

Hochauflösende optische Abstandsmessung mittels kompensierter Lasertriangulation

Patrick Kienle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Rigoll

Prüfende/-r der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. A. W. Koch
2. Prof. Dr. Felix Jose Salazar Bloise

Die Dissertation wurde am 08.12.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 20.06.2022
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hintergrund und Motivation	1
1.2	Zielsetzung und wissenschaftliche Problemstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1	Optische Messsysteme	5
2.1.1	Optik	6
2.1.2	Laser	15
2.1.3	Detektoren	18
2.1.4	Referenzoberflächen	24
2.2	Abstandsmessung	24
2.2.1	Grundbegriffe und Einteilung	25
2.2.2	Laserbasierte Abstandsmessung	27
2.3	Laserpunkterfassung	31
2.3.1	Bildvorverarbeitung	32
2.3.2	Positionsbestimmung eines Laserpunkts	34
3	Lasertriangulation	39
3.1	Auslegung eines Lasertriangulationssystems	39
3.2	Fehlereinflüsse und Limitierungen	44
3.2.1	Laser	45
3.2.2	Ausbreitungsmedium	45
3.2.3	Messoberfläche	46
3.2.4	Optomechanischer Aufbau	47
3.2.5	Laserpunkterfassung	48
3.2.6	Sonstige Fehlerquellen	48
3.3	Fehlermodell eines Lasertriangulationssystems	49
3.3.1	Laserstrahldrift	50
3.3.2	Ausbreitungsmedium	51
3.3.3	Optomechanischer Aufbau	51
3.3.4	Vergleich der Fehlerquellen	52

3.4	Methoden zur Fehlerkompensation	53
3.4.1	Laserstrahldrift	53
3.4.2	Ausbreitungsmedium	54
3.4.3	Optomechanischer Aufbau	54
3.4.4	Speckles und Messoberfläche	55
3.4.5	Laserpunkterfassung	55
3.4.6	Weitere Kompensationsmethoden	55
4	Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation	57
4.1	Funktionsprinzip und optischer Aufbau	57
4.2	Simulative Untersuchung der Kompensation	60
4.2.1	Kompensation bei einzelnen Fehlern	60
4.2.2	Thermische Simulationen	62
4.2.3	Kompensation bei zufälligen Verschiebungen	66
4.3	Laserpunkterfassung	67
4.3.1	Modellierung des Laserpunktes und allgemeines Vorgehen .	67
4.3.2	Einfluss der Bildvorverarbeitung	70
4.3.3	Optimierter Algorithmus	72
4.4	Experimenteller Aufbau	73
5	Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit	77
5.1	Grundlegendes Funktionsprinzip	77
5.2	Simulationen	81
5.3	Experimenteller Aufbau	84
6	Messergebnisse und Diskussion	87
6.1	Charakterisierung des Lasertriangulationssystems	87
6.2	Kompensation von Fehlereinflüssen	90
6.2.1	Statische Messungen	90
6.2.2	Mathematische Auswertung zur Kompensation	93
6.2.3	Dynamische Messungen	95
6.3	Laserpunkterfassung	96
6.4	Strukturierte Oberflächen	100
6.4.1	Reflektierender Balken	100
6.4.2	Fluoreszierende Struktur	101
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
7.1	Zusammenfassung	107
7.2	Ausblick	109
	Symbolverzeichnis	111

Abkürzungsverzeichnis	115
Abbildungsverzeichnis	117
Tabellenverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	125

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Abstandsmessung zählt zu einem der ältesten Messverfahren [10] und ist auch in der Gegenwart noch ein wichtiges Forschungsgebiet [6, 15]. Beispielhafte Anwendungen der Abstandsmessung sind die Überwachung großer Gebäudestrukturen [41], die Füllstandsmessung [32] sowie die Qualitätsprüfung und Fertigungsautomatisierung [29, 116]. Der absolute Abstand zu einem Objekt kann mit verschiedenen optischen und nicht-optischen Verfahren gemessen werden. Dabei bieten die optischen Messmethoden einige entscheidende Vorteile, wie eine hohe erreichbare Messrate und eine kontaktlose Messung [109]. Zu diesen Verfahren zählen die interferometrischen Methoden, das Laufzeitprinzip, Phasendetektionsmethoden und die Lasertriangulation. Die richtige Wahl des Messprinzips hängt von verschiedenen Faktoren wie der erforderlichen Messgenauigkeit, dem gewünschten Messbereich, der Messrate und den gegebenen Umgebungsbedingungen ab [78, 107].

Die Interferometrie zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Auflösung von bis zu 0,15 nm in einem Messbereich bis zu 10 m aus [113]. Der größte Nachteil dieser Methode ist der komplexe optische Aufbau, weshalb kommerzielle Messgeräte vergleichsweise teuer sind und im Bereich von mehreren Zehntausend Euro liegen. Folglich werden Interferometer typischerweise in der industriellen Präzisionsfertigung [116] oder für die Kalibrierung von Längenstandards eingesetzt [29].

Laufzeitverfahren und Phasendetektionsmethoden haben einen entscheidenden Vorteil durch ihren großen Messbereich. So können kommerzielle Messgeräte problemlos Abstände von bis zu mehreren 100 m erfassen [50]. Folglich werden solche Sensoren beispielsweise bei Anwendungen der Verkehrsüberwachung [109] oder der Erfassung von Baumbeständen eingesetzt [95]. Ein Nachteil liegt darin, dass die Messunsicherheit selbst bei geringen Entfernungen bereits einige Millimeter beträgt. Dies hängt hauptsächlich mit der begrenzten Messgenauigkeit bei der Zeitmessung der Lichtimpulse zusammen [57, 144].

Die Lasertriangulation hebt sich durch einen günstigen Messaufbau und die hohe erreichbare Genauigkeit hervor und wird deshalb häufig in der Fertigungsauto-

1 Einleitung

matisierung und Prozessüberwachung eingesetzt [13, 52]. Typische Messbereiche liegen dabei im Bereich von 20 mm bis 1000 mm, wobei die relative Messunsicherheit etwa 10^{-3} beträgt [49]. Die erreichbare Messunsicherheit liegt somit im Messabstand von 1 m bei etwa 1 mm.

Insgesamt fällt hier auf, dass es bei den optischen Verfahren zur Abstandsmessung im Messbereich von etwa 1 m bis 5 m eine technische Lücke gibt. Entweder ist die Messunsicherheit mit mehr als 1 mm vergleichsweise hoch, oder es muss auf das sehr teure Messverfahren der Interferometrie zurückgegriffen werden.

1.2 Zielsetzung und wissenschaftliche Problemstellung

Um diese technische Lücke zu schließen, wird im Zuge dieser Arbeit ein Lasertriangulationssystem (LTS) dahingehend angepasst und optimiert, dass im Messbereich von 0,8 m bis 8 m mit einer Messunsicherheit von bis zu 100 μm gemessen werden kann. Dabei soll das Messgerät mit maximalen Abmessungen von etwa 150 mm \times 150 mm \times 100 mm relativ kompakt bleiben und kostengünstig umgesetzt werden. Dazu muss das gesamte Messsystem passend ausgelegt und aufgebaut werden.

Bei der Erreichung der gestellten Ziele ergeben sich mehrere wissenschaftliche Herausforderungen. So führen bei der Lasertriangulation bereits geringe Verschiebungen der Komponenten, zum Beispiel wegen einer thermischen Ausdehnung des Messgerätes, zu signifikanten Messabweichungen [107]. Dies ist insbesondere in der industriellen Abstandsmessung ausschlaggebend, da sich die Einsatzbedingungen, wie zum Beispiel die Umgebungstemperatur, je nach Einsatzort stark unterscheiden können. Das Messgerät muss folglich dahingehend erweitert werden, dass es weniger empfindlich gegenüber den verschiedenen Fehlereinflüssen ist.

Die Bestimmung des Laserpunktzentrums (LPZ) auf dem Detektor ist ein typisches Anwendungsgebiet der digitalen Bildverarbeitung und ein wichtiger Schritt in der Lasertriangulation. Die Messgenauigkeit des Mittelpunktes bestimmt dabei automatisch auch die Messunsicherheit der Entfernung [117]. Da es in den vergangenen Jahren große Fortschritte bei der Bildverarbeitung gegeben hat, und die nötigen Algorithmen auch stark vom jeweiligen Detektorbild abhängig sind, muss im Zuge dieser Arbeit auch die Berechnung des LPZ optimiert und an den Messaufbau angepasst werden.

Aufgrund der gegebenen Abmessungen des Systems sowie des gewünschten

Messbereichs ist die maximal erreichbare Empfindlichkeit und somit auch die Messunsicherheit begrenzt [171]. Deshalb ist als letzte Aufgabenstellung eine Erhöhung der Empfindlichkeit des LTS zu nennen. Dies geschieht durch den Einsatz von definierten und strukturierten Messoberflächen. Gleichzeitig kann dadurch der große Einfluss der Messoberfläche auf die Messunsicherheit reduziert werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zuerst werden in Kapitel 2 Grundlagen und Stand der Technikchapter.5 die nötigen Grundlagen sowie der Stand der Technik für das Verständnis der Arbeit erörtert. Dabei werden zuerst die prinzipielle Struktur und nötigen Komponenten eines optischen Messsystems beschrieben. Darauf aufbauend werden verschiedene Verfahren der optischen Entfernungsmessung vorgestellt und verglichen. Abschließend wird in Abschnitt 2.3 Laserpunkterfassungsection.76 die bildverarbeitende Bestimmung eines Laserpunktzentrums erläutert.

Anschließend wird in Kapitel 3 Lasertriangulationchapter.97 detailliert auf das Messverfahren der Lasertriangulation eingegangen. Zu Beginn wird die optomechanische Auslegung eines Messsystems dargestellt. Weiterhin werden in Abschnitt 3.2 Fehlereinflüsse und Limitierungensection.124 mögliche Fehlereinflüsse und Limitierungen der Lasertriangulation vorgestellt. Darauf aufbauend wird dann ein detailliertes Fehlermodell eines LTS erarbeitet. Anhand dessen wird aufgezeigt, welche Fehlereinflüsse die größten Auswirkungen auf die Messabweichung eines LTS haben. In Abschnitt 3.4 Methoden zur Fehlerkompensationsection.144 werden bereits vorgestellte Verfahren zur Kompensation von Fehlern in Messsystemen zur Entfernungsmessung aufgeführt sowie deren Vor- und Nachteile dargelegt.

Kapitel 4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulationchapter.151 widmet sich einem optischen Aufbau, der zur umfassenden Kompensation verschiedener Fehlereinflüsse dient. Nach einer grundlegenden Vorstellung des Funktionsprinzips wird seine Kompensationsfähigkeit in Abschnitt 4.2 Simulative Untersuchung der Kompensationsection.162 durch umfangreiche Simulationen untersucht und bewiesen. Darauf aufbauend wird eine Optimierung der Laserpunkterfassung durchgeführt sowie der experimentelle Aufbau für die messtechnischen Untersuchungen vorgestellt.

Weiterhin wird in Kapitel 5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeitchapter.259 erläutert, wie mit Hilfe von strukturierten Messoberflächen

1 Einleitung

die Empfindlichkeit eines Lasertriangulationssystems erhöht werden kann. Dabei werden erneut nach einer Vorstellung des Funktionsprinzips umfassende simulative Untersuchungen durchgeführt sowie die Auswertung und Kalibrierung des modifizierten Systems dargestellt. Zudem wird auf die nötigen Anpassungen am Versuchsaufbau sowie die praktische Umsetzung der Strukturen eingegangen.

Anschließend werden die in den vorigen beiden Kapiteln vorgestellten Aufbauten und Methoden in umfangreichen Messungen in Kapitel 6 Messergebnisse und Diskussionchapter.296 analysiert und diskutiert. Für den Vergleich wird zu Beginn der unkompensierte Triangulationsaufbau vermessen. In Abschnitt 6.2 Kompensation von Fehlereinflüssensection.309 wird die Kompensationsfähigkeit in unterschiedlichen Szenarien verglichen und damit herausgearbeitet, wie stark sich die Messunsicherheit reduzieren lässt. Damit wird anschließend die Laserpunkterfassung für den realen Aufbau optimiert. Abschließend wird die Erhöhung der Empfindlichkeit durch die strukturierten Oberflächen messtechnisch untersucht und diskutiert.

Die Arbeit schließt mit einer Übersicht der wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse in Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblickchapter.409. Darauf aufbauend wird ein umfangreicher Ausblick gegeben um herauszustellen, in welchen Themen zukünftige Untersuchungen angesetzt werden können.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Zu Beginn werden die nötigen Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit gelegt. Außerdem wird der Stand der Technik in den entsprechenden Themengebieten dargestellt.

In Abschnitt 2.1 Optische Messsysteme section.6 wird auf die generelle Funktionsweise und die nötigen Komponenten von optischen Messsystemen eingegangen. Dabei werden insbesondere auch die nötigen allgemeinen Grundlagen der Optik vorgestellt. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 Abstandsmessung section.63 verschiedene optische Methoden zur Abstandsmessung sowie deren Stand der Technik erläutert. Abschließend wird in Kapitel 2.3 Laserpunkterfassung section.76 auf die Bildverarbeitung zur Erfassung und Positionsbestimmung von Laserpunkten eingegangen.

2.1 Optische Messsysteme

In der heutigen Forschung und Industrie werden optische Messsysteme vielfältig eingesetzt. So werden beispielsweise in der Spektroskopie Gase und Flüssigkeiten vermessen [177], mit Hilfe von faseroptischen Sensoren Temperaturen und Dehnungen überwacht [181] oder Bauteilabmessungen in der Automatisierungstechnik kontrolliert [139]. Seit der Entdeckung des Mikroskops Ende des 16. Jahrhunderts und der Erfindung des Teleskops zu Beginn des 17. Jahrhunderts hat sich die optische Messtechnik kontinuierlich weiterentwickelt [29, S.1].

Optische Messsysteme haben einige grundlegende Vorteile. So lassen sich die verschiedenen Größen berührungslos und damit rückwirkungsfrei messen [14]. Damit können auch ansonsten nicht direkt zugängliche Größen mit hohen Messraten und hoher Genauigkeit gemessen werden [29, S.2], während die Messsysteme gleichzeitig unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen sind [62, S.3].

Nachteile von optischen Systemen bestehen darin, dass sie oftmals teurer sind als nicht-optische Messsysteme und im Allgemeinen anfällig gegenüber äußeren Störungen, wie zum Beispiel Umgebungslicht, Vibrationen oder thermischen Ausdehnungen des optomechanischen Systems, sind [29, 72, 107]. Weiterhin sind

häufig bestimmte Anforderungen an die Messoberfläche gegeben, damit das Messsystem korrekt funktioniert. So benötigen manche Verfahren beispielsweise Reflektoren oder können nicht auf spiegelnden Oberflächen messen [78].

Generell besteht ein optischer Sensor aus einem Sender und einem Empfänger, die durch ein Übertragungsmedium miteinander verbunden sind [50, S.116]. Wie in Abbildung 2.1 Schematische Darstellung eines optischen Messsystems in Anlehnung an [50, Bild 3.1-57].figure.caption.7 dargestellt ist, sendet eine Strahlungsquelle die Sendestrahlung durch das Medium in Richtung eines Messobjekts [24, 134]. Durch Interaktion des Lichts mit dem Messobjekt entsteht die Empfangsstrahlung, die durch einen Empfänger detektiert wird. Durch eine Auswerteeinheit kann der Sender gesteuert und die empfangenen Signale ausgewertet werden. Je nach detaillierter Umsetzung und Ausführung können so verschiedenste optische Messsysteme umgesetzt werden. Durch die Beleuchtungs- und Abbildungsoptik kann außerdem die Sende- und Empfangsstrahlung passend beeinflusst und gelenkt werden.

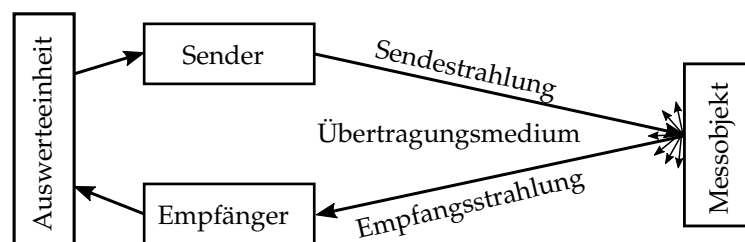


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines optischen Messsystems in Anlehnung an [50, Bild 3.1-57].

2.1.1 Optik

Die Optik ist ein Gebiet der Physik, das sich mit der Ausbreitung und den Eigenschaften von Licht beschäftigt [50]. In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit notwendigen optischen Grundlagen gelegt. Dabei wird zuerst auf die allgemeinen Eigenschaften von Licht eingegangen. Anschließend werden wichtige physikalische Effekte wie Absorption, Reflexion und Brechung vorgestellt.

Licht

Allgemein umfasst elektromagnetische Strahlung einen Wellenlängenbereich von etwa 10^{-14} m in Form von Gammaquanten, bis 10^6 m in Form von Radiowellen [83, S.2]. Der Teil des elektromagnetischen Spektrums im Wellenlängenbereich

von etwa 100 nm bis 1 mm wird als optische Strahlung bezeichnet und umfasst die ultraviolette, sichtbare und infrarote Strahlung. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Bereich von 380 nm bis 780 nm, der, wie in Abbildung 2.2 Übersicht der Einteilung des elektromagnetischen Spektrums nach [50, S.112] und [83]. Dabei stellt der Bereich von 380 nm bis 780 nm das sichtbare Licht dar. figure.caption.10 zu sehen ist, das sichtbare Licht darstellt.

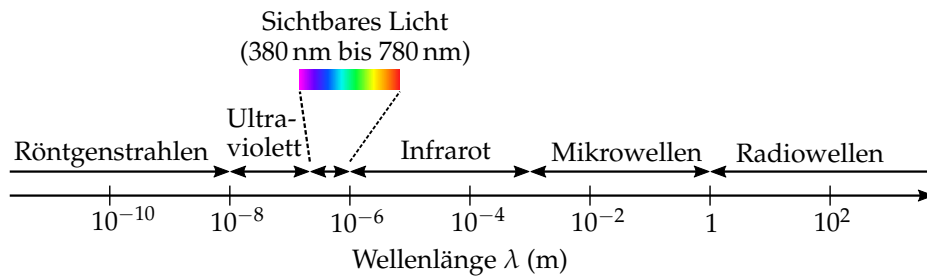


Abbildung 2.2: Übersicht der Einteilung des elektromagnetischen Spektrums nach [50, S.112] und [83]. Dabei stellt der Bereich von 380 nm bis 780 nm das sichtbare Licht dar.

In der Wellenoptik wird Licht als elektromagnetische Wellen mit der optischen Frequenz ν , Wellenlänge λ und Ausbreitungsgeschwindigkeit c beschrieben [34, S.2]. Dabei gilt der Zusammenhang

$$c = \nu \cdot \lambda = \frac{c_0}{n}, \quad (2.1)$$

wobei sich Licht im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ausbreitet. Der Brechungsindex n ist je nach Ausbreitungsmedium und Umgebungsbedingungen unterschiedlich und beträgt im Vakuum $n_0 = 1$. Andere Ausbreitungsmedien, zum Beispiel Glas, besitzen typischerweise einen Brechungsindex $n > 1$, weshalb sich das Licht darin langsamer fortbewegt. Die elektrische Feldstärke \vec{E} und die damit gekoppelte magnetische Feldstärke \vec{H} schwingen periodisch mit der Frequenz ν und stehen stets senkrecht zueinander und zur Ausbreitungsrichtung z der Welle. Im einfachsten Fall handelt es sich bei Licht um eine ebene Welle, die durch [29, S.5]

$$\begin{aligned} \vec{E}(z, t) &= \vec{E}_0 \cos(\omega t - kz - \phi_0), \\ \vec{H}(z, t) &= \vec{H}_0 \cos(\omega t - kz - \phi_0) \end{aligned} \quad (2.2)$$

definiert ist. Dabei sind \vec{E} und \vec{H} die Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke, \vec{E}_0 und \vec{H}_0 die Amplituden, ω die Winkelgeschwindigkeit, t die Zeit, k die Wellenzahl und ϕ_0 die Ausgangsphase der Welle. Der Zusammenhang

2 Grundlagen und Stand der Technik

zwischen der optischen Frequenz ν und der Winkelgeschwindigkeit ω der Welle ist gegeben durch

$$\omega = 2\pi\nu \quad (2.3)$$

und die Wellenzahl k lässt sich durch

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

berechnen [29, S.6]. Da sich das elektrische und magnetische Feld proportional zueinander verhalten, ist es ausreichend, lediglich das elektrische Feld anzugeben.

Wie bereits vorgestellt, liegt das sichtbare optische Licht im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm, bzw. im Frequenzbereich von etwa 10^{15} Hz. Diese Frequenzen lassen sich aktuell durch elektrische Messtechnik nicht direkt messen. Aus diesem Grund wird die Intensität I des Lichtes bestimmt, die sich durch

$$I = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0}{\mu\mu_0}} \overline{E^2} \quad (2.5)$$

ausdrücken lässt [34, S.3]. Dabei ist ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, ϵ die relative Dielektrizitätszahl, μ_0 die magnetische Feldkonstante und μ die relative magnetische Permeabilität. Da es sich bei $\overline{E^2}$ um den zeitlichen Mittelwert der quadrierten Feldstärke handelt, kann die Intensität durch verschiedene Detektoren direkt gemessen werden.

Überlagern sich verschiedene Wellenzüge, kann es zur sogenannten Interferenz zwischen den Lichtstrahlen kommen [29, S.10], wie in Abbildung 2.3 Interferenz zweier harmonischer Lichtwellen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 660$ nm in Anlehnung an [29] mit (a) konstruktiver Interferenz, (b) destruktiver Interferenz. figure.caption.16 beispielhaft dargestellt. Sind zwei Wellenzüge in Phase, kommt es zur sogenannten konstruktiven Interferenz und die Wellen verstärken sich. Haben die beiden Wellenzüge jedoch einen Phasenunterschied von $(2a + 1)\pi$ mit $a \in \mathbb{Z}$, kommt es zur destruktiven Interferenz und die Wellen löschen sich gegenseitig aus.

Eine weitere wichtige Eigenschaft von Licht besteht in seiner Quantennatur, bzw. dem Welle-Teilchen-Dualismus. Nach der Quantentheorie weist Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften auf [34, S.4]. Diese einzelnen Quanten werden als Photonen bezeichnet, deren Energie W sich durch

$$W = h\nu = hc/\lambda \quad (2.6)$$

berechnen lässt [34, S.4]. Dabei bezeichnet $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js das Plancksche Wirkungsquantum, ν , λ und c stehen weiterhin für die optische Frequenz bzw.

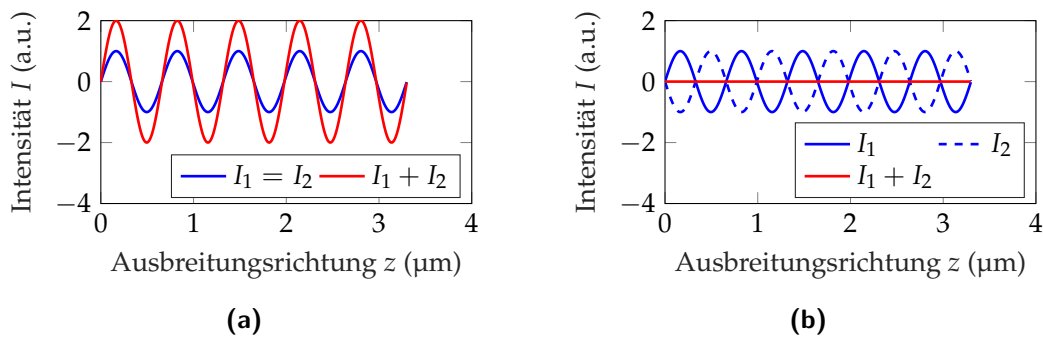


Abbildung 2.3: Interferenz zweier harmonischer Lichtwellen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 660 \text{ nm}$ in Anlehnung an [29] mit (a) konstruktiver Interferenz, (b) destruktiver Interferenz.

Wellenlänge des Lichts sowie dessen Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Absorption und Emission

Licht, beziehungsweise Photonen, können durch verschiedene physikalische Vorgänge entstehen oder verschwinden [34, S.28ff]. Hier wird insbesondere auf die Vorgänge der Absorption, der spontanen Emission und der stimulierten Emission eingegangen. Diese sind beispielhaft in Abbildung 2.4 beispielhafte Darstellung von (a) Absorption, (b) spontaner Emission und (c) stimulierter Emission in Anlehnung an [34].figure.caption.25 dargestellt.

Trifft ein Photon auf ein Atom kann es passieren, dass die Energie W des Photons *absorbiert* wird und damit ein Elektron des Atoms aus einem unteren Energieniveau E_1 auf ein höheres Energieniveau E_2 angehoben wird, siehe Abb. 2.4(a)figure.caption.25. Dadurch wird das Atom in einen angeregten Zustand versetzt, gleichzeitig verschwindet dabei das Photon. Dabei ist es wichtig, dass das Photon mindestens die Energie $W = \Delta E = E_2 - E_1$ besitzt, um das Atom anregen zu können.

Umgekehrt kann ein zum Beispiel durch die Zufuhr von externer Energie angeregtes Atom spontan ein Photon freigeben. Das ist die sogenannte *spontane Emission* (Abb. 2.4(b)figure.caption.25). Hier nimmt das angeregte Elektron im Energieniveau E_2 wieder seinen Ausgangszustand E_1 an. Die dabei freigesetzte Energie wird dann in Form eines Photons mit zufälliger Phase und Richtung freigegeben. Die Frequenz ν des Photons berechnet sich dabei durch

$$\nu = \Delta E/h. \quad (2.7)$$

Die *stimulierte Emission* ist ähnlich der spontanen Emission. Dabei läuft der Vorgang jedoch nicht zufällig ab, sondern wird von außen durch ein weiteres Photon

2 Grundlagen und Stand der Technik

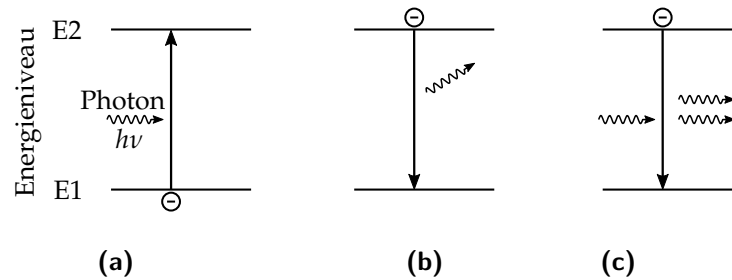


Abbildung 2.4: Beispielhafte Darstellung von (a) Absorption, (b) spontaner Emission und (c) stimulierter Emission in Anlehnung an [34].

ausgelöst. Sobald dieses externe Photon auf ein angeregtes Elektron trifft, geht dieses wieder in ein tieferes Energieniveau über. Das dabei abgegebene Photon besitzt nun die selbe Phase und Richtung wie das ursprüngliche Photon, wodurch das Licht verstärkt wird, siehe Abb. 2.4(c)figure.caption.25.

Streuung und Reflexion

In der geometrischen Optik werden Lichtstrahlen verwendet, um die Ausbreitung des Lichtes zu beschreiben [83, S.2]. Diese verlaufen in homogenen Medien gerade, können aber an Übergängen zu anderen Medien oder in inhomogenen Medien ihre Richtung ändern. Damit stellt die geometrische Optik ein vereinfachtes Modell zur Beschreibung von Licht dar. Mit Hilfe der geometrischen Optik werden im weiteren Verlauf die physikalischen Konzepte der Streuung, Reflexion, Brechung und optischen Abbildung erläutert.

Trifft ein Lichtstrahl auf ein Teilchen, muss er nicht zwingend dauerhaft absorbiert werden, sondern kann auch von diesem gestreut werden. Dabei wird die elektromagnetische Strahlung absorbiert und sofort wieder reemittiert [47, S.137]. Je nach Eigenschaften der Teilchen werden nur bestimmte Wellenlängen des Lichtes gestreut. Dies führt dazu, dass wir unterschiedliche Farben wahrnehmen können.

