnung und nicht die Blendenzahl gemeint. Große Blende bedeutet also kleine Blendenzahl.

4. Aufbau und Messergebnisse

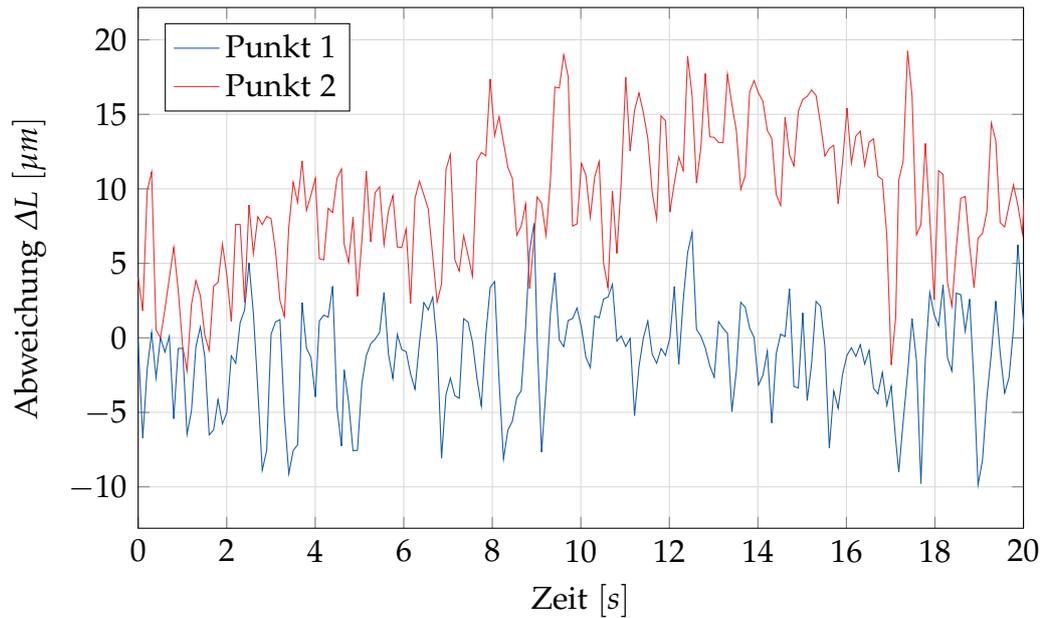


Abbildung 4.5.: Messung der Auflösung mit fokussiertem Laser und starker Überbeleuchtung.

immer die größte Blende (Blendenzahl 3,8) verwendet, da in den anderen Fällen der Algorithmus keinen verwertbaren BLOB gefunden hat.

In Abbildung 4.5 ist eine Messung mit fokussiertem Laser und starker Überbeleuchtung dargestellt. Das Signalrauschen ist sehr stark und begrenzt die Auflösung auf circa $10\ \mu\text{m}$. Wesentlich besser sieht es aus, wenn man die Belichtung zurückdreht. Eine Überbelichtung im Zentrum ist zwar notwendig, um die Specklemuster zu unterdrücken, am Rand des Punktes ist es besser, wenn die Intensität nicht gesättigt ist. Dadurch ist der Rand mehr ausgefranst, jedoch kann der Algorithmus mit mehr Graustufen arbeiten. In Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 sind Messungen mit optimal eingestellter Belichtung dargestellt wobei der Fokus variiert wurde. Während in Abbildung 4.6 der Laser auf den kleinstmöglichen Punkt fokussiert war, ist er bei Abbildung 4.7 auf den doppelten Durchmesser aufgefächert. Im ersten Fall liegt die erreichbare Auflösung bei ungefähr $2\ \mu\text{m}$, im zweiten Fall bei ungefähr $1,5\ \mu\text{m}$. In Abbildung 4.8 ist der Unterschied der beiden Strahlen dargestellt.

Die optimalen Einstellungen für diesen Versuch ist eine offene Blende, ein leicht

4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes

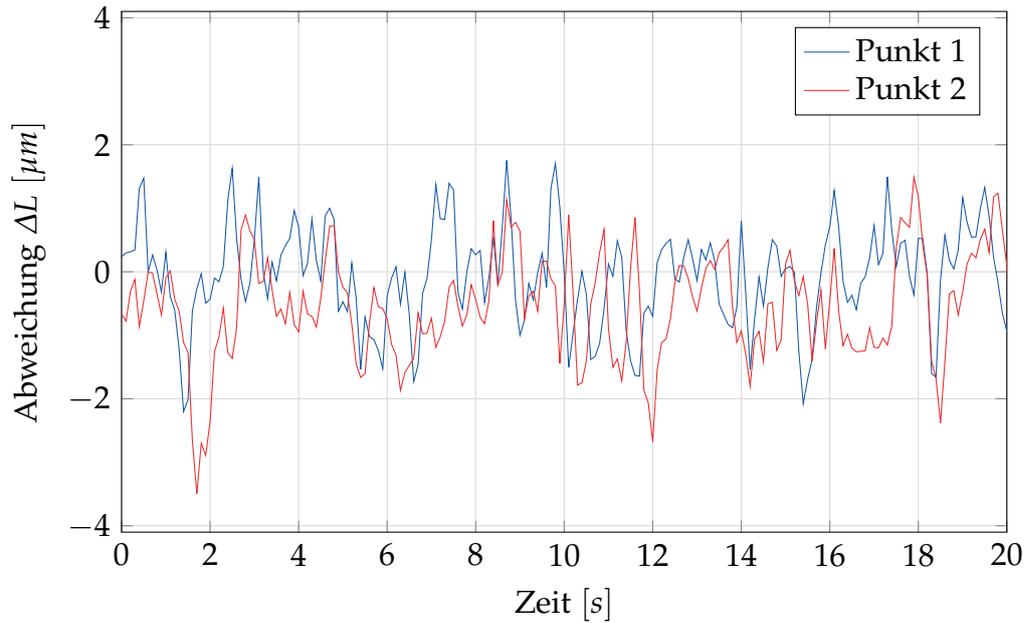


Abbildung 4.6.: Messung der Auflösung mit fokussiertem Laser und moderater Überbeleuchtung.

aufgeweiteter Strahl und eine Belichtungszeit, die das Zentrum des Punktes sättigt und nach außen hin von der Intensität abfallen lässt. In diesem Fall waren es 1,5 ms. In Abbildung 4.9 ist das Profil eines Punktes aus der letzten Messung gegeben.

4. Aufbau und Messergebnisse

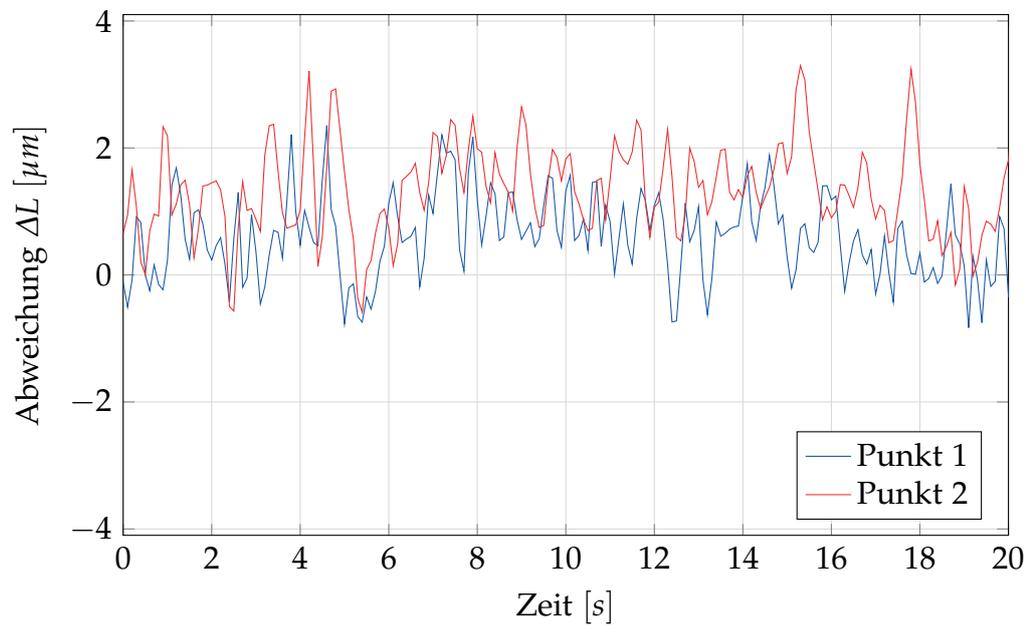


Abbildung 4.7.: Messung der Auflösung mit defokussiertem Laser und moderater Überbeleuchtung



Abbildung 4.8.: Die beiden Laserpunkte bei der Messung. Links: Voll fokussiert, Rechts: Aufgefächert auf doppelten Durchmesser.

4.1. Genauigkeit der Lokalisation des Laserpunktes

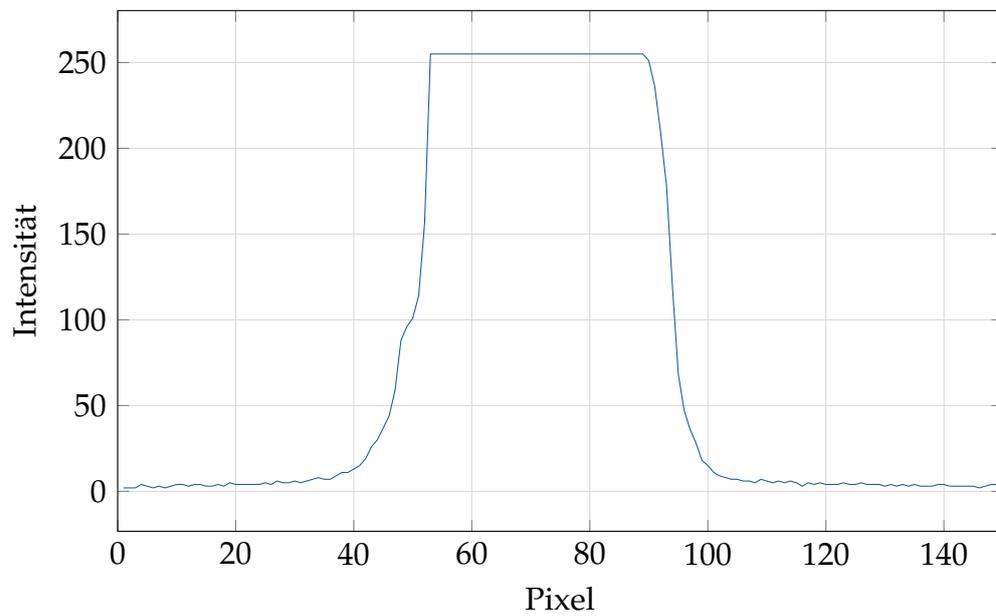


Abbildung 4.9.: Darstellung des Intensitätsprofils über den Durchmesser eines Laserpunktes mit der optimalen Belichtung.

4.2. Distanzmessung an Prüfmaschine

Für die Messung einer definierten Distanz ist ein Anbau an eine Prüfmaschine konstruiert worden. Dabei sind die Kamera und Laser so in die Messachse der Maschine eingebaut, dass eine Messung des Traversenwegs möglich ist. Da die Maschine selbst den Traversenweg mitmisst, ist eine gute Referenz vorhanden. In dieser Phase wird zuerst noch einmal die Strahlqualität im neuen Aufbau untersucht. Dann werden Distanzmessungen mithilfe des Traversenwegs vorgenommen und auf Genauigkeit und Reproduzierbarkeit untersucht.

4.2.1. Aufbau

Der Aufbau ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Für die Testreihen 1-4 sind wieder die 650 nm Laser zur Anwendung gekommen, die auch schon in Unterabschnitt 4.1.1 beschrieben worden sind. Für die Testreihen 5-6 wurde aufgrund der genannten Limitationen des ersten Modells auf einen anderen Lasertyp umgestiegen. Es handelt sich um einen FLEXPOINT® Laserdiodenmodul vom Typ *FP-D-650-1-C-F*. Dies ist ein echter Punktlaser. Die Ausgangsleistung ist genauso auf 1 mW bei einer Wellenlänge von 650 nm beschränkt, wodurch auch dieses Produkt in die Laserklasse 2 fällt⁵.

Bei der Kamera handelt es sich um eine Industriekamera von IDS vom Typ *UI-3483CP-M-GL MP*, welche in hochauflösenden Messgeräten eingesetzt wird. Sie ist mit einem 1/2 Zoll CMOS-Sensor von Aptina mit 5 Megapixel Auflösung ausgestattet. Im Vollbildmodus wird eine Bildrate von 15 frames per second (fps) erreicht, während bei einem eingeschränkten Bildmodus (AOI - area of interest) bis zu 166 fps erreicht werden können. Sie ist mit einem 35 mm Objektiv von Kowa (*LM35JC10M*) ausgestattet. Der Arbeitsabstand beträgt circa 600 mm, woraus sich ein Sichtfeld von ungefähr 82 mm ergibt.

Die Kamera ist über ein USB 3.0 Kabel mit einem Workstation-PC verbunden. Die Auswertung erfolgt mit *testXpert*® und *videoXtens*. Mit *videoXtens* wird die

⁵OEVE/OENORM EN 60825-1:2015-08-01

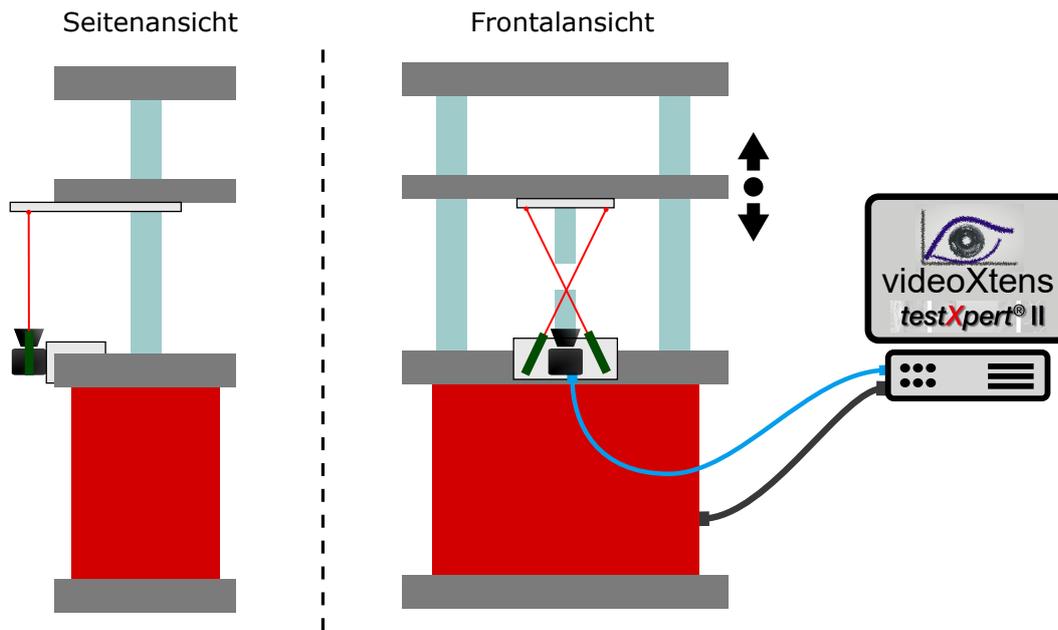


Abbildung 4.10.: Messaufbau für Phase 2: Eine Kamera und 2 Laser befinden sich parallel zur Prüfachse und können so die Distanz, die die Traverse zurücklegt messen.

Abstandsmessung vorgenommen, während *testXpert*[®] zum aufzeichnen der Daten und zur Steuerung des Prüfablaufs verwendet wird.

4.2.2. Konfiguration

In der ersten Testreihe wurde die richtige Konfiguration des Systems eingestellt. Alle folgenden Angaben sind speziell für die hier verwendete Software. Für nähere Angaben wird auf die Anleitung des jeweiligen Produkts verwiesen.

Verwendet wird das Matrix-Feature in der *videoXtens*-Software. Dazu muss die Kamera im Konfigurationsdialog mit der Punktmatrix verbunden werden. Im Messmarken-Dialog werden die weißen Punkte ausgewählt und die Standardeinstellung von zwei Messmarken beibehalten. Nun können im Matrix-Dialog benutzerspezifische Kanäle angelegt werden. An *testXpert*[®] sollen die beiden X-Positionen der Messmarken übertragen werden. Außerdem wird noch ein Abstand der beiden Punkte angelegt und als Längsdehnung definiert. Dieser

4. Aufbau und Messergebnisse

Kanal, den wir eigentlich nicht für die Messung brauchen ist notwendig, damit ein automatisches an- und absetzen des *videoXtens* durch *testXpert*[®] möglich ist. In *testXpert*[®] müssen genauso zwei benutzerdefinierte Messkanäle (X1 und X2) angelegt werden, die die gelieferten Messwerte speichern. In der Maschinenkonfiguration von *testXpert*[®] werden die entsprechenden Kanäle verbunden (VDX X-Position Messmarke 1 → X1; VDX X-Position Messmarke 2 → X2; VDX Längsmesslänge → Standardwegaufnehmer). So werden sowohl die absoluten Positionen als auch die bei Messbeginn genullten Positionen in den Kanälen X1 und X2 gespeichert.

4.2.3. Prüfungsablauf

Der Prüfungsablauf basiert auf der zyklischen Masterprüfvorschrift *xct054.zp2* von *testXpert*[®]. In Tabelle 4.1 werden alle Werte angegeben, die von den Standardwerten abweichen. Prinzipiell wird zwischen zwei unterschiedlichen Prüfungsarten unterschieden. Die Auflösungsprüfung ist eine Messung bei Stillstand, die nach 25 Sekunden abbricht und dient zum bestimmen der Auflösung. Eine Distanzprüfung ist ein Stufentest, bei dem verschiedene Distanzen angefahren und für eine bestimmte Zeit gehalten werden. Sie dient zum bestimmen der Genauigkeit der Distanzmessung.

4.2.4. Auflösungsbestimmung

Mit den Testreihen 2-5 wurde die Auflösung mit den verschiedenen Laserdioden und der neuen Kamera an der Maschine optimiert. Dazu wurden verschiedenste Parameter getestet, die in Tabelle 4.2 dargestellt sind. Die zu bestimmenden Parameter sind die Belichtungszeit, die Glättung des Signals und die Fokussierung des Laser. In der Tabelle befinden sich auch Verweise zu den jeweiligen Graphen der Prüfungen.

4.2. Distanzmessung an Prüfmaschine

Tabelle 4.1.: Angabe der Parameter für die Versuche. Standardparameter: Für alle Tests gleich; Auflösungsparameter: zusätzliche Parameter für eine Auflösungsmessung; Distanzparameter: zusätzliche Parameter für eine Distanzmessung.

Standardparameter	Wert
Prüfart	Zug
Einspannlänge bei Start	602 mm
Geschwindigkeit Startposition	100 mm/min
Vorlaufweg	keinen
Messlänge korrigieren	<input checked="" type="checkbox"/>
Vorkraft	<input type="checkbox"/>
Startposition einstellen nach Prüfung	<input checked="" type="checkbox"/>
Auflösungsparameter	Wert
Setzphase	<input type="checkbox"/>
Messphase	<input type="checkbox"/>
Belastungsphase bis Prüfungsende	<input checked="" type="checkbox"/>
Geschwindigkeit bis Prüfungsende	(lagegeregelt) 1e-014 mm/min
Maximale Versuchsdauer	25 s
Distanzparameter	Wert
Setzphase	<input type="checkbox"/>
Messphase	<input checked="" type="checkbox"/>
Art der Messphase	stufenweise Belastung
Anzahl der Stufen	31
Erste Stufe	(Dehnung nominell) -3 mm
Zunahme je Stufe	0,2 mm
Haltezeit an der Stufe	15 s
Halteart an der Stufe	lagegeregelt
Geschwindigkeit Stufen	10 mm/min
Belastungsphase bis Prüfungsende	<input type="checkbox"/>

4. Aufbau und Messergebnisse

Tabelle 4.2.: Die wichtigsten Parameter für die Testreihen 2-5 und den Unterse-
rien US zur Bestimmung der Auflösung im Testaufbau tabellarisch
dargestellt. Für jede Testreihe ist ein Verweis auf die jeweiligen
Messkurven gegeben.

US	Fokus	Belichtung	Sonstiges
Testreihe 2			Laser elliptisch Abbildung 4.11
US 1	fokussiert	0,1 ms	
US 2	fokussiert	2,2 ms	
US 3	fokussiert	0,5 ms	
US 4	fokussiert	0,1 ms	Glättung 200 ms, AOI (80 fps)
Testreihe 3			Laser elliptisch Abbildung 4.12
US 1	defokussiert	1 ms	
US 2	defokussiert	3 ms	
US 3	defokussiert	8,7 ms	Glättung 200 ms, AOI (80 fps)
US 4	defokussiert	10 ms	mit Bandpass-Filter
Testreihe 4			Laser elliptisch Abbildung 4.13
US 1	fokussiert	0,5 ms	mit Bandpass-Filter
US 2	fokussiert	0,5 ms	ohne Bandpass-Filter
Testreihe 5			Laser FLEXPOINT® Abbildung 4.14
US 1	defokussiert	15 ms	
US 2	defokussiert	8 ms	
US 3	defokussiert	4 ms	
US 4	fokussiert	4 ms	mit Bandpass-Filter
US 5	fokussiert	4 ms	
US 6	fokussiert	8 ms	
US 7	fokussiert	12 ms	
US 8	fokussiert	2 ms	
US 9	fokussiert	0,8 ms	
US 10	fokussiert	0,2 ms	
US 11	fokussiert	0,8 ms	Glättung 200 ms, AOI (130 fps)
US 12	fokussiert	0,3 ms	Glättung 200 ms, AOI (130 fps)
US 13	fokussiert	0,6 ms	Glättung 200 ms, AOI (130 fps)

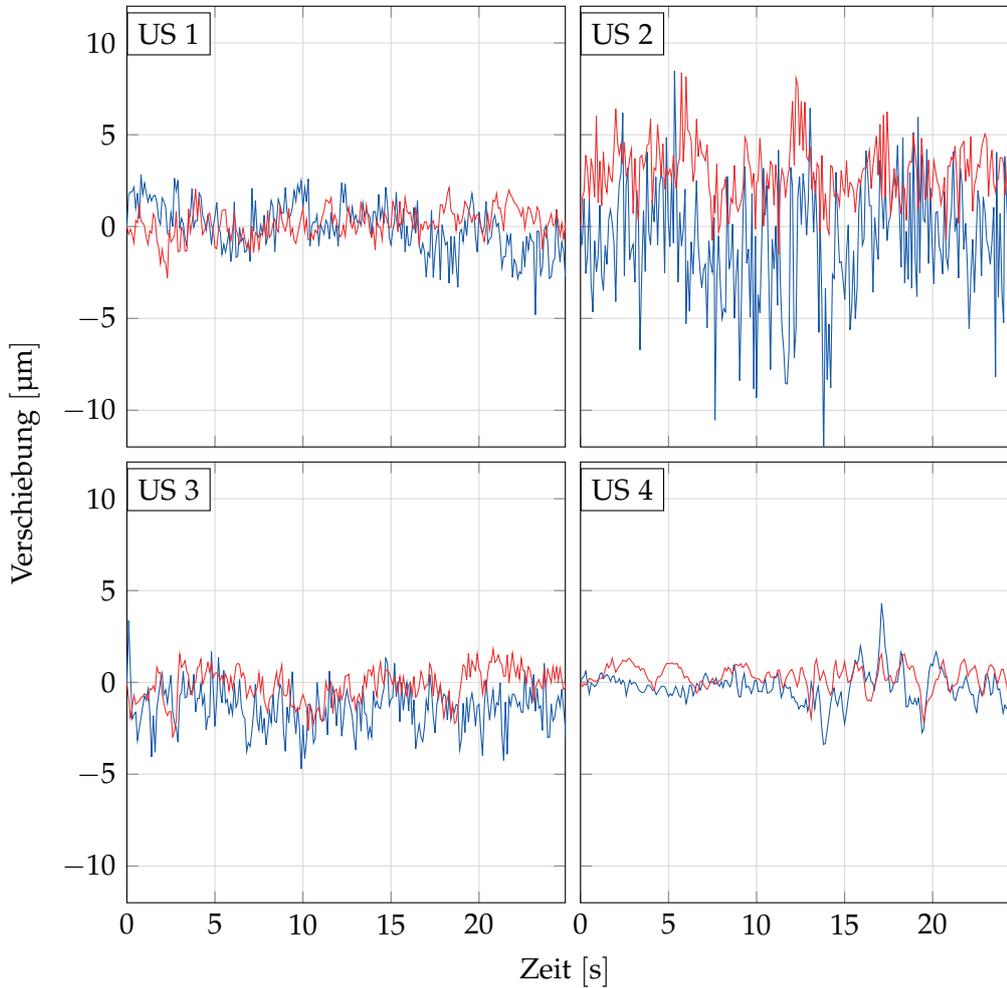


Abbildung 4.11.: Testreihe 2 mit den dazugehörigen Unterserien. Die verschiedenen Versuche unterscheiden sich in Belichtungszeit, Glättung und der Fokussierung des Lasers. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.2 angegeben. Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2.

4. Aufbau und Messergebnisse

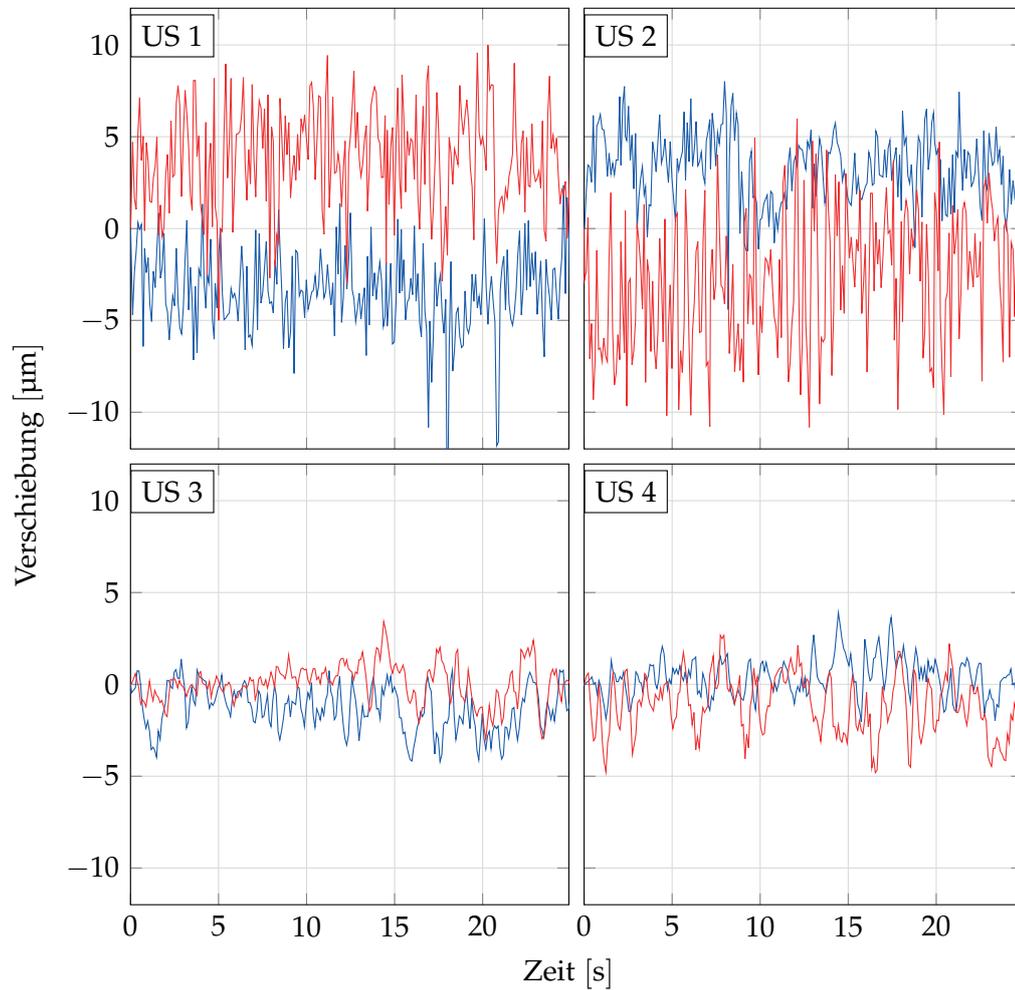


Abbildung 4.12.: Testreihe 3 mit den dazugehörigen Unterserien. Die verschiedenen Versuche unterscheiden sich in Belichtungszeit, Glättung und der Fokussierung des Lasers. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.2 angegeben. Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2.

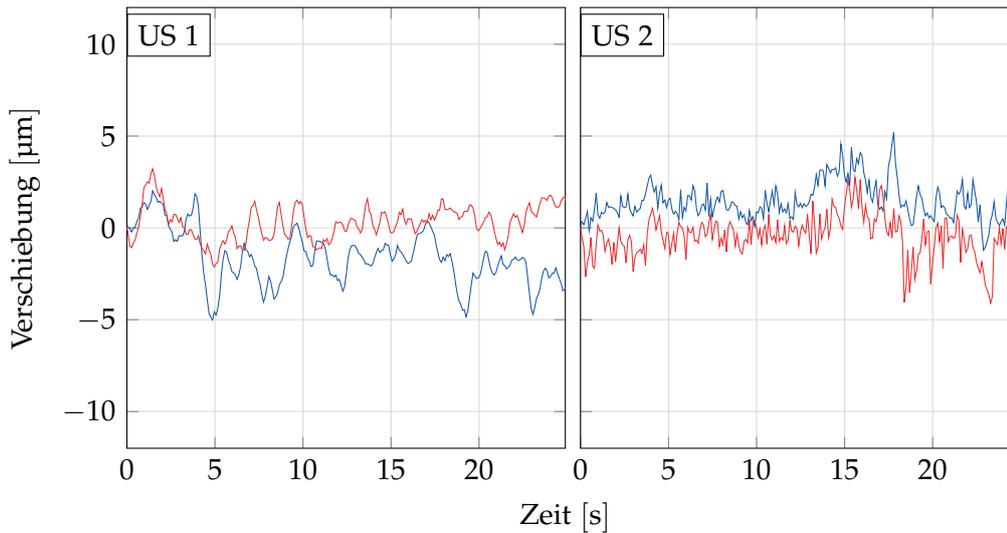


Abbildung 4.13.: Testreihe 4 mit den dazugehörigen Unterserien. Die verschiedenen Versuche unterscheiden sich in Belichtungszeit, Glättung und der Fokussierung des Lasers. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.2 angegeben. Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2.

4.2.5. Distanzmessung

Beim Stufentest wurden 31 Stufen um den Nullpunkt der Messung angefahren und für 15 Sekunden gehalten. Die genauen Parameter für die Prüfung sind in Tabelle 4.1 angegeben.

4. Aufbau und Messergebnisse

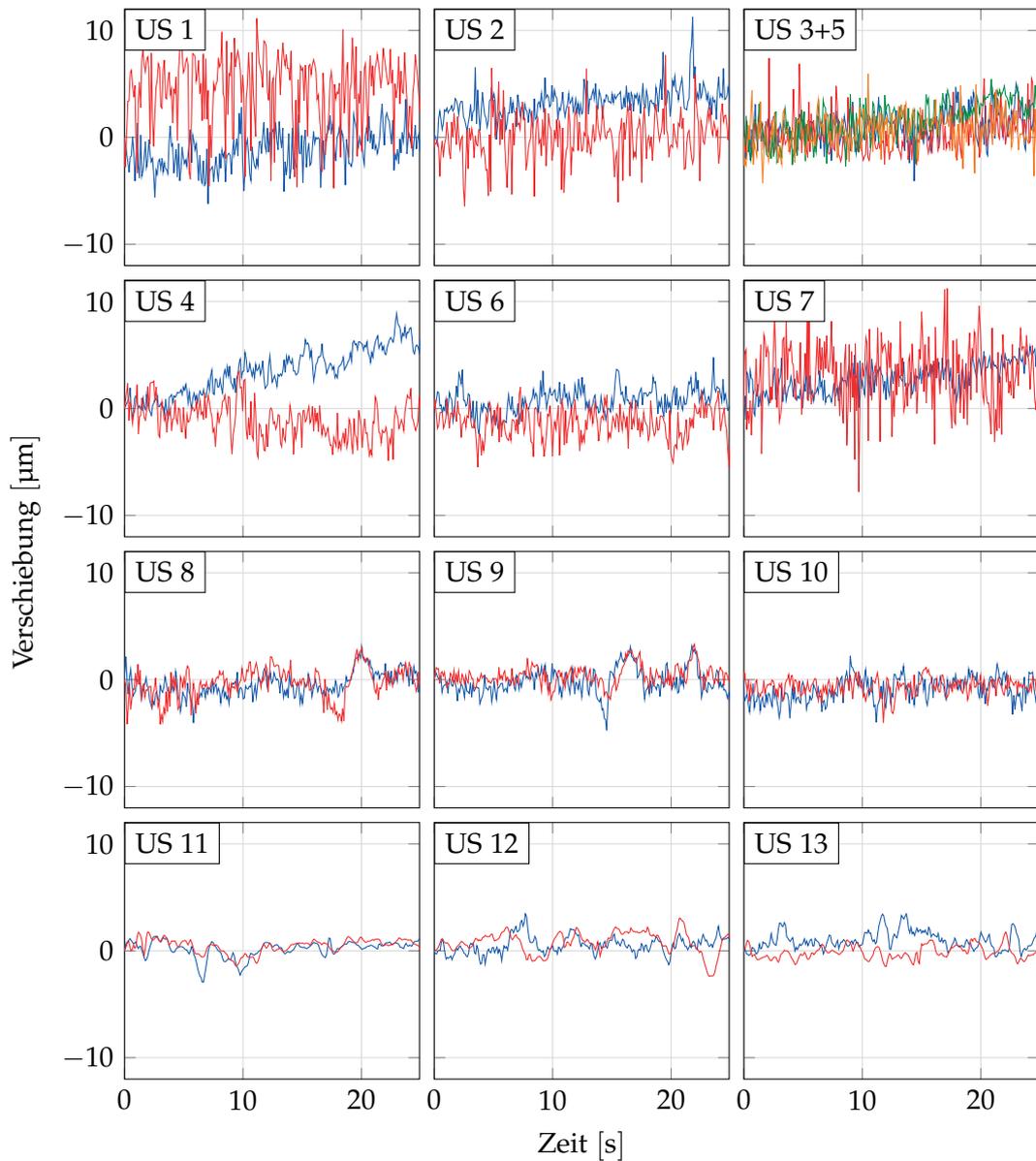


Abbildung 4.14.: Testreihe 5 mit den dazugehörigen Unterserien. Die verschiedenen Versuche unterscheiden sich in Belichtungszeit, Glättung und der Fokussierung des Lasers. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.2 angegeben. US 3 und 5 sind zusammengefasst dargestellt, da sie mit den gleichen Parametern ausgeführt wurden. Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2.

4.2. Distanzmessung an Prüfmaschine

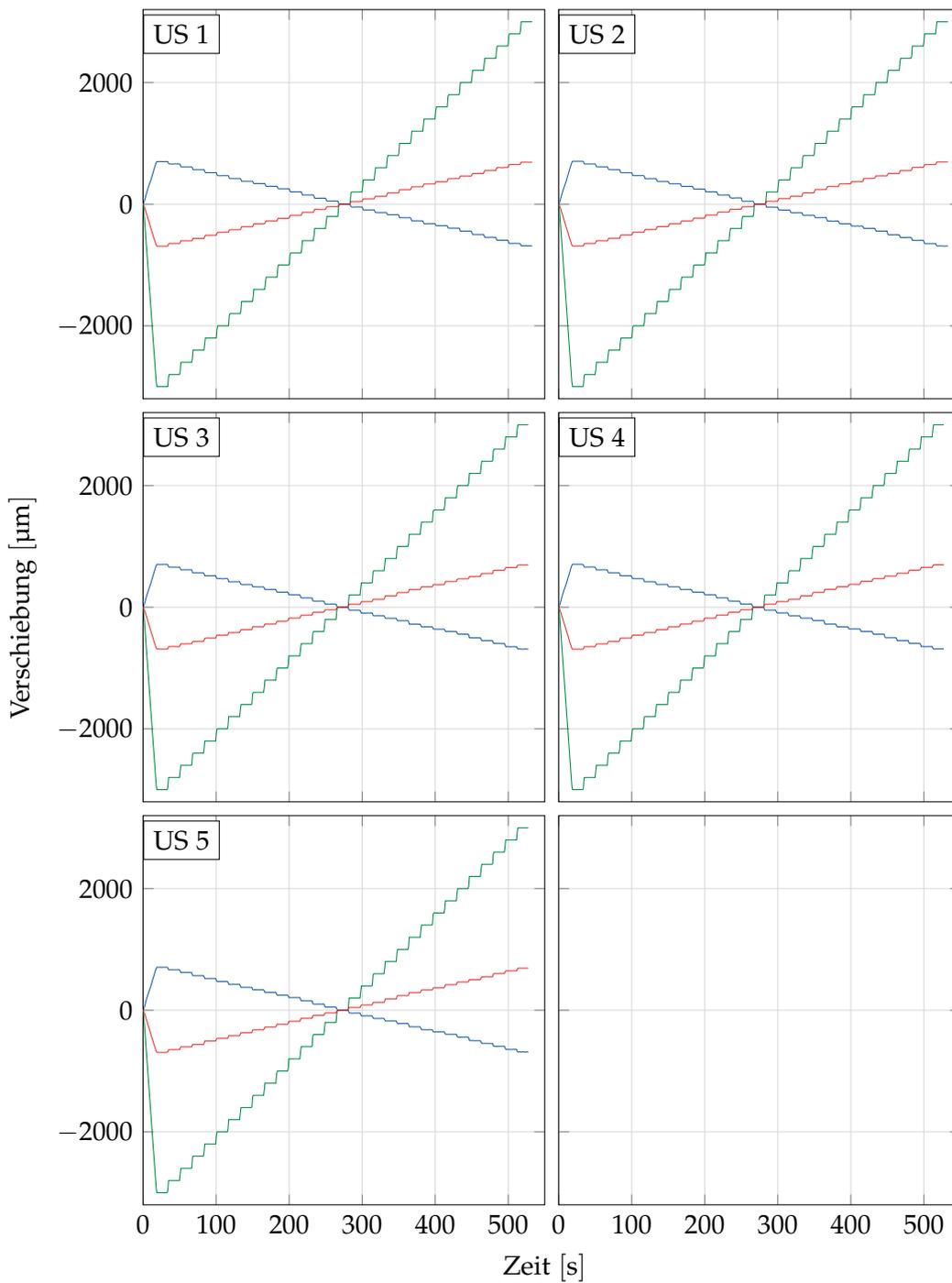


Abbildung 4.15.: Testreihe 6 mit den dazugehörigen Unterserien. Die dazugehörigen Parameter sind in Tabelle 4.2 angegeben. Grün: Traversenweg, Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2

4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine

4.3.1. Aufbau

Der Aufbau stimmt in großen Teilen mit Unterabschnitt 4.2.1 überein. Der einzige Unterschied ist die verwendete Prüfmaschine. Hierfür wurde die Maschine verwendet, die zur Kalibrierung der Messköpfe bei der Firma Messphysik Materials Testing GmbH herangezogen wird. Diese verfügt nicht nur über eine traditionelle Traversenwegmessung über die Spindeldrehung, sondern kann den Hub direkt an der Traverse mit einem Laser-Interferometer bestimmen.

Der Laser-Interferometer kommt von der Firma Renishaw. Es handelt sich um eine RLU10 Laser-Einheit mit einem RLD10 Detektor. Weiters sind über eine RCU10 Kompensationseinheit ein Messkopf zur Kompensation der Änderung des Brechungsindex der Luft und ein Messkopf zur Kompensation der Materialausdehnung der Prüfmaschine angeschlossen. Der Detektor ist als retro-reflektierendes System ausgeführt (siehe Abbildung 4.16 A), und erreicht eine Auflösung von 20 nm. Ein typischer Aufbau des Systems ohne Kompensation ist in Abbildung 4.16 B zu sehen.

Für die Kamera und den Laser wurde ein Anbau für die obere Festtraverse konstruiert, damit diese genau in der Prüfachse liegen. Auf der Fahrtraverse wurde noch eine plangefräste Platte montiert, auf der gemessen wurde. Der Renishaw misst auch auf der Fahrtraverse aber von unten. Der Aufbau ist in Abbildung 4.17 zu sehen.

Konfiguration und Prüfungsablauf sind der selbe wie in Unterabschnitt 4.2.2 und Unterabschnitt 4.2.3 dargelegt wurde. Bei den ersten zwei Messreihen wurde der selbe Punktlaser wie in Unterabschnitt 4.2.1 verwendet, bei der dritten Messreihe wurde ein Linienlaser verwendet. Die genauen Kameraparameter und andere Besonderheiten werden in den jeweiligen Abschnitten zu den Messreihen bekannt gegeben.

4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine

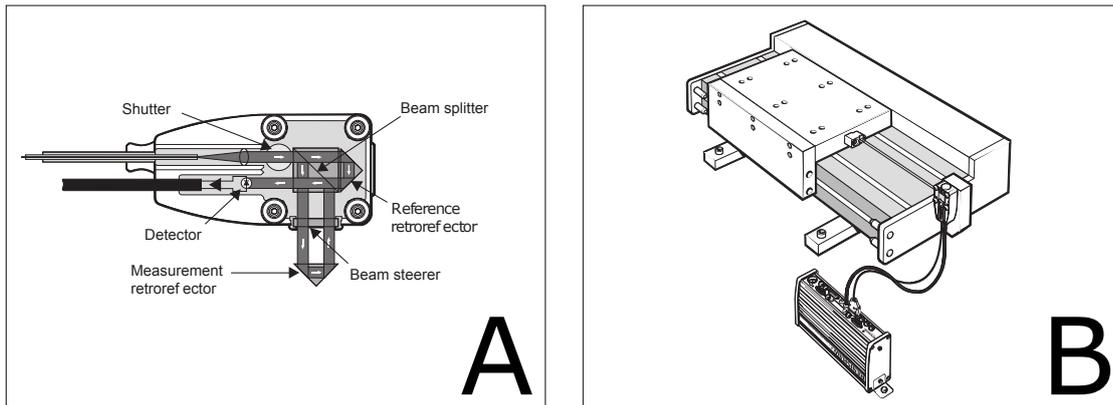


Abbildung 4.16.: A: Detektorkopf mit retroreflektierendem Aufbau. Ein Laserstrahl wird in 2 Teilstrahlen am Beamsplitter aufgeteilt und nach Reflexion wieder zusammengeführt. Dadurch entsteht eine Interferenz, mit der der zurückgelegte Weg des bewegten Reflektors berechnet werden kann. B: Typischer Messaufbau um den linearen Vershub eines Aufnehmers zu messen. Entnommen aus [Ren11].

4.3.2. Messreihe 1

Die erste Messreihe an der Kalibriermaschine wurde mit den selben Punktlasern wie in Unterabschnitt 4.2.1 durchgeführt. Weiters wurde die Sichtplatte an der Kalibriermaschine blank gelassen. Dadurch ergab sich ein hohes Reflexionsvermögen.

In Abbildung 4.18 ist die Messung der Auflösung gezeigt. Dies wurde mit folgenden Parametern erreicht:

- Abstand: 500 mm
- Gesichtsfeld: 67,2 mm
- Belichtungszeit: 0,05 ms
- Messfrequenz: 120 Hz
- Glättung: 500 ms
- Verstärkung: 0

4. Aufbau und Messergebnisse

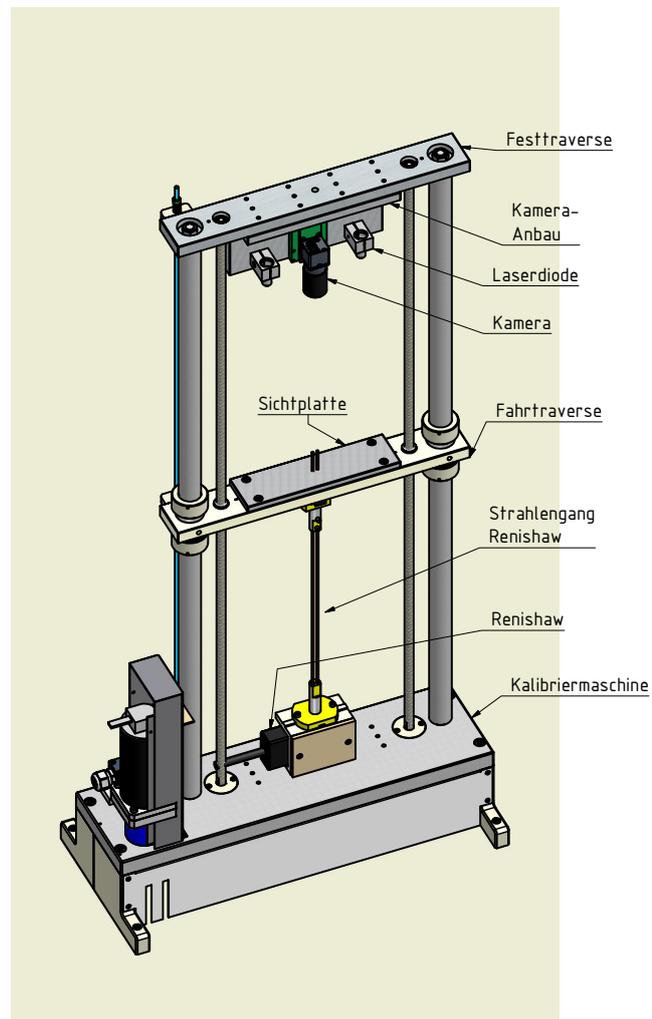


Abbildung 4.17.: Aufbau der Triangulationsmessung an der Kalibriermaschine. Die Kamera und die Laserdioden sind an der Festtraverse mit einem eigenen Anbau genau in Prüfachse montiert und sieht von oben auf die Fahrtraverse. Der Renishaw Laser-Interferometer ist an der Basis montiert und sieht von unten auf die Fahrtraverse.