Sobald ein Lichtstrahl auf eine optisch glatte Fläche trifft, wird er von dieser reflektiert [47, S.155ff]. Wie in Abbildung 2.5(a)figure.caption.27 zu sehen ist, gilt dabei der einfache Zusammenhang von $\Phi_e = \Phi_r$ zwischen Einfallswinkel Φ_e und Ausfallswinkel Φ_r des reflektierten Strahles. In diesem Fall wird auch von spiegelnder Reflexion gesprochen.

Die Beschaffenheit einer Oberfläche wird insbesondere durch seine Rauheit R definiert. Ist der Wert der Rauheit wesentlich kleiner als die Wellenlänge λ des auftreffenden Lichtes, spricht man von einer optisch glatten Oberfläche. In diesem

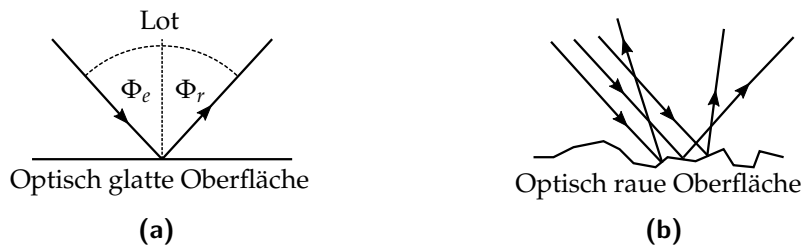


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung von (a) spiegelnder Reflexion an einer optisch glatten Oberfläche und (b) diffuser Reflexion an einer optisch rauhen Oberfläche.

Fall wird das Licht an der Oberfläche spiegelnd reflektiert [62, S.14].

Für den Fall $R \approx \lambda$ spricht man von optisch rauhen Oberflächen und es tritt eine sogenannte diffuse Reflexion, bzw. diffuse Streuung auf. Dabei wird das Licht zufällig in alle Richtungen des Raums gestreut, wie in Abbildung 2.5(b) dargestellt ist.

Brechung

Beim Auftreffen von Lichtstrahlen auf eine Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Medien kommt es neben der Reflexion auch zur Brechung. Dabei wird der auftreffende Strahl teilweise reflektiert, während der verbleibende Anteil in das Medium eintritt und transmittiert wird, siehe Abbildung 2.6(a) dargestellt. Dabei hängt der Winkel des transmittierten Strahles vom Verhältnis der Brechungsindizes der beiden Medien ab [83]. Der Austrittswinkel Φ_t des transmittierten Lichtes ergibt sich dabei laut dem snelliusschen Gesetz durch [48]

$$\sin \Phi_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \Phi_e, \quad (2.8)$$

wobei n_1 und n_2 die Brechungsindizes des ersten beziehungsweise zweiten Mediums sind. Überschreitet der Einfallswinkel Φ_e einen gewissen Wert, tritt die sogenannte Totalreflexion ein. In diesem Fall wird kein Licht transmittiert, sondern es wird die gesamte Lichtmenge an der Grenzfläche reflektiert.

Ein Medium mit einem größeren Brechungsindex n wird auch als optisch dichteres Medium bezeichnet. Beim Eintritt in ein optisch dichteres Medium wird der Lichtstrahl zum Lot gebrochen, wie auch in Abbildung 2.6(a) dargestellt. Außerdem ist anzumerken, dass die Frequenz ν des Lichtes beim Übertritt in ein anderes Medium mit Brechungsindex $n_2 \neq n_1$ gleich bleibt, sich jedoch darin die Wellenlänge λ_2 nach [83]

$$\lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2.9)$$

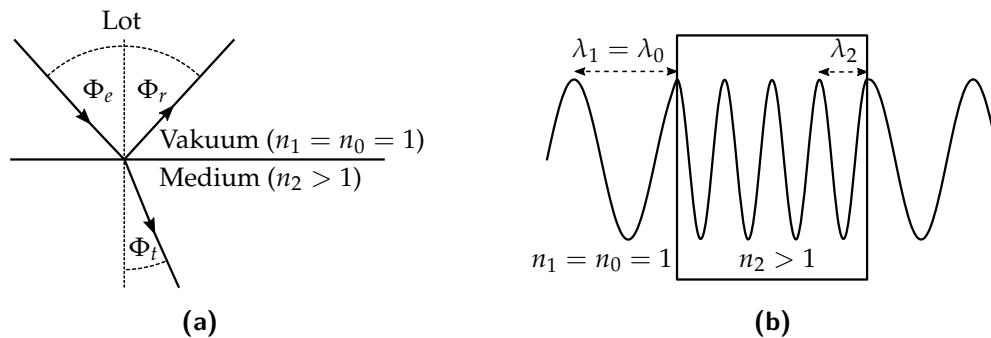


Abbildung 2.6: (a) Schematische Darstellung von Reflexion und Brechung am Übergang vom Vakuum in ein optisch dichteres Medium. (b) Veränderung der Wellenlänge beim Übergang vom Vakuum in ein optisch dichteres Medium in Anlehnung an [83].

verändert, wobei λ_0 die Wellenlänge des Lichtstrahles im Vakuum ist (vgl. Abbildung 2.6(b)figure.caption.30).

Allgemein ist es wichtig zu erwähnen, dass der Brechungsindex n eines Mediums von verschiedenen Faktoren abhängt. So ist der Brechungsindex von Luft insbesondere von der Temperatur T , dem Luftdruck p und der Luftfeuchte h_{Luft} abhängig, die wiederum mit dem Partialdruck p_{Wasser} von Wasser zusammenhängt. Bei normalen Bedingungen ($T = 293,15 \text{ K}$, $p = 1013,25 \text{ hPa}$, $h_{\text{Luft}} = 59\% \hat{=} p_{\text{Wasser}} = 13,3 \text{ hPa}$) ist der Brechungsindex von Luft $n_{\text{Luft}} = 1,000\,271\,274$. Dabei lässt sich die Änderung Δn näherungsweise durch [29, S.155]

$$\Delta n = 10^{-8} \left(\frac{27\Delta p}{\text{hPa}} - \frac{92\Delta T}{\text{K}} - \frac{4,2\Delta p_{\text{Wasser}}}{\text{hPa}} \right) \quad (2.10)$$

angeben. Auf die physikalischen Zusammenhänge wird hier nicht weiter eingegangen.

Optische Abbildung

Mit Hilfe der Brechung an einem optisch dichteren Medium kann Licht durch Linsen fokussiert werden. Dies dient dazu, eine optische Abbildung von einem Gegenstand zu erhalten, wie es schematisch in Abbildung 2.7 Schematische Darstellung der optischen Abbildung mit einer bikonvexen Linse mit der Brennweite f .figure.caption.36 dargestellt ist [47, S.250ff]. Dabei wird hier eine ideal angenommene Linse mit der Brennweite f betrachtet. Der Abstand g des Gegenstandes von der Linse wird mit dem Abstand b des Abbildes von der Linse durch die sogenannte Abbildungsgleichung mit der Brennweite verknüpft [62, S.14f]. Dabei

gilt

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}. \quad (2.11)$$

Weiterhin beschreibt die Vergrößerung V , wie sich die Bildgröße B zur Gegenstandsgröße G verhält und berechnet sich durch

$$V = -\frac{B}{G} = -\frac{b}{g} = \frac{f}{f-g}. \quad (2.12)$$

Dabei bedeutet ein negatives V , dass das Bild, wie in Abbildung 2.7 Schematische Darstellung der optischen Abbildung mit einer bikonvexen Linse mit der Brennweite f .figure.caption.36 gezeigt, auf dem Kopf steht.

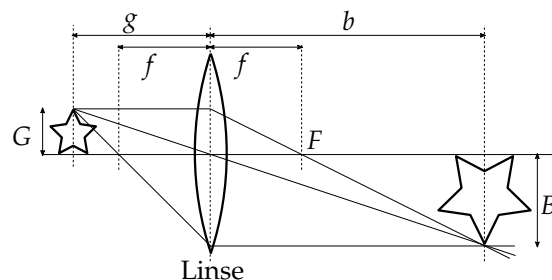


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der optischen Abbildung mit einer bikonvexen Linse mit der Brennweite f .

Die Abbildung kann relativ einfach durch Verwendung einiger spezieller Strahlen konstruiert werden [91]. So wird ein Strahl durch den Mittelpunkt der Linse nicht gebrochen. Strahlen, die parallel zur Achse der Linse verlaufen, werden durch den Brennpunkt F der Linse gelenkt. Strahlen, die durch den Brennpunkt die Linse erreichen, verlassen diese parallel zur optischen Achse. Mit Hilfe dieser drei Strahlen kann problemlos eine beliebige Abbildung konstruiert werden. Bei einer idealen Linse wird angenommen, dass alle Strahlen, die von einem Punkt ausgehen, wieder in genau einen Punkt zusammenlaufen.

Dieser ideale Zusammenhang gilt für eine ideale, unendlich dünne Linse. Bei realen Linsen kommt es aufgrund von Aberrationen, wie zum Beispiel Koma oder Astigmatismus, zu Abbildungsfehlern [47, S.380ff]. Hier wird lediglich auf den Effekt der Dispersion eingegangen. Der Brechungsindex von Glas hängt stark von der Wellenlänge des Lichtes ab. In einem Prisma wird dieser Effekt genutzt, um unterschiedliche Wellenlängen des Lichtes unterschiedlich stark zu brechen und so das Spektrum darstellen zu können. Bei Linsen ist dieser Effekt prinzipiell unerwünscht. Der Brechungsindex n in Abhängigkeit der Wellenlänge λ lässt sich

2 Grundlagen und Stand der Technik

nach der Sellmeier-Gleichung durch [108, S.816f]

$$n^2 - 1 = \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (2.13)$$

vereinfacht darstellen. Dabei sind B_1, B_2, B_3, C_1, C_2 und C_3 die materialabhängigen Sellmeier-Koeffizienten. Für das Kronglas N-BK7, das häufig für Linsen verwendet wird, beträgt der Brechungsindex n_l nach Gleichung (2.13) bei $\lambda_1 = 660 \text{ nm}$ etwa $n_{l,1} = 1,514$, während sich bei $\lambda_2 = 659 \text{ nm}$ der Brechungsindex zu $n_{l,2} = 1,513$ ergibt.

Die Brennweite einer dünnen Linse lässt sich in Abhängigkeit der Krümmungsradien R_1 und R_2 ihrer beiden Flächen sowie des Brechungsindex n_l des Linsenmaterials und $n_m \approx 1$ des umgebenden Mediums durch die sogenannte Linsenschleiferformel [48, S.322]

$$\frac{1}{f} = (n_l - n_m) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.14)$$

berechnen. Aufgrund der Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex n_l ändert sich beispielsweise die Brennweite einer bikonvexen Linse aus dem Kronglas N-BK7 mit Krümmungsradien $R_1 = -R_2 = 40,1 \text{ mm}$ von $f = 38,992 \text{ mm}$ bei einer Wellenlänge von 660 nm auf eine Brennweite von $f = 38,990 \text{ mm}$ bei einer Wellenlänge von 659 nm . So haben also kleine Wellenlängenänderungen einen geringen Einfluss auf die Brennweite.

Weiterhin hängt die Brennweite einer Linse auch von der Temperatur ab, da sowohl die Form als auch der Brechungsindex temperaturabhängig sind. Nach [56] gilt für N-BK7 der Zusammenhang

$$\frac{df}{dT} = f \cdot 0,98 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}. \quad (2.15)$$

Somit ändert sich bei einer Temperaturänderung von $\Delta T = 1 \text{ K}$ die Brennweite um $\Delta f = 38,2 \text{ nm}$.

Fluoreszenz

Ein weiterer optischer Effekt, auf den hier eingegangen wird, ist die sogenannte Fluoreszenz. Dabei handelt es sich um einen ähnlichen Effekt wie bei der Absorption und Emission von Photonen. Entscheidend hierbei ist allerdings, dass es dabei zur Veränderung der Wellenlänge des Lichts kommt [97, Kap. 6.1],[22, Kap. 3.1]. Dieser Effekt ist schematisch in Abbildung 2.8 Schematische Darstellung von Fluoreszenz dargestellt. So wird beispielsweise ein Photon mit der Wellenlänge λ_1 absorbiert und regt somit ein Atom vom Energieniveau E1 auf E3 an. Durch interne strahlungslose Übergänge in den Energiezuständen geht

ein Teil der absorbierten Energie verloren, sodass das Atom auf das niedrigere Energieniveau E_2 übergeht. Durch spontane Emission geht das Atom dann wieder in seinen Grundzustand E_1 über. Aufgrund der verlorenen Energie hat das abgegebene Photon folglich eine niedrigere Energie und somit eine größere Wellenlänge λ_2 . Die absorbierte und emittierte Wellenlänge ist dabei vom fluoreszierenden Material abhängig.

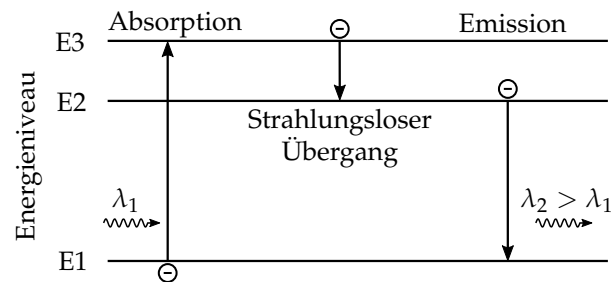


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung von Fluoreszenz.

Ein weiterer entscheidender Effekt liegt darin, dass das fluoreszierende Material noch eine gewisse Zeit nachleuchtet [22, Kap. 3.4]. Dies liegt daran, dass die Atome teils noch eine gewisse Zeit im angeregten Zustand verweilen, bevor es dann zur spontanen Emission kommt.

Ein ähnlicher Effekt tritt bei sogenannten hoch-konvertierenden Partikeln auf [39]. Hier werden jedoch mehrere Photonen gleichzeitig absorbiert, so dass das Atom direkt um mehrere Energieniveaus angeregt wird. Ein abgegebenes Photon nimmt dann diese höhere Energie auf. Folglich hat dieses dann eine niedrigere Wellenlänge als das anregende Licht.

2.1.2 Laser

Prinzipiell gibt es verschiedene Lichtquellen, wie zum Beispiel Glühlampen, Gasentladungslampen, Leuchtdioden oder Laser [133, S.623ff]. Diese unterscheiden sich weitreichend in ihren Eigenschaften. Da der Laser eine essentielle Komponente der Lasertriangulation darstellt, wird in diesem Kapitel weiter auf dessen Funktionsweise, Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile eingegangen.

Der Laser (engl.: light amplification by stimulated emission of radiation) wurde 1960 von Theodore Maiman erstmalig praktisch umgesetzt [31]. In den folgenden Jahrzehnten wurde der Laser stetig weiterentwickelt und verbessert, und eine Vielzahl von Nobelpreisen wurden im Zusammenhang mit Lasern verliehen.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Prinzipiell besteht ein Laser aus einem aktiven Medium, einem Resonator sowie einem Pumpmechanismus, siehe Abbildung 2.9. Schematische Darstellung eines Lasers bestehend aus aktivem Medium, Resonator sowie der zugeführten Pumpenergie in Anlehnung an [120]. Durch die Pumpe wird zusätzliche Energie in das aktive Medium zugeführt, um die darin enthaltenen Atome in einen angeregten Energiezustand zu versetzen, wodurch darin eine Besetzungsinversion erreicht wird [120, S.42]. Die Boltzmann-Verteilung [133, S.645]

$$\frac{N_2^e}{N_1^e} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) \quad (2.16)$$

besagt, dass bei Raumtemperatur die Anzahl der Elektronen N_2^e im höheren Energieniveau E_2 wesentlich kleiner ist als die Anzahl der Elektronen N_1^e im niedrigeren Energieniveau E_1 . Der Parameter k_B stellt dabei die Boltzmann-Konstante dar. Durch das Hinzuführen der Pumpenergie übersteigt die Anzahl an angeregten Atomen N_2^e die Anzahl der nicht-angeregten Atome N_1^e und die Besetzungsinversion wird erreicht. Durch die bereits vorgestellte stimulierte Emission können diese angeregten Atome zusätzliche Photonen mit identischer Wellenlänge, Richtung und Phase erzeugen.

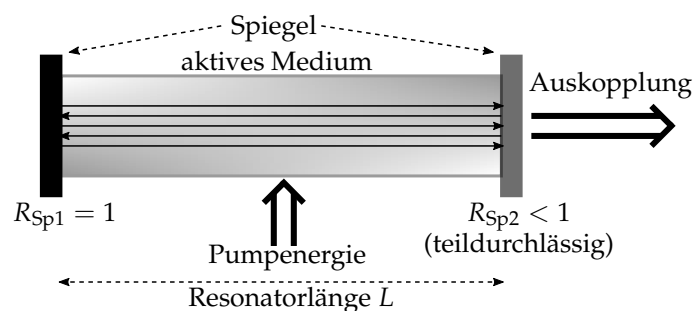


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Lasers bestehend aus aktivem Medium, Resonator sowie der zugeführten Pumpenergie in Anlehnung an [120].

Der Resonator wird typischerweise durch zwei gegenüberliegende Spiegel mit Reflexionsgrad R_{Sp1} bzw. R_{Sp2} umgesetzt und umgibt das aktive Medium, wobei einer der Spiegel zur Auskopplung von Licht teildurchlässig ist ($R_{Sp2} < 1$) [29, S.25]. Dadurch läuft das Licht zwischen den beiden Spiegeln hin und her, und es kann sichergestellt werden, dass die stimulierte Emission die spontane Emission überwiegt und das Licht ausreichend verstärkt wird.

Durch diese Funktionsweise besitzt Laserlicht einige sehr vorteilhafte Eigenschaften. Diese sind insbesondere die Monochromie, räumliche und zeitliche Kohärenz, die starke Direktionalität und Bündelung sowie die hohe Intensität der Strahlung

[133, S.647]. Diese Eigenschaften werden im Folgenden anhand von [47, 133] grob erläutert, für weitergehende Informationen wird der interessierte Leser auf die erwähnte Literatur verwiesen.

Monochromie bedeutet, dass das emittierte Licht lediglich eine Wellenlänge besitzt. Andere Lichtquellen, wie beispielsweise die Sonne, Leuchtdioden oder Glühlampen, besitzen ein relativ breites Spektrum, das sich häufig über den gesamten spektralen Bereich des sichtbaren Lichts und darüber hinaus erstreckt. Deshalb erscheint das Licht dieser Quellen als weiß, während Laserlicht häufig eine spezifische Farbe aufweist.

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die hohe Kohärenz. Diese kann generell in zeitliche und räumliche Kohärenz unterteilt werden. Allgemein gesprochen bedeutet eine hohe Kohärenz, dass verschiedene Wellenzüge im Licht über die Zeit und den Raum eine feste Phasenbeziehung besitzen. Bei inkohärentem Licht, wie es zum Beispiel bei einer normalen Glühlampe der Fall ist, besitzen die verschiedenen Wellenzüge zueinander keinen definierten räumlichen oder zeitlichen Zusammenhang (vgl. Abbildung 2.10(a)figure.caption.45). Handelt es sich wie in Abbildung 2.10(b)figure.caption.45 um räumlich und zeitlich kohärente Strahlung, besitzen alle Wellenzüge eine feste Phasenbeziehung zueinander. Dies ist beispielsweise bei vielen Laserquellen der Fall und bringt einige Vorteile mit sich. So ist die Kohärenz eine Voraussetzung für die Interferenz von Lichtstrahlen und somit in der Laserinterferometrie zwingend notwendig.

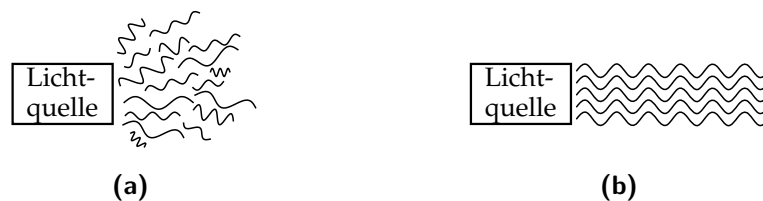


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung von zeitlicher und räumlicher Kohärenz von Wellen. (a) Räumlich und zeitlich inkohärentes Licht, zum Beispiel einer Taschenlampe. (b) Räumlich und zeitlich kohärentes Licht, zum Beispiel eines Laser.

Die Direktionalität eines Lasers ist sehr hoch. Während zum Beispiel eine Glühbirne das Licht in alle Raumrichtungen verteilt, tritt das Licht aus einem Laser stark gebündelt in eine definierte Richtung aus. Dies hängt mit dem Aufbau des Lasers zusammen, da lediglich die zum Resonator senkrecht stehenden Strahlen verstärkt werden und das Licht nur in eine Richtung ausgekoppelt wird. Der Strahl zeigt nur eine minimale Divergenz, die mit Beugungseffekten zusammenhängt.

Die hohe Intensität ist eng mit der Direktionalität verbunden. Wie zuvor beschrieben, wird die gesamte Energie des Lasers in einen sehr geringen Raumwinkel emittiert. Dies bewirkt, dass bereits vergleichsweise geringe Ausgangsleistungen

zu hohen Lichtleistungen auf dem Messobjekt führen.

Typischerweise handelt es sich bei einem Laserstrahl um einen Gaußstrahl [133, S.654], [29, S.27ff]. Das bedeutet, dass die Intensität des Laserstrahles nicht konstant über den Querschnitt des Strahles verteilt ist, sondern, wie in Abb. 2.11(a)figure.caption.47 dargestellt, ein radial verteiltes Gaußprofil aufweist.

Speckles

Die zuvor beschriebene Kohärenz hat gleichzeitig auch einen Nachteil. Trifft kohärentes Licht, beispielsweise von einem Laser, auf eine optisch raue Oberfläche wie ein weißes Blatt Papier, wird dieses wie zuvor vorgestellt diffus gestreut. Trifft dieses Streulicht auf einen Schirm oder wird auf einen Detektor abgebildet, kommt es zur Bildung von sogenannten Speckles [62, S.18]. Durch die diffuse Streuung besitzen die verschiedenen Wellenzüge eine unterschiedliche Phasenlage. Überlagern sich diese auf dem Schirm oder dem Detektor, kann es zur konstruktiven oder destruktiven Interferenz der Wellen kommen. Dadurch bilden sich zufällig verteilte helle und dunkle Flecken aus, wie es in Abbildung 2.11(b)figure.caption.47 beispielhaft dargestellt ist. In verschiedenen Messmethoden, wie zum Beispiel der Lasertriangulation, kann es dadurch zu Messabweichungen kommen [62, S.116f]. Es gibt jedoch auch Verfahren, welche die in den Speckles gespeicherten Informationen für Messungen verwenden, wie beispielsweise die Speckle-Interferometrie zur Messung von Oberflächenformen [62, S.79ff].

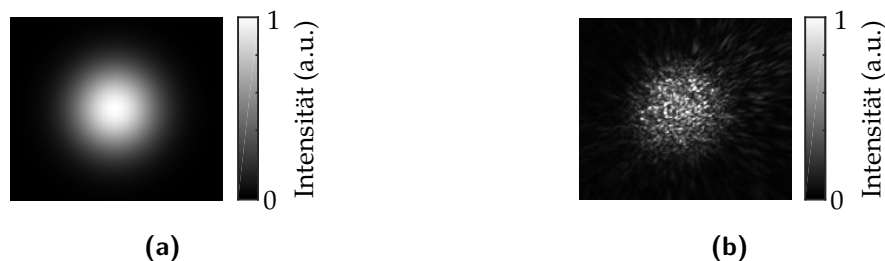


Abbildung 2.11: (a) Simuliertes Gaußprofil eines idealen Laserpunktes. (b) Resultierendes Specklemuster bei der Beleuchtung einer optisch rauhen Oberfläche mit einem Laserstrahl.

2.1.3 Detektoren

Eine weitere wichtige Komponente in optischen Messsystemen sind Detektoren. Deren Aufgabe ist es, Licht in ein elektrisch messbares Signal umzuwandeln. In der Lasertriangulation werden dazu typischerweise positionsempfindliche Detektoren (PSDs, position sensitive detectors), CCDs (charge-coupled detectors) oder

CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)-Detektoren verwendet [109, 133]. Prinzipiell dient dabei der photoelektrische Effekt in Halbleitern dazu, eine zur Anzahl der auftreffenden Photonen proportionale Ladung zu erzeugen, die anschließend gemessen werden kann.

Photodiode

Eine Photodiode (PD) stellt ein grundlegendes Element von lichtempfindlichen Sensoren dar [14], [83, S.122]. Treffen Photonen auf den in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergang, werden durch die zusätzlich eingebrachte Energie neue Elektronen/Loch-Paare generiert, siehe Abbildung 2.12. Schematische Darstellung des Photoeffektes in einer Photodiode. Durch das auftreffende Photon wird ein Elektronen/Loch-Paar generiert. Das Elektron wird dann durch die anliegende Spannung U_{PD} abtransportiert. Der resultierende Strom kann gemessen werden und ist proportional zur Anzahl der auftreffenden Photonen. Diese werden durch die anliegende Spannung U_{PD} abtransportiert und führen dadurch zu einem zur Anzahl der auftreffenden Photonen proportionalen Strom. Die Bedingung für die Erzeugung eines Elektronen/Loch-Paares ist, dass die Energie eines auftreffenden Photons die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leitungsband des pn-Übergangs übersteigt. Bei einer PD wird lediglich die Intensität des auftreffenden Lichtes gemessen. Weitere Systeme zur Ermittlung von Lichtintensitäten sind Photolawinendioden, Photowiderstände und Photoelemente [50, S.79].

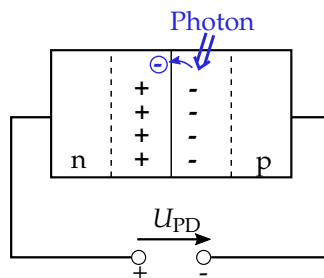


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Photoeffektes in einer Photodiode. Durch das auftreffende Photon wird ein Elektronen/Loch-Paar generiert. Das Elektron wird dann durch die anliegende Spannung U_{PD} abtransportiert. Der resultierende Strom kann gemessen werden und ist proportional zur Anzahl der auftreffenden Photonen.

Für viele Applikationen ist es nicht entscheidend, die Intensität des Lichtes zu kennen, sondern seine Auftreffposition auf dem Detektor [42]. Dazu zählen bei-

spielsweise Shack-Hartmann-Sensoren zur Vermessung von Wellenfronten, Auto-kollimatoren für eine Parallelitätsmessung oder die Lasertriangulation. Deshalb werden im Folgenden PSDs, CCDs und CMOS-Detektoren genauer beschrieben, da sich mit Hilfe dieser die Position des Lichtpunktes direkt oder indirekt bestimmen lässt.

Position Sensitive Detector

Ein PSD ist eine analoge Schaltung zur Messung der Auftreffposition eines Lichtpunktes auf dem Detektor [88, S.27], [109, S.82ff]. Dabei wird eine großflächige Photodiode (aktive Fläche mit Kantenlänge l) verwendet, auf deren Anode und Kathode ein gleichförmiger Widerstandsbelag aufgetragen ist. An den gegenüberliegenden Seiten ist nun jeweils eine Elektrode angebracht. Dadurch ergeben sich die vier Anschlüsse a, b, c und d. Der schematische Aufbau ist Abbildung 2.13(a)figure.caption.53 zu entnehmen. Trifft Licht auf die Photodiode, werden auf der aktiven Fläche Elektronen generiert. Diese fließen nun umgekehrt proportional zum Verhältnis der Widerstände zu den Elektroden ab. Folglich kann der Mittelpunkt (x, y) des eintreffenden Lichts mithilfe der vier Ströme i_a, i_b, i_c und i_d berechnet werden. Dabei gilt [109]

$$x = \frac{l}{2} \frac{i_b - i_d}{i_b + i_d} \quad \text{und} \quad y = \frac{l}{2} \frac{i_a - i_c}{i_a + i_c}. \quad (2.17)$$

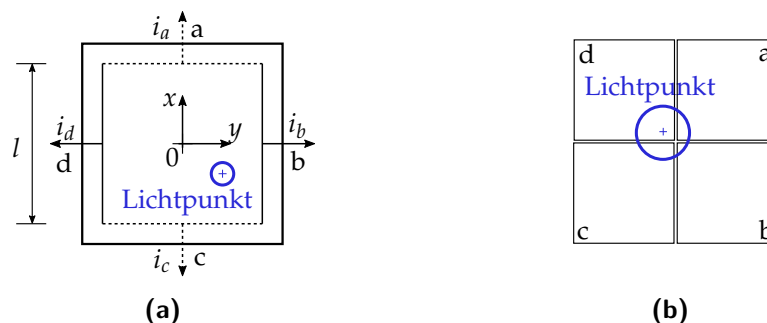


Abbildung 2.13: Analoge Detektoren zur Bestimmung der Auftreffposition eines Lichtpunktes in Anlehnung an [109]. (a) PSD und (b) 4-Quadranten-Detektor.