4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine

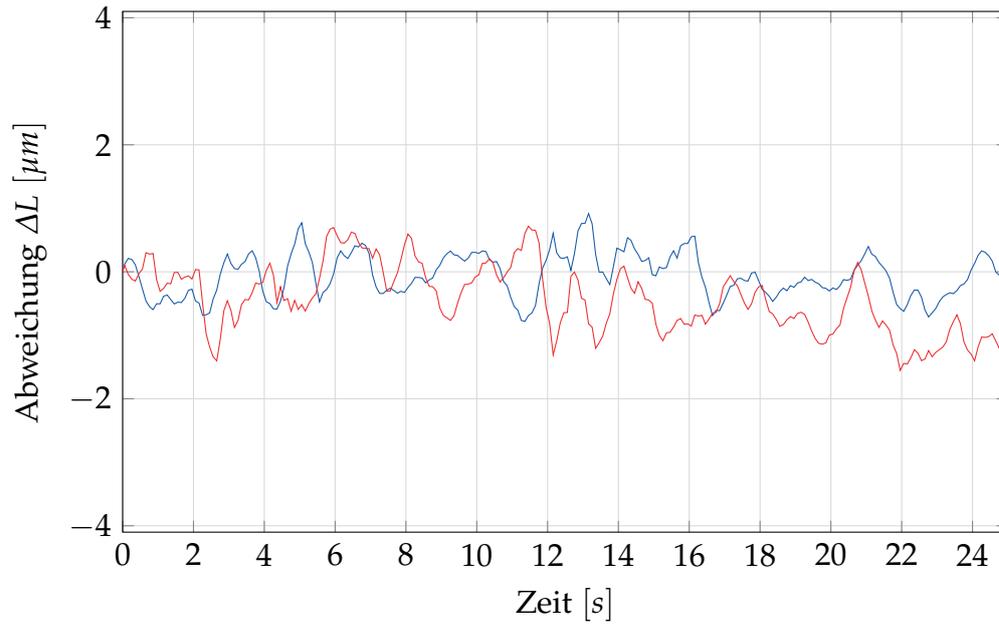


Abbildung 4.18.: Auflösungs-messung an der Kalibriermaschine für die Messreihe 1. Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2.

Diese Parameter wurden dann für die folgende Messreihe übernommen, die in Abbildung 4.19 dargestellt ist.

4. Aufbau und Messergebnisse

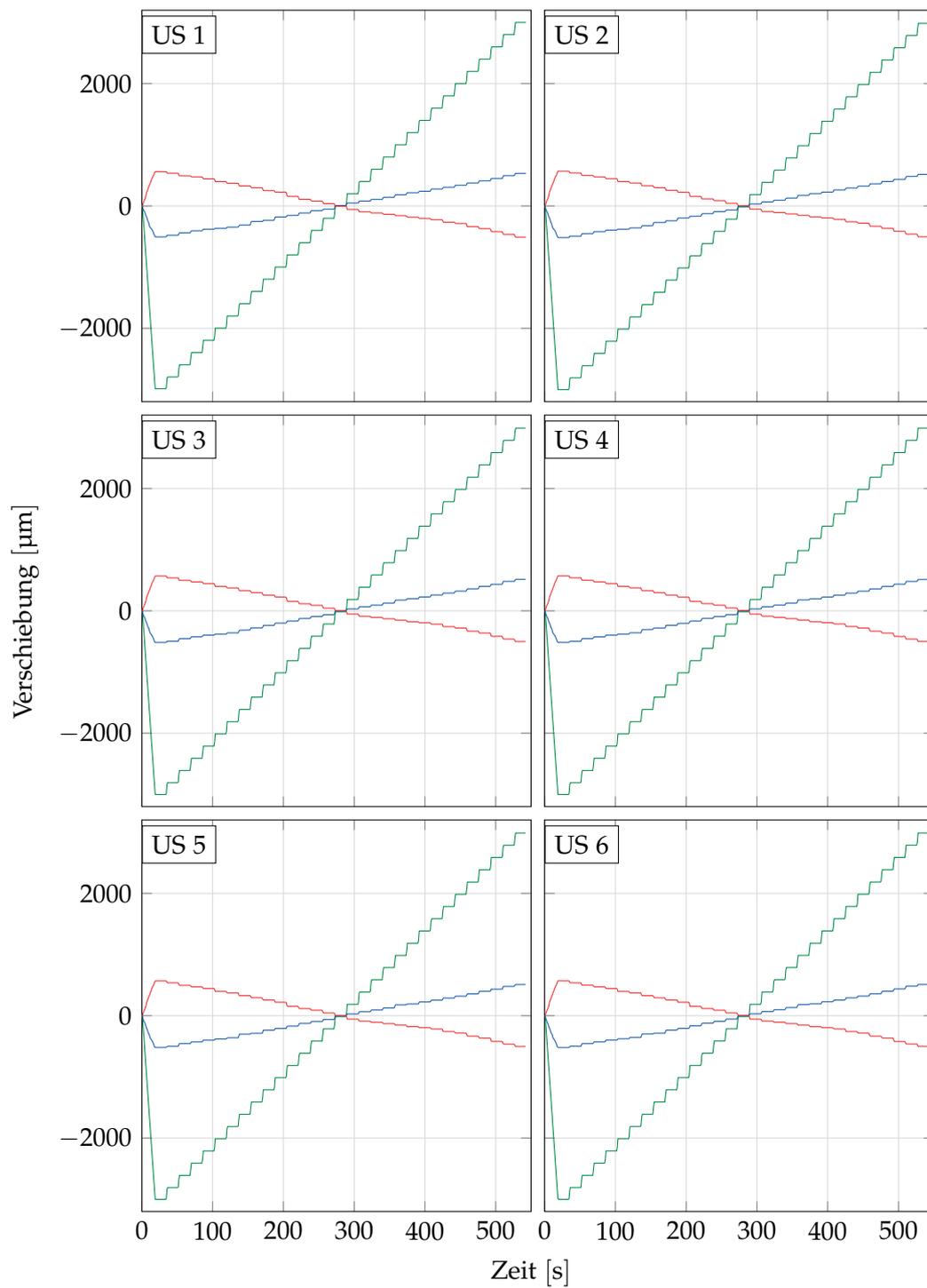


Abbildung 4.19.: Messreihe 1 mit der Kalibriermaschine. Grün: Renishaw, Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2

4.3.3. Zweiter Aufbau

Der Aufbau blieb nahezu unverändert zum ersten Aufbau. Hier wurde die Sichtplatte nun schwarz lackiert, um den Einfluss der Oberfläche zu sehen. Durch das nun geringere Reflexionsvermögen wurden folgenden Parameter verwendet:

- Abstand: 500 mm
- Gesichtsfeld: 67,2 mm
- Belichtungszeit: 0,3 ms
- Messfrequenz: 120 Hz
- Glättung: 1000 ms
- Verstärkung: 0

4.3.4. Messreihe 2

Durch die noch längere Glättung ist jetzt beinahe kein Rauschen mehr auf dem Signal, welches in Abbildung 4.20 zu sehen ist. Die Messkurven sind in Abbildung 4.21 abgebildet.

4.3.5. Aufbau Striche

Hier wurde der mechanische Aufbau von der vorherigen Messung übernommen, einzig ein anderer Lasertyp wurde verwendet. Zum Einsatz kam ein FLEXPOINT® Laserdiodenmodul vom Typ *MVNano-660-1-10-F*, welcher von Blau Optoelektronik hergestellt wurde. Dieser besitzt eine Linienform. Durch die weite Auffächerung des Lasers besitzt dieser natürlich eine geringere Intensität. Folgende Parameter wurden verwendet:

- Abstand: 500 mm
- Gesichtsfeld: 67,2 mm

4. Aufbau und Messergebnisse

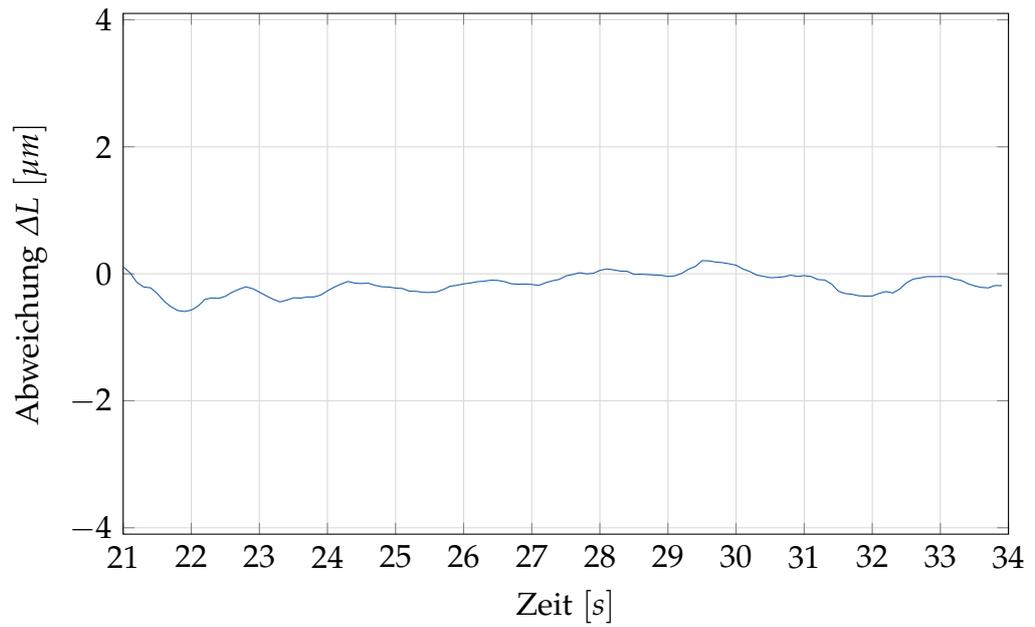


Abbildung 4.20.: Auflösungs-messung an der Kalibriermaschine für die Messreihe 2.

- Belichtungszeit: 10,06 ms
- Messfrequenz: 83,33 Hz
- Glättung: 1000 ms
- Verstärkung: 38

4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine

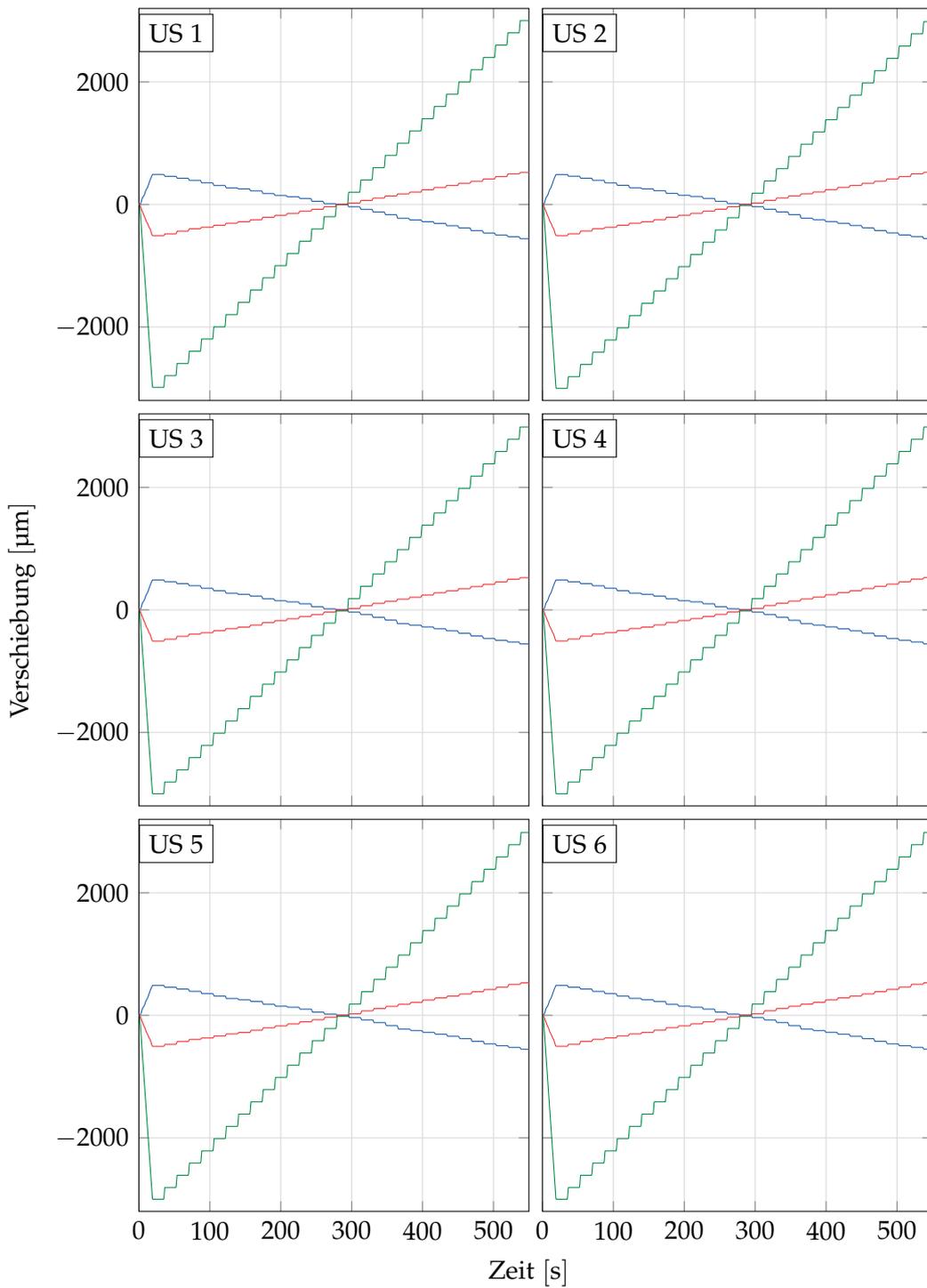


Abbildung 4.21.: Messreihe 2 mit der Kalibriermaschine. Grün: Renishaw, Blau: Punkt 1, Rot: Punkt 2

4.3.6. Messreihe Strich

In Abbildung 4.22 ist die Laserlinie im Auswertebild dargestellt mit einem vergrößerten Ausschnitt der Kante. In Abbildung 4.23 ist die Auflösung gezeigt, die mit diesem Aufbau erreichbar ist. Für die Genauigkeitsmessung wurde wieder der selbe Stufentest mit den 31 Stufen gefahren und dieser ist in Abbildung 4.24 dargestellt.

4.3. Distanzmessung an der Kalibriermaschine

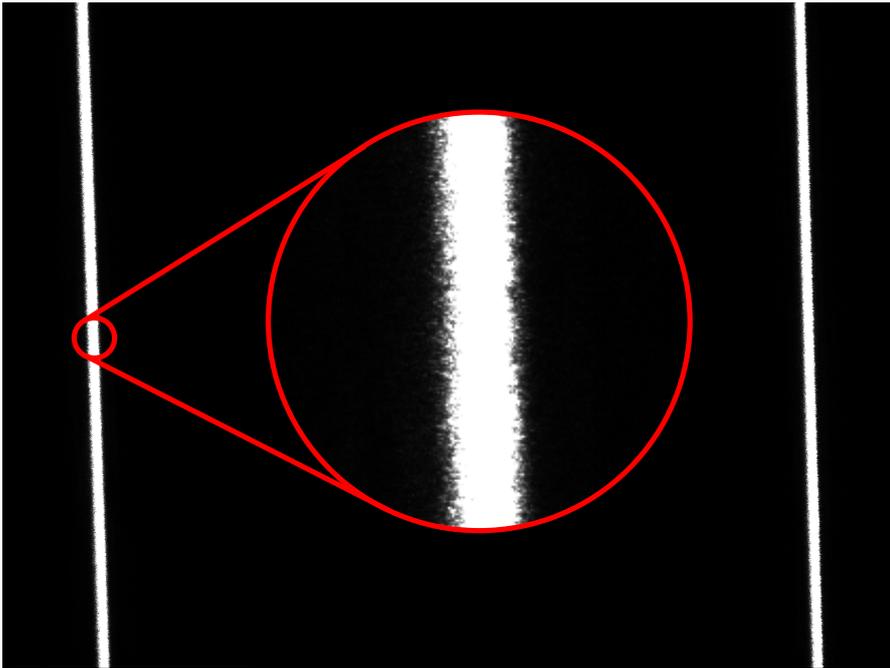


Abbildung 4.22.: Laserlinie im Auswertebild mit Vergrößerung um die Kantenstruktur besser sehen zu können.

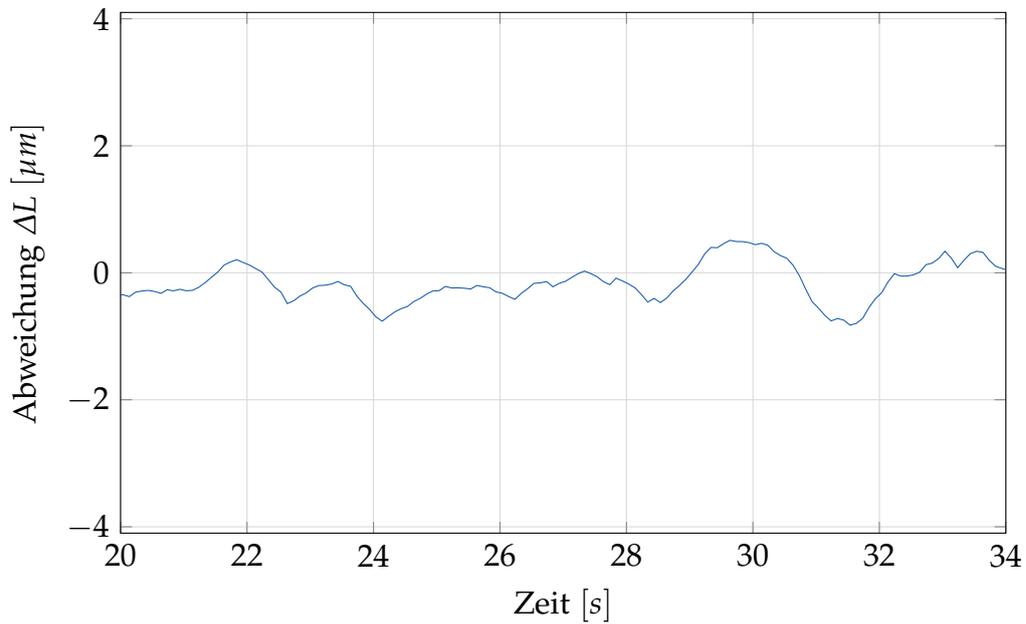


Abbildung 4.23.: Auflösungs-messung an der Kalibriermaschine für die Messreihe mit dem Linienlaser.

4. Aufbau und Messergebnisse

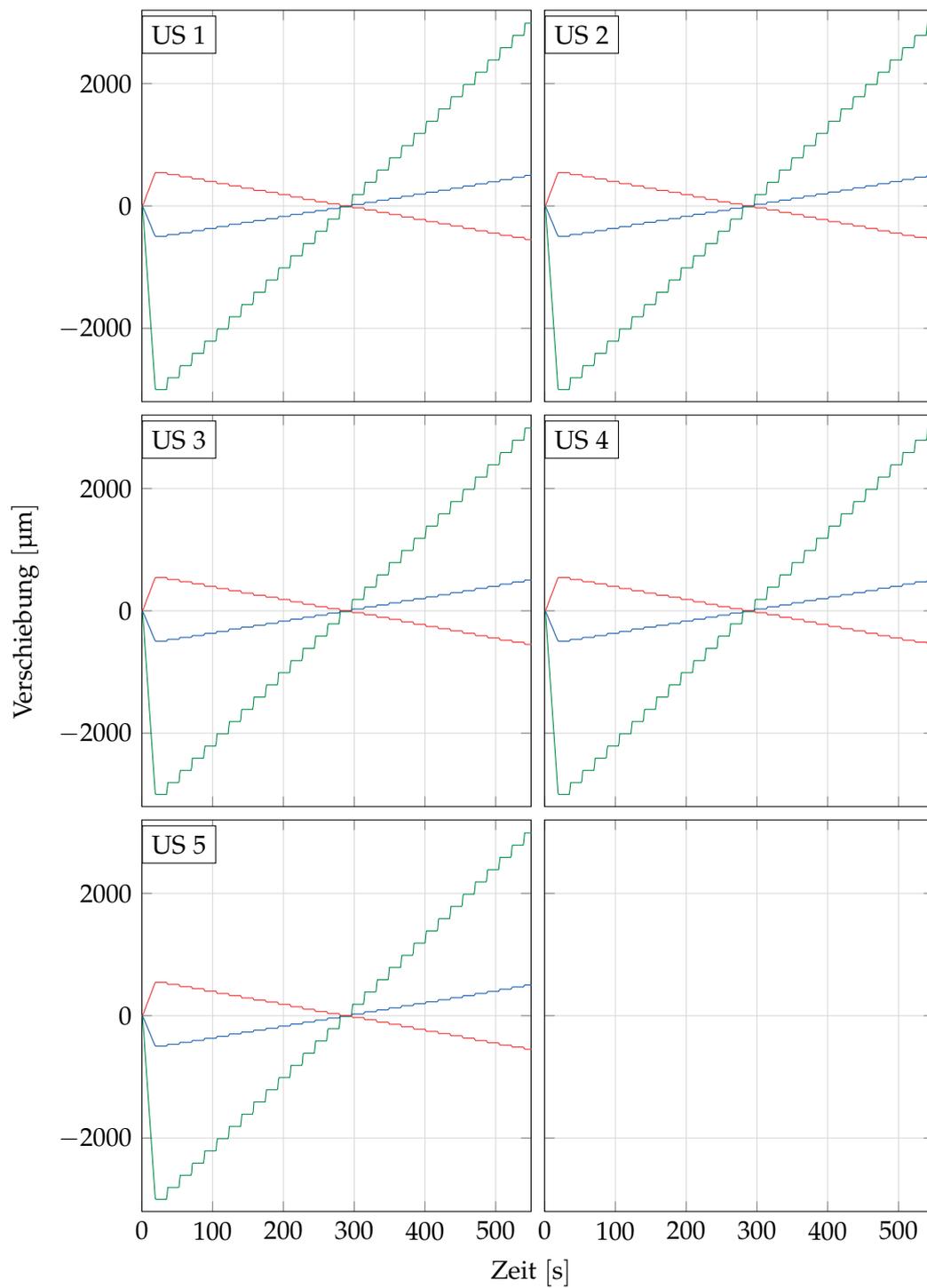


Abbildung 4.24.: Messreihe mit dem Linienlaser mit der Kalibriermaschine.
Grün: Renishaw, Blau: Linie 1, Rot: Linie 2

5. Auswertung

In diesem Kapitel werden die Daten, die im Kapitel 4 gewonnen wurden analysiert. Hierbei werden die Versuche an der Prüfmaschine und der Kalibriermaschine getrennt behandelt.

5.1. Messungen Prüfmaschine

5.1.1. Auflösungs-messung

Im ersten Versuchsaufbau (Abbildung 4.1) wurden verschiedene Messungen zur Auflösung des Messsignals gemacht. Da ein Vorteil des FLEXPOINT® Laserdiodenmodul gegenüber dem elliptischen Modell sichtbar war, wurde dieser für die Messungen verwendet. In Tabelle 4.2 und Abbildung 4.14 zur Testreihe 5 wurden die Parameter zur Auflösung bestimmt.

Aufgrund der Daten wurde für die weiteren Versuche die Einstellungen aus der Unterserie 11 verwendet. Sie besitzt beim zweiten Laserpunkt eine Auflösung von $1,6 \mu\text{m}$. Alle Versuche der Testreihe 6 sind also mit einer Belichtungszeit von $0,8 \text{ ms}$, einer Glättung von 200 ms und aktiviertem AOI durchgeführt worden.

5.1.2. Genauigkeitsbestimmung

Hier werden die Ergebnisse aus der Testreihe 6 (siehe Abbildung 4.15) ausgewertet und ein Rückschluss auf die Genauigkeit der Messung gezogen. Wie wir in (3.19) gezeigt haben, sollte die Verschiebung im Bild sich nur um einen konstanten Faktor von dem lateralen Versatz der Oberfläche unterscheiden.

5. Auswertung

Tabelle 5.1.: Auflösungsbestimmung aus Testreihe 5 zur Bestimmung der optimalen Parameter für die Versuche.

Serie	Punkt 1			Punkt 2		
	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]
US1	-6,22	3,56	4,89	-4,77	11,13	7,95
US2	-0,68	11,24	5,96	-6,46	7,69	7,07
US3	-4,10	5,02	4,56	-2,59	7,41	5,00
US4	-1,15	8,86	5,00	-4,89	3,47	4,18
US5	-2,74	5,44	4,09	-4,29	5,94	5,11
US6	-2,38	4,77	3,58	-5,50	2,00	3,75
US7	-1,05	5,81	3,43	-7,80	11,23	9,51
US8	-4,04	3,08	3,56	-4,19	2,99	3,59
US9	-4,74	3,15	3,94	-1,88	3,30	2,59
US10	-4,00	2,20	3,10	-4,02	1,14	2,58
US11	-2,94	1,37	2,16	-1,44	1,77	1,60
US12	-1,30	3,45	2,37	-2,38	3,06	2,72
US13	-0,56	3,45	2,00	-1,47	1,74	1,61

Um die beiden Kurven miteinander vergleichen zu können, wurde die Prüfung als Stufentest gefahren. In 31 verschiedenen Abständen, die um den Ursprungspunkt (602 mm) liegen, sind jeweils über 15 Sekunden Daten aufgezeichnet worden. Diese „Plateaus“ sollen zur Bestimmung der genauen Lage sowohl der Traverse als auch der Distanzmessung dienen. Mithilfe dieser Positionen kann dann eine Korrektur im Sinne eines Least-Square Verfahrens durchgeführt werden.

Nach dem Durchführen dieser Kalibrierung kann die Genauigkeit der Messung überprüft werden. Durch das Vergleichen mit den weiteren Kurven kann die Reproduzierbarkeit der Messung beurteilt werden.

Die Bestimmung der Plateaus erfolgt nach einem einfachen Schema. Aus den Messwerten der Traverse wird der Differenzenquotient gebildet. Ist dieser kleiner als eine Konstante, die kleiner als die Bewegung der Traverse, aber größer als die Signalunsicherheit ist, dann befindet sich die Traverse im Stillstand, also im Plateau. Zusätzlich werden nur solche Plateaus akzeptiert, die mehr als 50 aufeinanderfolgende Datenpunkte haben, um Ausreißer auszuschließen. Der Programmcode ist in Abschnitt A.2 angefügt. In Abbildung 5.1 wird die Auswertung dargestellt.

Dadurch, dass bei jedem Plateau über 15 Sekunden gemittelt wird, wird die Bestimmung der Verschiebung genauer als es die Auflösung eigentlich zulässt. Bei dem ersten Punkt schwankt die Standardabweichung der Orte zwischen $0,48\ \mu\text{m}$ und $1,44\ \mu\text{m}$ und liegt im Mittel bei $0,90\ \mu\text{m}$. Die Werte des zweiten Punktes besitzen eine Standardabweichung im Bereich von $0,28\ \mu\text{m}$ bis $1,68\ \mu\text{m}$, und liegt im Mittel bei $0,74\ \mu\text{m}$.

Als Erstes wird die Korrektur um nur einen konstanten Faktor betrachtet. Der Programmcode zur Auswertung ist in Abschnitt A.2, Abschnitt A.3 und Abschnitt A.4 gegeben, das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.2 und 5.3 gezeigt. Die Messungen des Punktes 1 zeigen eine Spannweite von $110,7\ \mu\text{m}$ und liegen im Mittel um $-43,2\ \mu\text{m}$ neben dem Traversenweg. Die Messwerte des Punktes 2 haben eine Streuung von $70,0\ \mu\text{m}$ und liegen im Schnitt $5,5\ \mu\text{m}$ neben der Nominale.

5. Auswertung

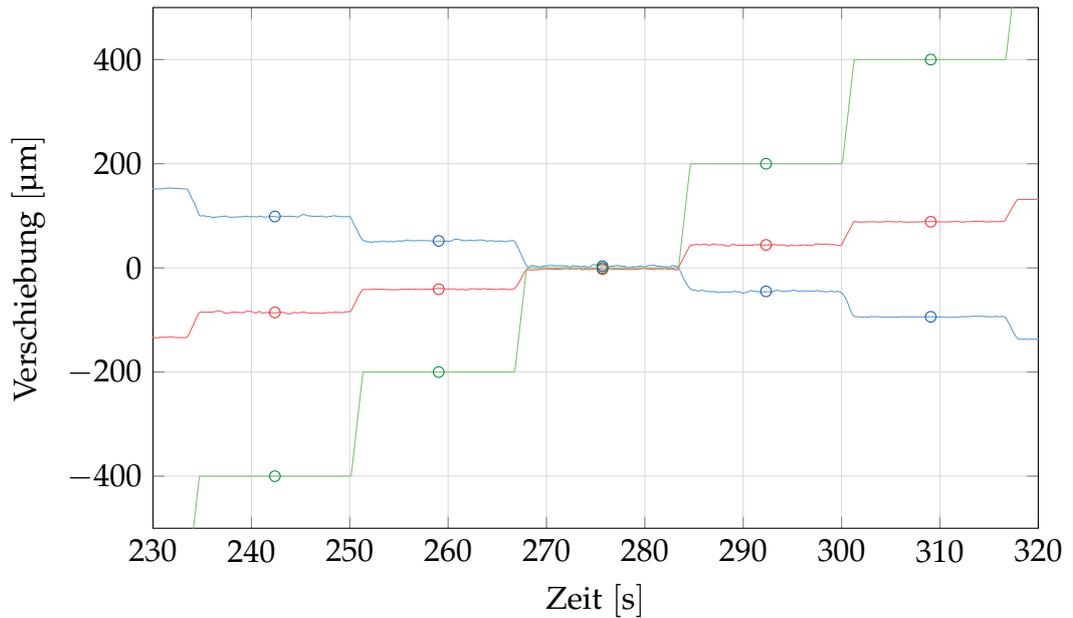


Abbildung 5.1.: Kurve mit den eingezeichneten Plateaus die vom Algorithmus aus Abschnitt A.2 gefunden wurden.

Der Korrekturfaktor wird hierbei für Punkt 1 zu $-4,30$ und für Punkt 2 auf $4,32$ berechnet. Dies bedeutet, dass der Einfallswinkel beinahe identisch ist, und dass die Gesamtverstärkung gering ist.

Aufgrund der Ergebnisse ist eine Mittelpunktskorrektur sinnvoll. Dadurch eliminiert man den mittleren Fehler der Plateaus. Dies gelingt mit einer linearen Regression. Diese liefert uns die wie schon oben beschriebenen Korrekturfaktoren und korrigiert auch die mittlere Abweichung. Das Ergebnis der linearen Regression ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Die maximale Abweichung liegt hierbei bei $\pm 60 \mu\text{m}$.

Um die Reproduzierbarkeit zu sehen, wird dieselbe Korrektur auf die weiteren Tests angewendet, die durchgeführt wurden. Dies ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Hier zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung der Kurven. Die Punkte weichen im Mittel $0,7 \mu\text{m}$ voneinander ab mit einem Standardfehler von $11,3 \mu\text{m}$. Der größte Ausreißer ist eine Abweichung von $42 \mu\text{m}$.

Dieses Ergebnis lässt sich verbessern, indem zwar der selbe Korrekturfaktor verwendet wird, der Nullpunktsabgleich aber für jede Kurve separat durchge-

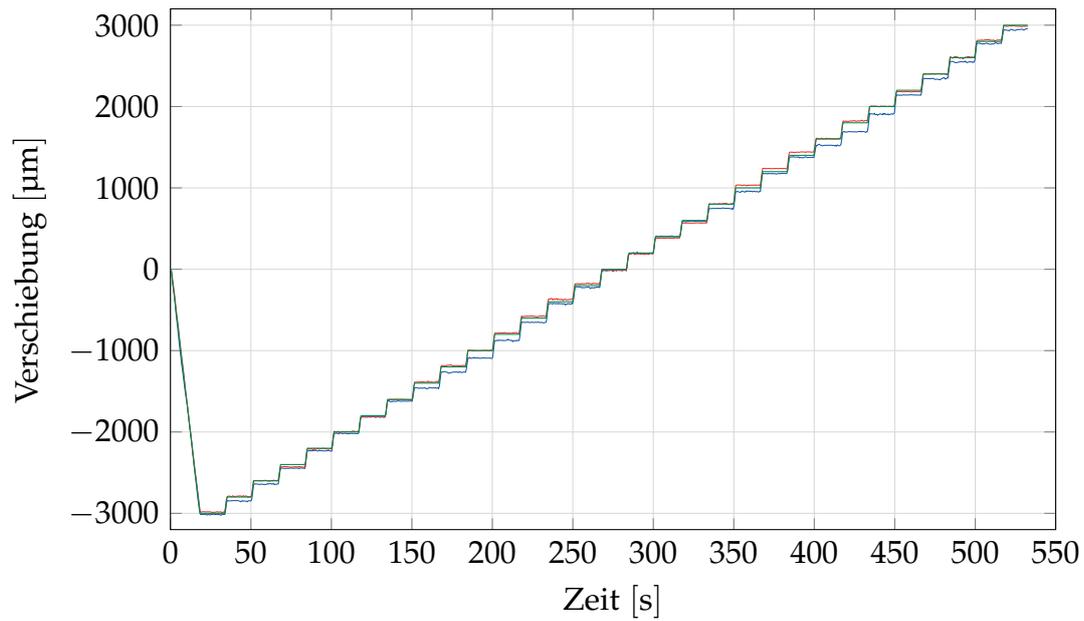


Abbildung 5.2.: Darstellung der drei Messkurven nach der Korrektur um einen konstanten Faktor.

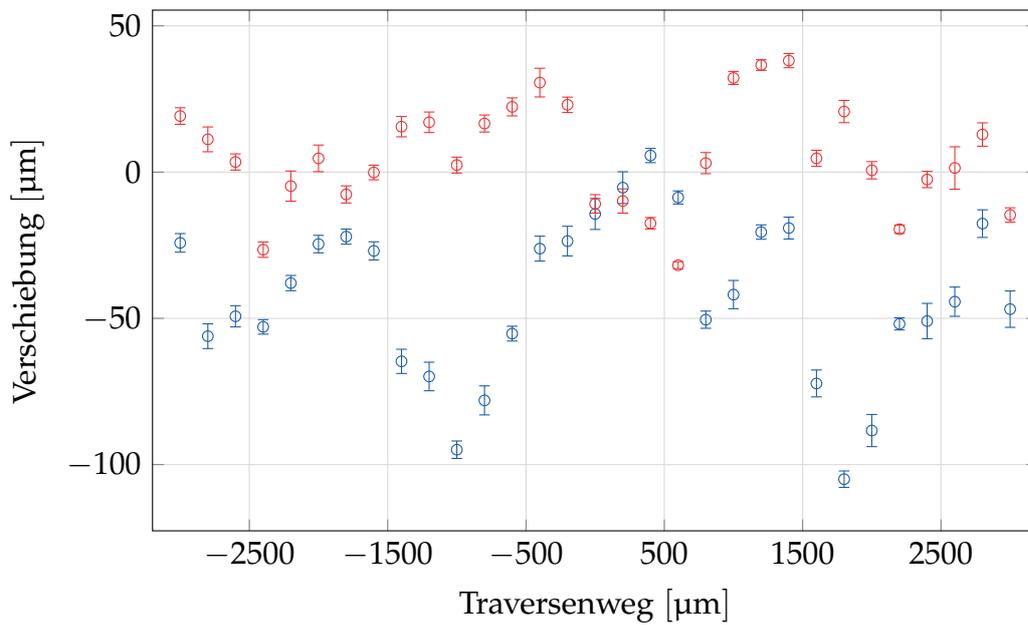


Abbildung 5.3.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach konstanter Korrektur.

5. Auswertung

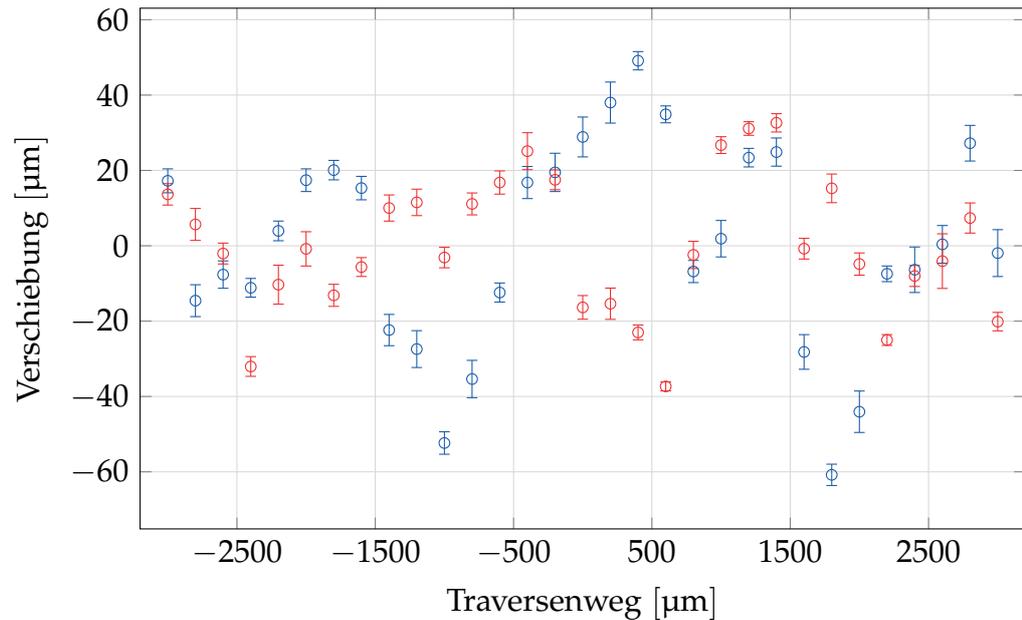


Abbildung 5.4.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach linearer Regression.

führt wird. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass die Traverse ein gewisses Umkehrspiel besitzt und somit die Ausgangsposition der Messung leicht unterschiedlich sein kann. Die Kurven nach dieser Korrektur sind in Abbildung 5.6 zu sehen. Die Punkte zeigen im Mittel nun keine Abweichung voneinander und besitzen einem Standardfehler von $6,2\ \mu\text{m}$. Der größte Ausreißer ist eine Abweichung von $26\ \mu\text{m}$.

5.1.3. Fazit

Die Auflösung der Messung ist mit $2\ \mu\text{m}$ für diesen Zweck mehr als ausreichend, die Genauigkeit der Messung liefert jedoch ein Fragezeichen. Die Abweichung der Distanzmessung nach einer linearen Korrektur sind mit bis zu $\pm 60\ \mu\text{m}$ nicht genau genug. Eine Messung der Reproduzierbarkeit zeigt aber, dass eine sehr starke Korrelation besteht. Dieses Ergebnis kann mehrere Gründe haben.

Erstens gab es keine Möglichkeit, die Ebenmäßigkeit der Oberfläche, auf der die optische Messung durchgeführt wurde, zu überprüfen. Es könnte also auch

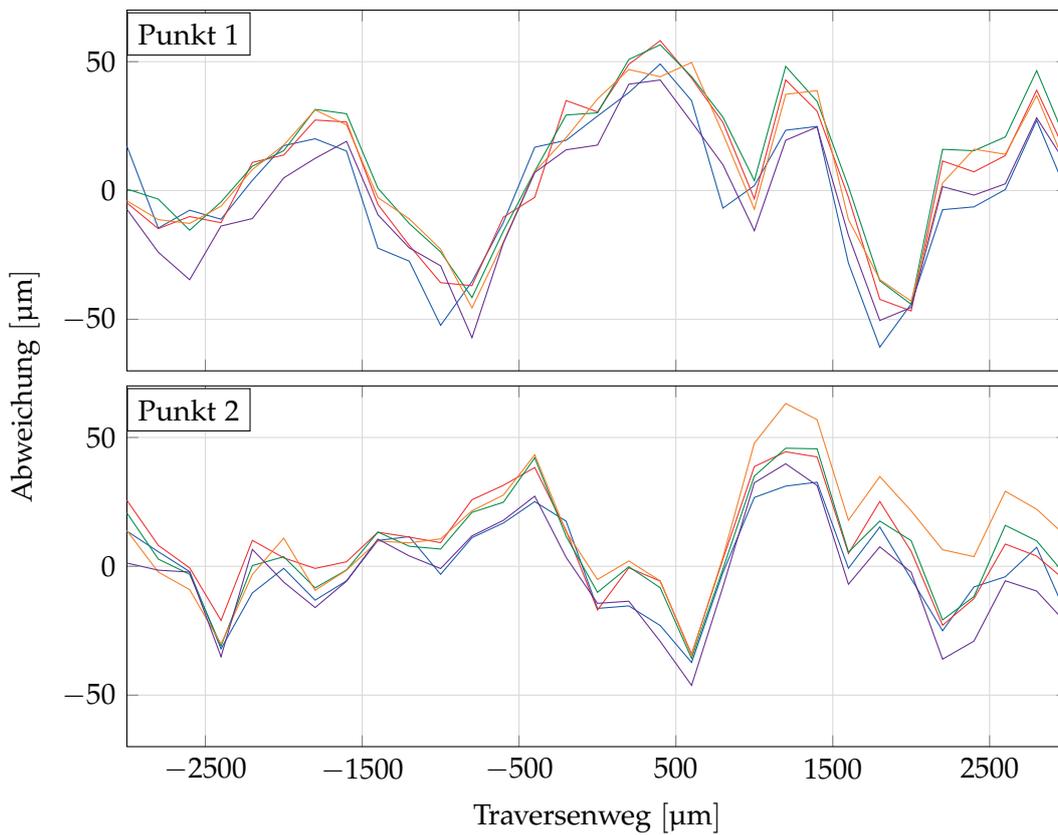


Abbildung 5.5.: Die fünf Messkurven aus Testreihe 6 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen 4 angewendet.

5. Auswertung

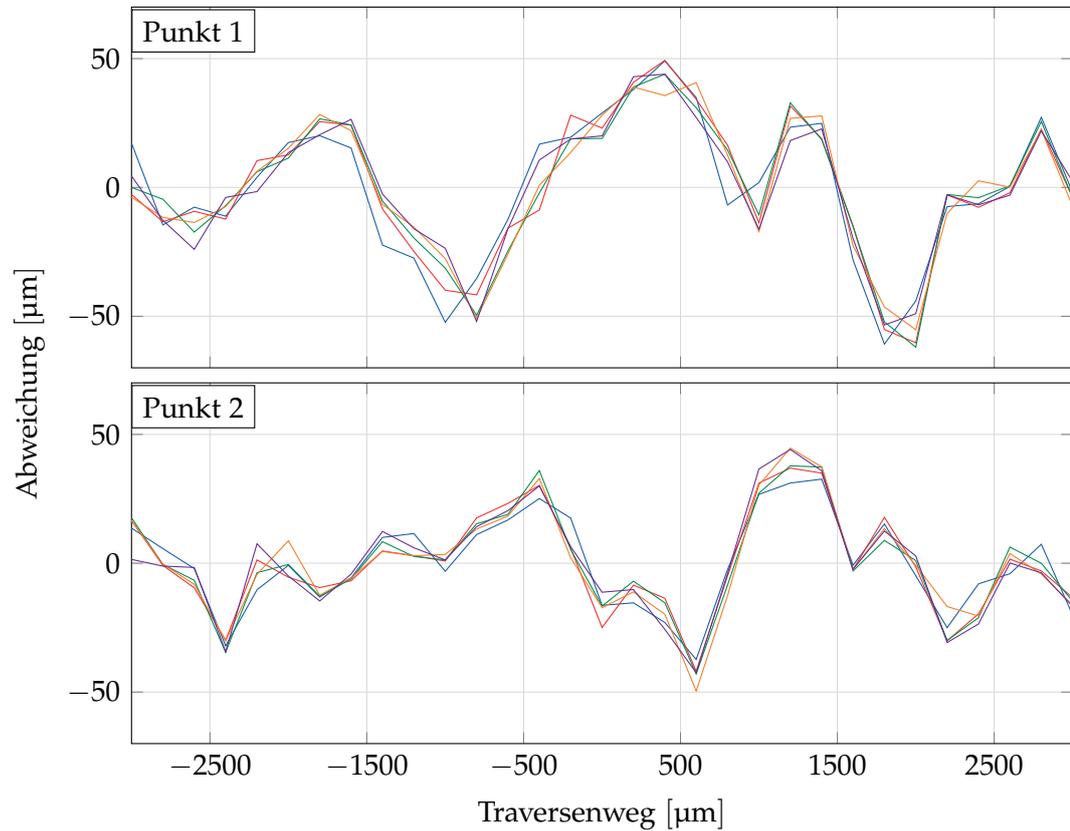


Abbildung 5.6.: Die fünf Messkurven aus Testreihe 6 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen vier angewendet. Die Nullpunkt-Korrektur wurde für jede Kurve individuell durchgeführt.

sein, dass hier einfach die Unebenheit der Oberfläche vermessen wurde. Die Oberfläche wurde mit einer CNC-Fräse bearbeitet und danach lackiert.