Eine weitere Umsetzung eines PSDs besteht in einem 4-Quadranten-Detektor [109, S.84]. Dabei werden vier einzelne Photodioden a, b, c und d symmetrisch um das Zentrum des Detektors angeordnet (Abb. 2.13(b)figure.caption.53). Durch die empfangene Leistung bzw. die erzeugten Ströme der einzelnen PDs kann dann der Mittelpunkt des Lichtstrahls ermittelt werden.

Vorteile bestehen in den sehr hohen möglichen Messraten des PSDs, der hohen

Auflösung der Position, der gleichzeitigen Messung der Lichtintensität sowie der einfachen und robusten Bauweise [163]. Der größte Nachteil besteht darin, dass der Sensor den Mittelpunkt des gesamten auftreffenden Lichtes ausgibt. Im Falle von Störlicht oder zweier auf dem Detektor auftreffenden Lichtpunkte kann es dadurch zu einer großen Abweichung kommen. Weiterhin weisen PSDs häufig Nichtlinearitäten auf.

Photokondensator

Als Grundlage für die Funktionsweise eines CCDs oder CMOS-Chips wird hier kurz das Prinzip eines Photokondensators erklärt. Wird eine pn-Photodiode mit offenem Stromkreis betrieben, wird die durch Strahlung erzeugte Ladung nicht abtransportiert, sondern in der Raumladungszone gespeichert. Somit handelt es sich hierbei bereits um eine einfache Art eines Photokondensators [91, S.402f]. Die Information über auftreffendes Licht kann während der Belichtungszeit in den Photokondensatoren gespeichert und anschließend ausgelesen werden.

Moderne Photokondensatoren werden dabei durch MOS-Kondensatoren (metal-oxide-semiconductor, Metall-Oxid-Halbleiter) wie in Abbildung 2.14 Photokondensator zur Speicherung von Ladungen in Anlehnung an [83].figure.caption.55 umgesetzt [83, S.127]. Durch eine positive Gate-Spannung U_G bildet sich ein Potentialtopf unter der SiO_2 -Isolationsschicht. Trifft ein Photon auf das p-Silizium (p-Si), wird dort ein Elektronen/Loch-Paar erzeugt. Das Loch wandert zur negativen Elektrode, während das Elektron im Potentialtopf gespeichert wird. Durch das Reduzieren der Spannung können die Ladungen anschließend über eine externe Schaltung ausgelesen werden.

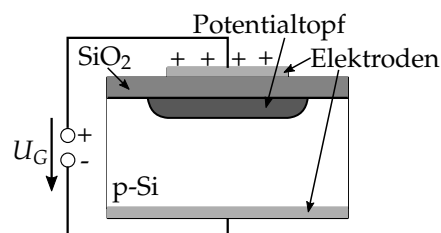


Abbildung 2.14: Photokondensator zur Speicherung von Ladungen in Anlehnung an [83].

Der Vorteil der MOS-Kondensatoren liegt darin, dass diese sehr große Kapazitäten erreichen. Dadurch wird verhindert, dass der Potentialtopf zur Speicherung von Ladungen gesättigt wird.

Charge-Coupled Detector

Anders als eine PD oder ein PSD besteht ein CCD nicht aus einer einzelnen lichtempfindlichen Sensoroberfläche, sondern aus einer Matrix von Photokondensatoren, den sogenannten Pixeln. Auftreffendes Licht erzeugt dann in jedem einzelnen Pixel eine Ladung [91, S.403f]. Durch die CCD-Technik werden durch Umschalten der Potentiale an den Gate-Elektroden die Ladungen schrittweise zur nächsten Kapazität bis an den Rand der Matrix verschoben und dort durch eine Elektronik ausgelesen und digitalisiert, siehe Abb. 2.15 Schematische Darstellung des Auslesevorgangs eines CCDs in Anlehnung an [29]. Durch das Umschalten der Potentiale der verschiedenen Photokondensatoren kann die Ladung schrittweise an den Rand der Matrix verschoben werden. Durch die Anordnung der Pixel in einer Matrix kann so eine zweidimensionale Lichtverteilung detektiert werden. Folglich werden CCD-Sensoren häufig in der digitalen Fotografie eingesetzt.

Vorteile der CCD-Sensoren liegen in ihrer hohen Linearität, der hohen Quanteneffizienz (Anteil an erzeugten Elektronen pro auftreffenden Photonen) von 50 % bis 80 % sowie der Ausgabe eines digitalen 2D-Bildes. Ein Nachteil von CCDs ist, dass nur der komplette Detektor ausgelesen werden kann [50, S.626].

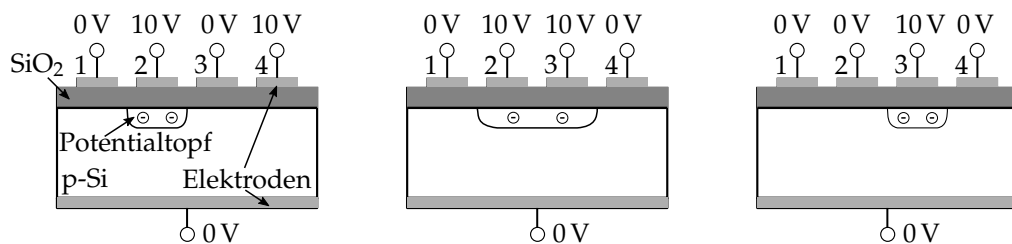


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung des Auslesevorgangs eines CCDs in Anlehnung an [29]. Durch das Umschalten der Potentiale der verschiedenen Photokondensatoren kann die Ladung schrittweise an den Rand der Matrix verschoben werden.

Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Detector

Auch ein sogenannter CMOS-Detektor besteht aus einer Pixel-Matrix. Der große Unterschied zu den CCD-Sensoren liegt darin, dass jedes Pixel eine eigene aktive Ausleseelektronik besitzt, die die erzeugte Ladung direkt in ein Spannungssignal wandelt und verstärkt [29, S.137]. Aus diesem Grund werden sie auch als Aktive-Pixel-Sensoren bezeichnet. Diese Ausleseelektronik besteht normalerweise aus mehreren Transistoren sowie zusätzlichen Elementen für die Analog-Digital-(AD)-Umsetzung. Der Unterschied zwischen CCD und CMOS-Detektoren ist

schematisch in Abbildung 2.16 Unterschied beim Auslesen eines CCDs und CMOS-Sensors nach [34].figure.caption.59 dargestellt. In jedem einzelnen Pixel generieren die auftreffenden Photonen eine Ladung. Während bei CCDs die Ladung erst schrittweise zum Rand verschoben und dort sequentiell gewandelt wird, kann beim CMOS-Detektor direkt auf die Information eines jeden einzelnen Pixels zugegriffen werden.

Vorteile von CMOS-Sensoren liegen in der hohen Ausleserate des Sensors und der damit hohen erreichbaren Messrate [29] sowie einem geringeren Leistungsbedarf, einer einfacheren Systemintegration und der Möglichkeit, nur beliebige Bereiche des Detektors auszulesen [34, S.384]. Ein großer Nachteil ist, dass die zusätzliche Auswerteelektronik Platz auf dem Detektor benötigt und sich somit der lichtempfindliche Bereich jedes einzelnen Pixels und somit die Empfindlichkeit des Sensors verringert. Durch Mikrolinsen kann dieser negative Effekt reduziert werden [78].

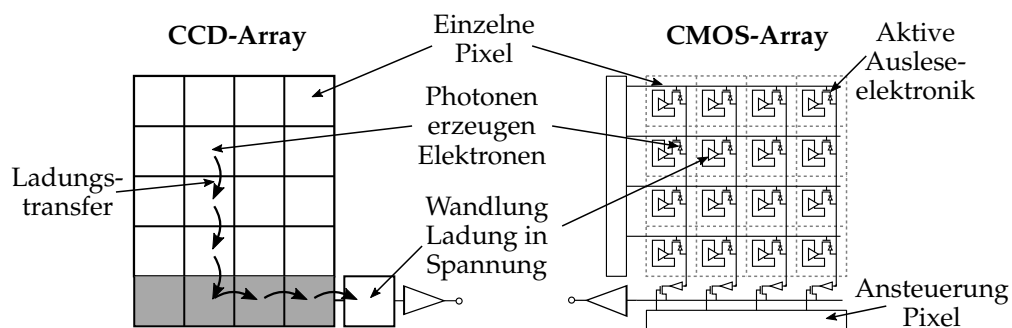


Abbildung 2.16: Unterschied beim Auslesen eines CCDs und CMOS-Sensors nach [34].

Rauscheinflüsse

Bildsensoren unterliegen unterschiedlichen Rauscheinflüssen. Da in dieser Arbeit aufgrund der später vorgestellten Anforderungen Pixel-Sensoren verwendet werden, wird hier kurz auf verschiedene Rauschquellen von CCD- und CMOS-Sensoren eingegangen. Während der Aufnahme werden den Bildinformationen nacheinander Rauschquellen überlagert [33, 54], die hier kurz erläutert werden. Die erste Fehlerquelle ist das sogenannte Schrotrauschen (engl. shot noise). Wie bereits vorgestellt, trifft das Licht nicht kontinuierlich auf den Detektor, sondern in Form von gequantelten Energieeinheiten, den sogenannten Photonen. Die Anzahl der auf einem Pixel auftreffenden Photonen unterliegt einer Poisson-Verteilung [55, 91]. Folglich kann es passieren, dass manche Pixel mehr oder weniger Photonen empfangen als die umliegenden Pixel. Diese Fehlerquelle ist physikalisch

bedingt und unvermeidbar.

Eine weitere Rauschquelle ist das sogenannte Dunkelstromrauschen (engl. dark shot noise). Aufgrund von thermischen Vorgängen in den einzelnen Pixel können sich Elektronen/Loch-Paare bilden, auch wenn keine Photonen auf die lichtempfindliche Fläche treffen [83, 133]. Dieser Dunkelstrom erhöht sich exponentiell mit steigender Sensortemperatur und kann folglich durch Kühlung des Detektors verringert werden.

Weiterhin überlagert sich das sogenannte Fixed Pattern Noise. Dieses hat, wie der Name bereits andeutet, ein festes Muster und unterteilt sich in die Photo Response Non Uniformity (PRNU) und in die Dark Signal Non Uniformity (DSNU) [35]. Aufgrund von Unterschieden bei der Fertigung der einzelnen Pixel ist sowohl die Empfindlichkeit bei der Umwandlung von Photonen zu Elektronen jedes Pixels unterschiedlich (PRNU), als auch der in jedem Pixel generierte Dunkelstrom (DSNU) [33]. Dadurch unterscheiden sich dann auch bei einer homogenen Beleuchtung die Ausgabewerte der unterschiedlichen Pixel. Da es sich hierbei um einen systematischen Fehler handelt, kann dieser durch geeignete Kalibrierung entfernt werden.

Beim Auslesen der Elektronen und dem Verstärken der Ladung kommt es zu weiteren Fehlereinflüssen, wie Verstärkerrauschen, thermisches Rauschen (Johnson-Rauschen), Ausleserauschen, Reset-Noise und $1/f$ -Rauschen. Für weitere Informationen sei auf [54, 65, 91, 133] verwiesen.

Abschließend kommt es bei der Umwandlung des analogen in ein digitales Signal zum Quantisierungsrauschen, da der kontinuierliche Spannungswert in die begrenzten Zustände des digitalen Wertes überführt wird [55].

2.1.4 Referenzoberflächen

Bei verschiedenen optischen Messverfahren ist die Verwendung von Referenzoberflächen üblich, um diese unabhängig von der Messoberfläche einsetzen zu können. Je nach Messprinzip sind Referenzoberflächen notwendig oder führen beim optionalen Einsatz zu verbesserten Messergebnissen [50, S.128], [134, S.647] und werden häufig auch als kooperative Targets bezeichnet. In diesem Abschnitt wird kurz auf den Nutzen und die Einsatzgebiete von Referenzoberflächen eingegangen.

Interferometer benötigen eine spiegelnde Oberfläche [109], so dass folglich Spiegel an das Messobjekt angebracht werden. Alternativ werden in der Interferometrie auch Retroreflektoren verwendet [78], wobei diese auch in Autokollimatoren bei der Parallelitätsmessung eingesetzt werden [63]. Der Vorteil von Retroreflektoren besteht darin, dass sie einfallendes Licht wieder in dieselbe Richtung reflektieren,

siehe Abbildung 2.17(a)figure.caption.62. Reflektoren können auch bei Laufzeitmessungen eingesetzt werden, um die erreichte Genauigkeit zu erhöhen [69].

In der Vergangenheit wurde bereits gezeigt, dass bei der Lasertriangulation Messabweichungen aufgrund von Speckle-Bildung durch Streuung an rauen Oberflächen auftreten und dass diese Abweichungen durch eine fluoreszierende Messoberfläche reduziert werden können [46]. Darüber hinaus gibt es zielbasierte Messmethoden für Verschiebungs- und Deformationsmessungen, die ein Target mit bekannter Form und Muster verwenden [68, 151], zum Beispiel eine schwarze Oberfläche mit vier weißen Punkten wie in Abbildung 2.17(b)figure.caption.62 gezeigt. Diese Methoden wurden jedoch hauptsächlich für Deformationsmessungen an großen Strukturen wie Brücken oder Gebäuden eingesetzt.

Durch die Verwendung eines elliptischen Paraboloids als Referenzfläche konnten Verschiebungen im Mikrometerbereich gemessen werden, allerdings nur bei einem sehr kleinen Messabstand [85]. Yang et al. [149] verwenden eine Mikrostruktur als Referenzoberfläche, um die Ausrichtung eines Präzisionsdrehtisches exakt bestimmen zu können. Diese Mikrostruktur enthält eine Linie mit einer Tiefe von $0,6\ \mu\text{m}$ und einer Breite von $100\ \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 2.17(c)figure.caption.62).

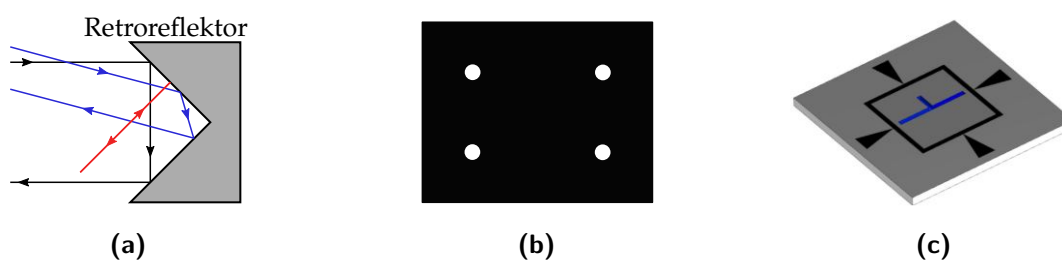


Abbildung 2.17: (a) Funktionsweise Retroreflektor. (b) Schwarze Referenzoberfläche mit bekanntem Muster in Form von vier weißen Punkten für Deformationsmessungen an Gebäuden nach [68]. (c) Mikrostruktur für interferometrische Messung [149, Fig. 2].

2.2 Abstandsmessung

Die Abstandsmessung ist ein wichtiges Feld in der Messtechnik, dessen Anfänge Jahrtausende zurück liegen [116, S.419f]. Dabei wurden in der Vergangenheit viele verschiedene Messmethoden wie zum Beispiel Messbänder oder Hodometer sowie akustische, elektrische und optische Sensoren entwickelt und verwendet. Typische Anwendungen liegen beispielsweise in Fahrerassistenzsystemen [38], in leistungsfähigen Fertigungsverfahren [144] oder in der Überwachung von Gebäuden und großen Strukturen [145]. Je nach nötigem Messbereich und den

2 Grundlagen und Stand der Technik

Anforderungen können unterschiedliche Verfahren zur Anwendung kommen [78, 107].

Zuerst werden im folgenden Kapitel nötige Grundbegriffe definiert sowie eine grobe Übersicht und Einteilung der verschiedenen möglichen Messverfahren gegeben. Anschließend wird die Funktionsweise der hier relevanten laserbasierten Methoden erläutert.

2.2.1 Grundbegriffe und Einteilung

Zuerst wird auf einige grundlegende Begrifflichkeiten für ein einheitliches Verständnis der Abstandsmessung eingegangen.

Prinzipiell findet man in der Literatur häufig die Begriffe *Abstand*, *Distanz*, *Entfernung*, *Position* oder *Weg* [50, 67]. *Position* bezeichnet dabei die Lage eines Punktes in einem Koordinatensystem und stellt somit eine vektorielle Größe dar [67, S.97]. In dieser Arbeit geht es um die Messung von *Abstand*, *Distanz* oder *Entfernung*. Diese Bezeichnungen werden hier gleichwertig verwendet und bezeichnen die Entfernung zwischen der aktiven Fläche des Messgerätes und dem Messobjekt [50, S.127].

Demgegenüber stehen Wegsensoren, die ein positionsgebendes Element, wie zum Beispiel einen Magnet auf dem Messobjekt, verwenden [50, S.127]. Auf solche Sensoren wird im Zuge dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

Der *Abstand* wird dabei in Metern angegeben. Diese Einheit wurde 1875 in 17 Staaten als Maßeinheit eingeführt, wobei der Urmeter dem zehnmillionsten Teil der *Distanz* vom Äquator zum Pol entspricht [116, S.419]. Seit 1993 wird der Meter als die Entfernung angegeben, die in $1/299\,792\,458$ s von Licht im Vakuum zurückgelegt wird.

Generell wird zwischen *absolut* und *relativ* messenden Verfahren unterschieden [159]. Die absoluten Messgeräte geben dabei die absolute Entfernung vom Messgerät zum Messobjekt an, während bei relativen Messgeräten lediglich eine Entfernungsänderung detektiert wird.

Weiterhin werden die Verfahren häufig bezüglich der Dimension der Vermessung unterschieden [46]. So gibt es Verfahren, die die Entfernung nur zu einem Punkt bestimmen, die hier als 1D-Verfahren bezeichnet werden. 2D-Verfahren erkennen die Entfernung einer Linie zum Messgerät, während die 3D-Verfahren die Entfernung einer Oberfläche bestimmen.

Darüber hinaus wird zwischen *berührenden* und *kontaktlosen* Verfahren differenziert [134, S.574]. Bei den berührenden, oder auch taktilen Methoden muss das Messgerät einen direkten Kontakt zur Messoberfläche haben. Berührungslose Ver-

fahren hingegen messen zum Beispiel durch den Einsatz von elektromagnetischen Wellen ohne einen Kontakt zwischen Messgerät und Messobjekt.

Dadurch wird insgesamt deutlich, dass sich die Entfernungsmessung nach vielen verschiedenen Kriterien unterteilen und gliedern lässt. In dieser Arbeit ist die 1D-Messung von absoluten Abständen entscheidend. Deshalb werden im Folgenden nur noch Messprinzipien betrachtet, die dies erfüllen können. In Abbildung 2.18 Übersicht der gängigsten Methoden zur 1D-Abstandsmessung in Anlehnung an [128].figure.caption.65 ist eine beispielhafte Einteilung ausgewählter vorhandener Verfahren gegeben. Eine weitergehende Übersicht über verschiedene Messmethoden ist zum Beispiel [51, S.336] zu entnehmen. Diese würden sich aber auch nach anderen Kriterien unterteilen lassen, wie beispielsweise nach Messbereich [16], nach Messwerterfassung [51, S.338] oder nach aktiven und passiven Verfahren [116, S.6], [107].

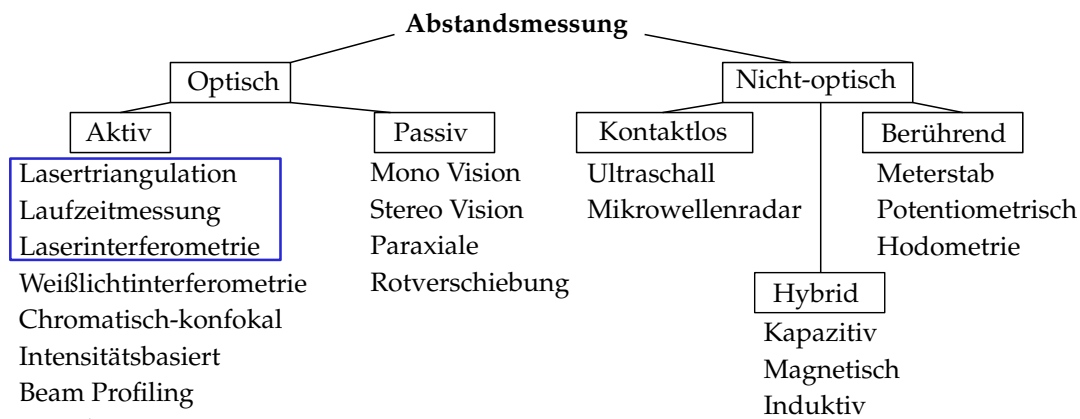


Abbildung 2.18: Übersicht der gängigsten Methoden zur 1D-Abstandsmessung in Anlehnung an [128].

Im weiteren Verlauf wird lediglich auf die drei hervorgehobenen laserbasierten Verfahren eingegangen.

2.2.2 Laserbasierte Abstandsmessung

In den laserbasierten Verfahren zur Abstandsmessung werden hier insbesondere die drei Verfahren Laufzeitmessung, Interferometrie und Lasertriangulation hervorgehoben [37, 78, 109].

Prinzipiell messen die Verfahren den Abstand in einer Dimension, können aber zum Beispiel durch Kombination mit Abtast-Vorrichtungen oder weiteren optischen Komponenten für 3D-Messungen [16, 107] oder mit weiteren mechanischen Komponenten zu Lasertrackern [71] erweitert werden.

Die Vorteile dieser Messverfahren liegen insbesondere in der berührungslosen Messung, die sich durch eine hohe Auflösung und geringe Messzeiten auszeichnet [109, 135]. Als Nachteile lassen sich die vergleichsweise höheren Kosten sowie die Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzungen des Messgerätes oder den Eigenschaften des Ausbreitungsmediums aufführen [134, S.646].

Laufzeitverfahren

Das erste hier vorgestellte Messverfahren ist das optische Laufzeitverfahren (TOF, time-of-flight). Ähnlich wie beim Mikrowellenradar oder bei ultraschallbasierten Abstandssensoren wird dabei aus der Laufzeit eines Signales und dessen bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit auf die Entfernung zurückgeschlossen [50, S.171].

Erste lichtbasierte Laufzeitverfahren sind dabei etwa im Jahre 1936 vorgestellt worden [96]. 1963 wurde dann das erste laserbasierte TOF-Verfahren betrachtet. Ein schematischer Aufbau eines Systems für die Pulslaufzeitmessung ist in Abbildung 2.19 Schematische Darstellung des Laufzeitverfahrens. dargestellt [62]. Eine Sendeeinheit, zum Beispiel eine Laserdiode, sendet einen Lichtpuls in Richtung des Messobjektes. Der Lichtpuls wird davon reflektiert und erreicht nach der Laufzeit t_{tof} den Detektor. Mit Kenntnis der Lichtgeschwindigkeit c_0 und des Brechungsindex n des Ausbreitungsmediums berechnet sich die unbekannte Entfernung d durch [50, S.171]

$$d = \frac{t_{tof} \cdot c_0}{2 \cdot n}. \quad (2.18)$$

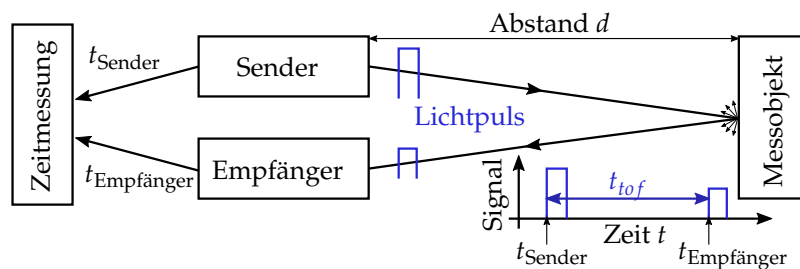


Abbildung 2.19: Schematische Darstellung des Laufzeitverfahrens.

In der Abwandlung des Phasenlaufzeitverfahrens (AMCW, amplitude modulated continuous wave) wird das Laserlicht kontinuierlich ausgesandt und dabei durch Amplitudenmodulation moduliert. Durch den Phasenversatz zwischen gesendetem und empfangenem Licht kann dann der Abstand berechnet werden [50, S.171],

[111].

Im Frequenzlaufzeitverfahren (FMCW, frequency modulated continuous wave) wird die Frequenz des emittierten Laserlichtes moduliert [50, S.171], [138]. Ähnlich wie im AMCW-Verfahren kann hier aus der Frequenzdifferenz zwischen Sendee- und Empfangsfrequenz die Entfernung berechnet werden.

Die Vorteile des TOF-Prinzips liegen in seinem hohen Messbereich und der hohen zeitlichen Auflösung [90] sowie in der Fähigkeit, durch den Einsatz von Scannern 3D-Koordinaten zu messen, wie es in Light Detection and Ranging (LiDAR)-Systemen [60] angewendet wird.

Der große Nachteil der TOF-Verfahren ist eine relativ geringe Auflösung der Abstandswerte von etwa einigen Millimetern, die typischerweise durch die Messunsicherheit der Zeitmessung begrenzt ist [57, 144].

Typische Anwendungen liegen im Bereich der industriellen Fertigung [116, S.426], der Verkehrsüberwachung [109, S.88] und dem autonomen Fahren [157].

Laserinterferometrie

Ein weiteres laserbasiertes Verfahren zur Abstandsmessung ist die sogenannte Laserinterferometrie. Dabei wird die Interferenz von Licht verwendet, um die Entfernung mit Subwellenlängenauflösung zu messen [78]. Das sogenannte Michelson-Interferometer stellt dabei die einfachste Variante dar und wurde 1882 erstmalig von A. A. Michelson zur interferometrischen Abstandsmessung eingesetzt [29, S.145]. Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 2.20 Schematische Darstellung der Laserinterferometrie anhand eines Michelson-Interferometers in Anlehnung an [50].figure.caption.72 dargestellt. Der Laserstrahl wird an einem Strahlteiler ST aufgeteilt. Die vom Referenz- und Messspiegel reflektierten Strahlen werden anschließend wieder durch den Strahlteiler auf einem Detektor überlagert. In Abhängigkeit der optischen Pfaddifferenz und damit einer Phasenverschiebung kommt es dabei zur konstruktiven oder destruktiven Interferenz zwischen den beiden Strahlen, wie es beispielhaft anhand der zwei Wellenzüge illustriert ist. Wird nun der Messspiegel verschoben, ändert sich die optische Pfadlänge des Messstrahles. Somit wird durch eine Abstandsänderung Δd die Intensitätsverteilung I auf dem Detektor moduliert, wie in Abbildung 2.20 Schematische Darstellung der Laserinterferometrie anhand eines Michelson-Interferometers in Anlehnung an [50].figure.caption.72 dargestellt ist. Durch das Ermitteln der Anzahl N der Nulldurchgänge kann dann durch [116, S.424]

$$\Delta d = N \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2.19)$$

2 Grundlagen und Stand der Technik

die relative Abstandsänderung in Abhängigkeit der verwendeten Wellenlänge λ ermittelt werden. Da die Wellenlänge des Lichtes als Referenz dient, müssen die Frequenz des Lasers sowie der Brechungsindex des durchlaufenen Mediums möglichst genau bekannt sein.