Weiters könnte es sich um Unsicherheiten bei der Traversenmessung handeln, die gewisse nicht lineare Abweichungen besitzen könnte.

Drittens kann der Einfluss der Oberfläche auf die Reflexion nicht eingeschätzt werden. Es kann sein, dass eine uneben Oberfläche den detektierten Punkt noch zusätzlich verformt und heller oder dunkler erscheinen lässt und so einen weiteren Fehler induziert.

Viertens wurde bei der Konstruktion das Abbesche Komparatorprinzip missachtet. Die optische Messung und die Traversenmessung sind nicht fluchtend angeordnet wodurch Kippfehler erster Ordnung an der Traverse auftreten können.

Die Punkte 2 und 4 können durch einen besseren Aufbau und bessere Überprüfung des Traversenwegs verbessert werden. Bei Punkt 1 war während dieser Arbeit technisch keine Verbesserung möglich. Sollte Punkt 3 zutreffen, dann würde das eine starke Limitation des Messsystems darstellen.

5.2. Messungen Kalibriermaschine 1

Die Benutzung der Kalibriermaschine stellt eine wesentliche Verbesserung der Traversenwegmessung dar. Auch wenn die Traversenwegmessungen sehr genau sind, und normalerweise nur die Bewegung an den Umkehrpunkten durch das Spiel der Gewinde kritisch ist, bringt die zusätzliche Überprüfung absolute Sicherheit. Alle Komponenten sind genau in der Messachse ausgerichtet, wodurch Kippfehler vermieden werden.

5.2.1. Auflösungs-messung

Da gegenüber vorherigen Messungen die Kamera, das Objektiv und die Laser gleich geblieben sind, wird ein ziemlich ähnliches Ergebnis erwartet. Da es

5. Auswertung

sich um eine unlackierte Metallplatte handelt, wurde die Helligkeit ein wenig zurückgenommen. Als optimale Parameter wurden eine Belichtungszeit von 0,03 ms, eine Glättung von 500 ms und aktiviertes AOI bestimmt.

Tabelle 5.2.: Auflösungsbestimmung aus Messreihe 1 zur Bestimmung der optimalen Parameter für die Versuche.

Serie	Punkt 1			Punkt 2		
	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]
KA1	-0,78	0,92	0,85	-1,55	0,72	1,14

5.2.2. Genauigkeitsbestimmung

Für die Genauigkeitsbestimmung wurde genau der selbe Stufentest gefahren, wie er schon in Unterabschnitt 4.2.3 beschrieben wurde.

Als Erstes wird die Korrektur um nur einen konstanten Faktor betrachtet, das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.7 und 5.8 gezeigt. Die Messungen des Punktes 1 zeigen eine Spannweite von 288,1 μm und liegen im Mittel um $-18,4 \mu\text{m}$ neben dem Traversenweg. Die Messwerte des Punktes 2 haben eine Streuung von 536,8 μm und liegen im Schnitt $-167,9 \mu\text{m}$ neben der Nominale.

Der Korrekturfaktor wird hierbei für Punkt 1 zu 5,69 und für Punkt 2 auf $-5,57$ berechnet. Auch hier ist der Einfallswinkel beinahe identisch und die Verstärkung gering.

Aufgrund der Ergebnisse ist auch hier eine Mittelpunktskorrektur sinnvoll. Daher wird wieder die lineare Regression eingesetzt, das Ergebnis ist in Abbildung 5.9 zu sehen. Die maximale Abweichung liegt hier für die einzelnen Punkte bei der halben Spannweite, respektive bei $\pm 144 \mu\text{m}$ und $\pm 268 \mu\text{m}$.

Um die Reproduzierbarkeit zu sehen, wird die selbe Korrektur auf die weiteren Tests angewendet, die durchgeführt wurden. Dies ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Hier zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung der Kurven. Dieses

5.2. Messungen Kalibriermaschine 1

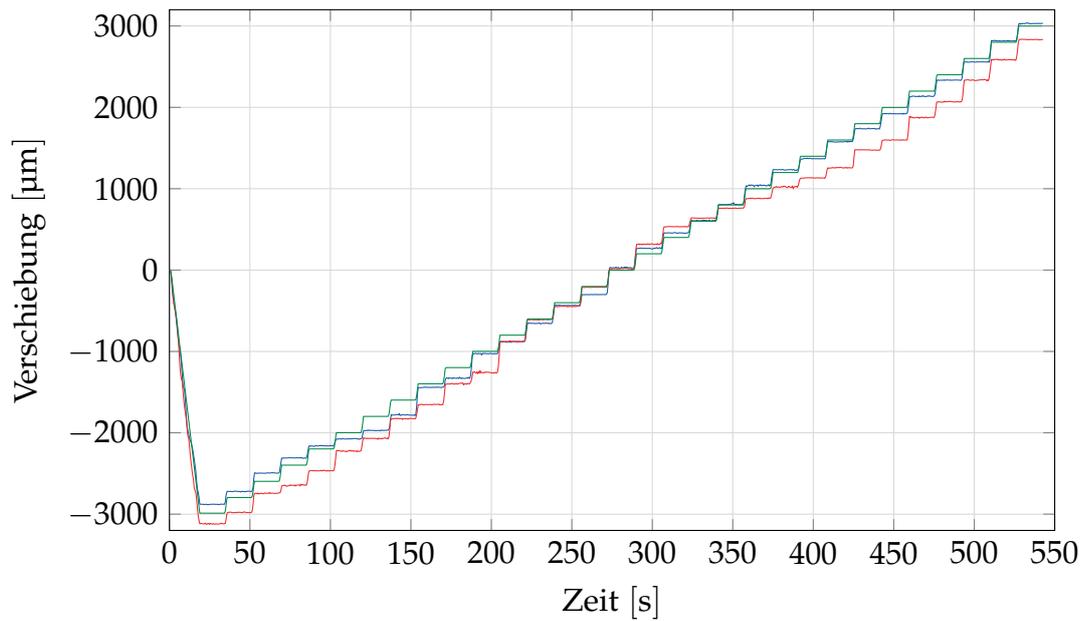


Abbildung 5.7.: Darstellung der drei Messkurven nach der Korrektur um einen konstanten Faktor. Man sieht hier schon starke Abweichungen der Kurven, vor allem von Punkt 2 (rote Kurve)

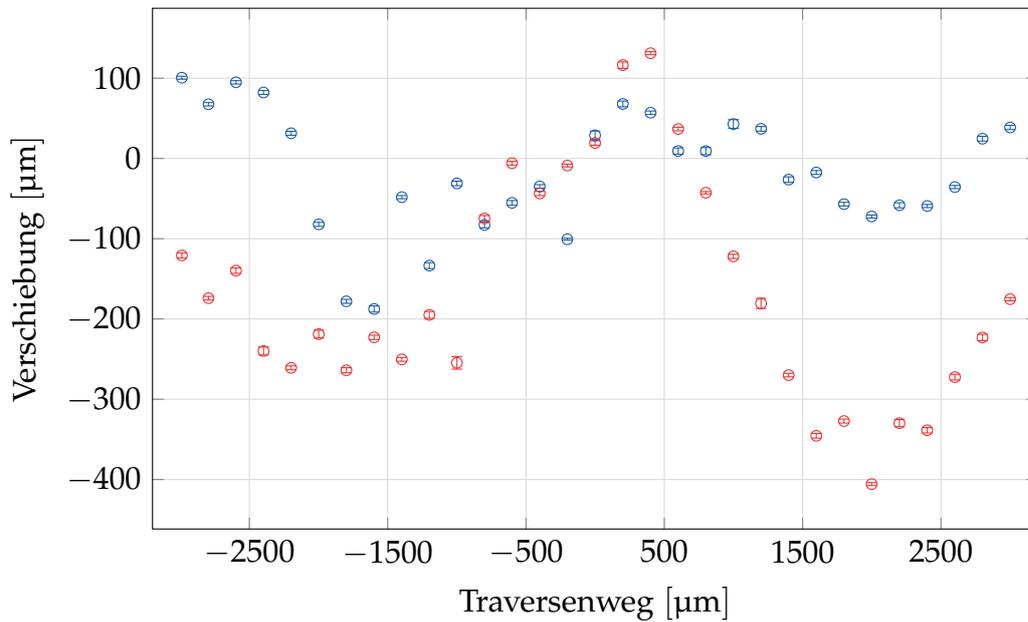


Abbildung 5.8.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach konstanter Korrektur.

5. Auswertung

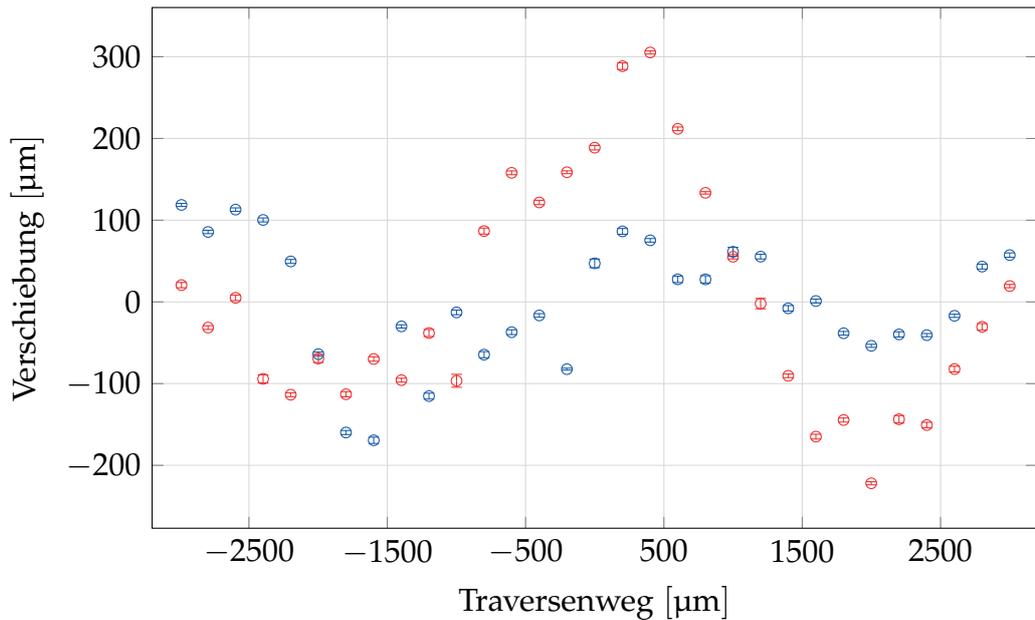


Abbildung 5.9.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach linearer Regression.

Ergebnis lässt sich verbessern, indem zwar der selbe Korrekturfaktor verwendet wird, der Nullpunktsabgleich aber für jede Kurve separat durchgeführt wird. Hier kann noch immer eine gewisse Ungenauigkeit der Traverse ausgeglichen, da die Startposition von der Traverse angefahren wird, und dann alle Kanäle genullt werden. Dadurch kann ein genau gleicher Startpunkt trotz des Interferometers nicht garantiert werden, was den Nullpunkt-Abgleich rechtfertigt. Die Kurven nach dieser Korrektur sind in Abbildung 5.11 zu sehen. Punkt 1 zeigt nach dieser Korrektur noch immer eine mittlere Abweichung der Punkte von $-7\ \mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von $23\ \mu\text{m}$. Der größte Ausreißer ist eine Abweichung von $85\ \mu\text{m}$. Die Messwerte von Punkt 2 zeigen nach dieser Korrektur keine mittlere Abweichung ($10^{-14}\ \mu\text{m}$) mehr und streuen um $10\ \mu\text{m}$. Die maximale Abweichung zweier Messpunkte beträgt $55\ \mu\text{m}$.

5.2.3. Fazit

Obwohl der Traversenweg mit dem kommerziellen Renishaw-Interferometer überprüft wurde und die Ungenauigkeit dieser garantiert in einem vernach-

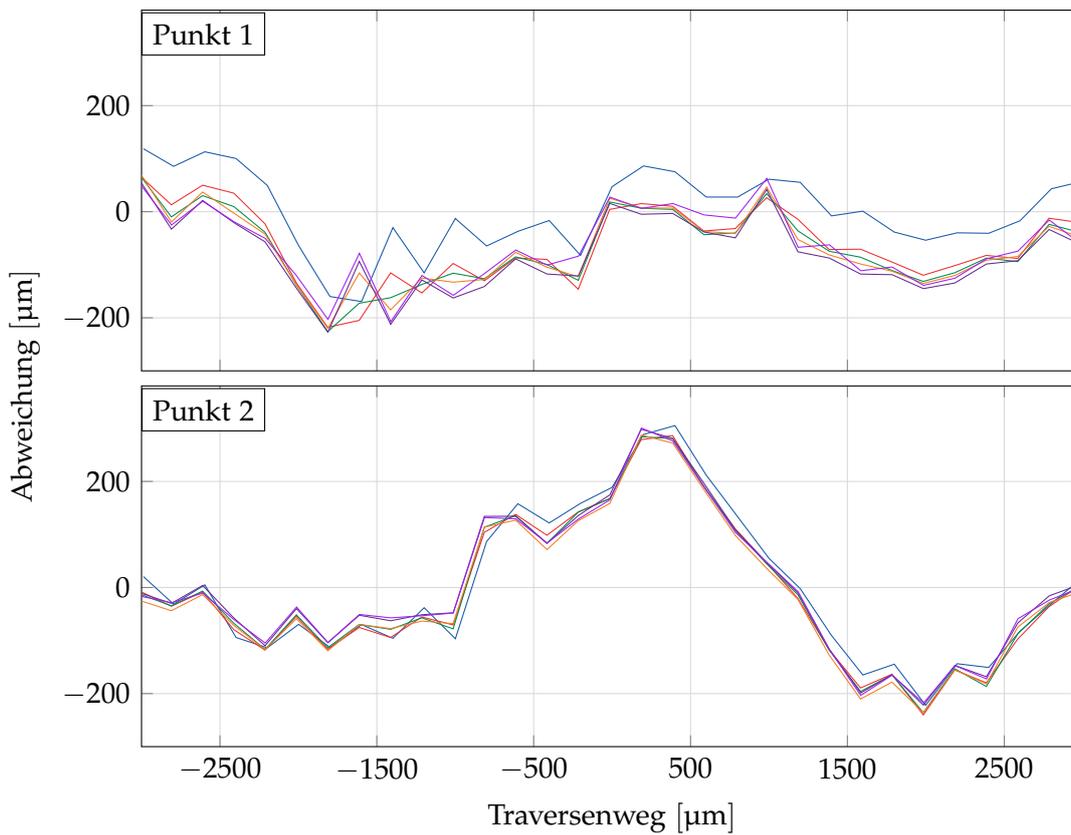


Abbildung 5.10.: Die sechs Messkurven aus Messreihe 1 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen fünf angewendet.

5. Auswertung

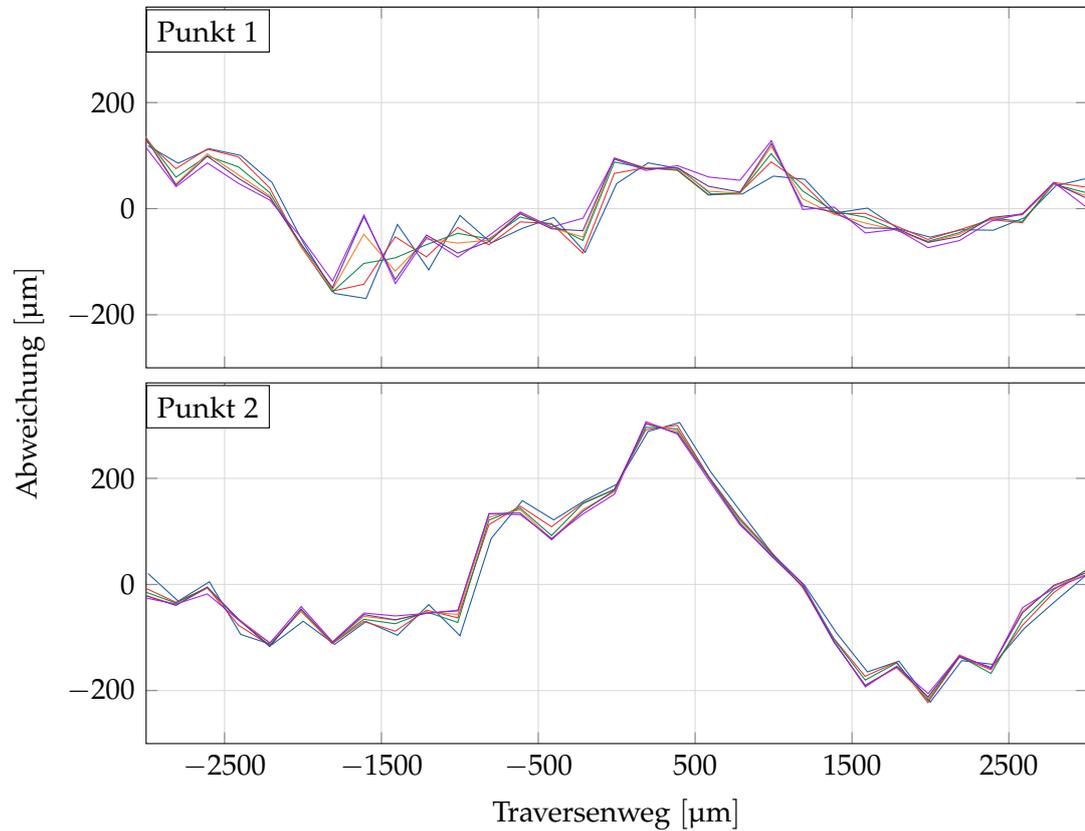


Abbildung 5.11.: Die sechs Messkurven aus Messreihe 1 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen fünf angewendet. Die Nullpunktskorrektur wurde für jede Kurve individuell durchgeführt.

lässigbaren Bereich liegt, haben sich die Ergebnisse nicht verbessert, sondern signifikant verschlechtert.

Während die Messungen an der Prüfmaschine eine Abweichung von $\pm 50 \mu\text{m}$ vom Traversenweg aufweisen, hat sich dies bei der Messung an der Kalibriermaschine auf $\pm 270 \mu\text{m}$ mehr als verfünffacht. Außerdem ist die Streuung der Punkt untereinander im Mittel von $6,2 \mu\text{m}$ auf $23 \mu\text{m}$ angewachsen.

Interessant ist auch zu beobachten, dass der Punkt, der größere Abweichungen zur Traverse aufweist (Punkt 2) reproduzierbarere Resultate bringt.

Mit diesen Ergebnissen kann eine ungenaue Traverse und Kippbewegungen dieser als Ursache für den Fehler ausgeschlossen werden.

Auch die Ebenmäßigkeit der Oberfläche der Sichtplatte kann nicht zu dieser Verschlechterung geführt haben. Die Sichtplatten aus den beiden Versuchen sind nach dem selben Verfahren und von der selben Fräse, die vom selben Arbeiter bedient wurde, gefertigt worden. Während der Fehler in den Messungen an der Prüfmaschine von $\pm 50 \mu\text{m}$ schon hoch, aber noch realistisch für ein Bauteil sind, sind $\pm 270 \mu\text{m}$ nicht mehr anzunehmen. Eine Verschlechterung der Bauteilqualität in diesem Maße ist nicht zu erwarten und noch dazu treten diese Schwankungen auf einer Strecke von $\sim 1 \text{ mm}$ auf, was auch schon mit dem Auge eindeutig sichtbar wäre.

Die beiden Sichtplatten unterscheiden sich nur durch ihre Oberflächenbehandlung. Die eine war lackiert, während die andere aus blankem Metall ist. Dies hat natürlich starke Auswirkung auf das Reflexionsvermögen, was zu verschiedenen Belichtungszeiten führt. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Oberfläche einen entscheidenden Einfluss auf die Messung hat.

Bis jetzt wurde das Thema der Speckle vernachlässigt, da nur ein Einfluss auf die Erkennung des Punktes vermutet wurde, und damit ein Rauschen im Signal. Da die Erkennung gut funktionierte und das S/N-Verhältnis auch passend war, wurde diese Eigenschaft einfach ignoriert.

5.3. Messungen Kalibriermaschine 2

Um zu sehen, welche Auswirkung die Oberfläche auf die Distanzmessung hat, wurde die zweite Messreihe gemessen. Dabei wurde die Sichtplatte lackiert und ein besonderes Augenmerk auf das Speckle-Muster der Punkte gelegt.

5.3.1. Auflösungsmessung

Die Helligkeit ist aufgrund der lackierten Platte geringer. Es wurde mit einer Belichtungszeit von 0,3 ms gearbeitet und die Glättung wurde auf 1000 ms verlängert. Beides verringert das Rauschen zusätzlich.

Tabelle 5.3.: Auflösungsbestimmung aus Messreihe 2 zur Bestimmung der optimalen Parameter für die Versuche.

Serie	Punkt 1			Punkt 2		
	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]
D2A1	489,75	491,59	0,92	-509,29	-508,49	0,40

5.3.2. Genauigkeitsbestimmung

Für die Genauigkeitsbestimmung wurde genau der selbe Stufentest wie in den vorherigen Messreihen gefahren.