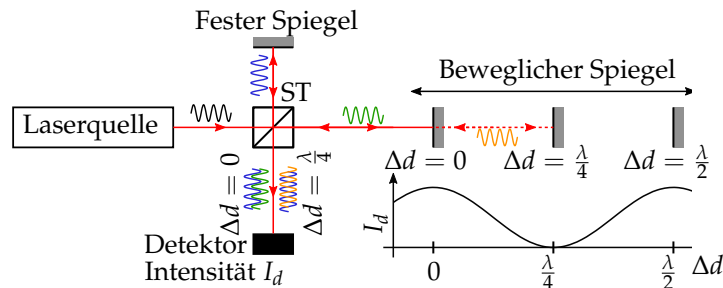


Abbildung 2.20: Schematische Darstellung der Laserinterferometrie anhand eines Michelson-Interferometers in Anlehnung an [50].

Dieser einfache interferometrische Aufbau hat das Problem, dass er nur relative Abstandsänderungen messen kann. Verschiedene Varianten umgehen dieses Problem, um so auch eine absolute Entfernungsmessung zu ermöglichen. In der Mehrwellenlängen-Interferometrie werden parallel mehrere Wellenlängen emittiert [20]. Durch das damit erhaltene Interferenzmuster kann anschließend die absolute Entfernung bestimmt werden. In der ‚wavelength scanning‘-Interferometrie wird die Wellenlänge des Lasers durchgestimmt [11], was zu einem ähnlichen Effekt führt.

Ein weiteres ähnliches Verfahren ist die Laser-Feedback-Interferometrie [73]. Dort interferiert das reflektierte Licht direkt im Laserresonator und führt dadurch zu einer Modulation der Laserintensität und Leistungsaufnahme, wodurch wiederum der absolute Abstand berechnet werden kann. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der Messergebnisse ist die Anwendung von Frequenzkämmen in Interferometern [130, 140].

Die allgemeinen Vorteile interferometrischer Systeme liegen in der sehr hohen Genauigkeit, bis hinunter zu einer relativen Messunsicherheit von 10^{-10} über lange Messbereiche von bis zu mehreren Kilometern [144]. Zu den Nachteilen zählen die hohen Kosten und sperrigen Aufbauten, die mit einem kommerziellen interferometrischen System aufgrund seiner vielen und komplexen optischen Komponenten verbunden sind, sowie Stabilitätsprobleme [13, 126].

Typische Anwendungen sind aufgrund der hochgenauen Messungen die Kalibrierung von Längenstandards [29] oder die Prozessüberwachung in der industriellen Präzisionsfertigung [116].

Lasertriangulation

In der Triangulation wird die Entfernung durch geometrische Betrachtungen errechnet. Das Messprinzip wurde schon etwa im Jahre 600 vor Christus vom griechischen Mathematiker Thales für die Vermessung der Pyramiden von Gizeh verwendet [37]. Die Lasertriangulation wurde erstmalig im Jahre 1973 von D. Burrows und J. Heartwin zur Vermessung eines Meeresbodens eingesetzt [150]. Ein beispielhafter Aufbau ist in Abbildung 2.21 Grundlegender Aufbau eines Lasertriangulationssystems in Anlehnung an [13]. Bei einer Abstandsänderung verschiebt sich der Bildpunkt auf dem Detektor. Licht wird von einem Laser in Richtung des Messobjektes emittiert und von diesem diffus gestreut. Ein Teil des Streulichtes wird dann durch eine Linse auf einen ortsauflösenden Detektor abgebildet. Ändert sich der Abstand d vom Messgerät zum Messobjekt, verschiebt sich der Bildpunkt auf dem Detektor um Δv . Anhand der Position v auf dem Detektor und des bekannten Basisabstandes b , sowie der Brennweite f der Linse, berechnet sich der absolute Abstand d durch [50]

$$d = \frac{b \cdot f}{v}. \quad (2.20)$$

Durch den Einsatz von einer Laserlinie kann statt eines 1D-Abstandes auch das 2D-Profil einer Oberfläche vermessen werden, bzw. bei der sogenannten Streifenprojektion auch das 3D-Profil einer Oberfläche [62]. Durch den Einsatz von Abtastvorrichtungen können außerdem Laserscanner umgesetzt werden [115].

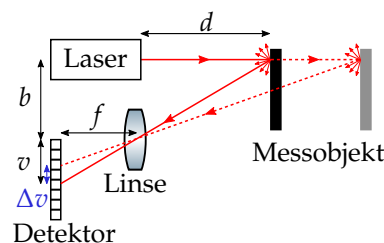


Abbildung 2.21: Grundlegender Aufbau eines Lasertriangulationssystems in Anlehnung an [13]. Bei einer Abstandsänderung verschiebt sich der Bildpunkt auf dem Detektor.

Die Lasertriangulation ist aufgrund ihres einfachen, kostengünstigen und robusten Betriebs und der hohen Messraten eine in industriellen Anwendungen häufig verwendete Methode [13, 52].

Nachteile sind die mit zunehmendem Messabstand abnehmende Auflösung und die starke Abhängigkeit von der Strahlstabilität der Laserquelle sowie den Oberflächeneigenschaften des Messobjektes [98, 141]. Weiterhin führt ein zunehmender

Messabstand zu einer quadratischen Zunahme der Messunsicherheit [94].

Typische Anwendungen liegen in der Fertigung und Automatisierungstechnik [116, S.431], in der Dickenmessung von Objekten [116, S.102] sowie in der Qualitätskontrolle [29, S.273]. Aktuelle Anwendungsgebiete in Industrie und Forschung sind zum Beispiel die Überwachung des Füllstands von Pulver bei der Herstellung von Tabletten [32], die Rekonstruktion von Zahnradprofilen [132], die Messung der Dicke dünner Schichten wie der Hornhautschicht des Auges [2] oder für den Autofokus von Inspektionssystemen [164].

Die meisten kommerzialisierten Triangulationssysteme haben typischerweise eine relative Messunsicherheit von etwa 10^{-3} bis 10^{-4} bei einem Arbeitsabstand von 20 mm bis 1000 mm mit einem Messbereich von ± 1 mm bis ± 250 mm [49], obwohl es einige wenige Systeme mit einem Messbereich von bis zu mehreren Metern [15] gibt. Liebe et al. [78] stellten ein Lasertriangulationssystem für einen Messbereich von 0,5 m bis 10 m vor, das eine Genauigkeit von etwa 1,5 mm in einer Entfernung von 1 m erreicht.

2.3 Laserpunkterfassung

Wie zuvor beschrieben, wird in der Lasertriangulation die Position des Laserpunktes auf dem Detektor zur Berechnung der Entfernung zum Messobjekt verwendet. Die räumliche Position des Bildpunkts kann dabei durch bildverarbeitende Algorithmen bestimmt werden. Allgemein handelt es sich dabei um die Erkennung eines kreisförmigen Lichtpunkts in einem digitalen Bild, wie sie zum Beispiel auch in Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren oder Autokollimatoren angewendet wird [42]. Die Bestimmung der Position des Bildpunkts eines Lasers, dem sogenannten *Laserpunktzentrum* (LPZ), wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *Laserpunkterfassung* bezeichnet.

In der Literatur sind viele verschiedene Methoden zur Laserpunkterfassung vorgestellt worden, darunter die Kreisanpassung [162], die Hough-Transformation [153], die Schwerpunktmethode [136] oder die Gaußanpassung [8]. Grundsätzlich lassen sich diese Algorithmen in kantenbasierte Algorithmen und intensitätsbasierte Algorithmen unterteilen [82]. Die kantenbasierten Algorithmen nutzen die Kanteninformation eines Bildes, während innerhalb der intensitätsbasierten Ansätze das Intensitätsprofil des Laserpunktes verwendet wird.

Ein allgemeiner Ablauf der Laserpunkterfassung ist in Abbildung 2.22 Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen. figure.captio.77 zu sehen, der die Schritte Bildaufnahme, Filterung, Segmentierung, morphologi-

sche Filterung, Kantendetektion und Positionsberechnung umfasst [162].

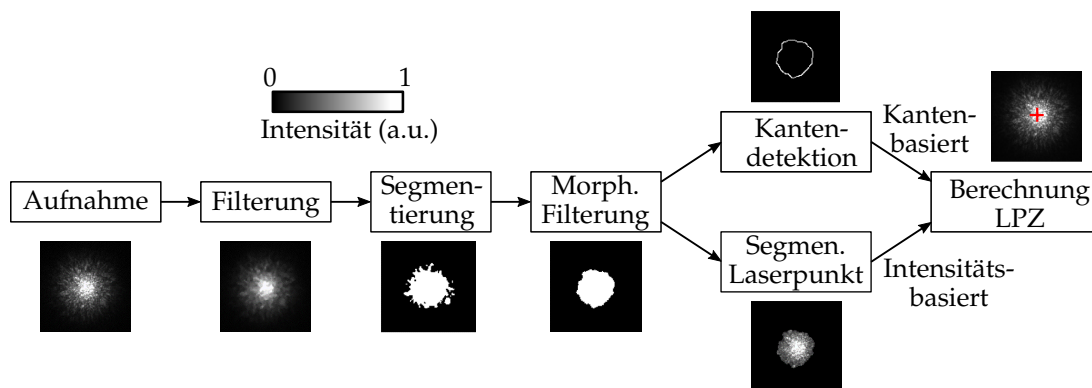


Abbildung 2.22: Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen.

Die verschiedenen Schritte dieser Ansätze werden in den folgenden Abschnitten kurz erläutert. Da es viele verschiedene Möglichkeiten für die Realisierung der genannten Schritte gibt, werden hier nur die in der Laserpunkterfassung am häufigsten verwendeten Methoden beschrieben. Eine detailliertere Ausführung ist in den angegebenen Referenzen sowie der Literatur [17, 55, 101, 127] zu finden.

2.3.1 Bildvorverarbeitung

Filterung

Die aufgenommenen Bilder sind von Störungen überlagert, zum Beispiel durch Umgebungslicht, dem thermischen Rauschen des Detektors oder Schrotrauschen [59, 87]. Eine weitere Rauschquelle ist das Speckle-Rauschen, das durch die Streuung von kohärentem Laserlicht an der rauen Messoberfläche entsteht [62]. Da sich Rauschen negativ auf die Bildqualität und damit auf die Erkennung des Laserpunktzenters auswirkt, können Filterfunktionen verwendet werden, um das Bild zu glätten und das Rauschen zu reduzieren [101, S.132ff]. Dadurch wird die Qualität des Bildes verbessert, was zu einem genaueren Ergebnis führen kann. Bei der Laserpunkterfassung wurden bisher viele verschiedene Filter eingesetzt, zum Beispiel Median-, Gauß- oder Mittelwertfilter [167]. Darüber hinaus stehen im Bereich der Bildverarbeitung verschiedene andere Filterverfahren zur Verfügung, zum Beispiel Wiener- oder Wavelet-Filter [87, 89].

Segmentierung

Im Bereich der Laserpunkterfassung besteht das Ziel der Bildsegmentierung darin, das aufgenommene Bild in den Vordergrund, bzw. den Laserpunkt, und den Hintergrund zu unterteilen. Dadurch wird Rauschen, das sich außerhalb des Laserpunktes befindet, unterdrückt. Dies kann beispielsweise mittels der histogramm- oder modellbasierten Segmentierung erfolgen [55, S.541ff].

Bei der histogrammbasierten Segmentierung werden Pixel, deren Intensität einen bestimmten Schwellwert überschreiten, als Vordergrund betrachtet, während die dunkleren Pixel als Hintergrund betrachtet und auf den Intensitätswert ‚Null‘ gesetzt werden [101, S.104]. Der Schwellwert kann entweder auf einen statischen Wert gesetzt oder adaptiv anhand des Histogramms ermittelt werden. Aufgrund variierender Umgebungsbedingungen ist es schwierig, einen angemessenen statischen Schwellwert festzulegen. Folglich besteht der gebräuchlichste Ansatz darin, den Schwellwert dynamisch zu berechnen. Eine typische Methode hierfür ist der Otsu-Algorithmus [127, S.213], [103, 104].

Modellbasierte Ansätze segmentieren das Bild nach bestimmten Merkmalen [55, S.551ff]. Im Falle der Laserpunkterfassung kann eine Segmentierung anhand der bekannten Kreisform des Laserpunktes erfolgen. So können alle Pixel innerhalb eines bestimmten Radius um das Laserpunktzentrum als Vordergrund betrachtet und die Pixel außerhalb des Kreises vernachlässigt werden. Dies wird später bei den hybriden Algorithmen angewendet.

Morphologische Filterung

Nach der Segmentierung enthält der Bildfleck häufig Löcher oder kleine Fragmente außerhalb des Laserpunktes, wie in Abb. 2.22 Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen. [figure.caption.77](#) zu sehen ist. Mit morphologischen Operationen können solche Fragmente und Löcher eliminiert werden [55, S.561f]. Dies ist besonders wichtig, wenn in einem späteren Schritt die Kante berechnet werden soll, da Fragmente und Löcher zu falsch registrierten Kantenpunkten führen und somit die Genauigkeit der Laserpunkterfassung beeinträchtigen.

Die morphologische Filterung besteht in der Laserpunkterfassung typischerweise aus zwei Operationen, dem sogenannten Öffnen und Schließen [162]. Zuerst wird ein kreisförmiges strukturierendes Element verwendet, um die Fragmente zu löschen, die kleiner als das strukturierende Element sind. In einem anschließenden Schritt werden durch den Schließvorgang die Löcher innerhalb des Bildflecks

gefüllt. Dies führt zu einer weiteren Rauschreduktion im Bild. Dabei muss die Größe des strukturierenden Elements passend gewählt werden.

Kantendetektion

Für kantenbasierte Algorithmen wird anschließend die Kante des Laserpunktes extrahiert. Dabei muss eine Veränderung der Grauwerte im Bild erkannt werden [55, S.367ff]. Dies kann mit Hilfe verschiedener Kantendetektoren wie zum Beispiel Canny [118], Sobel [154] oder SUSAN [161] erfolgen. All diese Algorithmen berechnen den Rand des Bildflecks auf Pixelebene. Dazu wird das Bild im Allgemeinen mit einer Maske gefaltet, welche zur Berechnung einer Gradientenmatrix des Bildes führt. Gradienten über einem bestimmten Schwellenwert werden dann als Randpunkte des Bildes betrachtet, wie in Abb. 2.22 Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen. figure.caption.77 zu sehen ist.

2.3.2 Positionsbestimmung eines Laserpunktes

Nach der Bildvorverarbeitung wird der Mittelpunkt des Laserpunktes berechnet. In diesem Abschnitt werden die am häufigsten verwendeten Ansätze sowohl für kanten- als auch für intensitätsbasierte Algorithmen vorgestellt.

In den folgenden Erläuterungen hat das digitale Bild eine Größe von $M \times N$ Pixel, während $I(i, j)$ die Intensität des Pixels mit der Koordinate (i, j) bezeichnet. Für kontinuierliche Werte werden die Koordinaten (v, y) verwendet. Das berechnete und wahre Zentrum des Laserspots wird allgemein als (v_b, y_b) bzw. (v_w, y_w) bezeichnet.

Kantenbasierte Algorithmen

Kreisanpassung Die Kreisanpassung berechnet das Zentrum und den Radius des Punktes mit Hilfe seiner Kantenpunkte, die im Schritt der Kantendetektion extrahiert wurden. Dazu wird der Kreis [167]

$$(v - v_b)^2 + (y - y_b)^2 = r^2 \quad (2.21)$$

an die gegebenen Kantenpunkte angepasst. Dabei bezeichnen (v_b, y_b) und r den Mittelpunkt bzw. den Radius des Bildflecks. Für jeden Kantenpunkt (v_k, y_k) lässt sich das Residuum ϵ_k durch

$$\epsilon_k = (v_k - v_b)^2 + (y_k - y_b)^2 - r^2 \quad (2.22)$$

darstellen. Die Anpassung geschieht dann durch die Methode der kleinsten Quadrate, wobei die Quadratsumme der Residuen minimiert wird und somit der Mittelpunkt (v_b, y_b) und der Radius r des Laserpunktes ermittelt werden [162]. Das Minimierungsproblem kann analytisch gelöst werden, was zu einer zeiteffizienten und genauen Methode führt.

Ein Vorteil der kantenbasierten Algorithmen ist, dass sie auch zu einem Wert für den Radius führen, was die Möglichkeit einer zusätzlichen modellbasierten Segmentierung eröffnet. Der Algorithmus kann durch die Verwendung von Subpixelkanten weiter verbessert werden [81].

Hough-Transformation Eine weitere Methode, die sich auf die Kanten des Laserpunktes stützt, ist die so genannte zirkuläre Hough-Transformation [155], [127, S.239f]. Dies ist ein gebräuchlicher Algorithmus zur Erkennung kreisförmiger Objekte in digitalen Bildern. Dabei werden die Kantenpunkte (v_k, y_k) aus dem Bildraum in den Parameterraum mit dem Parametersatz (v_b, y_b, r) transformiert [153], siehe Abbildung 2.23. Die Hough-Transformation wandelt die Kantenpunkte (v_k, y_k) im Bildraum (links) in den Parameterraum (rechts). Da um jeden transformierten Kantenpunkt Kreise mit verschiedenen Radien r gezogen werden, bilden sich im 3D-Parameterraum Kegel aus. Der Punkt in diesem Raum, der von den meisten Kreisen geschnitten wird, stellt die Parameter (v_b, y_b, r) des Kreises dar (Abbildung nach [84]). Für jeden transformierten Kantenpunkt wird ein Kreis mit Radius r um ihn herum erzeugt. Für jeden Punkt (v_b, y_b) auf dem erzeugten Kreis wird die Akkumulatormatrix $H(v_b, y_b, r)$ um den Wert 1 inkrementiert. Dies geschieht iterativ für verschiedene Werte von r . Das Zentrum des Laserpunktes wird dann durch die Koordinaten (v_b, y_b) bestimmt, an denen die Akkumulatormatrix H ihr Maximum aufweist.

Die Nachteile dieses Algorithmus liegen zum einen in seinem hohen Rechenaufwand [53]. Ein weiteres Problem besteht darin, dass der Mittelpunkt nur mit einer Genauigkeit auf Pixelebene berechnet wird. Folglich wird die Hough-Transformation häufig in Kombination mit einem anderen Algorithmus verwendet, um das Ergebnis anschließend weiter zu verfeinern [153].

Intensitätsbasierte Algorithmen

Schwerpunktmethode Eine einfache und anschauliche Methode der intensitätsbasierten Algorithmen stellt die Berechnung des Flächenschwerpunktes dar [101, S.529], wie es zum Beispiel auch mit dem Flächenschwerpunkt in der Mechanik gemacht wird. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dies als Schwerpunktmethode

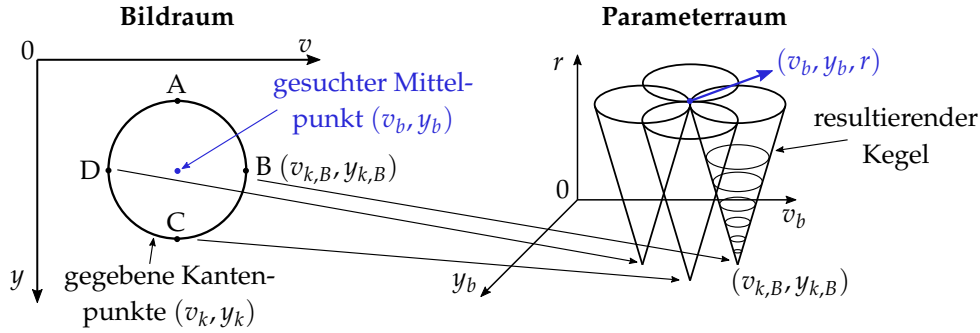


Abbildung 2.23: Die Hough-Transformation wandelt die Kantenpunkte (v_k, y_k) im Bildraum (links) in den Parameterraum (rechts). Da um jeden transformierten Kantenpunkt Kreise mit verschiedenen Radien r gezogen werden, bilden sich im 3D-Parameterraum Kegel aus. Der Punkt in diesem Raum, der von den meisten Kreisen geschnitten wird, stellt die Parameter (v_b, y_b, r) des Kreises dar (Abbildung nach [84]).

bezeichnet. Dabei wird das LPZ durch eine intensitätsgewichtete Berechnung des geometrischen Mittelpunkts ermittelt:

$$v_b = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N j \cdot I^q(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I^q(i, j)} \quad \text{und} \quad y_b = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i \cdot I^q(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I^q(i, j)}. \quad (2.23)$$

Normal werden die Intensitätswerte mit dem Exponenten $q = 1$ gewichtet. Zur Erhöhung der Genauigkeit kann der Algorithmus auch als quadratische Schwerpunktmethode mit $q = 2$ verwendet werden, so dass hellere Pixel einen stärkeren Einfluss auf den Mittelpunkt haben [119, 136].

Da die Berechnung des Flächenschwerpunktes eine einfache, aber gleichzeitig genaue und effiziente Methode ist, ist sie der am häufigsten verwendete Subpixel-Algorithmus bei der Laserpunkterfassung [123]. Ein Nachteil des Algorithmus ist, dass der Laserpunkt eine regelmäßige Form und Intensitätsverteilung haben sollte, um zu guten Ergebnissen zu führen, und dass er leicht durch Umgebungslicht beeinträchtigt werden kann [21].

Gaußanpassung Die Methoden der Gaußanpassung [8] oder der gaußschen Interpolation [123] nutzen die Gauß-Verteilung der Lichtintensität, die ein Laserpunkt typischerweise aufweist. Der Mittelpunkt wird dann durch Anpassung einer Gaußkurve an das Intensitätsprofil bestimmt. Die kontinuierliche Intensitätsverteilung $I(v, y)$ ist im Allgemeinen gegeben durch [27]

$$I(v, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma_v\sigma_y} \exp\left(-\frac{(v - v_b)^2}{2\sigma_v^2}\right) \exp\left(-\frac{(y - y_b)^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad (2.24)$$

wobei I_0 die Gesamtintensität und σ_v sowie σ_y die Standardabweichungen in v - bzw. y -Richtung sind. Ähnlich wie zuvor bei der Kreisanpassung wird diese Kurve an das gemessene Intensitätsprofil angepasst. Dies geschieht erneut durch das Aufstellen von Residuen und der Minimierung des sogenannten Problems der kleinsten Quadrate und liefert als Ergebnis den Mittelpunkt (v_b, y_b) des Laserpunktzentrums.

Die Gaußanpassung wird als ein sehr genauer Ansatz angesehen. Sie ist jedoch rechenintensiv, da mehrere Parameter in einem iterativen Verfahren optimiert werden müssen [21].

Hybride Algorithmen

In einem fortgeschrittenen Ansatz können die verschiedenen Algorithmen auch miteinander kombiniert werden. Dies wird auch als hybride Algorithmen bezeichnet [21]. Zu den bereits untersuchten hybriden Algorithmen gehören die Kombination von Hough-Transformation und Schwerpunktmethode [153], Kreisanpassung und Schwerpunktmethode [118], Schwerpunktmethode und gaußscher Interpolation [123] sowie Schwerpunktmethode und 2D-Gaußanpassung [21]. Dabei wurde jeweils die erste Methode für eine verfeinerte Segmentierung des Laserpunktes bzw. für eine erste grobe Abschätzung des Mittelpunktes verwendet. Die zweite Methode wurde daraufhin angewandt, um ein verbessertes Ergebnis für das Laserpunktzentrum zu erzielen.

In Abb. 2.22 Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen. [figure.caption.77](#) kann man deutlich erkennen, dass die Segmentierung des Laserpunktes eine große Herausforderung darstellt, da er ungleichmäßig vom Hintergrund getrennt wird. Folglich beeinflusst diese ungleichmäßige Form die Leistung der intensitätsbasierten Algorithmen. Um dies zu vermeiden, wird ein erweitertes Flussdiagramm gemäß [Abb. 2.24](#) Erweitertes Ablaufdiagramm der Laserpunkterkennung nach [172]. In einem zweiten Schritt kann die Position des Laserpunktes durch eine genauere Segmentierung oder durch eine Interpolation der Position weiter verbessert werden. [figure.caption.96](#) eingeführt.

Mit einem kantenbasierten Algorithmus, zum Beispiel der Kreisanpassung, können ein erster Mittelpunkt und Radius für den Laserpunkt berechnet werden. Unter Berücksichtigung dieser Informationen kann das Bild mittels einer modellbasierten Segmentierung aufgeteilt werden. Mit dieser verbesserten Segmentierung kann anschließend der Mittelpunkt mit einem intensitätsbasierten Algorithmus berechnet werden. Zusätzlich kann die Position des Laserpunktzentrums unter Verwendung der Intensitätsinformation der benachbarten Pixel interpoliert wer-

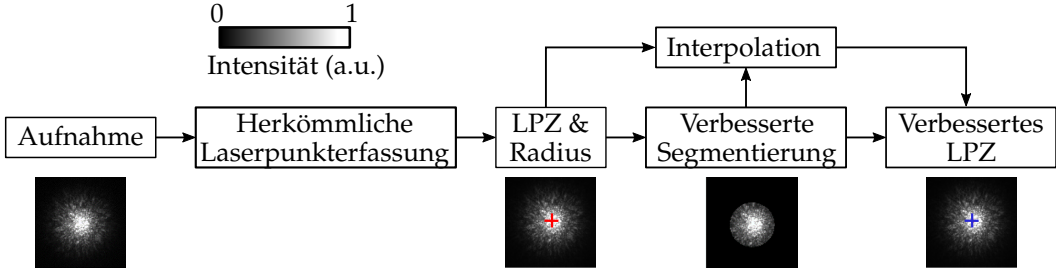


Abbildung 2.24: Erweitertes Ablaufdiagramm der Laserpunkterkennung nach [172]. In einem zweiten Schritt kann die Position des Laserpunkts durch eine genauere Segmentierung oder durch eine Interpolation der Position weiter verbessert werden.

den.

3 Lasertriangulation

Aufgrund der genannten Vorteile gegenüber den anderen optischen Messverfahren wird in dieser Arbeit ein Lasertriangulationssystem eingehend betrachtet und optimiert. Wegen der Projektanforderungen soll dieses in einem Messbereich von 800–8000 mm eingesetzt werden können. Dazu werden in diesem Kapitel detaillierte Grundlagen und Hintergründe erläutert. Zuerst wird auf die Funktionsweise und die Auslegung eines Lasertriangulationssystems eingegangen. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 Fehlereinflüsse und Limitierungensection.124 die verschiedenen Fehlereinflüsse behandelt, die die Genauigkeit von Lasertriangulationssystemen limitieren. Darauf aufbauend wird anschließend ein umfassendes Fehlermodell hergeleitet, das die Auswirkung dieser Fehlerquellen auf die Genauigkeit eines Lasertriangulationssystem (LTS) darstellt. In Abschnitt 3.4 Methoden zur Fehlerkompensationsection.144 werden die in der Vergangenheit vorgestellten Methoden zur Vermeidung und Kompensation von möglichen Fehlern aufgeführt.