Als Erstes wird die Korrektur um nur einen konstanten Faktor betrachtet, das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.12 und 5.13 gezeigt. Die Messungen des Punktes 1 zeigen eine Spannweite von 268,8 μm und liegen im Mittel um 160,5 μm neben dem Traversenweg. Bei Messwerte des Punktes 2 haben eine Spannweite von 169,8 μm und liegen im Schnitt 3,3 μm neben der Nominale.

Der Korrekturfaktor wird hierbei für Punkt 1 zu -5,61 und für Punkt 2 auf 5,77 berechnet. Dies ist beinahe ident zu den vorherigen Messungen.

5.3. Messungen Kalibriermaschine 2

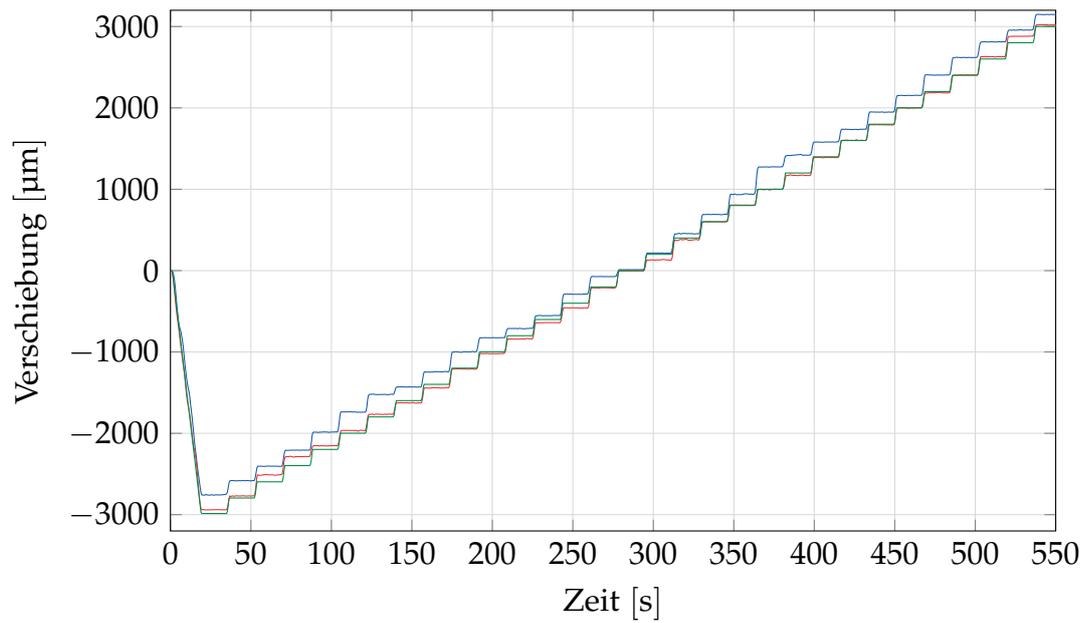


Abbildung 5.12.: Darstellung der drei Messkurven nach der Korrektur um einen konstanten Faktor.

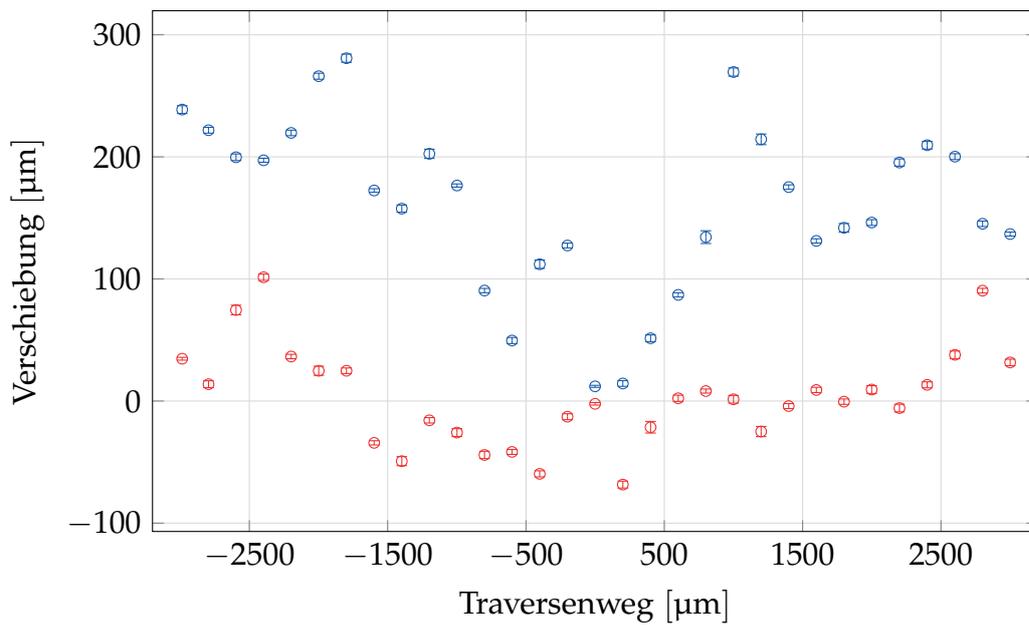


Abbildung 5.13.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach konstanter Korrektur.

5. Auswertung

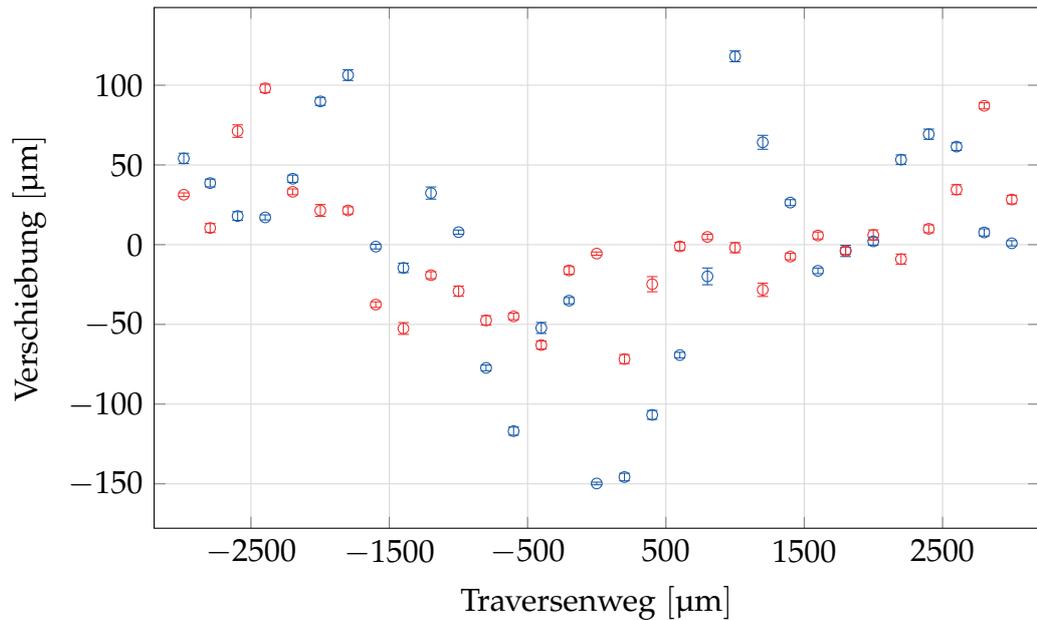


Abbildung 5.14.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach linearer Regression.

Wie bei den vorherigen Messungen wird auch hier eine Mittelpunkt-Korrektur vorgenommen. Daher wird wieder die lineare Regression eingesetzt, das Ergebnis ist in Abbildung 5.14 zu sehen. Die maximale Abweichung liegt hier für die einzelnen Punkte bei der halben Spannweite, respektive bei $\pm 134 \mu\text{m}$ und $\pm 80 \mu\text{m}$.

Um die Reproduzierbarkeit zu sehen, wird die selbe Korrektur auf die weiteren Tests angewendet, die durchgeführt wurden. Dies ist in Abbildung 5.15 dargestellt. Hier zeigt sich wieder eine sehr hohe Übereinstimmung der Kurven. Dieses Ergebnis lässt sich verbessern, indem der Nullpunkt-Abgleich für jede Kurve separat durchgeführt wird. Die Kurven nach dieser Korrektur sind in Abbildung 5.16 zu sehen. Punkt 1 zeigt nach dieser Korrektur eine mittlere Abweichung der Punkte von $5 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von $8 \mu\text{m}$. Der größte Ausreißer ist eine Abweichung von $27 \mu\text{m}$. Die Messwerte von Punkt 2 zeigen nach dieser Korrektur keine mittlere Abweichung mehr und streuen um $4,6 \mu\text{m}$. Die maximale Abweichung zweier Messpunkte beträgt $22 \mu\text{m}$.

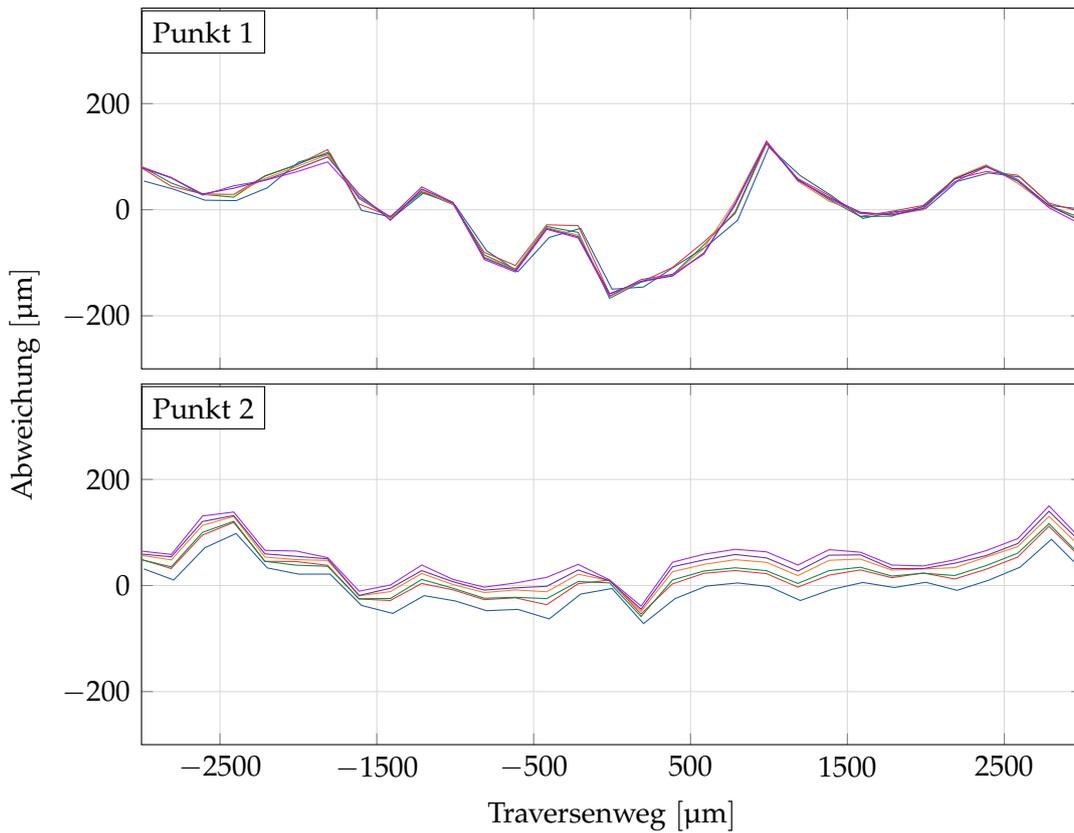


Abbildung 5.15.: Die sechs Messkurven aus Messreihe 2 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen fünf angewendet.

5. Auswertung

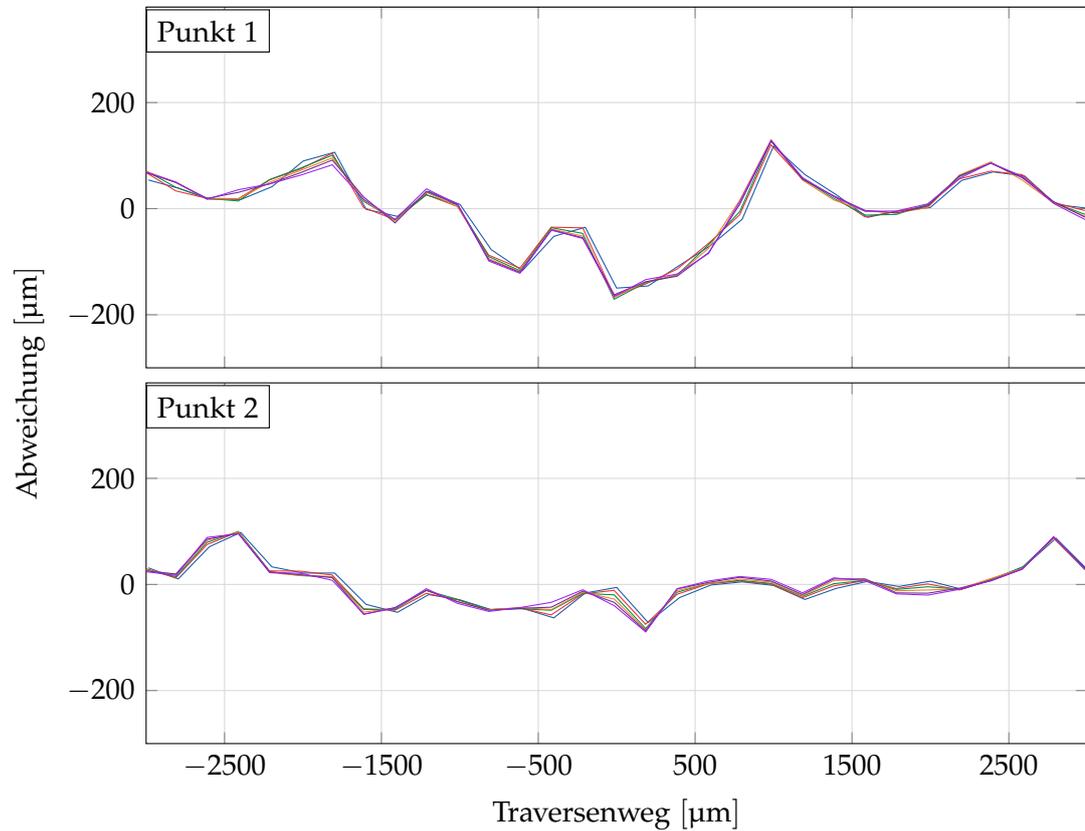


Abbildung 5.16.: Die sechs Messkurven aus Messreihe 2 nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen fünf angewendet. Die Nullpunkt-Korrektur wurde für jede Kurve individuell durchgeführt.

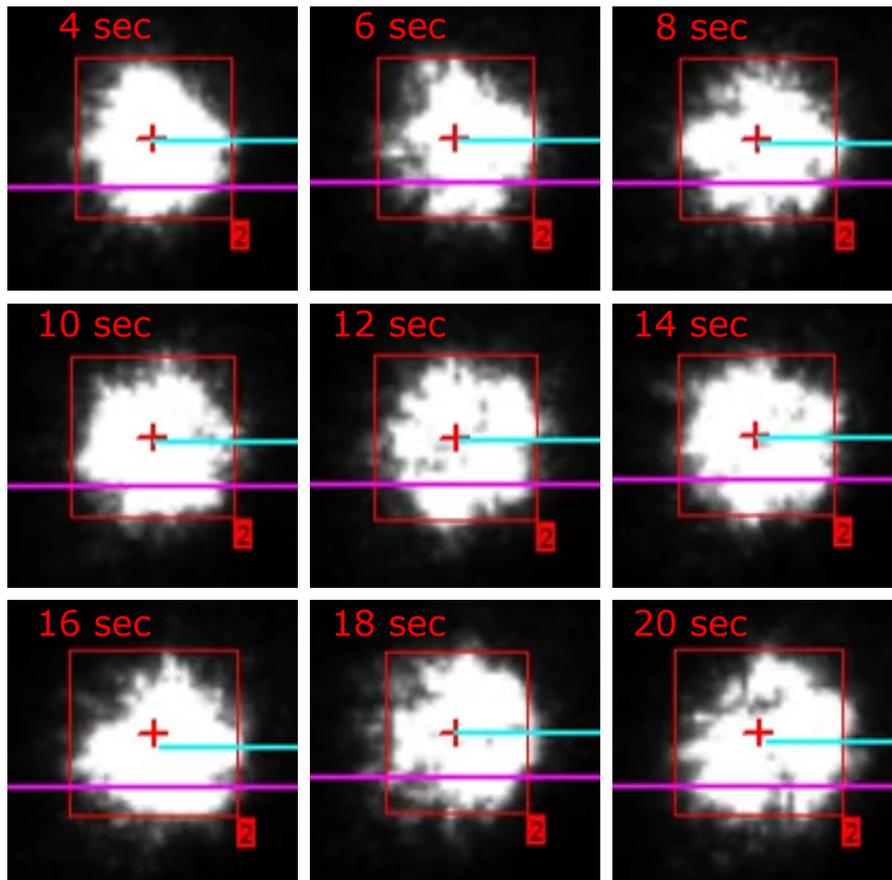


Abbildung 5.17.: Veränderung der Form des Punktes durch unterschiedliche Speckle-Intensitäten im Laufe der Messung. Im Bild wird jeweils die Prüfzeit angezeigt, die Aufnahme wurde während der Anfahrphase der ersten Stufe aufgenommen.

5.3.3. Laser-Speckles

Während der Messung wurde das Video-Bild aufgezeichnet und auf Veränderung des Punktes analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass die Speckle-Intensität sehr stark schwankt. Dies hat einen starken Einfluss auf die Form der Messpunkte und damit auch auf den Schwerpunkt, der als Messwert herangezogen wird. Eine Abbildung der Speckle-Muster ist in Abbildung 5.17 über den Verlauf einer Prüfung gezeigt.

5.3.4. Fazit

Diese zweite Messreihe an der Kalibriermaschine zeigt, dass die Oberfläche einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis hat. Dabei ist aber nicht deren Unebenheit entscheidend, sondern die Veränderung des Speckle-Musters durch die Bewegung des Punktes bei einer Verschiebung. Diese ist rein von der Oberflächenrauigkeit abhängig, und da diese nicht bekannt ist, nicht korrigierbar.

Dies zeigt sich auch an den Messungen. Diese weisen eine Abweichung bis 200 μm vom wahren Wert auf, sind jedoch perfekt reproduzierbar. Auch eine Kalibrationskurve schafft hier keine Abhilfe, da das Speckle-Bild abhängig von der Probenoberfläche ist, und somit für jede Probe neu kalibriert werden müsste.

Als Lösungsansatz muss eine Methode gefunden werden, die die Speckles selbst reduziert, oder deren Einfluss auf das Messergebnis mindert. Zwei Lösungsvorschläge wurden in Betracht gezogen:

1. Vergrößerung der Punkte: Dies würde eine größere Punktfläche ergeben. Durch eine geeignet gewählte Belichtungszeit wäre die innere Fläche gesättigt, und die Speckle-Veränderung hätte nur am Rand einen Einfluss. Dementsprechend würde sich das weniger auf den Schwerpunkt auswirken und eine geringere Unsicherheit bewirken.
2. Verwenden eines Linienlasers: Hier wird eine Linie und deren Verschiebung detektiert. Gemessen wird am Übergang von der Linie auf das Material. Aufgrund der großen abgedeckten Länge kompensiert sich das kohärente Rauschen in gewissen Maße.

Aufgrund der höheren subjektiven Erfolgsaussicht und der Erfahrung, dass der Linien-Algorithmus der *videoXtens*-Software stabiler funktioniert als der Punkt-Algorithmus, wurde die Methode 2 ausgewählt.

5.4. Messung Kalibriermaschine Strich

Da die Messungen mit einem Punktlaser nicht zufriedenstellend waren wurde auf einen Linienlaser vom Typ *MVNano-660-1-10-F* umgestiegen. Dieser besitzt eine ganz andere Abstrahlcharakteristik als der Punktlaser, weswegen zur optimalen Auflösung völlig andere Kameraparameter notwendig waren. Es wurde der Linien-Algorithmus der *videoXtens*-Software verwendet.

5.4.1. Auflösungsmessung

Aufgrund der großen Auffächerung des Laserstrahls ist seine Intensität viel geringer. Deshalb wurde eine Belichtungszeit von 10,06 ms verwendet und zusätzlich eine Verstärkung von 38. Dadurch musste auch die Messfrequenz auf 83,33 Hz gesenkt werden. Die Glättung von 1000 ms wurde beibehalten.

Tabelle 5.4.: Auflösungsbestimmung aus Messreihe 2 zur Bestimmung der optimalen Parameter für die Versuche.

Serie	Punkt 1			Punkt 2		
	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]	Min [μm]	Max [μm]	Res [μm]
KS1	-496,83	-495,32	0,75	544,39	546,45	1,03

5.4.2. Genauigkeitsbestimmung

Hier handelt es sich wieder um den selben Stufentest. Als Erstes wird die Korrektur um nur einen konstanten Faktor betrachtet, das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.18 und 5.19 gezeigt. Die Messungen der ersten Linie zeigen eine Spannweite von 67,5 μm und liegen im Mittel um $-15,7 \mu\text{m}$ neben dem Traversenweg. Die Messwerte der zweiten Linie haben eine Spannweite von 69,2 μm und liegen im Schnitt 10,2 μm neben der Nominale.