3.1 Auslegung eines Lasertriangulationssystems

Das grundlegende Prinzip der Lasertriangulation wurde bereits in Kapitel 2.2.2 Lasertriangulationsection*.73 vorgestellt. Dabei waren die Ebenen der Linse und des Detektors senkrecht zum Laser angeordnet. In der Regel werden die Komponenten aber nach der sogenannten Scheimpflugbedingung ausgerichtet [134, S.662]. Das bedeutet, dass der Detektor so in Relation zur Linse positioniert wird, dass sich die Linsenebene und die Detektorebene mit dem Laser in einem Punkt SB schneiden, wie es in Abbildung 3.1(a)figure.caption.100 dargestellt ist. Dies führt dazu, dass der Laserpunkt über den gesamten Messbereich möglichst scharf abgebildet wird. Der gesuchte Abstand d berechnet sich dabei durch [169]

$$d = \frac{f}{\cos \alpha} \left(1 + \frac{\sqrt{b^2 + \left(b \tan \alpha - \frac{f}{\cos \alpha} \right)^2}}{v_L + v_{\text{offset}}} \right) - b \tan \alpha + l_z. \quad (3.1)$$

Der Basisabstand b (Abstand zwischen Laser und Linsenmitte in x -Richtung), der Linsenversatz l_z (Abstand zwischen Laser und Linsenmitte in z -Richtung),

3 Lasertriangulation

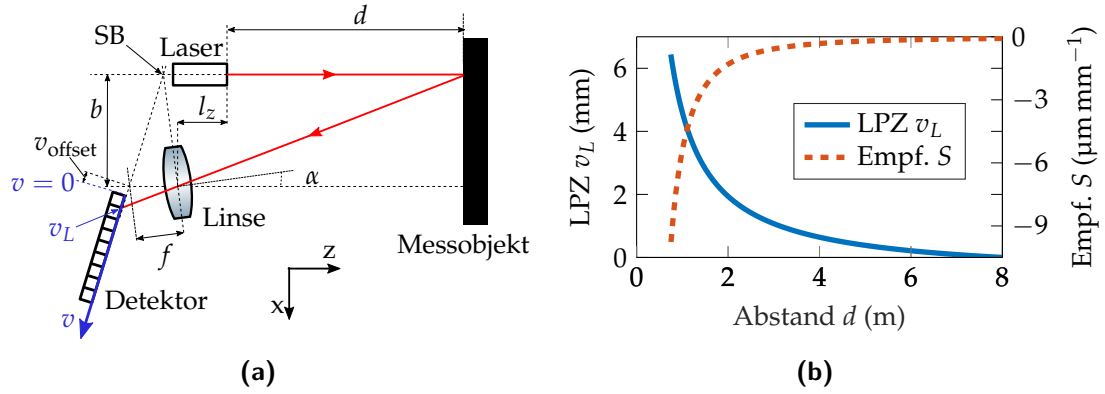


Abbildung 3.1: (a) Schematische Darstellung eines Lasertriangulationssystems mit nach der Scheimpflugbedingung angeordnetem Laser, Linse und Detektor nach [169]. (b) Zusammenhang zwischen dem Laserpunktzentrum v_L auf dem Detektor und dem Abstand d nach Gleichung (3.1Auslegung eines Lasertriangulationssystemequation.99) sowie der Empfindlichkeit des Aufbaus, die durch die Verschiebung des Laserpunktzentrums in Abhängigkeit einer Abstandsänderung definiert ist.

die Brennweite f der Linse, die Detektorlänge w_{det} , der Detektor-Offset v_{offset} (Verschiebung der Detektorkante in v -Richtung), die Detektorverkipfung β und die Neigung α der Linse sind bekannte Designparameter des optomechanischen Aufbaus, während das Laserpunktzentrum (LPZ) v_L auf dem Detektor mit Bildverarbeitungsalgorithmen gemessen wird. Der Zusammenhang zwischen dem Abstand d und dem LPZ v_L für das in dieser Arbeit verwendete Setup ist in Abbildung 3.1(b)figure.caption.100 in blau dargestellt. Dieser Zusammenhang kann entweder durch eine Berechnung mit den bekannten Parametern nach Gleichung (3.1Auslegung eines Lasertriangulationssystemequation.99) oder durch eine Kalibrierung anhand von Messdatenpunkten erreicht werden. Da die Parameter aufgrund von Fertigungsprozess toleranzen und optischen Aberrationen in einem realen optischen System nicht genau bekannt sind, ist typischerweise ein Kalibrierungsprozess erforderlich [165].

Wird Gleichung (3.1Auslegung eines Lasertriangulationssystemequation.99) nach dem LPZ v_L aufgelöst, kann durch die Ableitung von v_L nach dem Abstand d die Empfindlichkeit S des Messsystems berechnet werden:

$$S = \frac{d(v_L)}{d(d)} = \frac{-\frac{\cos \alpha}{f} \sqrt{b^2 + \left(b \tan \alpha - \frac{f}{\cos \alpha}\right)^2}}{\left(\frac{\cos \alpha}{f} (d + b \tan \alpha - l_z) - 1\right)^2} \quad (3.2)$$

Folglich ergibt sich dafür ein Wert in $\mu\text{m mm}^{-1}$ oder px mm^{-1} . Umso größer

die Empfindlichkeit ist, desto genauer kann prinzipiell gemessen werden. Wie in Gleichung (3.2) und Abb. 3.1(b) in rot deutlich wird, sinkt der Betrag der Empfindlichkeit des LTS mit zunehmendem Abstand quadratisch ab.

Auswirkung ausgewählter Parameter auf das LTS

Durch passende Auslegung des geometrischen Aufbaus können die Empfindlichkeit und der Messbereich des LTS eingestellt werden. So nimmt $|S|$ mit einer steigenden Basis b oder größeren Brennweite f zu. Gleichzeitig nimmt aber der mögliche Messbereich MB ab. Dieser ergibt sich aus dem minimalen Messabstand d_{\min} und maximalen Messabstand d_{\max} mit $MB = d_{\max} - d_{\min}$. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 3.2 für verschiedene Werte der Basis bzw. Brennweite dargestellt. Dabei gelten für die restlichen Parameter die Werte, wie sie am Ende dieses Kapitels vorgestellt werden, siehe Tabelle 3.2 für den Messbereich wurde einmal der minimale Messabstand auf $d_{\min} = 0,75$ m und einmal der maximale Messabstand $d_{\max} = 8$ m fixiert. Hier wird deutlich, dass sich der maximale Messabstand wesentlich stärker ändert als der minimale Messabstand. Darauf wird auch noch später in diesem Kapitel eingegangen.

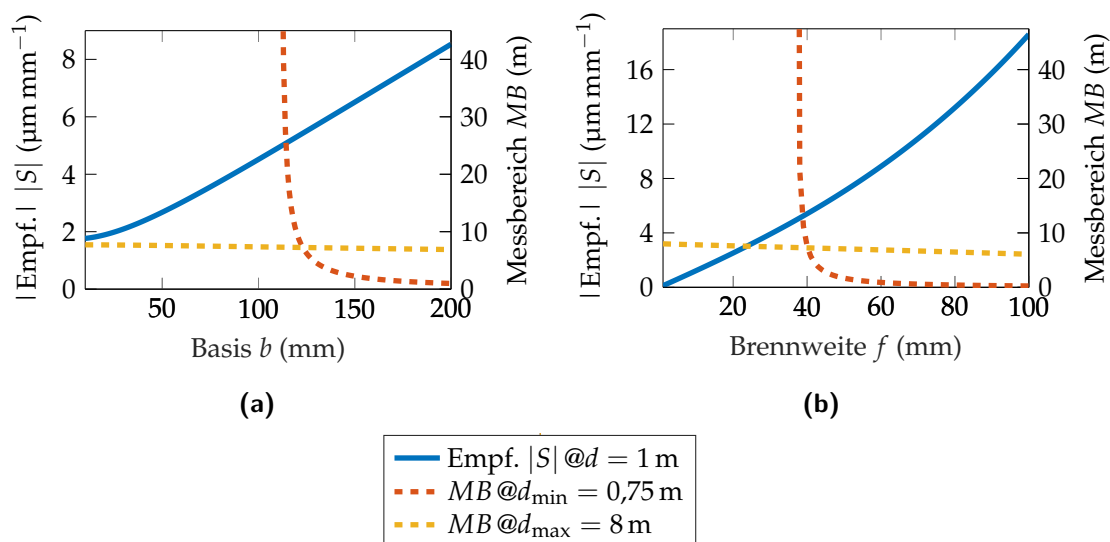


Abbildung 3.2: Empfindlichkeit und Messbereich eines LTS in Abhängigkeit von (a) seiner Basis b , (b) seiner Brennweite f .

3 Lasertriangulation

In Tabelle 3.1 Auswirkung der wichtigsten Designparameter eines Lasertriangulationssystems. table.caption.115 sind die Designparameter aufgeführt, die einen signifikanten Einfluss auf die wesentlichen Eigenschaften des LTS haben. So kann zum Beispiel die Empfindlichkeit sowohl über die Basis b , als auch über die Brennweite f erhöht werden. Gleichzeitig führen aber auch beide Parameter zu einer Verringerung des Messbereichs und einer Erhöhung der Abmessungen des LTS. Folglich gibt es verschiedene Möglichkeiten und Kombinationen, wie die Designparameter an die gewünschten Anforderungen angepasst werden können.

Tabelle 3.1: Auswirkung der wichtigsten Designparameter eines Lasertriangulationssystems.

Parameter	Auswirkung auf LTS
Basis $b \uparrow$	Empfindlichkeit \uparrow Abmessungen \uparrow Messbereich \downarrow
Brennweite $f \uparrow$	Empfindlichkeit \uparrow Abmessungen \uparrow Messbereich \downarrow
Detektorlänge $w_{\text{det}} \uparrow$	Messbereich \uparrow
Verschiebung Detektor $v_{\text{offset}} \uparrow$	Minimaler Messabstand \downarrow Maximaler Messabstand $\downarrow\downarrow$

Berechnung der Designparameter

In dieser Arbeit wird zur Auslegung des Aufbaus zuerst die Position der Linse bezogen auf den Laser durch den Basisabstand b und die z-Verschiebung l_z festgelegt. Diese müssen entsprechend den gewünschten maximalen Abmessungen des Messgerätes angeordnet werden. Wie zuvor dargestellt steigt bei einem größeren Basisabstand die Empfindlichkeit des Messgerätes, jedoch nimmt auch seine Dimension zu [94, 105].

Anschließend wird der Winkel α der Abbildungslinse definiert. Dabei wird dieser so festgelegt, dass die optische Achse der Linse den Laserstrahl in dem Abstand schneidet, der etwa in der Mitte des gewünschten Messbereichs liegt, bzw. den Hauptmessabstand darstellt. Dies hat den Vorteil, dass dort die optischen Aberrationen minimal sind und gleichzeitig möglichst viel Licht durch die Linse in das Messgerät eintreten kann. Damit ist die Position und Ausrichtung der Abbildungs-

optik festgelegt.

Die Brennweite der Linse muss dann in Anbetracht der Länge des Detektors so ausgelegt werden, dass das gewünschte Sichtfeld (field of view, FOV) und damit der gewünschte Messbereich abgedeckt sind. Allgemein gilt, dass eine kleinere Brennweite einen größeren Messbereich bedeutet, während eine größere Brennweite zu einer höheren Empfindlichkeit und gleichzeitig einem größeren Messgerät führt [94].

In Abhängigkeit dieser Parameter wird dann die Position und Ausrichtung des Detektors nach der Scheimpflugbedingung ermittelt. Der Winkel β des Detektors berechnet sich dabei zu

$$\beta = \arctan \left(\frac{f}{b \cos \alpha} - \tan \alpha \right), \quad (3.3)$$

während sich der Aufpunkt v_0 des Detektors durch den Zusammenhang

$$v_{0,x} = b \quad \text{und} \quad v_{0,z} = -\frac{f}{\cos \alpha} - l_z \quad (3.4)$$

ergibt. Dadurch ist der Detektor so positioniert, dass theoretisch Abstände bis ins Unendliche gemessen werden können. Falls ein davon abweichender maximaler Messabstand d_{\max} gewünscht ist, lässt sich der Detektor um den Offset $v_{\text{off,max}}$ verschieben:

$$v_{\text{off,max}} = \frac{\sqrt{b^2 + \left(\frac{f}{\cos \alpha} - b \tan \alpha \right)^2}}{\frac{\cos \alpha}{f} (d_{\max} + b \tan \alpha - l_z) - 1}. \quad (3.5)$$

Damit ergibt sich ein minimaler Messabstand d_{\min} von

$$d_{\min} = \frac{f}{\cos \alpha} \left(\frac{\sqrt{b^2 + \left(\frac{f}{\cos \alpha} - b \tan \alpha \right)^2}}{v_{\text{off,max}} + w_{\text{det}}} + 1 \right) - b \tan \alpha + l_z. \quad (3.6)$$

Alternativ kann man statt d_{\max} zuerst den gewünschten minimalen Messabstand d_{\min} festlegen, so dass sich der Detektor-Offset zu

$$v_{\text{off,min}} = \frac{\sqrt{b^2 + \left(\frac{f}{\cos \alpha} - b \tan \alpha \right)^2}}{\frac{\cos \alpha}{f} (d_{\min} + b \tan \alpha - l_z) - 1} - w_{\text{det}} \quad (3.7)$$

berechnet und man folglich einen maximalen Messabstand von

$$d_{\max} = \frac{f}{\cos \alpha} \left(\frac{\sqrt{b^2 + \left(\frac{f}{\cos \alpha} - b \tan \alpha \right)^2}}{v_{\text{off,min}}} + 1 \right) - b \tan \alpha + l_z \quad (3.8)$$

3 Lasertriangulation

erhält. Dabei ist anzumerken, dass eine geringe Änderung des minimalen Messbereichs zu einer großen Änderung des maximalen Messbereichs führt. Wird beispielsweise in dem LTS mit den Werten nach Tabelle 3.2 Parameter des in dieser Arbeit untersuchten Lasertriangulationssystems.table.caption.123 der maximale Messbereich um 10 mm verringert, reduziert sich der minimale Messbereich nur um 0,1 mm. Wird hingegen der minimale Messbereich um 10 mm erhöht, steigert sich der maximale Messbereich um 1450 mm.

In dieser Arbeit wird ein Messaufbau mit einer Basisdistanz von 122,5 mm, einer Linse mit einer Brennweite von 40 mm und einem Detektor mit einem Pixelpitch von 1,67 μm und einer Länge von 3856 px verwendet, um den im Projekt geforderten Messbereich von 800–8000 mm zu erreichen. Dies führt zu einer Empfindlichkeit von etwa $S = -3,2 \text{ px mm}^{-1}$ bei einem Messabstand von 1 m. Die gewählten und daraus resultierenden Parameter sind in Tabelle 3.2 Parameter des in dieser Arbeit untersuchten Lasertriangulationssystems.table.caption.123 zusammengefasst. Der Zusammenhang zwischen Laserpunktzentrum v_L und Messabstand d sowie die daraus resultierende Empfindlichkeit S für diesen Aufbau wurde bereits in Abbildung 3.1(b)figure.caption.100 analytisch dargestellt.

Tabelle 3.2: Parameter des in dieser Arbeit untersuchten Lasertriangulationssystems.

Parameter	Wert
Basis b	122,5 mm
l_z	0 mm
α	4°
Brennweite f	40 mm
Detektorlänge w_{det}	3856 px
Pixelpitch p	1,67 μm
Verkipfung β	14,4°
$(v_{0,x}; v_{0,z})$	(122,5; -40,10) mm
Verschiebung Detektor v_{offset}	0,61 mm
Minimaler Messbereich d_{min}	800 mm
Maximaler Messbereich d_{max}	8000 mm
Empfindlichkeit S @ $d = 800 \text{ mm}$	-5,1 px mm^{-1}
Empfindlichkeit S @ $d = 1000 \text{ mm}$	-3,2 px mm^{-1}
Empfindlichkeit S @ $d = 2500 \text{ mm}$	-0,5 px mm^{-1}
Empfindlichkeit S @ $d = 5000 \text{ mm}$	-0,1 px mm^{-1}

3.2 Fehlereinflüsse und Limitierungen

Prinzipiell wird die Messunsicherheit des LTS durch die Empfindlichkeit S des Systems und die Messunsicherheit des Laserpunktzentrums v_L definiert. Im Allgemeinen bewegt sich das Laserpunktzentrum auf dem Detektor jedoch nicht nur mit einer Abstandsänderung, sondern auch aufgrund verschiedener Fehlerquellen [28, 29, 78, 107, 152]. Der Einfluss dieser Fehlerquellen ist als zeitlicher Drift des Messwertes erkennbar und führt somit zu einer unbekanntenen systematischen und statistischen Messabweichung. Mögliche Fehlereinflüsse werden in diesem Kapitel vorgestellt und lassen sich dazu in die Gruppen Laser, Ausbreitungsmedium, Messoberfläche, optomechanisches System sowie Laserpunkterfassung unterteilen.

3.2.1 Laser

Aufgrund von thermischen Einflüssen und mechanischen Instabilitäten kann die Richtung des Laserstrahls stark variieren [72, 148, 161]. Dies wird auch als begrenzte Strahlstabilität oder als *Laserstrahldrift* (engl. laser beam drift) bezeichnet. Folglich bewegt sich der Laserspot auf der Messoberfläche und damit auf dem Detektor, wie es beispielhaft in Abbildung 3.3(a) dargestellt ist. Diese Verkippung $\Delta\gamma$ des Lasers führt zu einer Verschiebung Δv_L des Laserpunktzentrums und somit zu einer Abweichung in der gemessenen Entfernung [147]. Weiterhin kann auch eine schwankende Lichtintensität [152] oder eine Wellenlängenänderung des emittierten Lichtes [43, 107] zu einer Messabweichung führen.

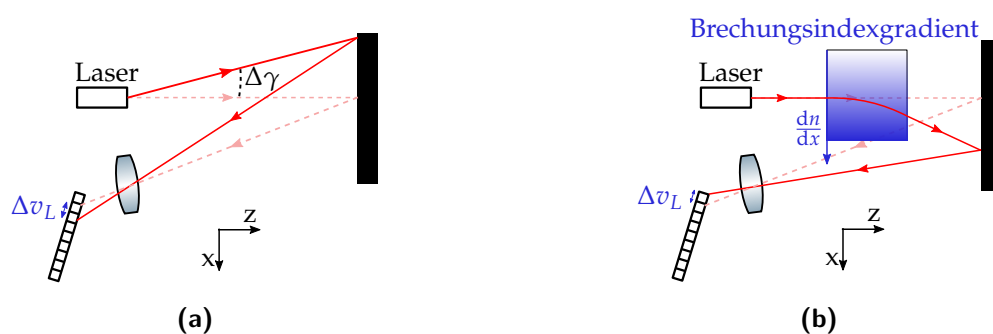


Abbildung 3.3: Entstehung von Messabweichungen in der Lasertriangulation durch (a) Laserstrahldrift, (b) Ausbreitungsmedium (nach [29, Fig.10.17]).

3.2.2 Ausbreitungsmedium

Weiterhin kann der Laserstrahl auch durch das Ausbreitungsmedium abgelenkt werden, das sich zwischen dem LTS und der Messoberfläche befindet [74, 148]. In klassischen Anwendungen der Lasertriangulation handelt es sich dabei um Luft, die während der Messung zweimal vom Laserlicht passiert wird. Bei Luftturbulenzen oder einem Temperaturgradienten im Ausbreitungsmedium kann der Laserstrahl, wie in Abbildung 3.3(b) schematisch gezeigt, abgelenkt werden. Diese Ablenkung resultiert ebenso in einem Fehler der berechneten Entfernung [12], [29, S.268f].

3.2.3 Messoberfläche

Allgemein hat die Messoberfläche, an der das Licht diffus reflektiert wird, einen großen Einfluss auf die erreichbare Messunsicherheit. Dabei spielen verschiedene Faktoren wie Rauheit, Orientierung, Farbe oder Beschaffenheit eine große Rolle. Wie bereits in Kapitel 2.1.1 Streuung und Reflexionsection*.26 vorgestellt wurde, führt die kohärente Natur des Laserlichts in Kombination mit der Rauheit der Messoberfläche zu sogenannten Speckles im abgebildeten Laserpunkt. Durch die im Bildpunkt enthaltenen Intensitätsunterschiede kommt es bei der Bestimmung des Laserpunktzentrum zu einer Messabweichung [9, 30, 52]. Da die Rauheit einer technischen Oberfläche einer zufälligen Verteilung unterliegt, spielt auch die Position des Laserpunktes auf dieser eine wichtige Rolle [62]. Wird die Messoberfläche seitlich verschoben, verändert sich der Abstand prinzipiell nicht. Da sich nun aber eine andere Phasenverteilung des gestreuten Lichtes ergibt und somit andere Speckles ausbilden, ändert sich damit der gemessene Abstandswert [46, 129].

Neben der Position muss auch die Ausrichtung der Messoberfläche bezogen auf den Sensor beachtet werden. So kann eine Verkipfung der Messoberfläche in unterschiedliche Richtungen zu weiteren Messabweichungen führen [139, 152]. Dies liegt daran, dass sich mit einer Änderung des Winkels die Form des abgebildeten Laserpunktes ändert und sich somit auch das berechnete Laserpunktzentrum verschieben kann [135].

Außerdem wurde in der Vergangenheit dargelegt, dass auch die Form und allgemeine Beschaffenheit der Messoberfläche einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat. So führen zum Beispiel gekrümmte Objekte zu Messabweichungen [25], während es an Oberflächen mit Strukturen durch Mehrfachreflexionen zu Fehlern kommen kann [61]. Insbesondere das Reflexionsverhalten spielt dabei eine entscheidende Rolle [50, S.169]. Weist die Oberfläche neben einem diffus re-

flektierenden auch einen spiegelnden Anteil auf, führt eine keulenartige Form des abgebildeten Lichtpunktes zu einer weiteren Messabweichung [62, S.50]. Falls das Licht komplett spiegelnd reflektiert wird ist, genauso wie im Falle einer komplett absorbierenden Oberfläche, keine Messung mehr möglich, da dann am Detektor kein Licht empfangen wird [135]. Weiterhin führen unterschiedliche Farben der Messoberfläche [75, 135], ein Ölfilm auf dieser [139] oder auch eine Inhomogenität der Oberfläche [18, 78, 105, 141] zu einer Verschlechterung der Messergebnisse. Dies liegt allgemein daran, dass dadurch die Eigenschaften des abgebildeten Laserpunktes geändert und somit das berechnete Laserpunktzentrum v_L verschoben wird (siehe Abbildung 3.4(a)figure.caption.129).

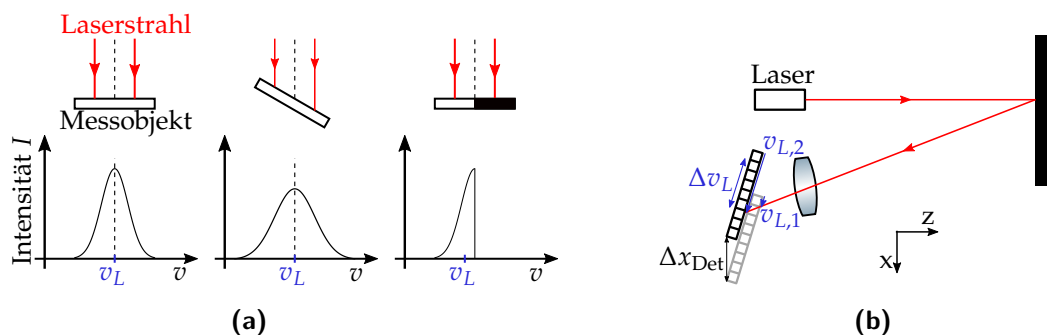


Abbildung 3.4: Entstehung von Messabweichungen in der Lasertriangulation durch (a) die Messoberfläche aufgrund einer Änderung der Intensität I des Detektors (nach [29, Fig.10.9]), (b) die mechanische Verschiebung des Detektors um Δx_{Det} .

3.2.4 Optomechanischer Aufbau

Das Messprinzip der Lasertriangulation basiert darauf, dass der Abstand durch geometrische Beziehungen zwischen Laser, Linse und Detektor berechnet wird. Verschiebt sich eine dieser Komponenten, resultiert das in einer Änderung der Position des Laserpunktzentrums auf dem Detektor, wie es beispielhaft in Abbildung 3.4(b)figure.caption.129 für eine Verschiebung Δx_{Det} des Detektors dargestellt ist. Folglich wird eine Abstandsänderung detektiert, obwohl diese nicht stattgefunden hat [107]. Zum einen kann sich der Detektor aufgrund seiner Eigenerwärmung verschieben [44, 86], zum anderen führen Vibrationen [42], mechanische Instabilitäten [78] und eine thermische Ausdehnung des gesamten Systems [43, 110] zu diesem Effekt.

Weiterhin hat auch das optische System einen Einfluss auf die Messergebnisse. So kann sich durch Temperaturänderungen die Brennweite der Linse ändern [3], welche somit auch zu einer Verschiebung des Punktes auf dem Detektor führt.

Gleichzeitig führen die Aberrationen des optischen Systems dazu, dass der abgebildete Laserpunkt größer wird, somit pro Pixel weniger Licht auf den Detektor trifft und sich das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, signal-to-noise ratio) verringert [43].

3.2.5 Laserpunkterfassung

Allgemein gilt, dass eine exakte Laserpunkterfassung notwendig ist, damit auch das Ergebnis der Lasertriangulation eine hohe Genauigkeit ausweist [117]. Zu Beginn dieses Kapitels wurde bereits gezeigt, dass sich die Abbildung des Laserpunktes durch verschiedene Einflussfaktoren der Messoberfläche, wie zum Beispiel Verkippung, Inhomogenität oder die Bildung von Speckles verändert. Folglich weicht das berechnete vom wahren Laserpunktzentrum ab (Abbildung 3.4(a)figure.caption.129) und führt so zu einer Messabweichung in der Lasertriangulation.

Neben den bereits genannten Faktoren gibt es noch weitere Fehlerquellen im aufgenommenen Detektorbild wie zum Beispiel räumliche Quantisierung, Analog-Digital-Quantisierung, Umgebungslicht oder Dunkelstromrauschen [4, 42, 92]. Diese werden in diesem Abschnitt kurz erläutert und beruhen teilweise auf den in Kapitel 2.1.3 Rauscheinflüsse section*.60 vorgestellten Rauscheinflüssen des Detektors.

Aufgrund der Quantennatur von Licht spielt die Anzahl der am Detektor auftretenden Photonen eine große Rolle. Die Photonen unterliegen dabei einer Poisson-Verteilung und führen somit zu einem statistischen Fehler [106]. Dieses Phänomen ist unumgänglich, und tritt auch in einem ansonsten idealen und rauschfreien System auf. Die damit verbundene untere Grenze der minimalen Messabweichung wird als Cramér-Rao-Grenze bezeichnet und lässt sich nicht umgehen [131].

Zusätzlich spielt in einem nicht-idealen System das Verhältnis zwischen Anzahl an Photonen des abgebildeten Laserpunktes und Noise pro Pixel eine entscheidende Rolle [77, 107]. Weitere Noiseeinflüsse, die so einen großen Einfluss haben, sind zum Beispiel Ausleserauschen oder Dunkelstromrauschen [42, 43, 77, 137] sowie die räumliche Quantisierung aufgrund der Abtastung durch die Pixel [4]. Da bei der Lasertriangulation typischerweise mit kohärentem Licht auf einer optisch rauen Oberfläche gemessen wird, überwiegt hier das kohärente Rauschen, wie zum Beispiel Speckles [106]. Weiterhin kann es auch durch die Bildverarbeitung, insbesondere die Segmentierung, zu einem weiteren Fehler kommen [119].

3.2.6 Sonstige Fehlerquellen

Abschließend werden noch weitere Einflüsse vorgestellt, die nicht explizit den zuvor dargestellten Kategorien zugeordnet werden können. So wurde in der Vergangenheit gezeigt, dass Distanzsensoren eine allgemeine zeitliche Drift aufgrund von Temperaturschwankungen aufweisen [71, 76, 80, 99]. Hier wird nicht weiter definiert, wie sich die Temperaturänderungen genau auswirken. Prinzipiell sind sie aber in den oben genannten Punkten Laser, Ausbreitungsmedium, optomechanisches System und Laserpunkterfassung implizit enthalten.

Auch durch die Kalibrierung kann es zu einer weiteren Abweichung kommen [107, 112]. So sind hier Messabweichungen bei der Laserpunkterfassung während der Kalibrierung, die Messunsicherheit der Referenzmessung und die begrenzte Fähigkeit der interpolierenden Funktion zur Berechnung der Abstandswerte zu nennen.

Zuletzt kann noch der Anwender des Messgeräts als Fehlerquelle aufgeführt werden [7]. Bei einer falschen Bedienung kann es zu zusätzlichen signifikanten Messabweichungen kommen.

3.3 Fehlermodell eines Lasertriangulationssystems

In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten der zuvor vorgestellten Fehlereinflüsse in ein Fehlermodell zusammengefasst werden. Dazu wird berechnet oder simuliert, wie groß die aus den verschiedenen Fehlerquellen resultierenden Messabweichungen in der Abstandsmessung sind. Dabei liegt im Zuge dieser Arbeit der Fokus auf Störungen, die durch Temperaturänderungen und damit insbesondere durch optomechanische Verschiebungen, mangelnder Strahlstabilität des Lasers sowie Änderungen des Ausbreitungsmediums entstehen. Dadurch wird hier deutlich gemacht, wie groß der Einfluss kleiner Fehler bereits sein kann. Die Messoberfläche kann oftmals nicht direkt beeinflusst werden, deshalb wird diese nicht weiter betrachtet. Auf den Einfluss der Laserpunkterfassung wird später in Kapitel 4.3 Laserpunkterfassungsection.237 detailliert eingegangen, weshalb diese hier nicht analysiert wird.

Durch geometrische Betrachtungen des vorgestellten Aufbaus lässt sich berechnen, wie stark sich das LPZ v_L auf dem Detektor bei verschiedenen Fehlereinflüssen verschiebt. Mit der bekannten Empfindlichkeit S kann anschließend die resultierende Messabweichung Δd berechnet werden. Für die Berechnungen wird das in Kapitel 3.1 Auslegung eines Lasertriangulationssystemssection.98 vorgestellte System angenommen und es wird von einem Messabstand von $d_0 = 1$ m ausgegangen. Exemplarisch wird für ausgewählte Einflussfaktoren auf die Berechnung

3 Lasertriangulation

eingegangen (zum Beispiel Verkippung Laser, Ausbreitungsmedium und Verschiebung Linse), während die weiteren Faktoren lediglich der Übersichtlichkeit halber in der abschließenden Tabelle 3.3 Zusammenhang zwischen der Abweichung des Abstandes Δd und einer Parameteränderung im Abstand $d_0 = 1$ m. So führt zum Beispiel eine Verkippung des Lasers um $\Delta\gamma = 1$ μ rad zu einer berechneten Abweichung von $\Delta d = 8,6$ μ m. Zusammengefasst werden. Für die Berechnungen wird die paraxiale Näherung der geometrischen Strahlenoptik verwendet (siehe Kapitel 2.1.1 Optiksubsection.8). So wird von einer idealen dünnen Linse ausgegangen, die keine Aberrationen aufweist. Außerdem wird der Laserstrahl als ein unendlich dünner Lichtstrahl angenommen.

Zur Validierung der hergeleiteten Formeln werden die Werte durch Simulationen mit Zemax OpticStudio überprüft. Dabei werden sowohl die Aberrationen des optischen Systems als auch die Ausdehnung des Laserstrahls berücksichtigt. Folglich gibt es leichte Unterschiede zwischen den errechneten und simulierten Ergebnissen. Teilweise ist es nicht möglich, mit den verwendeten Vereinfachungen/Annahmen eine analytische Betrachtung durchzuführen (zum Beispiel bei der Verkippung der Linse wegen der paraxialen Näherung), in solchen Fällen werden lediglich Werte für die Simulationen angegeben.

3.3.1 Laserstrahldrift

Die Berechnung der Messabweichung Δd in Abhängigkeit der Verkippung $\Delta\gamma$ des Lasers erfolgt anhand von Abbildung 3.5(a) figure.caption.136. Damit ergibt sich

$$\Delta d = \frac{b \cdot (l_z + d_0)}{b + d_0 \cdot \tan \Delta\gamma} - d_0 - l_z, \quad (3.9)$$

wobei der wahre Abstand hier $d_0 = 1$ m ist. So führt eine Verkippung von $\Delta\gamma = 1$ μ rad zu einer Messabweichung von $\Delta d = 8,2$ μ m. Aufgrund von Temperaturänderungen kommt es zu einer Änderung der Laserwellenlänge λ . Die Änderung ist abhängig vom verwendeten Laser. Laut dem Datenblatt der in dieser Arbeit verwendeten Laserdiode liegt eine typische Änderung der Wellenlänge im Bereich von $\frac{\Delta\lambda}{\Delta T} = 0,24$ nm K⁻¹ [66]. Bei einer Wellenlängenänderung von 1 nm ändert sich die Brennweite der Linse aufgrund der Änderung ihres Brechungsindex um etwa $\Delta f = 0,002$ mm (siehe Kapitel 2.1.1 Optische Abbildungsection*.33). Daraus resultiert in den Simulationen eine Messabweichung von $\Delta d = 0,02$ μ m.

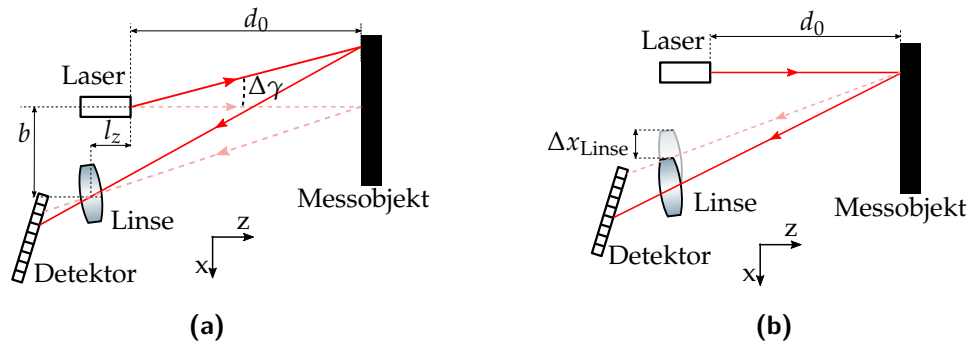


Abbildung 3.5: (a) Auswirkung der Verkippung $\Delta\gamma$ des Laserstrahles. (b) Auswirkung der Verschiebung Δx_{Linse} der Linse durch thermische Ausdehnungen.

3.3.2 Ausbreitungsmedium

Der räumliche Brechungsindexgradient $\Delta n / \Delta x$ aufgrund eines Temperaturgradienten $\Delta T / \Delta x$ und eines Druckgradienten $\Delta p / \Delta x$ ist näherungsweise gegeben durch [29, S.269]

$$\frac{dn}{dx} \approx \frac{\Delta n}{\Delta x} = \left((0,27 \text{ m hPa}^{-1}) \frac{\Delta p}{\Delta x} - (0,92 \text{ m K}^{-1}) \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}. \quad (3.10)$$

Wie zuvor in Abbildung 3.3(b)figure.caption.126 gezeigt, lenkt ein Brechungsindexgradient $\Delta n / \Delta x$ den Laserstrahl in seiner Richtung ab. Unter der Annahme, dass der Brechungsindexgradient in z -Richtung konstant ist, wird die Auslenkung Δx des Laserstrahls durch [29, S.269]

$$\Delta x \approx \frac{1}{2n} \cdot \frac{dn}{dx} \cdot z^2 \quad (3.11)$$

berechnet. Dabei stellt z den Abstand vom Laseraustritt dar. So führt ein Temperaturgradient von 1 K m^{-1} nach Gleichung (3.10) zu einem Brechungsindexgradienten von $\Delta n / \Delta x \approx -9,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ und folglich zu einer Verschiebung $\Delta x = 0,46 \mu\text{m}$ des Laserpunktes auf der Messoberfläche in einem Abstand $d_0 = 1 \text{ m}$. Bezogen auf die Abstandsmessung ergibt sich durch die Auslenkung eine Messabweichung von $\Delta d = 3,8 \mu\text{m}$.

3.3.3 Optomechanischer Aufbau

Normalerweise kommt es durch Temperaturänderungen zu Ausdehnungen des gesamten Systems, so dass sich alle darin enthaltenen Teile simultan verschieben. Um den Einfluss der einzelnen Komponenten detailliert herauszustellen, wird jeweils angenommen, dass sich nur die betrachtete Komponente verschiebt, während die anderen Teile ihre Position beibehalten. Verschiebt sich beispielsweise

3 Lasertriangulation

die Linse um Δx_{Linse} , wie in Abbildung 3.5(b) dargestellt, verschiebt sich folglich auch das Laserpunktzentrum v_L auf dem Detektor. Diese Verschiebung lässt sich durch

$$\Delta v = \frac{\Delta x_{\text{Linse}}}{\cos \beta} + \frac{\sin \phi_f}{\cos \beta} \cdot \frac{\frac{f}{\cos \alpha} + \Delta x_{\text{Linse}} \tan \beta}{\cos \phi_f - \sin \phi_f \cdot \tan \beta} - \frac{\frac{f}{\cos \alpha} \sin \phi}{\cos \phi \cdot \cos \beta - \sin \phi \cdot \sin \beta} \quad (3.12)$$

mit $\phi = \arctan(b/d_0)$ und $\phi_f = \arctan((b + \Delta x_{\text{Linse}})/d_0)$ darstellen. Wie zuvor sind b die Basis, α und f die Verkippung und Brennweite der Linse und β die Verkippung des Detektors. Folglich führt eine Verschiebung der Linse um $\Delta x_{\text{Linse}} = 1 \mu\text{m}$ zu $\Delta v = 0,66 \text{ px}$ und somit zu einer Messabweichung von $\Delta d = 206 \mu\text{m}$.

Die Änderung der Brennweite f der Linse spielt theoretisch eine weitere Rolle. Wie in Kapitel 2.1.1 Optische Abbildungsection*³³ bereits dargestellt wurde, ist dieser Einfluss aber sehr gering. So führt eine Temperaturänderung von $\Delta T = 1 \text{ K}$ lediglich zu einer Brennweitenänderung $\Delta f = 38,2 \text{ nm}$, welche eine Messabweichung von $0,4 \text{ nm}$ nach sich zieht.

3.3.4 Vergleich der Fehlerquellen

Tabelle 3.3 Zusammenhang zwischen der Abweichung des Abstandes Δd und einer Parameteränderung im Abstand $d_0 = 1 \text{ m}$. So führt zum Beispiel eine Verkippung des Lasers um $\Delta \gamma = 1 \mu\text{rad}$ zu einer berechneten Abweichung von $\Delta d = 8,6 \mu\text{m}$. Tabelle 3.3 fasst den Einfluss mehrerer Parameter in einem Lasertriangulationsaufbau mit den zuvor angegebenen Abmessungen zusammen. Dabei wird zur besseren Vergleichbarkeit der eingeführte Abstandsfehler Δd dividiert durch die jeweilige Parameteränderung angegeben. Wie in Tabelle 3.3 Zusammenhang zwischen der Abweichung des Abstandes Δd und einer Parameteränderung im Abstand $d_0 = 1 \text{ m}$. So führt zum Beispiel eine Verkippung des Lasers um $\Delta \gamma = 1 \mu\text{rad}$ zu einer berechneten Abweichung von $\Delta d = 8,6 \mu\text{m}$. Tabelle 3.3 zu sehen ist, haben mehrere Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Insbesondere kleine Änderungen des Laserwinkels sowie der Detektor- und Linsenposition können zu erheblichen Abweichungen führen.

Abschließend werden noch einige Fehlergrößen aus der Literatur verwendet, um einen absoluten Fehler für einige Parameter zu quantifizieren.

Die Abweichung des Laserwinkels von $\Delta \gamma = 0,2^\circ$, bzw. $3,5 \text{ mrad}$, wie in Ref. [147] gezeigt, würde zu einer Messabweichung $\Delta d \approx 29,5 \text{ mm}$ führen.

Tabelle 3.3: Zusammenhang zwischen der Abweichung des Abstandes Δd und einer Parameteränderung im Abstand $d_0 = 1$ m. So führt zum Beispiel eine Verkippung des Lasers um $\Delta\gamma = 1$ μrad zu einer berechneten Abweichung von $\Delta d = 8,6$ μm .

Kategorie	Parameter	Berechnung	Simulation
Laser	Verkippung $\Delta\gamma$	8,6 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	8,4 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$
	Wellenlänge $\Delta\lambda$	- - -	0,02 $\mu\text{m}/\text{nm}$
Ausbreitungs- medium	Temperatur $\Delta T/\Delta x$	3,8 $\mu\text{m}/(\text{K}/\text{m})$	- - -
	Druck $\Delta p/\Delta x$	-1,1 $\mu\text{m}/(\text{hPa}/\text{m})$	- - -
Optomech. System	Basis Δb	8,6 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	8,4 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
	Linse Δx_{Linse}	217,5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	216,3 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
	Linse Δz_{Linse}	26,6 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	22,5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
	Linse $\Delta\alpha$	- - -	0,5 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$
	Detektor Δx_{Det}	208,9 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	207,9 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
	Detektor Δz_{Det}	25,6 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	21,5 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
	Detektor $\Delta\beta$	0,1 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	0,1 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$
	Brennweite Δf	- - -	0,01 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$

Eine Verschiebung des Detektors um 14,8 μm in Ref. [86] führt zu einer Messabweichung von etwa 3,1 mm.

Bei einem Basisabstand von 122,5 mm und der Annahme, dass die Komponenten auf einer Aluminiumbasis montiert sind (Wärmeausdehnungskoeffizient von 22,9 $\mu\text{m K}^{-1} \text{m}^{-1}$ [64]), würde eine Temperaturänderung von 1 K zu einer Erhöhung des Basisabstandes um 2,8 μm führen, was einen Fehler bei der Abstandsmessung von etwa 23,7 μm zur Folge hätte.

Diese Berechnungen zeigen, dass selbst kleine Änderungen der Temperatur oder des Aufbaus im Allgemeinen zu erheblichen Messfehlern führen. Um die Genauigkeit eines Lasertriangulationssystems zu erhöhen, müssen diese Fehler vermieden oder kompensiert werden.

3.4 Methoden zur Fehlerkompensation

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Systeme vorgestellt, die den Einfluss der zuvor vorgestellten Fehlerquellen kompensieren oder eliminieren sollen. Diese werden in diesem Kapitel grob dargestellt und es wird erläutert, welche der Fehlerquellen diese beseitigen können. Die folgende Literatur zielt nicht ausschließlich auf die Verbesserung von Lasertriangulationssystemen oder

3 Lasertriangulation

der Abstandsmessung im Allgemeinen ab, so dass ein Teil davon die Verbesserung in anderen Messbereichen betrifft, zum Beispiel die Geradheitsmessung. Dennoch könnten diese Ideen generell für ein Lasertriangulationssystem verwendet werden und werden der Vollständigkeit halber hier aufgeführt.

3.4.1 Laserstrahldrift

Der Einfluss der begrenzten Strahlstabilität kann durch Aufspaltung des Lasers und Überwachung eines Teilstrahls mit einem Kontrolldetektor kompensiert werden [125]. Außerdem kann die Richtung des Strahls mit einem aktiven elektrooptischen System [19, 45] oder einem thermo-mechanischen System [148] stabilisiert werden. Liu et al. [79] verwendeten einen rotierenden Diffuser im Strahlengang, um die Laserstrahldrift zu kompensieren. Der Nachteil dieser Methoden ist, dass nur Fehler aufgrund des Laserstrahldrifts kompensiert werden.

Weiterhin kann ein solcher Fehler durch eine Aufspaltung des Laserstrahls in zwei parallele Strahlen eliminiert werden, die sich bezüglich einer Winkeländerung des Laserstrahles gegensätzlich verhalten [146, 147, 156]. Dabei werden auch Fehler durch atmosphärische Turbulenzen oder Brechungsindexgradienten der Luft kompensiert.

3.4.2 Ausbreitungsmedium

Li et al. [72] verwendeten ein digitales optisches Phasenkonjugationssystem in einem Aufbau zur Geradheitsmessung, um eine Ablenkung des Laserstrahls aufgrund eines Brechungsindexgradienten der Luft und Turbulenzen im Messpfad zu kompensieren. Da dieser Aufbau komplex ist und aktive Komponenten wie einen räumlichen Lichtmodulator verwendet, ist er für einen einfachen Triangulationsaufbau ungeeignet. Außerdem wäre eine Vorrichtung auf der Messoberfläche notwendig, um die Wellenfront der Laserstrahlen zu überwachen.

Dobosz et al. [26] messen mit Ultraschall die Temperatur entlang des Strahlengangs in einem interferometrischen Abstandsmesssystem, um Variationen im Brechungsindex zu berücksichtigen. Weiterhin verwendeten Yong et al. [156] einen faseroptischen Schalter, um zwei parallele Strahlen zu erzeugen, die dann die Kompensation von Luftturbulenzen ermöglichen. Bei bekannten Bedingungen besteht auch die Möglichkeit, den Brechungsindexgradienten zu modellieren und so mathematisch zu kompensieren [12].

3.4.3 Optomechanischer Aufbau

Messabweichungen, die durch thermische Ausdehnungen in den optomechanischen Aufbau eingebracht werden, wurden bisher noch nicht umfassend kompensiert. Eine sehr aufwändige Methode besteht darin, den gesamten Aufbau durch eine Heizung oder Kühlung auf einer konstanten Temperatur zu halten [143, 166]. Pierce et al. [110] stellten einen Aufbau mit einem Beugungsgitter vor, der zwei konvergierende Laserstrahlen erzeugt. Der Abstand wird durch die Distanz zwischen den beiden Laserpunkten auf dem Messobjekt ermittelt. Dadurch kann der Einfluss von Vibrationen und thermischen Ausdehnungen kompensiert werden, gleichzeitig wird aber die optomechanische Auslegung stark eingeschränkt.

Im Allgemeinen ist es möglich, solche Fehler durch die Implementierung eines sehr robusten Aufbaus unter Verwendung von Komponenten mit einem niedrigen Temperaturausdehnungskoeffizienten, wie zum Beispiel ‚Invar‘, zu vermeiden. Dies führt aber gleichzeitig zu höheren Kosten und einem schwereren Aufbau. Der Einfluss von optischen Aberrationen der Kamera kann zum Beispiel durch das Brown-Modell korrigiert werden [112].

3.4.4 Speckles und Messoberfläche

Um den Einfluss des Speckle-Rauschens durch raue Oberflächen zu vermeiden, wurde von Zbontar et al. [158] ein beweglicher Laser eingeführt, der ein symmetrisches Lasermuster projiziert. Da dieser Aufbau bewegliche Teile verwendet, ist er eher instabil und nicht sehr robust. Faulhaber et al. [36] projizieren mehrere Laserpunkte auf die Messoberfläche zur Reduzierung des Speckle-Rauschens. Dies geschieht mit einem räumlichen Lichtmodulator, welcher die Komplexität des Aufbaus erhöht. Weiterhin kann auch das Werkstück leicht unter dem Messgerät bewegt werden, um so den Einfluss von Speckles zu kompensieren [129]. Außerdem können Speckles durch das Aufbringen von fluoreszierender Farbe [46] und den Einsatz einer breitbandigen Lichtquelle [62] vermieden werden. Bei Messungen auf farbigen oder verkippten Oberflächen kann das Ergebnis durch das Aufbringen einer dünnen weißen Kreideschicht verbessert werden [135]. Weiterhin kann der Einfluss der Messoberfläche, wie zum Beispiel eine Verkipfung oder eine unterschiedliche Farbe, rechnerisch korrigiert werden [25, 70, 75, 152].

3.4.5 Laserpunkterfassung

Der Fehler, der durch die Berechnung des Laserpunktzentrums entsteht, kann durch verbesserte Algorithmen und durch Mittelung über die Zeit oder über mehrere Laserpunktpositionen verringert werden [52]. Letzteres kann durch die Projektion mehrerer Laserpunktbilder auf den Detektor erfolgen. Dazu wurden mehrere Laser in einem Aufbau verwendet, um die erreichbare Sensorgenauigkeit zu erhöhen und Verdeckungen zu vermeiden [5, 23, 117, 122]. Außerdem wurde ein Beugungsgitter vor dem Detektor verwendet, um den einzelnen Punkt aufzuspalten [43, 102]. Takushima et al. [129] verwendeten ein Mikrolinsen-Array, um einen ähnlichen Effekt zu erzielen. Der Nachteil dieser Aufbauten ist, dass sie nur Abweichungen bei der Berechnung des LPZ mitteln und nicht aufgrund von zum Beispiel Laserstrahldrift oder Brechungsindexgradienten der Luft.

3.4.6 Weitere Kompensationsmethoden

In [71] messen die Autoren regelmäßig den Abstand zu einer Referenzfläche mit bekanntem Abstand und schätzen den Fehler mit Hilfe eines Kalmanfilters ab, um ihn für die anschließenden Messungen zu kompensieren. Da dabei ein beweglicher Lasertracker verwendet wird, ist dies in einem einfachen LTS nicht möglich. Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung ist der Einsatz mehrerer Detektoren, wie es in einer Dual-View-Anordnung geschieht [52, 114]. Dies eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss zufälliger Fehler zu mitteln und Abweichungen aufgrund von mangelnder Strahlstabilität oder eines Brechungsindexgradienten zu kompensieren. Der Nachteil sind höhere Kosten aufgrund eines zweiten optomechanischen Aufbaus und Detektors.

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

In Kapitel 3 Lasertriangulationchapter.97 wurde dargelegt, dass insbesondere optomechanische Verschiebungen im System zu signifikanten Messabweichungen führen. Außerdem wurden bereits verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, Fehlerquellen zu eliminieren. Diese waren jedoch entweder sehr komplex und aufwändig in der Umsetzung, oder konnten nur einen geringen Teil der möglichen Fehlerquellen beseitigen. Deshalb wurde im Zuge dieser Arbeit ein Aufbau entwickelt, der es ermöglicht, Fehler der Kategorien Laser, Ausbreitungsmedium und optomechanischer Aufbau gleichzeitig zu kompensieren.

Zuerst wird in Abschnitt 4.1 Funktionsprinzip und optischer Aufbau section.152 das Funktionsprinzip und das dazu nötige optische Setup vorgestellt. Darauf aufbauend werden umfangreiche Simulationen betrachtet, die die Kompensationsfähigkeit in verschiedenen Szenarien beleuchten. So wird die Wirkung bei der Verschiebung einzelner Komponenten aufgezeigt und mögliche Verschiebungen durch thermische Simulationen betrachtet. Anschließend wird die Laserpunkterfassung in Abschnitt 4.3 Laserpunkterfassung section.237 optimiert, um für das hier vorgestellte Setup ideale Ergebnisse zu erhalten. Abschließend wird der in dieser Arbeit verwendete experimentelle Aufbau vorgestellt.

4.1 Funktionsprinzip und optischer Aufbau

Der schematische Aufbau der optischen Kompensationsmethode, der im Vergleich zum normalen LTS aus Kapitel 3 Lasertriangulationchapter.97 nur aus einem zusätzlichen Strahlteiler und Spiegel besteht, ist in Abbildung 4.1 Darstellung eines Aufbaus, der in der Lage ist, Fehler aufgrund von Laserstrahldrift, Brechungsindexgradienten und optomechanischen Verschiebungen zu kompensieren (nach [169]). (a) Schematische Draufsicht. (b) Isometrische CAD-Ansicht. (c) Frontale CAD-Ansicht. (d) Verlauf der Laserpunktzentren in Abhängigkeit des Messabstandes d . figure.caption.154 zu sehen [169]. Der Laserstrahl wird dadurch in einen Mess- und einen Referenzstrahl aufgeteilt. Diese führen zu einem Mess- und einem Referenzfleck im Detektorbild, wodurch die Möglichkeit besteht, Fehler

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

aufgrund von Laserstrahldrift, Brechungsindexgradienten und optomechanischen Verschiebungen zu kompensieren.

Dabei ist es wichtig, dass die Ausbreitungsrichtung des Referenzstrahls in der x - z -Ebene durch das Zentrum der Abbildungslinse verläuft (siehe Abb. 4.1(b)figure.caption.154 und 4.1(c)figure.caption.154). Auf diese Weise ändert sich bei einer Änderung des Abstands d das Messfleckzentrum (MFZ) v_{Mess} , während das Referenzfleckzentrum (RFZ) v_{Ref} konstant bleibt, siehe Abb. 4.1(d)figure.caption.154. Wenn dagegen v_{Mess} aufgrund eines Fehlers geändert wird, ändert sich v_{Ref} in ähnlicher Weise. Folglich kann das kompensierte Fleckzentrum (KFZ) v_{Komp} durch

$$v_{\text{Komp}} = v_{\text{Mess}} - k \cdot v_{\text{Ref}} \quad (4.1)$$

errechnet werden, wobei k ein Kompensationsfaktor ist, der passend gewählt werden muss. Typischerweise gilt dabei $k \leq 1$, da die Verschiebung des RFZ in den Untersuchungen größer als die des MFZ war.

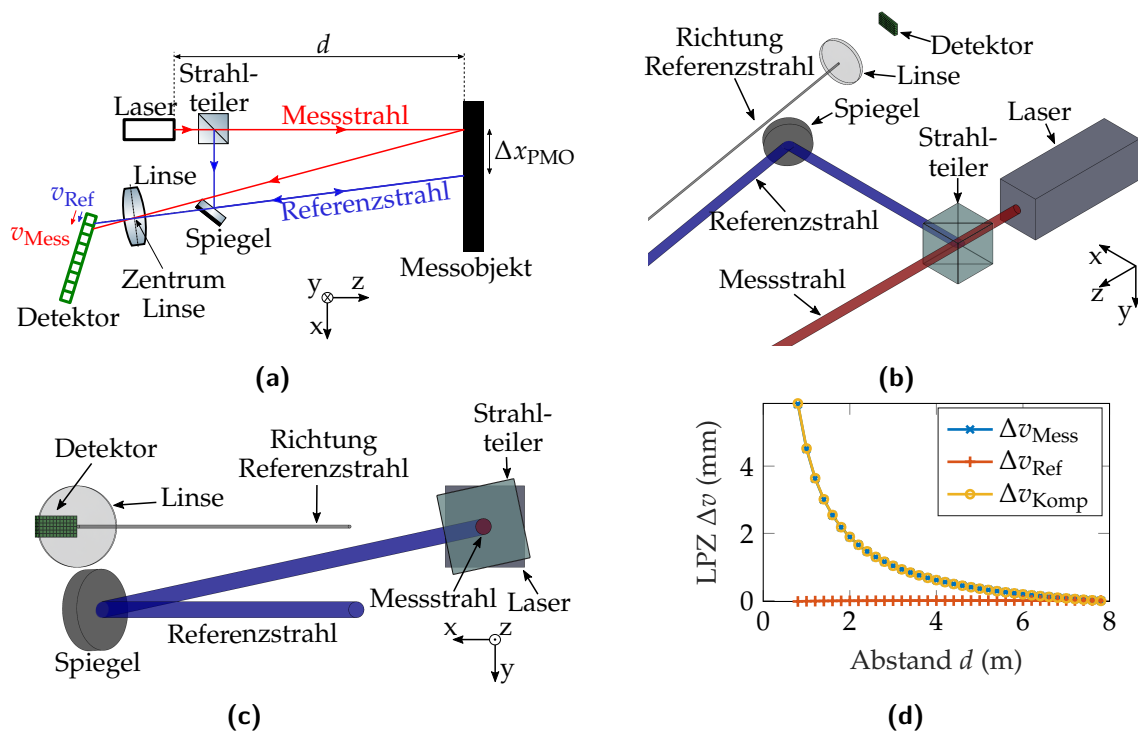


Abbildung 4.1: Darstellung eines Aufbaus, der in der Lage ist, Fehler aufgrund von Laserstrahldrift, Brechungsindexgradienten und optomechanischen Verschiebungen zu kompensieren (nach [169]). (a) Schematische Draufsicht. (b) Isometrische CAD-Ansicht. (c) Frontale CAD-Ansicht. (d) Verlauf der Laserpunktzentren in Abhängigkeit des Messabstandes d .

Das Funktionsprinzip ist durch eine Simulation in Abbildung 4.2(a)figure.capti-

on.158 dargestellt. Dabei wurde der Detektor in x -Richtung verschoben, wie es zum Beispiel durch eine thermische Ausdehnung auftreten kann. Da der Messabstand d konstant bleibt, sollten sich die beiden LPZs eigentlich nicht bewegen. Aufgrund der Detektorverschiebung ändern sich die Positionen des Mittelpunktes des Messstrahles und Referenzstrahles aber nahezu identisch. Aus diesem Grund lässt sich der Fehler durch die Subtraktion nach Gleichung (4.1) kompensieren, so dass das KFZ konstant $\Delta v_{\text{Komp}} = 0 \text{ px}$ beträgt.