5. Auswertung

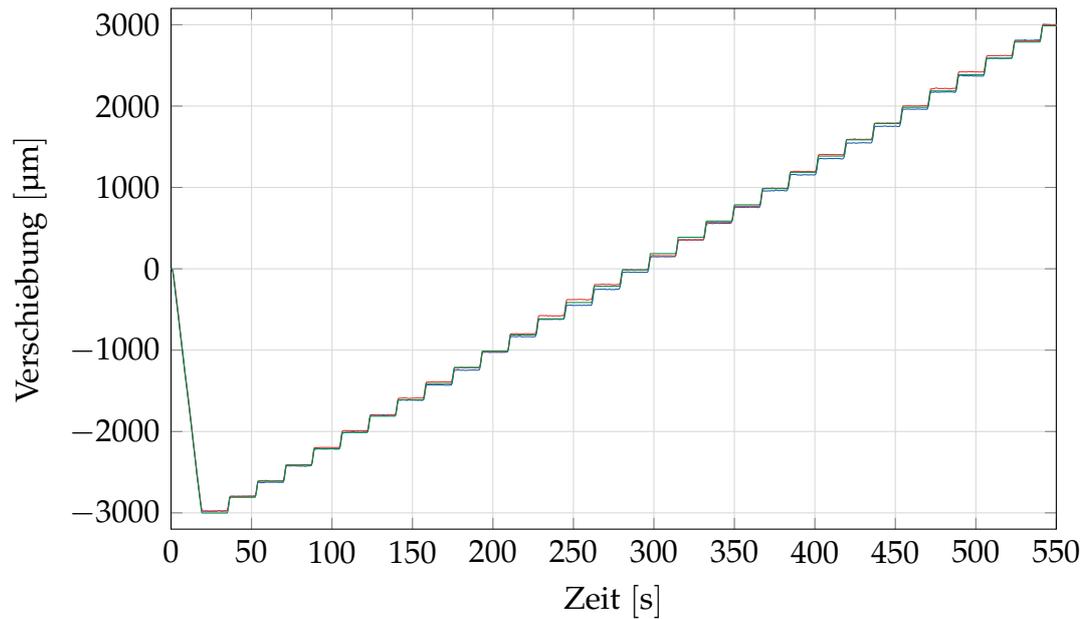


Abbildung 5.18.: Darstellung der drei Messkurven nach der Korrektur um einen konstanten Faktor.

Der Korrekturfaktor wird hierbei für Linie 1 zu 5,99 und für Linie 2 zu -5,46 berechnet. Diese Werte liegen recht weit auseinander, was auf eine leichte Schrägstellung der Kamera bei der Montage hindeutet. Dies hat aber keinen negativen Einfluss auf die Messung.

Wie bei den vorherigen Messungen wird auch hier eine Mittelpunktskorrektur vorgenommen. Daher wird wieder die lineare Regression eingesetzt, das Ergebnis ist in Abbildung 5.20 zu sehen. Die maximale Abweichung liegt hier für die einzelnen Punkte bei der halben Spannweite, respektive bei $\pm 33,7 \mu\text{m}$ und $\pm 34,6 \mu\text{m}$.

Um die Reproduzierbarkeit zu sehen, wird dieselbe Korrektur auf die weiteren Tests angewendet, die durchgeführt wurden. Dies ist in Abbildung 5.21 dargestellt. Hier zeigt sich wieder eine sehr hohe Übereinstimmung der Kurven. Dieses Ergebnis lässt sich verbessern, indem der Nullpunktsabgleich für jede Kurve separat durchgeführt wird. Die Kurven nach dieser Korrektur sind in Abbildung 5.22 zu sehen. Die erste Linie zeigt nach dieser Korrektur eine mittlere Abweichung der Punkte von $1 \mu\text{m}$ bei einer Standardabweichung von

5.4. Messung Kalibriermaschine Strich

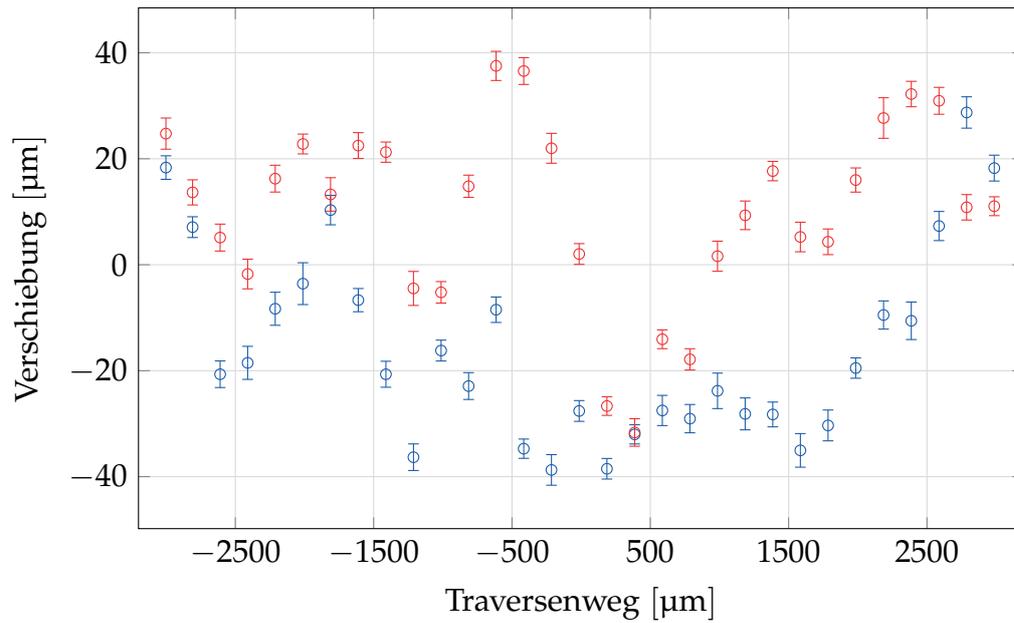


Abbildung 5.19.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach konstanter Korrektur.

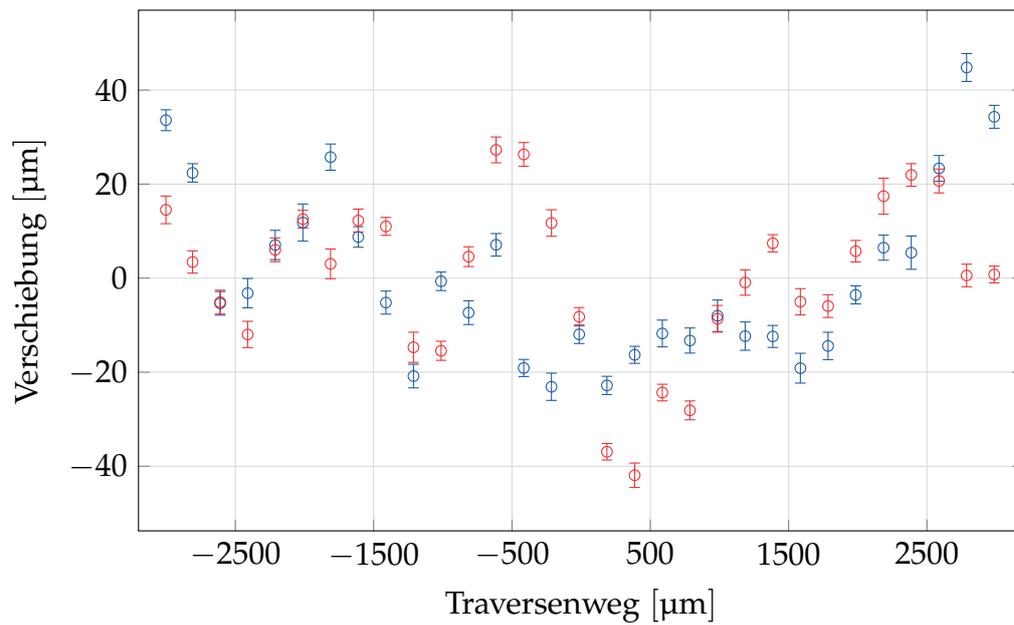


Abbildung 5.20.: Darstellung der Abweichung der zwei Distanzmessungen von der Traversenmessung nach linearer Regression.

5. Auswertung

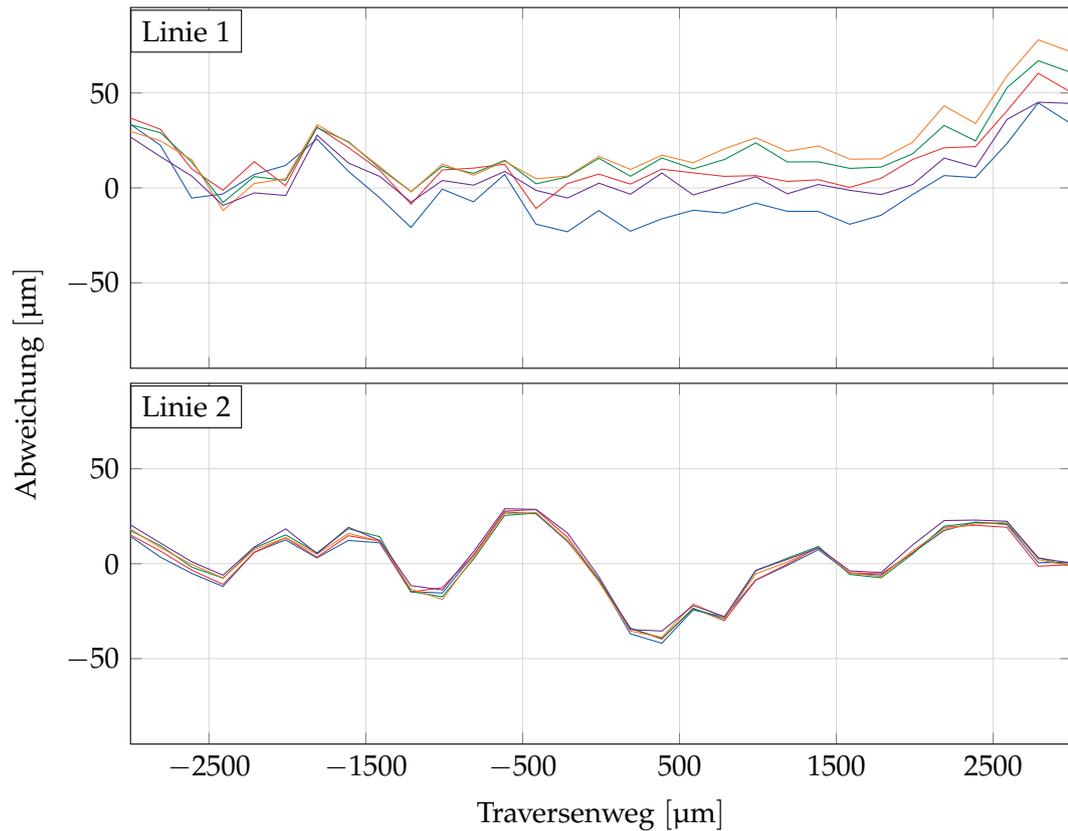


Abbildung 5.21.: Die fünf Messkurven aus Messreihe Strich nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen vier angewendet.

8 µm. Der größte Ausreißer ist eine Abweichung von 32 µm. Die Messwerte der zweiten Linie zeigen nach dieser Korrektur keine mittlere Abweichung mehr und streuen um 3,2 µm. Die maximale Abweichung zweier Messpunkte beträgt 19 µm.

5.4.3. Fazit

Die Linienerkennung der *videoXtens*-Software funktioniert gut an den Laserlinien. Die Messung der Distanz der Traverse zeigt die erwartete Verbesserung. Die Auflösung des Signals ist kleiner als 1 µm und damit weit ausreichend, die Abweichung vom tatsächlichen Wert konnte auf ± 30 µm reduziert werden.

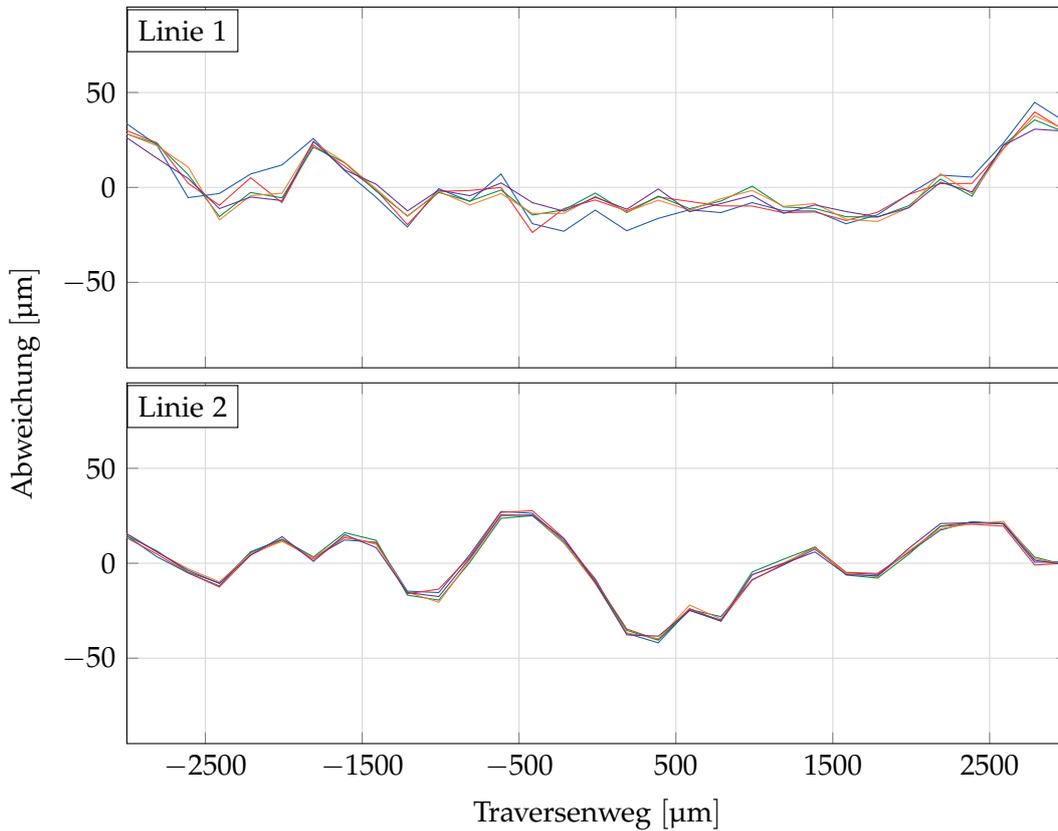


Abbildung 5.22.: Die fünf Messkurven aus Messreihe Strich nach linearer Korrektur. Die Korrektur wurde für die erste Kurve berechnet und auf die anderen vier angewendet. Die Nullpunktkorrektur wurde für jede Kurve individuell durchgeführt.

5. Auswertung

Auffällig bei dieser Messung (und auch bei den vorherigen) ist, dass sich die Kurven von der ersten Messmarke zu der von der zweiten Messmarke in Genauigkeit und Reproduzierbarkeit leicht unterscheiden. Obwohl darauf geachtet wurde, dass die Fokussierungen und Intensitäten möglichst gleich sind, war das noch nicht genau genug. Für gleichbleibende Ergebnisse muss auf eine genaue Abstimmung der Laser aufeinander geachtet werden.

Die anvisierte Genauigkeit, die zum Beispiel für eine E-Modul-Messung benötigt wird, wurde noch um den Faktor 3 verfehlt. Angesichts des Verbesserungspotentials, das noch in der Methode steckt (siehe hierfür auch Abschnitt 6.2) kann dies aber als ein gutes Ergebnis betrachtet werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird eine Zusammenfassung der Arbeit und der Ergebnisse gegeben. Ebenso werden Verbesserungen aufgezeigt, die unmittelbar auf die entwickelte Methode angewendet werden können. Am Ende wird ein Ausblick gegeben, wie diese Methode in der Materialprüfung eingesetzt werden kann und welche Verbesserungen sie bringen könnte.

6.1. Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, eine Methode zu finden, die Fehler in der Dehnungsmessung mit dem *videoXtens* durch Abstandsänderungen kompensieren kann. In dieser Arbeit wird die Kompensation durch direkte Messung des Abstandes gewählt. Dadurch lassen sich die Fehler, die bei der Messung entstehen durch einfache trigonometrische Formeln zurückrechnen, wie in Abschnitt 3.2 dargelegt wurde.

Nach Recherchen zur Abstandsmessung (welche in Kapitel 2 zusammengefasst sind) wurde die Triangulationsmethode ausgewählt. Hauptgrund dafür war, dass für diese Methode schon fast alle erforderlichen Komponenten in den Messköpfen zur Dehnungsmessung verbaut sind. Nur ein zusätzlicher Laser muss integriert werden. Außerdem zeigen kommerziell erhältlich Systeme dass die benötigte Genauigkeit erreicht werden kann.

Zur Überprüfung wurde ein einfacher Prototyp gebaut, der an eine Prüfmaschine in Zugrichtung montiert werden kann, damit eine gemessene Verschiebung

6. Zusammenfassung und Ausblick

mit dem Traversenweg als Referenz verglichen werden kann. Diese Messungen sind in Abschnitt 4.2 dargestellt. Die Auswertung in Abschnitt 5.1 zeigt eine maximale Abweichung der Messpunkte um $60\ \mu\text{m}$ aber eine sehr hohe Reproduzierbarkeit. So weichen die Messpunkte bei wiederholter Messung um Mittel nur um $11\ \mu\text{m}$ voneinander ab. Als mögliche Ursachen wurde hier die Unebenheit der Probe oder eine Ungenauigkeit der Traversenwegmessung, die indirekt über die Spindeldrehung gemessen wird, vermutet.

Um diese Vermutungen zu Überprüfen, wurde von der Prüfmaschine auf die hauseigene Kalibriermaschine von Messphysik Materials Testing GmbH gewechselt. Dort wird der Traversenweg mittels eines Laser-Interferometer überwacht, wie in Unterabschnitt 4.3.1 dargelegt. Die Messkurven sind in Abschnitt 4.3 dargestellt.

Die erste Messreihe an der Kalibriermaschine war signifikant schlechter als die Messungen an der Prüfmaschine, wie in der Auswertung (Abschnitt 5.2) dargelegt wurde. Da der Traversenweg als Fehlerquelle ausgeschlossen war, wurde als Ursache die Oberfläche der Sichtplatte vermutet. Diese war im Gegensatz zu den bisherigen Tests aus blankem Metall.

Die nächste Testreihe wurde deshalb mit einer lackierten Platte durchgeführt und ein besonderes Augenmerk auf das Speckel-Muster der Messpunkte gelegt. Das Ergebnis wurde nicht besser. Es zeigte sich, dass das kohärente Rauschen einen starken Einfluss auf die Form des Punktes hat, was man besonders deutlich in Abbildung 5.17 sehen kann.

Um ein stabileres Messergebnis zu bekommen wurde vom Punktlaser auf einen Linienlaser gewechselt. An der Detektion der Linie sollte sich mit zunehmender Anzahl der Messzeilen das Rauschen kompensieren. Die Messergebnisse sind in Unterabschnitt 4.3.6 zu sehen und tatsächlich zeigt die Auswertung in Abschnitt 5.4 eine substantielle Verbesserung. Die Auflösung der Messung ist besser als $1\ \mu\text{m}$ und die Genauigkeit steigerte sich auf $30\ \mu\text{m}$. In Abbildung 6.1 sind noch einmal die Messungen im Vergleich dargestellt.

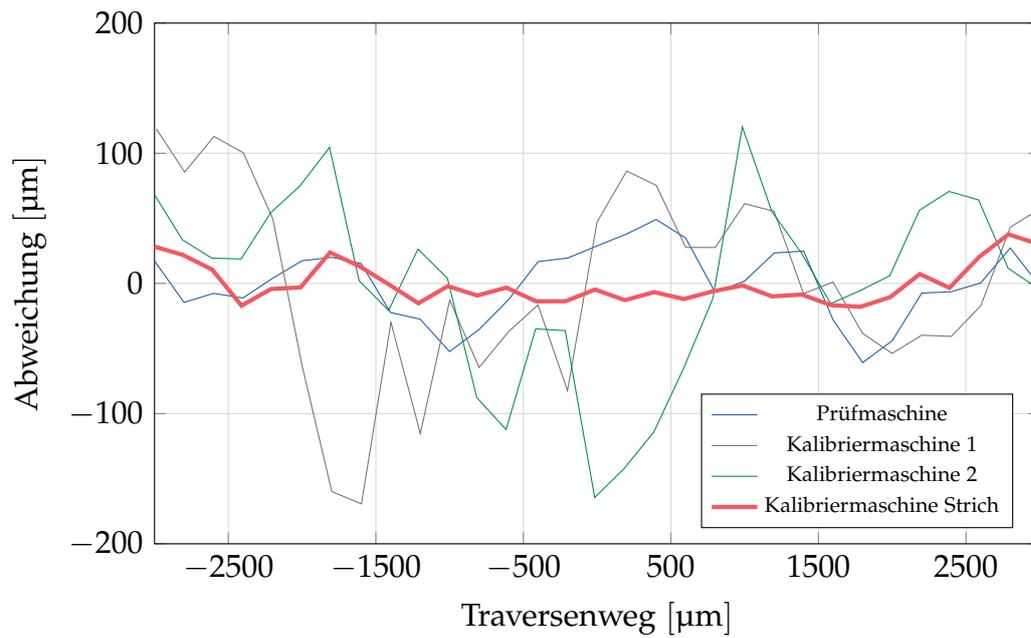


Abbildung 6.1.: Darstellung der 4 Messergebnisse nach der Auswertung. Dargestellt ist die Abweichung der Distanzmessung von der Traversenbewegung über die Traversenbewegung.

6.2. Bewertung

Wie in Unterabschnitt 3.2.3 berechnet wurde, wird eine Genauigkeit der Distanzmessung von $10\ \mu\text{m}$ erforderlich sein, um den Fehler bei einem *videoXtens* HP der durch Out-of-plane Bewegungen entsteht auf $1\ \mu\text{m}$ zu beschränken. Dieser Wert wurde um den Faktor 3 verfehlt. Trotzdem wird diese Arbeit aus mehreren Gründen als erfolgreich gewertet, die hier näher dargelegt werden sollen.

Zum einen ist der Wert von $10\ \mu\text{m}$ schon ein oberer Grenzwert. Dies wird benötigt um bei Kunststoffen den E-Modul nach der DIN EN ISO 527-1 zu messen. Eine striktere Anforderung in der Materialprüfung gibt es nicht. Auch wenn diese nicht erfüllt werden kann, ist diese Methode trotzdem für viele andere Anwendungen interessant.

Das Potential dieser Messmethode ist mit dieser Arbeit auch noch nicht ausgeschöpft, es existieren noch einige Hebel, an denen man ansetzen kann, um das Ergebnis zu verbessern. Hier werden noch einige Punkte aufgelistet, die die Messung positiv beeinflussen werden:

1. Optimierung der Kamera-Parameter
2. Aufeinander abgestimmte Lasermodule
3. Erhöhung der Messzeilen
4. Ausnutzen eines größeren Verstärkungsfaktors
5. Anpassen des Auswerte-Algorithmus

Punkt 4 wird im Folgenden noch einmal besonders betrachtet. Wird durch eine einfache Konstruktion wie in Abbildung 3.5 dargestellt der Einfallswinkel erhöht, lässt sich mit einfachen Mitteln die Messung verstärken. Bei diesen Tests wurde aufgrund des geringen Sichtfelds und in Voraussicht der engen Montageverhältnisse im *videoXtens*-Messkopf nur ein Einfallswinkel von ungefähr 6° erreicht. Mit der Montage eines Spiegels ist ein Winkel von 30° leicht realisierbar. Vorausgesetzt dass dabei nicht ein anderer Messfehler auftritt, zum Beispiel schlechtere Erkennung der Linie, würde dies die Messung um einen

Tabelle 6.1.: E-Module berechnet aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer CFK-Probe.