Damit der Kompensationsaufbau wie gewünscht funktioniert, müssen die verschiedenen Komponenten passend ausgerichtet werden. Ähnlich wie in Kapitel 3.1 Auslegung eines Lasertriangulationssystemsection.98 vorgestellt, wird auch hier der Detektor durch die Scheimpflugbedingung in Relation zur Linse positioniert. Damit der Spiegel nicht das einfallende Licht auf den Detektor blockiert, müssen die Abbildungsoptik sowie der Mess- und Referenzstrahl in y -Richtung räumlich getrennt werden. Dies kann entweder durch Platzieren der Linse und des Detektors über oder unter dem Messstrahl in y -Richtung erfolgen, oder durch eine Verkippung des Strahlteilers um die z -Achse wie in Abb. 4.1(c) dargestellt.

Die Verkippung des Strahlteilers hat den Vorteil, dass sich die beiden Laserpunkte nicht auf der Messoberfläche und somit auch nicht im Detektorbild überlagern können. Dadurch kommt es zu keiner Überschneidung der Punkte und sie können stets räumlich voneinander getrennt werden. Der Verlauf der abgebildeten Punkte auf dem Detektor ist Abbildung 4.2(b) zu entnehmen. Hier wird erneut deutlich, dass die v -Komponente des Referenzfleckzentrums nicht vom Messabstand d abhängt.

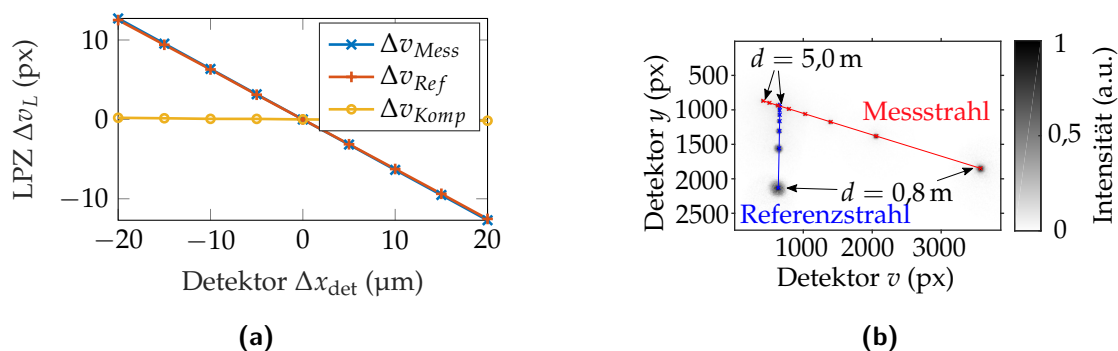


Abbildung 4.2: (a) Aufgrund einer Bewegung Δx_{det} des Detektors kommt es zu einer ungewollten Abweichung von Δv_{Mess} und Δv_{Ref} , die durch die Kompensation auf $\Delta v_{\text{Komp}} = 0 \text{ px}$ reduziert wird. (b) Verlauf der beiden Laserpunkte auf dem Detektor in Abhängigkeit vom Messabstand d . Hier fällt außerdem auf, dass der Punktradius mit steigendem Abstand abnimmt.

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

Weiterhin muss insbesondere der Spiegel korrekt angeordnet und verkippt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass der Referenzstrahl in der x - z -Ebene parallel zum Messstrahl verläuft, und dass sich das RFZ v_{Ref} bei einer Abstandsänderung nicht auf dem Detektor bewegt. Da die Komponenten nun im dreidimensionalen Raum angeordnet werden, lassen sich keine übersichtlichen Formeln wie im vorigen Kapitel mehr herleiten. Aus diesem Grund werden die Komponenten durch das numerische Lösen der geometrischen Beziehungen mit den gewünschten Bedingungen positioniert. Der Winkel γ_{Ref} des Referenzstrahls bezogen auf den Messstrahl kann prinzipiell beliebig gewählt werden. Hier wird er so eingestellt, dass der Betrag des Abstandes Δx_{PMO} der beiden Punkte auf der Messoberfläche (siehe Abb. 4.1(a)figure.caption.154) im minimalen und maximalen Messabstand d_{min} bzw. d_{max} identisch ist.

Dieser Aufbau hat mehrere Vorteile gegenüber einem einfachen Lasertriangulationssystem oder den zuvor erwähnten Kompensationsmethoden. Zunächst verwendet er nur zwei optische Standardkomponenten und ist nicht auf aktive oder bewegliche Teile angewiesen. Weiterhin ist er in der Lage, Fehler aufgrund von Laserstrahldrift, Brechungsindexgradienten sowie Verschiebungen im optomechanischen Aufbau zu kompensieren. Daher kann ein weniger stabiler und kostengünstigerer mechanischer Aufbau, Laser und Detektor verwendet werden, da die Driften dieser Komponenten eliminiert werden. Gleichzeitig wird man unempfindlicher gegenüber Änderungen der Umgebungstemperatur.

Der Aufbau hat jedoch einen Nachteil. Da die beiden Strahlen nicht parallel emittiert werden, treffen die beiden Punkte in der Regel mit einem gewissen Abstand Δx_{PMO} auf die Messoberfläche. Dies hat keinen Einfluss auf den gemessenen Abstand, da die Ausbreitungsachse des Referenzstrahls durch die Abbildungslinse verläuft. Die Messoberfläche muss aber breit genug sein, damit der Referenzstrahl auch diffus von dieser reflektiert wird und somit vom Sensor erfasst werden kann.

4.2 Simulative Untersuchung der Kompensation

In diesem Kapitel wird die Kompensationsfähigkeit des Aufbaus in umfangreichen Simulationen dargestellt. Zuerst werden dabei die Verschiebungen der einzelnen Komponenten mit den größten Fehlereinflüssen betrachtet. Anschließend wird durch thermische Simulationen untersucht, wie stark die optomechanischen Verschiebungen im realen Aufbau zu erwarten sind. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wird die Kompensationsfähigkeit des Setups bewertet.

4.2.1 Kompensation bei einzelnen Fehlern

Das erweiterte Lasertriangulationssystem nach Kapitel 4.1 Funktionsprinzip und optischer Aufbau section.152 wurde im optischen Simulationsprogramm Zemax OpticStudio aufgebaut. Jeder geometrische Parameter des Aufbaus, zum Beispiel die Position der Linse oder des Detektors, kann darin beliebig variiert werden. So werden die verschiedenen Fehlereinflüsse, die in der x -Achse in Abbildung 4.3 Simulierte Abstandsfehler Δd von Messstrahl, Referenzstrahl sowie kompensierten Strahl in Abhängigkeit einer Änderung von (a) Laserstrahlwinkel $\Delta\gamma$, (b) Basis Δb , (c) Linsenposition Δx_{Linse} , (d) Detektorposition Δx_{Det} , (e) Spiegelposition $\Delta x_{\text{Spiegel}}$ (nach [169]).figure.caption.164 dargestellt sind, analysiert. Durch Raytracing kann die Verschiebung des Laserpunktzentrum Δv im simulierten Detektorbild ermittelt werden, die mit der Empfindlichkeit S des Aufbaus in einen Abstandsfehler $\Delta d = \Delta v / S$ umgerechnet werden kann. Dieser simulative Ansatz hat den Vorteil, dass optische Aberrationen durch die Abbildungsoptik und die Ausdehnung des Laserstrahls berücksichtigt werden.

Der induzierte Fehler Δd der beiden Strahlen sowie des kompensierten Strahls ist in Abhängigkeit von mehreren Parametern in den Abbildungen 4.3(a)figure.caption.164 bis 4.3(d)figure.caption.164 angegeben. Der Fehler des kompensierten Strahls Δd_{Komp} wird durch $\Delta d_{\text{Komp}} = \Delta d_{\text{Mess}} - k \cdot \Delta d_{\text{Ref}}$ berechnet, wobei hier der Kompensationsfaktor $k = 1$ gewählt wird. Dabei ist ersichtlich, dass die im Kapitel 3.3 Fehlermodell eines Lasertriangulationssystem section.133 eingeführten Fehler zu einem guten Grad kompensiert werden. Weiterhin ist anzumerken, dass es durch Verschiebungen des Strahlteilers und Spiegels zu Messabweichungen kommt, die es ohne Kompensation nicht geben würde, siehe Abb. 4.3(e)figure.caption.164. Dies liegt daran, dass davon nur der Referenzstrahl und nicht der Messstrahl betroffen ist.

Die Fehler mit und ohne Kompensation sind in Tabelle 4.1 Beziehung zwischen Abstandsfehler Δd in Abhängigkeit von Parameteränderungen bei einem Messabstand von $d_0 = 1$ m ohne und mit Kompensation.table.caption.183 zusammengefasst. Dabei fällt auf, dass die Abweichung durch die optische Kompensation um bis zu 98,6 % reduziert wird. Für den Laserwinkel und die z -Verschiebungen ist die erzielte Verbesserung etwas geringer. Wie in Abbildung 4.3(a)figure.caption.164 zu sehen ist, ist dies auf die unterschiedliche Verschiebung des MFZ und RFZ aufgrund der unterschiedlichen Wege der Strahlen zurückzuführen. Durch passende Wahl des Kompensationsfaktors k kann festgelegt werden, welcher Fehler primär kompensiert werden soll. In einem realen Messaufbau ist bisher nicht bekannt, welche Fehlereinflüsse wie stark vorhanden sind, so dass k experimentell bestimmt werden muss.

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

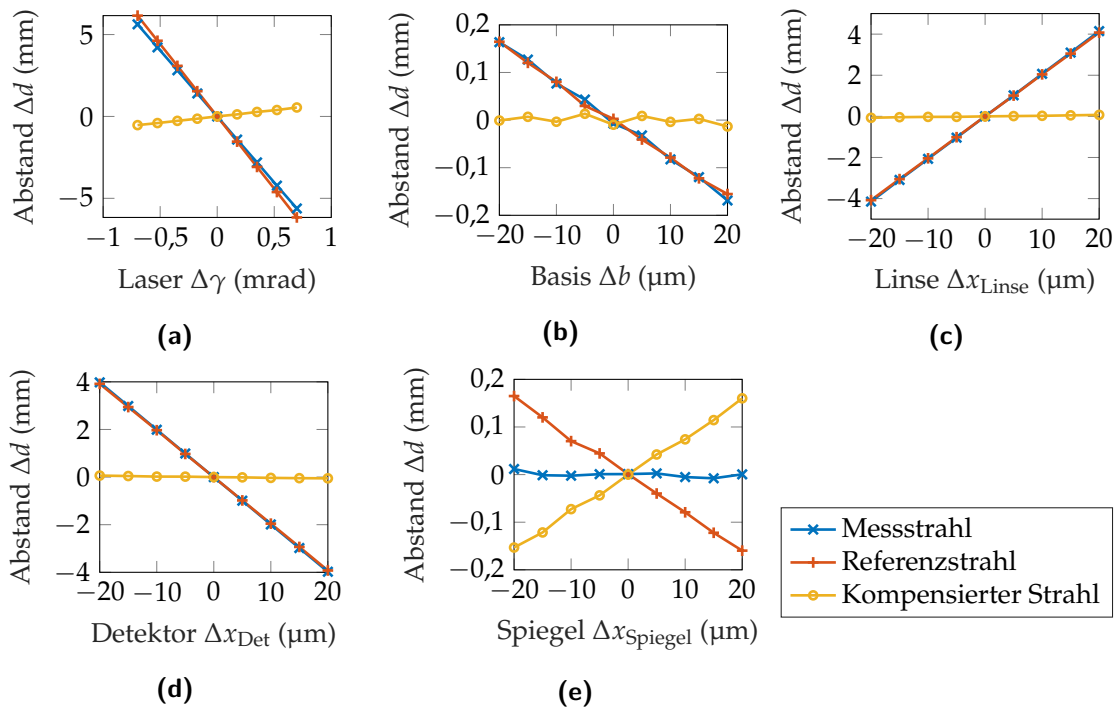


Abbildung 4.3: Simulierte Abstandsfehler Δd von Messstrahl, Referenzstrahl sowie kompensiertem Strahl in Abhängigkeit einer Änderung von (a) Laserstrahlwinkel $\Delta\gamma$, (b) Basis Δb , (c) Linsenposition Δx_{Linse} , (d) Detektorposition Δx_{Det} , (e) Spiegelposition $\Delta x_{\text{Spiegel}}$ (nach [169]).

Diese Ergebnisse wurden alle mit einem konstanten Messabstand von $d_0 = 1$ m ermittelt. Abschließend wird noch betrachtet, wie sich die Messabweichung bei der Verschiebung einer Komponente über den Messbereich verhält. Dazu wurde beispielhaft der Detektor um $\Delta x_{\text{Det}} = 15 \mu\text{m}$ verschoben. Die Messabweichung Δd mit und ohne Kompensation über den gesamten Messbereich ist in Abbildung 4.4 Verlauf der Messabweichung Δd über dem Abstand d bei einer Verschiebung des Detektors um $\Delta x_{\text{Det}} = 15 \mu\text{m}$. figure.caption.184 dargestellt. Dadurch wird deutlich, dass diese mit steigenden Abständen noch größer ausfällt, gleichzeitig aber über den gesamten Messbereich zuverlässig kompensiert wird.

4.2.2 Thermische Simulationen

Anders als in den bisherigen Simulationen, kommt es in einem realen Messgerät zur gleichzeitigen Verschiebung mehrerer Komponenten. Dabei kann sich jedoch aufgrund des mechanischen Aufbaus die Größenordnung der Bewegungen zwischen verschiedenen Bauteilen stark unterscheiden. Weiterhin ist zu beachten, dass eine Drift des Strahlteilers oder des Spiegels zu einem Fehler in der Kompensation

Tabelle 4.1: Beziehung zwischen Abstandsfehler Δd in Abhängigkeit von Parameteränderungen bei einem Messabstand von $d_0 = 1$ m ohne und mit Kompensation.

Parameter	Unkompensiert	Kompensiert	Reduzierung um
Laser $\Delta\gamma$	8,4 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	-0,8 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	90,4 %
Basis Δb	8,7 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,3 $\mu\text{m}/\mu\text{rad}$	96,2 %
Linse Δx_{Linse}	216,7 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	3,7 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	98,3 %
Linse Δz_{Linse}	22,4 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	13,1 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	41,8 %
Detektor Δx_{Det}	207,9 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	3,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	98,6 %
Detektor Δz_{Det}	21,6 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	12,8 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	40,9 %
Spiegel $\Delta x_{\text{Spiegel}}$	0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	-8,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	- - -

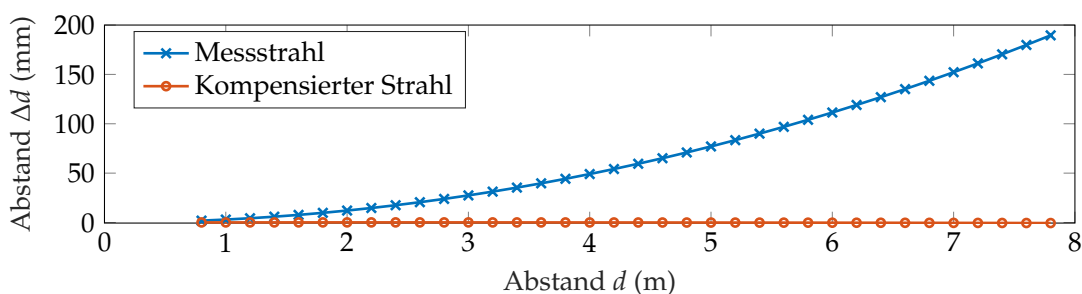


Abbildung 4.4: Verlauf der Messabweichung Δd über dem Abstand d bei einer Verschiebung des Detektors um $\Delta x_{\text{Det}} = 15 \mu\text{m}$.

führt, da dies nur den Referenzstrahl betrifft. Deshalb wird in diesem Abschnitt untersucht, wie groß die zu erwartenden Verschiebungen für die unterschiedlichen Komponenten sind [170]. Dazu wurde der verwendete Messaufbau in einem CAD-Programm modelliert. Durch thermische Simulationen kann damit analysiert werden, wie sich verschiedene Punkte im Aufbau in diversen Szenarien bewegen. So können zum Beispiel verschiedene Wärmequellen oder -senken definiert oder auch die generelle Umgebungstemperatur variiert werden. Die Verschiebung der Komponenten in x -Richtung bei einer Änderung der Umgebungstemperatur von 20°C auf 30°C ist in Abbildung 4.5(a) dargestellt. Die x -Richtung ist dabei wie zuvor in Abb. 4.1 dargestellt. (a) Schematische Draufsicht. (b) Isometrische CAD-Ansicht. (c) Frontale CAD-Ansicht. (d) Verlauf der Laserpunktzentren in Abhängigkeit des Messabstandes d . Die Befestigung der Grundplatte am optischen Tisch wurde dabei als fixiert definiert, so dass sich diese Punkte nicht verschieben. Dabei fällt auf, dass sich die Bewegungen je nach Komponente stark unterscheiden.

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

In Abb. 4.5(b) sind die Verschiebungen Δx_{Det} des Detektors und Δx_{Linse} der Linse in x -Richtung über der Temperatur aufgetragen. Hierbei wird ersichtlich, dass es in den Simulationen einen linearen Zusammenhang zwischen Temperatur und Verschiebung gibt.

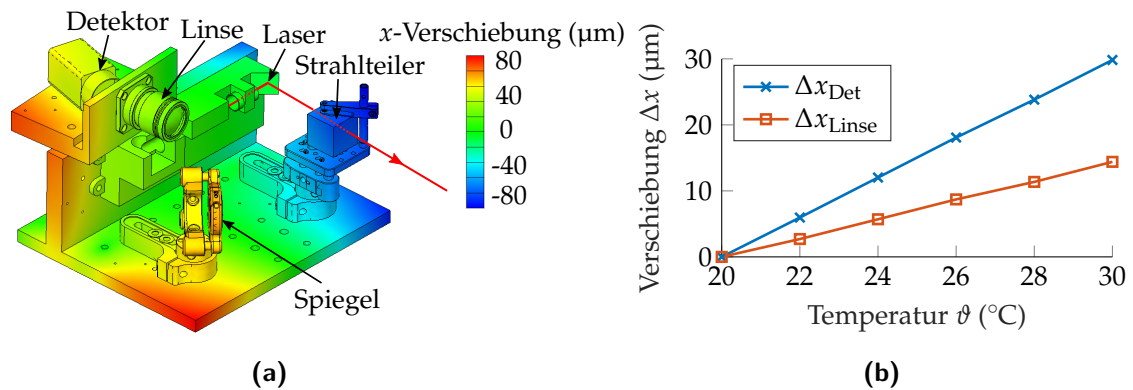


Abbildung 4.5: Simulation der thermischen Expansion des LTS bei einer Änderung der Umgebungstemperatur von 20 °C auf 30 °C. (a) Verschiebung der Komponenten in x -Richtung. (b) Verschiebung des Detektors und der Linse in x -Richtung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.

Für die dargestellte Änderung der Umgebungstemperatur um 10 °C ergeben sich beispielhaft die in Tabelle 4.2 Verschiebungen durch thermische Ausdehnungen im verwendeten LTS bei Änderung der Umgebungstemperatur um $\Delta\theta = 10$ °C. Dabei wird deutlich, dass bereits kleine Temperaturänderungen zu signifikanten Verschiebungen der Komponenten führen. Weiterhin ist anzumerken, dass sich auch der Strahlteiler und Spiegel verschieben. Dies führt zu einem Fehler in der Kompensation und wird deshalb im Folgenden weiter betrachtet.

Tabelle 4.2: Verschiebungen durch thermische Ausdehnungen im verwendeten LTS bei Änderung der Umgebungstemperatur um $\Delta\theta = 10$ °C.

Komponente	Δx	Δz
Laser	-9 μm	7 μm
Linse	14 μm	26 μm
Detektor	30 μm	-5 μm
Strahlteiler	-65 μm	49 μm
Spiegel	51 μm	73 μm

4.2 Simulative Untersuchung der Kompensation

Durch optische Simulationen mit Zemax OpticStudio wird darauf aufbauend untersucht, wie sich die thermische Ausdehnung des gesamten Aufbaus auf die Messung und Kompensation auswirkt. Dabei wird der Messabstand konstant auf $d_0 = 1 \text{ m}$ belassen, während die Positionen der Komponenten um die ermittelten Werte geändert werden. Die Verschiebung der Laserpunktzentren von Messstrahl, Referenzstrahl und kompensiertem Strahl in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 4.6(a) dargestellt. Hierbei fällt erneut der lineare Zusammenhang zwischen Verschiebung und Temperatur auf. Anders als in den ideal betrachteten Situationen im vorigen Abschnitt 4.2.1 Kompensation bei einzelnen Fehlern unterscheidet sich nun die Verschiebung zwischen Messstrahl und Referenzstrahl. Für eine ideale Kompensation muss in dem hier dargestellten Szenario der Kompensationsfaktor $k = 0,7$ gewählt werden. Dadurch lässt sich die Verschiebung des Messstrahles von $-1,1 \text{ px K}^{-1}$ auf 0 px K^{-1} reduzieren, bzw. die Messabweichung von $0,34 \text{ mm K}^{-1}$ auf 0 mm K^{-1} .

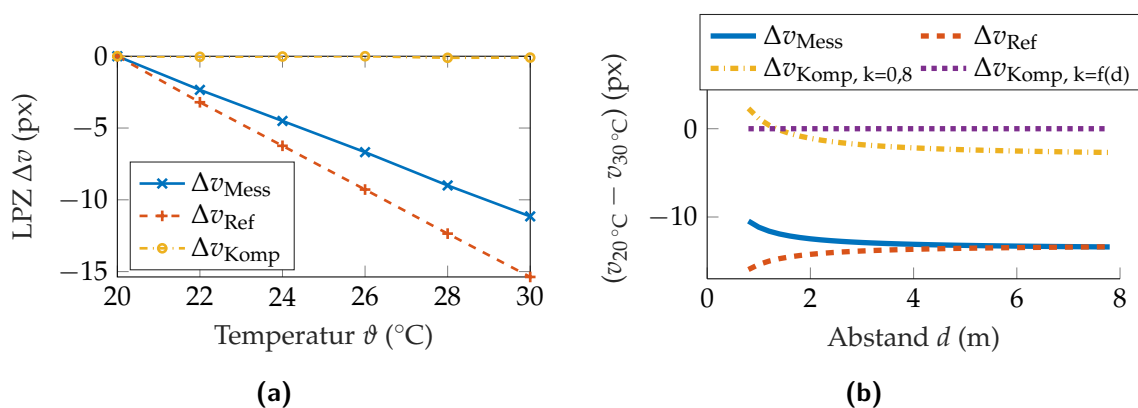


Abbildung 4.6: (a) Resultierende Verschiebung der beiden Laserpunktzentren in Abhängigkeit von der Temperatur. (b) Verschiebungen der Laserpunktzentren bei $\Delta\vartheta = 10 \text{ °C}$ in Abhängigkeit vom Abstand d .

Wie bereits erwähnt, kommt es aufgrund der Bewegung von Strahlteiler und Spiegel zu einer Verschiebung des Referenzstrahles. Dadurch ist dieser nicht mehr wie ursprünglich gefordert so ausgerichtet, dass er durch das Zentrum der Abbildungslinse verläuft. Anders als im idealen Fall angenommen kommt es damit also auch zu einer leichten Verschiebung des RFZ mit dem Abstand d . Das ist beispielhaft in Abb. 4.6(b) dargestellt. Weiterhin wird hier auch deutlich, dass auch die Verschiebung des Messstrahles durch einen Fehlereinfluss vom Abstand abhängt. Wird mit einem festen Kompensationsfaktor $k = 0,8$ gerechnet, ergibt sich über den gesamten Messbereich eine gute Verbesserung. Aufgrund der Abstandsabhängigkeit von Messstrahl und Referenzstrahl hängt theoretisch

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

auch der ideale Kompensationsfaktor $k = f(d)$ von der Distanz d ab. Dieser liegt damit im Bereich $k = 0,66 \dots 0,97$ und ermöglicht eine perfekte Kompensation der temperaturbedingten Messabweichung.

In Abb. 4.7 Messabweichung ohne und mit Kompensation bei thermischen Verschiebungen in Abhängigkeit vom Abstand d für $\vartheta = 20, 22, 24, 26, 28$ und 30°C . 200 ist die Messabweichung ohne und mit Kompensation über den gesamten Messbereich für verschiedene Temperaturen im Bereich von 20°C bis 30°C aufgetragen. Dabei wurde nun ein konstanter Kompensationsfaktor $k = 0,8$ gewählt. Hier wird erneut deutlich, dass es trotz der Verschiebung des Strahlteilers und des Spiegels zu einer Verbesserung durch die Kompensation kommt. So wird der RMSE (root mean square error) über den gesamten Messbereich bei einer Temperaturänderung um 10°C von 84 mm auf 17 mm bzw. um 80 % reduziert.

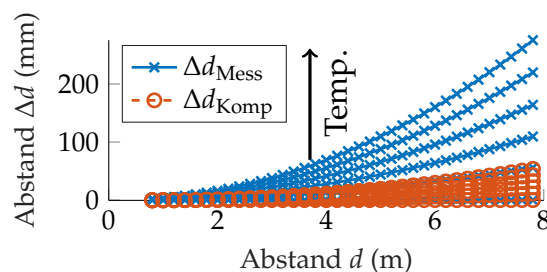


Abbildung 4.7: Messabweichung ohne und mit Kompensation bei thermischen Verschiebungen in Abhängigkeit vom Abstand d für $\vartheta = 20, 22, 24, 26, 28$ und 30°C .

Hier wird bereits deutlich, dass die Wahl des Kompensationsfaktors eine wichtige Rolle spielt. Da nicht genau vorhergesagt werden kann, welche Komponenten sich wie verschieben, muss der Kompensationsfaktor in späteren Messungen experimentell bestimmt werden. Damit wird sichergestellt, dass dieser auf den realen Messaufbau und die vorliegenden Umgebungsbedingungen angepasst ist.

4.2.3 Kompensation bei zufälligen Verschiebungen

Die thermischen Simulationen stellen dabei eine sehr idealisierte Betrachtung dar. Aufgrund von vernachlässigten Effekten, wie zum Beispiel dem internen Aufbau der Kamera, der ungleichmäßigen Erwärmung der Umgebung oder der Verlustleistung der aktiven Komponenten kann es in der Realität zu abweichenden Verschiebungen und somit Ergebnissen kommen. Deshalb dienen jetzt die zuvor ermittelten Bauteilverschiebungen in Tabelle 4.2 Verschiebungen durch thermische Ausdehnungen im verwendeten LTS bei Änderung der Umgebungstemperatur

um $\Delta\vartheta = 10^\circ$.table.caption.191 als obere Grenze, innerhalb derer sich die verschiedenen Komponenten zufällig bewegen. In Abbildung 4.8(a)figure.caption.214 ist der Verlauf der Messabweichung mit und ohne Kompensation über den gesamten Messbereich für zehn zufällige Parametersätze dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Kompensation weiterhin zu einer Verbesserung führt. Dies wird insbesondere durch Abbildung 4.8(b)figure.caption.214 hervorgehoben. Hier ist der RMSE über den gesamten Messbereich für 500 zufällige Parametersätze mit und ohne Kompensation dargestellt. Abgesehen von einigen Ausnahmen liefert die Kompensation stets eine Verbesserung. Dabei wird der mittlere RMSE von 37 mm auf 7 mm durch die Kompensation verbessert. Dies entspricht einer durchschnittlichen Reduzierung um 80 %. Für diese Simulationen wurde ein Kompensationsfaktor von $k = 0,8$ gewählt.

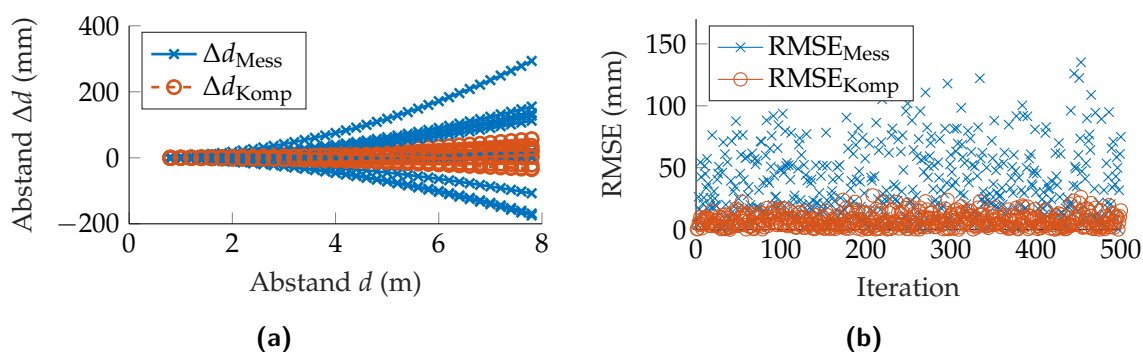


Abbildung 4.8: Einfluss von zufälligen Parameteränderungen innerhalb der zuvor ermittelten Grenzen. (a) Verlauf von Messstrahl und kompensiertem Strahl über den Abstand d für zehn Iterationen. (b) Vergleich des RMSE mit und ohne Kompensation für 500 Iterationen.