Kurve	E-Modul [MPa]
Original	130,25
Ohne Korrektur	87,01
Korrektur mit Ergebnissen aus der Arbeit	127,74
Mögliche Korrektur mit Umlenkspiegel	130,09

Faktor von 5,5 verbessern. Die Genauigkeit der Messung würde dann $5,5 \mu\text{m}$ betragen.

In Abbildung 6.2 ist eine theoretische Berechnung basierend auf einer echten Messung abgebildet, die zeigt, welche Auswirkungen eine Verschiebung der Probe während eines Versuches um $0,5 \text{ mm}$ zur Kamera hin zur Folge hätte, und wie eine Korrektur der Kurve mit dem Aufbau aus dieser Arbeit wirken würde. Verwendet wurde hierfür die Messkurve aus Abbildung 5.22. Hier wurde der E-Modul einer kohlefaserverstärkten Probe mit einem *videoXtens* HP gemessen. Aus dieser wurde der Verlauf der Kurven bei einer lateralen Bewegung von $0,5 \text{ mm}$ zur Kamera hin berechnet, und danach die Korrektur unseres Prototypen angewandt. Es ist auch der noch nicht getestete Aufbau mit einem Umlenkspiegel und Einfallswinkel von 30° dargestellt.

Der E-Modul dieser Probe berechnet sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus der Steigung der Kurve. Diese wird im Bereich von $0,05\%$ und $0,25\%$ berechnet, was hier bei 50 mm Ausgangsmesslänge $25 \mu\text{m}$ bis $125 \mu\text{m}$ entspricht. Die berechneten E-Module sind in Tabelle 6.1 angegeben. Die unkorrigierte Messung ist mit einer Abweichung von $30,4\%$ unbrauchbar, während beide Korrekturen ein gutes Ergebnis liefern. Die Korrektur mit den Ergebnissen aus der Arbeit zeigt eine Abweichung von 2% , die fiktive Korrektur mit einem Umlenkspiegel einen Fehler von $0,12\%$, der unter jeglicher Messtoleranz liegt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

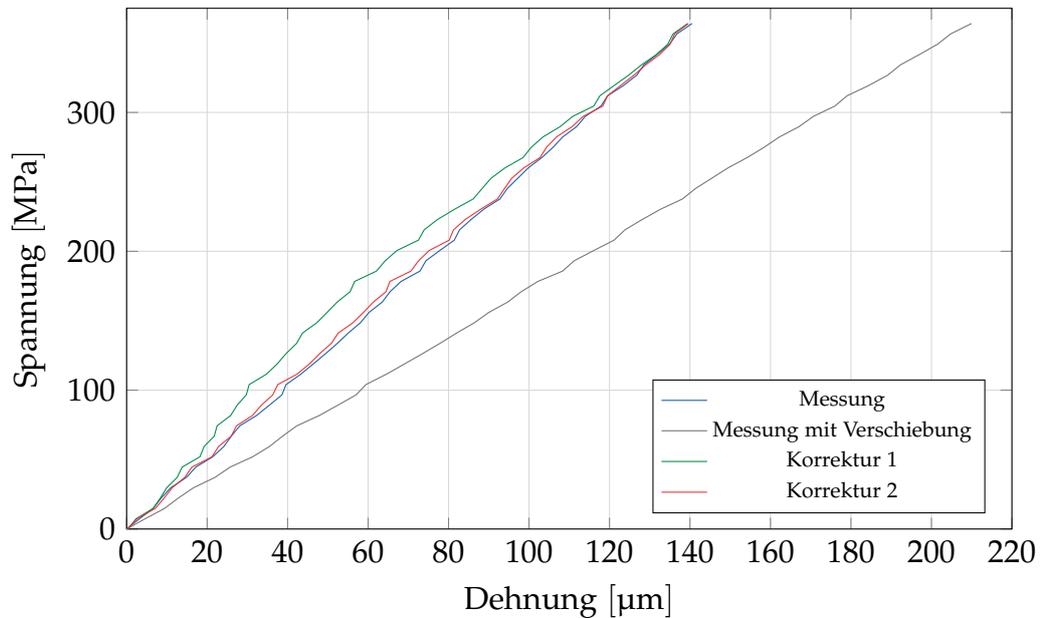


Abbildung 6.2.: Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer typischen E-Modul Messung einer CFK-Probe mit circa 130 GPa E-Modul. Angegeben ist die tatsächliche Messung, die Kurve, die bei einer Verschiebung von 0,5 mm während der Prüfung aufgezeichnet werden würde, und zwei Korrekturen. Korrektur 1 zeigt die Genauigkeit, die in dieser Arbeit erreicht wurde, Korrektur 2 zeigt das theoretische Ergebnis mit einem zusätzlichen Umlenkspiegel.

6.3. Ausblick

Dank der guten Messergebnisse und der einfachen Integrationsmöglichkeit in bestehende Systeme wird dieses Messprinzip über kurz oder lang seinen Weg in die Materialprüfung finden. Einige Hürden gibt es auf diesen Weg noch zu überwinden.

Als ersten Schritt wird man versuchen, den Einfluss des kohärenten Rauschens auf die Lagemessung zu reduzieren. Dies kann sowohl durch Reduzieren der Speckles an sich, oder durch Anpassen des Algorithmus auf diese spezielle Applikation passieren.

Als zweiter wichtiger Schritt folgt die Integration in das mechanische Messgerät und dem Prüfablauf. Eine Auswertung im selben Bild sowohl mit Dehnungsmarken als auch Abstandsmarken kann sich natürlich gegenseitig beeinflussen. Denkbar wäre hier eine eigene Kamera für die Abstandsmessung oder eine verzahnte Messmethode, wo ein Bild zur Dehnungsmessung verwendet wird, und das darauffolgende für Distanzmessung. Hier müssten die gegenseitigen Marken durch geeignete Bandpassfilter jeweils ausgeblendet werden. Die erste Option besticht hier durch die einfachere Ausführung und die doppelte Messgeschwindigkeit, braucht aber dementsprechend mehr Platz. Die zweite Methode spart eine zusätzliche Kamera, erfordert aber einen komplexeren Aufbau.

In Abbildung 6.3 ist ein weiterer Vorteil dargestellt, nämlich die Herstellungskosten der Systeme für Messungen mit Distanzkorrektur. Als Grundsystem ist ein videoXtens HP mit 100% angegeben, und im Vergleich dazu die beiden bestehenden Systeme mit denen abstandskorrigiert gemessen werden kann (beidseitig und telezentrisch), und dazu noch die Kosten eines kommerziellen Triangulationsmessgerätes kombiniert mit dem Grundsystem. Dort sind aber noch nicht die Kosten der nötigen Anpassungen und Schnittstellen berücksichtigt. Daneben sind die Kosten einer Integration des Prototypen mit einer zusätzlichen Kamera dargestellt, welche auf einer qualifizierten Schätzung beruhen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

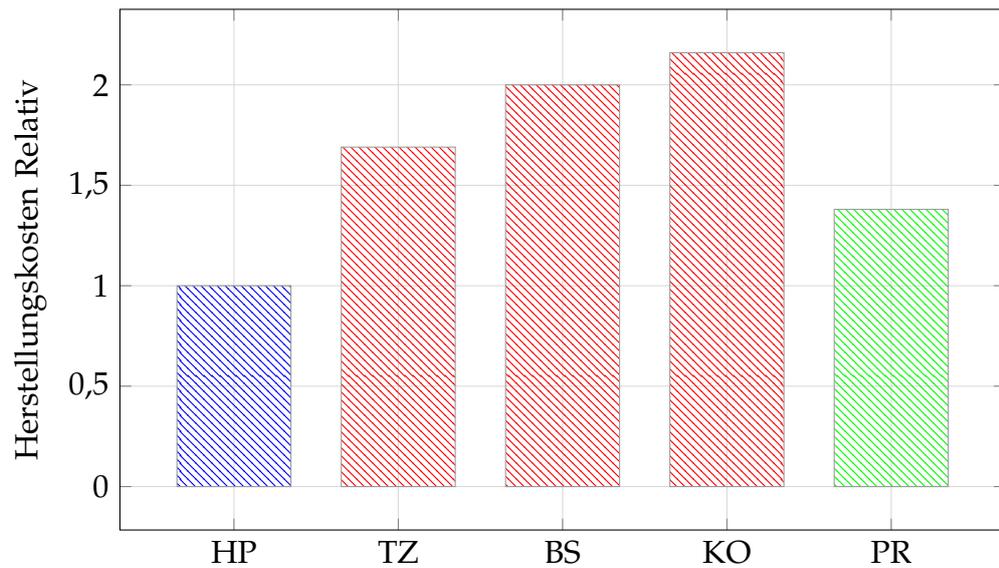


Abbildung 6.3.: Vergleich der Herstellungskosten zwischen dem Basisgerät videoXtens HP und den Lösungen mit telezentrischen Objektiven (TZ), beidseitigem Aufbau (BS), kommerziellen Abstandsmessung (KO) und dem integrierten Prototypen (PR).

Literatur

- [Bau13] Bautsch. *Telezentrische Abbildung objektseitig*. Bild. By (CC0 3.0) via Wikimedia Commons. 2013. URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Telezentrische.Abbildung.objektseitig.png>.
- [Blu03] H. Blumenauer. *Werkstoffprüfung*. Wiley, 2003.
- [BTW00] D. Behring, J. Thesing und D. Winter. „Apparatur zur Musterprojektion zum Zwecke der Meßtechnik, Qualitätssicherung u. Objekt-digitalisierung“. DE Patent App. DE1,998,144,256. Gom Ges. Fuer Optische Messtechnik. März 2000.
- [Chr04] R. Christoph. „Verfahren zum berührungslosen messen von geometrien von gegenständen“. EP Patent 1,299,691. Werth Messtechnik GmbH. Dez. 2004.
- [Dai75] J Dainty. *Laser Speckle and Related Phenomena*. Springer Berlin Heidelberg, 1975.
- [Dan06] Danh. *Diagram of confocal principle*. Bild. By (CC 3.0) via Wikimedia Commons. 2006. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Confocalprinciple_in_English.svg.
- [Dro82] W.D. Drotning. „Development of a Laser Interferometric Dilatometer“. In: *Thermal Expansion 7*. Hrsg. von D.C. Larsen. Springer US, 1982.
- [EE10] H.J. Eichler und J. Eichler. *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [FOE07] FOE. *Laserextensometer - Funktionsprinzip*. Fiedler Optoelektronik GmbH. 2007. URL: <http://www.foe.de/>.

Literatur

- [Har07] P. Hariharan. *Basics of Interferometry*. 2. Aufl. Academic Press, 2007.
- [HBM15] HBM. *Hochgenau ist hocheffizient: Warum besonders genaue Kraftaufnehmer neue Anwendungsgebiete ermöglichen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 2015. URL: <http://www.hbm.com/>.
- [HL97] G. Häusler und G. Leuchs. „Physikalische Grenzen der optischen Formerrfassung mit Licht“. In: *Physikalische Blätter* 53.5 (1997), S. 417–422.
- [HM06] E. Hering und R. Martin. *Photonik. Grundlagen, Technologie und Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, S. 82.
- [Kam00] M. Kamegawa. „Elongation measurement using a laser non-contact extensometer“. EP Patent 0,694,756. Shimadzu Corporation. Nov. 2000.
- [KK89] D.L. Kent und R.N. Khan. „Laser strain extensometer for material testing“. US Patent 4,869,110. Systems Integration Technology Inc. Sep. 1989.
- [KL83] G. Krankenhagen und H. Laube. *Werkstoffprüfung: von Explosionen, Brüchen und Prüfungen*. Rowohlt, 1983.
- [Maa97] Hans-Gerd Maas. „Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie“. Habilitationsschrift. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 1997. ISBN: 3906467007.
- [Mal15] S. Mallick. *Blob Detection Using OpenCV (Python, C++)*. 2015. URL: <http://www.learnopencv.com/>.
- [Mal94] R. Malz. „Verfahren zum Aufnehmen eines dreidimensionalen Bildes eines Objektes nach dem aktiven Triangulationsprinzip und Vorrichtung hierzu“. Reinhard Malz. Feb. 1994.
- [Mes15] Messphysik. *Laser Speckle Extensometer 1C*. Messphysik Materials Testing GmbH. 2015. URL: <http://www.messphysik.com/>.
- [Paw06] J. Pawley, Hrsg. *Handbook of Biological Confocal Microscopy*. 3. Aufl. Springer US, 2006.
- [Pfe93] T. Pfeifer. *Optoelektronische Verfahren zur Messung geometrischer Größen in der Fertigung: Grundlagen, Verfahren, Anwendungsbeispiele*. Expert-Verlag, 1993. Kap. 1.3.3, S. 18.

- [Ren11] Renishaw. *RLE fibre optic laser encoder*. Installation guide. Renishaw plc. 2011.
- [Spi13] O. Spinka. „Ortsbestimmung und Bestimmung der Verschiebung von Orten durch berührungslose Abstandsmessung bei einer Materialprüfung“. DE Patent 102,010,038,062. Messphysik Materials Testing GmbH. Aug. 2013.
- [Tes15] Zwick Material Testing. *videoXtens - High precision without contact!* Product Information. 2015. URL: <http://www.zwick.com/>.
- [Tho+98] B.L. Thomas u. a. „Laser aligned five-axis position measurement device“. American Research Corporation Of Virginia. Aug. 1998.

Anhang A.

Programmcode Matlab

A.1. Code zur Auflösungsbestimmung

```
1 clear all
2 close all
3
4 % Auflösungsbestimmung zur Testreihe 5
5
6 names = dir('../*KSA*');
7 s1 = '../';
8 len = length(names);
9 DATA = cell(len,1);
10
11 for ii = 1:len
12     A = importdata(strcat(s1,names(ii).name));
13     DATA{ii} = A.data;
14 end
15
16 D = cell(len,7);
17
18 for ii = 1:len
19     D{ii,1} = strcat('KS',int2str(ii));
20     D{ii,2} = '&';
21     D{ii,3} = min(DATA{ii}(:,3));
22     D{ii,4} = '&';
```

Anhang A. Programmcode Matlab

```
23     D{ii,5} = max(DATA{ii}(:,3));
24     D{ii,6} = '&';
25     D{ii,7} = (D{ii,5} - D{ii,3})/2;
26     D{ii,8} = '&';
27     D{ii,9} = min(DATA{ii}(:,4));
28     D{ii,10} = '&';
29     D{ii,11} = max(DATA{ii}(:,4));
30     D{ii,12} = '&';
31     D{ii,13} = (D{ii,11} - D{ii,9})/2;
32     D{ii,14} = '\\';
33 end
34
35 fileID = fopen('aufl_KSA.txt','w');
36 formatSpec = '%s %s %3.2f %s %3.2f %s %3.2f %s %3.2f %s %3.2
    ↪ f %s %3.2f %s \r\n';
37
38 for ii = 1:len
39     fprintf(fileID,formatSpec,D{ii,:});
40 end
41
42 fclose(fileID);
```

A.2. Funktion zur Bestimmung der Plateaus

```

1 function pcoords = plateaus(filename)
2
3 A = importdata(filename);
4
5 t = A.data(:,1);
6 x0 = A.data(:,2); %traverse data in microm
7 x1 = A.data(:,3); %point 1 data in microm
8 x2 = A.data(:,4); %point 2 data in microm
9
10 %% find plateaus
11
12 %approximate derivative of traverse
13 dx0 = diff(x0);
14 %all values smaller than e-1 (plateau)
15 ldx0 = abs(dx0) < 5e-01;
16 %shift logical values by one index
17 lsd0 = circshift(ldx0,1);
18 %the boundaries of the connected regions
19 lx0 = ldx0 ~= lsd0;
20 %indices of region boundaries
21 i1 = find(lx0);
22
23 % checks if first value is plateau value, if true, discard
    ↪ first index
24 if(ldx0(1)), i1 = i1(2:end); end
25
26 % add last index as boundary
27 i1 = [i1;length(dx0)];
28 d1 = diff(i1); % difference of indices
29
30 iA = zeros(1,2); % Array for plateau boundaries
31 jj = 1; % running index
32
33 % arrange the boundaries in the array
34 for ii = 1:length(d1)

```

Anhang A. Programmcode Matlab

```
35     if ( (d1(ii)>50) && (mod(ii,2)~=0) )
36         iA(jj,1) = i1(ii);
37         iA(jj,2) = i1(ii+1)-1;
38         jj = jj+1;
39     end
40 end
41
42 %% Statistical calculations
43
44 np = length(iA); % number of plateaus
45 pcoords = zeros(np,7);
46
47 for ii = 1:np
48     pcoords(ii,1) = mean( t(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
49     pcoords(ii,2) = mean( x0(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
50     pcoords(ii,3) = mean( x1(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
51     pcoords(ii,4) = mean( x2(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
52     pcoords(ii,5) = std( x0(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
53     pcoords(ii,6) = std( x1(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
54     pcoords(ii,7) = std( x2(iA(ii,1):iA(ii,2)) );
55 end
56
57
58 end
```

A.3. Funktion Fit der Kurven

```

1 function [c2,pp2] = plat_err(c1,pp1)
2
3 %at least the data must be submitted
4 if ( nargin<1 || isempty(c1) ), error('Not enough input
   ↪ arguments'), end
5
6 %if no polynomial is provided, calculate one
7 %standard is linear regression
8 if ( nargin<2 || isempty(pp1) )
9     %get polynom coeffs
10    p1 = polyfit(c1(:,3),c1(:,2),1);
11    p2 = polyfit(c1(:,4),c1(:,2),1);
12    %copy data
13    c2 = c1;
14    %correct data
15    c2(:,3) = c1(:,3)*p1(1) + p1(2);
16    c2(:,4) = c1(:,4)*p2(1) + p2(2);
17    c2(:,6) = abs(c1(:,6)*p1(1));
18    c2(:,7) = abs(c1(:,7)*p2(1));
19    %prepare output polynomial
20    pp2 = [p1;p2];
21
22    %if polynomial is provided, use this one
23 elseif ( length(pp1) > 1 )
24    %get polynom coeffs
25    p1 = pp1(1,:);
26    p2 = pp1(2,:);
27    %copy data
28    c2 = c1;
29    %correct data
30    c2(:,3) = polyval(p1,c1(:,3));
31    c2(:,4) = polyval(p2,c1(:,4));
32    c2(:,6) = c2(:,3)./c1(:,3).*c1(:,6);
33    c2(:,7) = c2(:,3)./c1(:,3).*c1(:,6);
34    %prepare output polynomial

```

Anhang A. Programmcode Matlab

```
35     pp2 = pp1;
36
37     %otherwise the order of the polynomial is given
38     elseif ( length(pp1) == 1 )
39         %for 0 make a linear fit withou zero correction.
40         if (pp1 == 0)
41             p1 = c1(:,3)\c1(:,2);
42             p2 = c1(:,4)\c1(:,2);
43             %copy data
44             c2=c1;
45             %correct data
46             c2(:,3) = c1(:,3)*p1;
47             c2(:,4) = c1(:,4)*p2;
48             c2(:,6) = abs(c1(:,6)*p1);
49             c2(:,7) = abs(c1(:,7)*p2);
50             %prepare output polynomial
51             pp2 = [p1;p2];
52             %calculate the polynomial with the given length
53         else
54             if (pp1 < 0) || (mod(pp1,1)~=0)
55                 error('Input must be a positiv integer')
56             end
57             %get polynom coeffs
58             p1 = polyfit(c1(:,3),c1(:,2),pp1);
59             p2 = polyfit(c1(:,4),c1(:,2),pp1);
60             %correct data
61             c2(:,3) = polyval(p1,c1(:,3));
62             c2(:,4) = polyval(p2,c1(:,4));
63             c2(:,6) = c2(:,3)./c1(:,3).*c1(:,6);
64             c2(:,7) = c2(:,3)./c1(:,3).*c1(:,6);
65             %prepare output polynomial
66             pp2 = [p1;p2];
67         end
68     else
69         error('Unkown error')
70     end
71 end
```

A.4. Konstante Korrektur

```

1 close all
2 clear all
3
4 names = dir(' ../KS_*');
5 s1 = '../';
6 len = length(names);
7
8 %needed cells
9 C1 = cell(len,1);
10 C2 = cell(len,1);
11 P1 = cell(len,1);
12 P2 = cell(len,1);
13 D = cell(len,1);
14
15 %import Data
16 for ii = 1:len
17     A = importdata(strcat(s1,names(ii).name));
18     D{ii} = A.data;
19 end
20
21 %get the plateaus
22 for ii = 1:len
23     C1{ii} = plateaus(strcat(s1,names(ii).name));
24 end
25
26 %correction
27 for ii = 1:len
28     [C2{ii} P2] = plat_err(C1{ii},0);
29 end
30
31 d_out = D{1};
32 d_out(:,3) = d_out(:,3)* P2(1);
33 d_out(:,4) = d_out(:,4)* P2(2);
34
35 %save output

```

Anhang A. Programmcode Matlab

```
36 fid = fopen('c-data.dat', 'wt');
37 formatSpec = '%3.2f\t%3.2f\t%3.2f\t%3.2f \n';
38
39 fprintf(fid, 'Zeit\tx0\tx1\tx2 \n');
40 for ii = 1:size(d_out,1)
41     fprintf(fid,formatSpec,d_out(ii,:));
42 end
43
44 fclose(fid);
45
46 c_out = C2{1};
47 c_out(:,3) = c_out(:,3)-c_out(:,2);
48 c_out(:,4) = c_out(:,4)-c_out(:,2);
49
50 fid = fopen('c-plat.dat', 'wt');
51
52 formatSpec = '%3.2f\t%3.2f\t%3.2f\t%3.2f\t%3.2f\t%3.2f\t%3.2
    ↪ f \n';
53 fprintf(fid, 'Zeit\tx0\tx1\tx2\tts0\tts1\tts2 \n');
54
55 for ii = 1:size(c_out,1)
56     fprintf(fid,formatSpec,c_out(ii,:));
57 end
58
59 fclose(fid);
60
61 %% Calculations
62
63 minr1 = min(c_out(:,3));
64 maxr1 = max(c_out(:,3));
65 sp1 = maxr1 - minr1;
66 minr2 = min(c_out(:,4));
67 maxr2 = max(c_out(:,4));
68 sp2 = maxr2 - minr2;
69 mean1 = mean(c_out(:,3));
70 mean2 = mean(c_out(:,4));
```