4.3 Laserpunkterfassung

Neben Messabweichungen durch die Verschiebung von Komponenten spielt insbesondere auch die Laserpunkterfassung eine große Rolle. So ist in einem LTS eine genaue Erkennung des Laserpunktzentrums wichtig für eine präzise Abstandsmessung [117, 118].

Wie in Abschnitt 2.3Laserpunkterfassungsection.76 beschrieben, wurden in der Vergangenheit viele verschiedene Ansätze zur Laserpunkterfassung vorgeschlagen. Dabei wurden jedoch unterschiedliche Bildverarbeitungsschritte, Simulationsdaten und Messaufbauten in den verschiedenen Publikationen zum Vergleich herangezogen. Ziel dieses Kapitels ist es daher, die Genauigkeit einiger grundlegender Algorithmen zu vergleichen und den Einfluss verschiedener Parameter,

wie beispielsweise der Rauschamplitude oder Bildvorverarbeitung, zu charakterisieren. Dadurch soll ein Algorithmus bestimmt und optimiert werden, der in dem vorliegenden Setup das beste Ergebnis bezüglich der Messunsicherheit erreicht [172].

Zuerst wird erläutert, wie das Detektorbild modelliert wird und die Simulationen allgemein ablaufen. Anschließend wird der Einfluss unterschiedlicher Rauschquellen sowie der Bildvorverarbeitung auf die Laserpunkterfassung untersucht. Darauf aufbauend werden die Algorithmen für das hier vorliegende Szenario optimiert und ein passender Algorithmus für die weitergehende Arbeit ausgewählt.

4.3.1 Modellierung des Laserpunktes und allgemeines Vorgehen

In Abschnitt 2.1.3 Rauscheinflüsse section*.60 wurde bereits ausführlich auf die unterschiedlichen vorhandenen Rauscheinflüsse, die in einem Detektorbild vorkommen können, eingegangen. Die verschiedenen Fehlerquellen haben aber eine sehr unterschiedliche Auswirkung auf die Laserpunkterfassung, so dass nicht jeder Rauscheinfluss modelliert werden muss. Mohammadikaji et al. [93] haben untersucht, wie sich das Rauschen in der Lasertriangulation passend simulieren lässt. An diesem Modell orientieren sich die weiteren Betrachtungen in diesem Abschnitt. Dabei wird das gesamte Rauschen durch die Überlagerung von Speckles, Poisson-, Gauß- und Quantisierungsrauschen simuliert.

Zur Simulation der Speckles wird angenommen, dass die von dem Messobjekt gestreuten Lichtwellen aufgrund der Oberflächenrauheit eine zufällige und unabhängige Phasenverschiebung $[0, 2\pi)$ aufweisen. Mit Hilfe der Fourier-Optik kann durch die Amplituden Transfer Funktion (ATF) der Apertur der Effekt der Speckles im Detektorbild simuliert werden.

Das Schrotrauschen kommt aufgrund der zufälligen Verteilung der gequantelten Photonen zustande und unterliegt einer Poisson-Verteilung. Durch Raytracing oder eine mathematische Berechnung kann die durchschnittliche Anzahl μ_p an Photonen auf jedem Pixel berechnet werden. Für die Standardabweichung σ_p einer Poisson-Verteilung gilt [55]

$$\sigma_p^2 = \mu_p. \quad (4.2)$$

Durch die Berechnung und das Raytracing, die hier nicht genauer vorgestellt werden, ergibt sich in einem Messabstand von $d = 1$ m eine Rate von $n_{\text{Photonen}} = 1,68 \cdot 10^9$ Photonen/ms, die sich über den gaußförmigen Laserpunkt verteilen. Mit diesen Werten lässt sich der Einfluss der Poisson-Verteilung berechnen.

Die übrigen Rauschquellen, wie das Dunkelstromrauschen, Ausleserauschen und Verstärkerrauschen, lassen sich als Dunkelrauschen durch eine Normalverteilung

mit Mittelwert μ_d und Standardabweichung σ_d zusammenfassen [55, 93]. Diese Werte sind abhängig von der verwendeten Kamera und steigen linear mit der Belichtungszeit und exponentiell mit der Kamertemperatur. Hier werden diese Werte anhand von Dunkelbildaufnahmen bestimmt [160]. Dafür wird die Kamera im verwendeten Messaufbau abgedunkelt, damit kein Licht auf den Sensor trifft. So wird ein Detektorbild aufgenommen und ausgewertet. Das Histogramm des resultierenden Dunkelbildes kann Abb. 4.9(a)figure.caption.240 entnommen werden. Hier fällt auf, dass es sich relativ gut um eine Gaußverteilung handelt. Der Mittelwert μ_d und die Standardabweichung σ_d ergeben sich bei einer Belichtungszeit von 1 ms, die auch bei den späteren Messungen im Abstand von $d = 1$ m verwendet wird, zu $\mu_d = 163,4$ bzw. $\sigma_d = 10,9$. Die Messung wurde mit einer 12-Bit-Kamera durchgeführt, folglich können die Intensitätswerte I im Bereich 0 bis 4095 liegen. Für abweichende Belichtungszeiten t_{bel} berechnen sich die Parameter näherungsweise durch $\mu_d = 0,16 \text{ ms}^{-1} \cdot t_{\text{bel}} + 163,4$ beziehungsweise $\sigma_d = 0,01 \text{ ms}^{-1} \cdot t_{\text{bel}} + 10,9$.

Das Quantisierungsrauschen der Analog-Digital-Umsetzung wird abschließend modelliert, in dem die kontinuierlichen Intensitätswerte auf eine 12-Bit-Variable abgebildet werden.

Für die Simulationen wird mit Laserpunkten mit idealem Gaußprofil gearbeitet, wie einer beispielhaft in Abbildung 4.9(b)figure.caption.240 dargestellt ist. Dadurch ist der wahre Mittelpunkt (v_w, y_w) exakt bekannt. Diesem idealen Punkt werden wie zuvor beschrieben die verschiedenen Rauscheinflüsse überlagert. Ein gemessener Laserpunkt ist in Abbildung 4.9(c)figure.caption.240 dargestellt, während in Abbildung 4.9(d)figure.caption.240 ein simulierter verrauschter Punkt abgebildet ist. Hier fällt auf, dass die Punkte visuell eine gute Übereinstimmung aufweisen, es aber auch leichte Unterschiede gibt. So weist das gemessene Detektorbild zum Beispiel leichtes ‚Lens Flare‘ auf [142], das durch Reflexionen am Abbildungssystem entsteht, aber hier nicht weiter betrachtet wird.

Zur Bewertung der Qualität der Simulation sollte jedoch eine subjektive Einschätzung vermieden werden [93]. Wird für den verrauschten Punkt das Zentrum (v_b, y_b) berechnet, kann durch die Kenntnis des wahren Zentrums die Messabweichung $\Delta v_{\text{lpe}} = v_b - v_w$ der Laserpunkterfassung ermittelt werden. Da einige der Rauschquellen, wie zum Beispiel das Gauß- und Poissonrauschen, statistischer Natur sind, müssen die Simulationen iterativ mit einer ausreichend großen Anzahl an Durchläufen wiederholt werden. Weiterhin ändert sich auch das Specklemuster abhängig von der Position auf der Messoberfläche, so dass auch hier mehrere Iterationen durchgeführt werden müssen. Um einen objektiven Kennwert zu erhalten, wird abschließend der RMSE(Δv_{lpe}) über die verschiedenen Iterationen

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

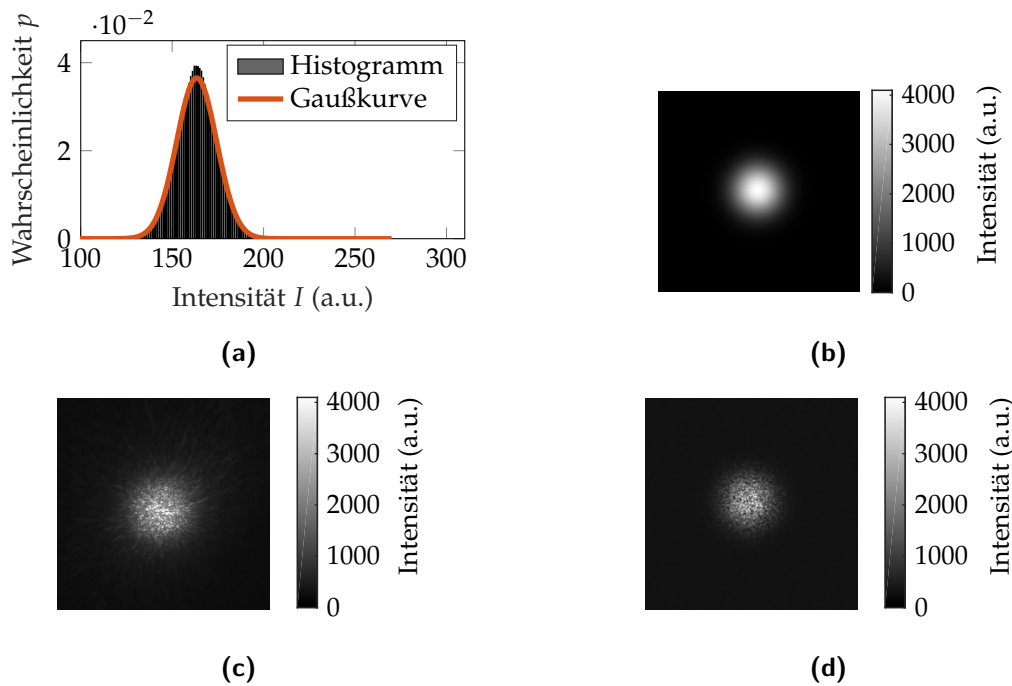


Abbildung 4.9: (a) Histogramm eines gemessenen Laserpunktes und zugehörige berechnete Gaußkurve. (b) Simuliertes Detektorbild eines idealen Laserspots mit gaußscher Intensitätsverteilung. (c) Gemessenes Detektorbild eines realen Laserspots. (d) Simuliertes Detektorbild eines Laserpunktes mit überlagerten Rauscheinflüssen.

der Simulation berechnet.

Durch Änderung beliebiger Parameter in der Simulation werden so verschiedene Einflussfaktoren untersucht. So können zum Beispiel die Amplituden der Rauscheinflüsse, die Form oder Größe des Laserpunktes und der Einfluss der Bildvorverarbeitung getrennt betrachtet werden. Dabei werden zuerst die grundlegenden vier Algorithmen der Schwerpunktmethode (SP), Gaußanpassung (GA), Kreisanpassung (KA) sowie Hough-Transformation (HT) untersucht und verglichen. Standardmäßig wird ein Medianwertfilter verwendet. Anschließend wird durch die Otsu-Methode segmentiert und eine morphologische Filterung mit einem Strukturelement mit Radius $r_{\text{disc}} = 3 \text{ px}$ ausgeführt. Die Kante wird mit dem Canny-Algorithmus berechnet. Durch die Simulationen kann so der beste Algorithmus für diesen Aufbau bestimmt und die Parameter der Bildvorverarbeitung dafür optimiert werden.

4.3.2 Einfluss der Bildvorverarbeitung

Anschließend wird die Auswirkung verschiedener Parameter in der Bildverarbeitung untersucht. Dabei wird insbesondere der verwendete Filter, die Größe des verwendeten Strukturelements bei der morphologischen Filterung sowie der berechnete Schwellwert für die Segmentierung betrachtet.

In Abb. 4.10(a)figure.caption.243 ist der RMSE(Δv_{lpe}) für die verschiedenen Algorithmen in Abhängigkeit des verwendeten Filters dargestellt. Hier fällt auf, dass allgemein die Messabweichung der verschiedenen Methoden stark variiert. So zeigen insbesondere die intensitätsbasierten Algorithmen wesentlich bessere Werte als die kantenbasierten. Bezüglich der Filter ist zu bemerken, dass der Mittelwertfilter die besten Ergebnisse mit sich bringt. Für die weiteren Schritte wird deshalb nun dieser Filter verwendet.

Darauf aufbauend wird der Schwellwert der Segmentierung betrachtet. Um auf sich ändernde Umgebungsbedingungen reagieren zu können, wird dieser häufig durch die sogenannte Otsu-Methode berechnet (siehe Abschnitt 2.3.1Segmentierungsection*.80). In den hier vorliegenden Simulationen ergibt sich damit ein durchschnittlicher Schwellwert $T \approx 672$. Hier wird nun der Einfluss davon abweichender Schwellwerte analysiert. Bei einem Wert von $T < 160$ liegt der RMSE der Laserpunkterfassung im Bereich von 30 px bis 60 px. Diese hohen Werte liegen daran, dass das normalverteilte Rauschen auf dem Detektor nicht zuverlässig entfernt wird und somit einen großen Einfluss auf die Berechnung des LPZ hat. Wie in Abb. 4.10(b)figure.caption.243 zu sehen ist, erreicht der RMSE der Laserpunkterfassung mit $T \approx 170$ ein Minimum. Deshalb sollte idealerweise ein fixer Intensitätswert verwendet werden. Problematisch ist dann aber, dass nicht mehr auf sich ändernde Umgebungsbedingungen reagiert wird.

Als Alternative kann der Schwellwert in Zusammenhang mit Mittelwert μ_d und Standardabweichung σ_d des Dunkelbildes durch $T = \mu_d + 5 \cdot \sigma_d$ berechnet werden [77]. Dadurch ergibt sich in diesem Fall ein Schwellwert von $T \approx 210$, der gut mit dem Optimum in Abb. 4.10(b)figure.caption.243 übereinstimmt. Da der Einfluss aber relativ gering ist, wird für eine flexiblere und robustere Laserpunkterfassung der Schwellwert im weiteren Verlauf mit der Otsu-Methode berechnet.

Anschließend wird die Größe des Strukturelements der morphologischen Filterung untersucht, siehe Abb. 4.10(c)figure.caption.243. Das Strukturelement ist eine Scheibe, dessen Radius man beliebig festlegen kann und der Entfernung von Löchern im Detektorbild dient. In den Simulationen fällt auf, dass die Messabweichung für die intensitätsbasierten Algorithmen im Bereich von $r_{disc} = 8$ px ein

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

Minimum einnimmt. Deshalb wird im weiteren Verlauf mit diesem Parameter gearbeitet. Da die Größe des Strukturelementes auch nicht den Radius des Laserpunktes auf dem Detektor übersteigen sollte, darf der Wert auch nicht größer gewählt werden, da ansonsten der gesamte Punkt gelöscht werden kann und somit keine Laserpunkterfassung mehr möglich ist.

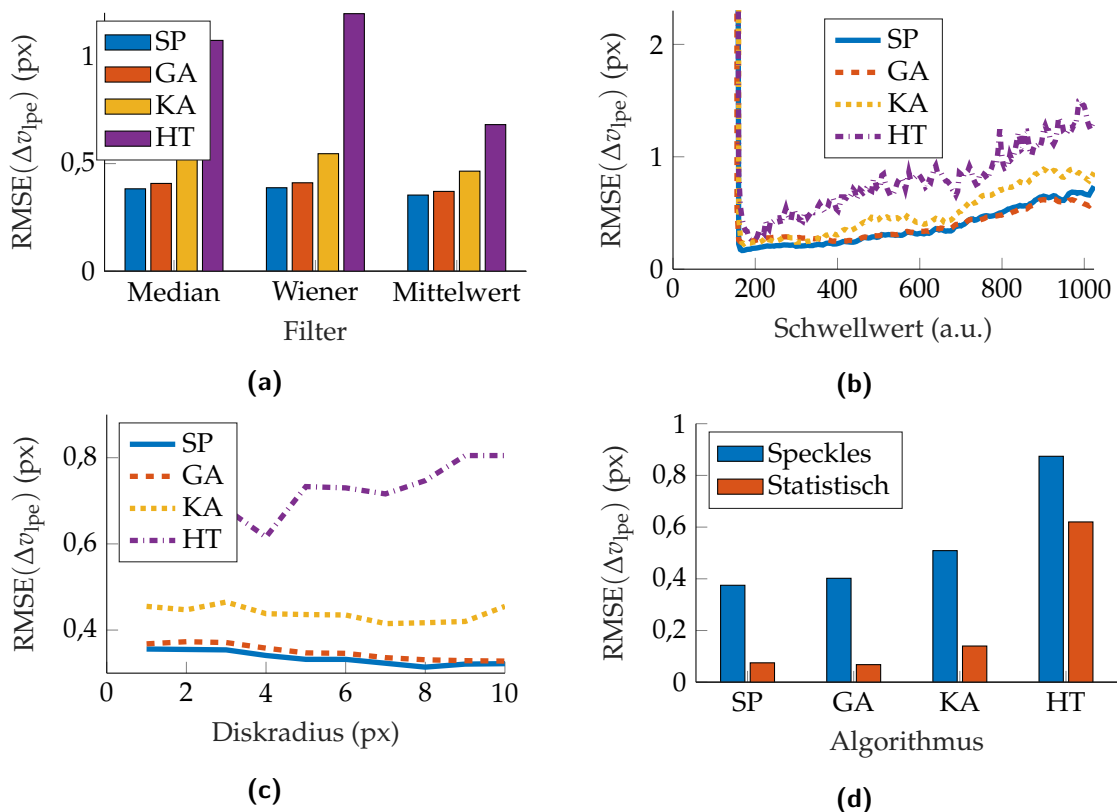


Abbildung 4.10: Einfluss der Bildvorverarbeitung auf die Messabweichung $RMSE(\Delta v_{lpe})$ der Laserpunkterfassung. (a) Filterung. (b) Schwellenwert der Segmentierung. (c) Größe des Strukturelementes der morphologischen Filterung. (d) Unterscheidung zwischen Fehler aufgrund von Speckles und statistischem Rauschen.

In Abb. 4.10(d) wird außerdem noch ein Vergleich zwischen dem Einfluss des statistischen und des Speckle-Rauschen gezogen. Wie hierbei auffällt, haben die Speckles einen wesentlich größeren Einfluss auf die Messunsicherheit $RMSE(\Delta v_{lpe})$. So liegt der Einfluss des statistischen Rauschen für die Schwerpunktmethode im Bereich von 0,08 px, während die Speckles einen Beitrag von etwa 0,38 px haben.

4.3.3 Optimierter Algorithmus

Abschließend wird der für diesen Aufbau passendste Algorithmus gewählt und noch weiter optimiert. Dazu werden nicht nur die vier grundlegenden Methoden betrachtet, sondern auch einige hybride Algorithmen (siehe Abschnitt 2.3.2 Hybride Algorithmen section*.95). Dazu wurden verschiedenste Kombinationen getestet, wobei hier nur die Varianten mit den besten Ergebnissen vorgestellt werden. In Tabelle 4.3 Vergleich vom $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für verschiedene Algorithmen bei der normalen Implementierung nach der Literatur sowie bei einer optimierten Umsetzung. table.caption.253 ist die Messunsicherheit $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für die vier grundlegenden Methoden sowie die hybriden Algorithmen zusammengefasst. Dabei wird jeweils auch der Vergleich zwischen den ursprünglichen Methoden aus der Literatur (Bildvorverarbeitung nach Referenz [162]) mit den hier verbesserten Berechnungen gezogen. Hier wird deutlich, dass die Abweichung in der Laserpunkterfassung signifikant reduziert werden kann. Für die Schwerpunktmethode wird zum Beispiel eine Verbesserung von 0,38 px auf 0,31 px, bzw. um 18 % erreicht.

Insgesamt ist weiterhin zu bemerken, dass durch die hybriden Algorithmen eine weitere Optimierung erzielt wird. So erreicht das beste Ergebnisse mit 0,25 px eine modellbasierte Segmentierung durch die Kreisanpassung in Kombination mit der Gaußanpassung. Da der hybride Algorithmus mit der Schwerpunktmethode mit 0,27 px ähnlich gute Ergebnisse erzielt, die Laufzeit aber mit 0,59 ms nur etwa 1 % der für die Gaußanpassung beträgt, wird im weiteren Verlauf der Arbeit diese Laserpunkterfassung verwendet.

Tabelle 4.3: Vergleich vom $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für verschiedene Algorithmen bei der normalen Implementierung nach der Literatur sowie bei einer optimierten Umsetzung.

Algorithmus	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,normal}})$	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,verbessert}})$	Rechenzeit
SP	0,38 px	0,31 px	0,27 ms
GA	0,41 px	0,33 px	63,41 ms
KA	0,53 px	0,42 px	0,23 ms
HT	1,07 px	0,61 px	9,98 ms
Quadrierte SP	0,36 px	0,32 px	0,23 ms
KA + SP ² (hybrid)	---	0,27 px	0,59 ms
KA + GA (hybrid)	---	0,25 px	57,39 ms

In Abb. 4.11 Abweichung Δv_{lpe} der Schwerpunktmethode SP und der verbesserten hybriden Schwerpunktmethode KA + SP² unter Verwendung einer modellbasierten Segmentierung. figure.caption.254 ist die Abweichung des Laserpunktzen-

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

trums in v -Richtung für 100 Iterationen für die normale und verbesserte hybride Schwerpunktmethode aufgetragen. Hier wird deutlich, dass der optimierte Algorithmus zu einer engeren Streuung Δv_{lpe} der Datenpunkte führt und somit insgesamt zu einer geringeren Messunsicherheit in der Lasertriangulation.

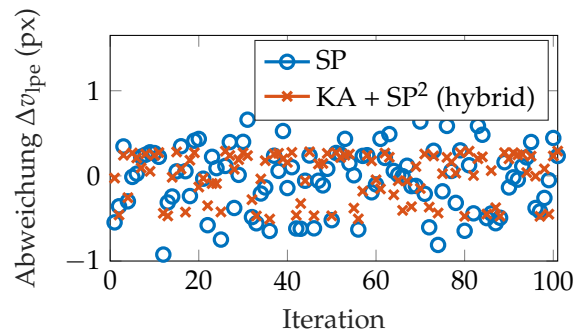


Abbildung 4.11: Abweichung Δv_{lpe} der Schwerpunktmethode SP und der verbesserten hybriden Schwerpunktmethode KA + SP² unter Verwendung einer modellbasierten Segmentierung.

4.4 Experimenteller Aufbau

Das zu Beginn dieses Kapitels vorgestellte Setup wurde für die anschließenden Messungen im Labor aufgebaut. Dabei wurden die Abmessungen und Bauteilpositionen gemäß Kapitel 3.1 Auslegung eines Lasertriangulationssystemsections.98 verwendet.

Die fasergekoppelte Laserdiode hat eine Mittenwellenlänge von 660 nm und eine Leistung von 10 mW (LasersCom, LDI-660-FP-10), wobei die optische Leistung durch die Elektronik nur auf 2 mW begrenzt wird. Das Licht wird durch eine achromatische Linse mit einer Brennweite von 25 mm fokussiert (Throl optics GmbH). Daraus ergibt sich auf dem Messobjekt ein Durchmesser des Laserpunktes von etwa 3,5 mm bei einem Abstand von $d = 1$ m.

Der Laserspot wird mit einer bikonvexen Linse mit einer Brennweite $f = 40$ mm und einem Durchmesser von 25,4 mm abgebildet (Thorlabs, LB1027-A). Durch einen Laserlinienfilter (Thorlabs, FB660-10) wird die Empfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht reduziert. Der Basisabstand b ist auf 122,5 mm eingestellt und der CMOS-Detektor hat eine Auflösung von $3856 \text{ px} \times 2764 \text{ px}$, mit einem Pixelabstand von $1,67 \mu\text{m}$ (Dahua, DH-MV-A3A04MG10E). Der Winkel der Abbildungslinse ist auf 4° festgelegt, während der Detektor nach der Scheimpflugbedingung ausgerichtet ist.

Der Laser wird mit einem Pentaprismenstrahlteiler im Verhältnis 50:50 aufgeteilt

(Artifex Engineering GmbH), während der Referenzstrahl von einem Zerodur-Spiegel (Thorlabs, B111-E02) abgelenkt wird. Der Pentaprismenstrahlteiler führt dazu, dass der Strahl immer um 90° abgelenkt wird. Der Strahlteiler wird um 4° um die z -Achse gekippt, um die beiden Laserpunkte auf der Messfläche räumlich um 10 mm zu trennen. Der Spiegel wird dabei so positioniert, dass der Referenzstrahl parallel zur x - z -Ebene in Richtung Messobjekt geführt wird und der Abstand Δx_{PMO} zwischen Mess- und Referenzpunkt beim minimalen und maximalen Messabstand gleich groß ist. Dadurch ist der Referenzstrahl um $\gamma_{\text{Ref}} = 1,6^\circ$ zum Messstrahl verkippt. Der Abstand zwischen Messfleck und Referenzfleck auf der Messoberfläche beträgt beim minimalen oder maximalen Messabstand etwa $\Delta x_{\text{PMO}} = 100 \text{ mm}$.

Der Aufbau des Messgerätes ist Abbildung 4.12 In den Experimenten verwendetes Lasertriangulationssystem. figure.caption.258 zu entnehmen. Der Strahlteiler und der Spiegel sind dabei auf speziellen Edelstahl-Halterungen befestigt, die thermisch möglichst stabil sind und damit Fehlern durch deren Verschiebung entgegenwirken sollen (Polaris-K1M4/M und Polaris-K1). Die verschiedenen Komponenten sind wiederum auf einer Polylactide-Grundplatte befestigt und stellen so insgesamt das Messgerät dar.

Um den Messabstand variieren zu können, wird die Messoberfläche auf einem Translationstisch befestigt (Thorlabs, NRT150), der eine Positioniergenauigkeit von $5 \mu\text{m}$ und einen Verfahrbereich von 150 mm besitzt. Damit kann der Messabstand im Bereich 1100 mm bis 1250 mm variiert werden. Als Messoberfläche wird, falls nicht anders erwähnt, eine weiße Teflonplatte verwendet. Diese lässt sich stabil am Translationstisch befestigen und streut das Licht relativ gleichmäßig und stellt somit eine geeignete Messoberfläche dar.

Für die Analyse des thermischen Verhaltens wird kontinuierlich die interne Kamertemperatur sowie durch Thermoelemente die Temperaturen der Messoberfläche, Umgebungstemperatur und Spiegelhalterung gemessen.

4 Optischer Kompensationsaufbau für die Lasertriangulation

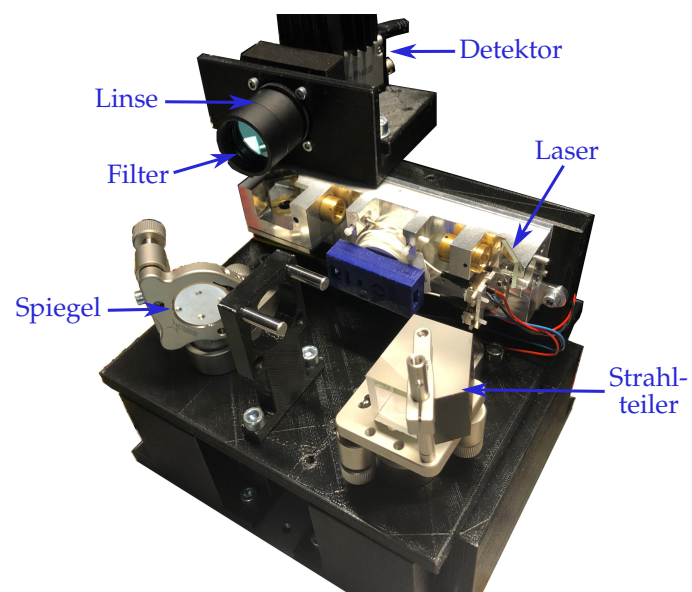


Abbildung 4.12: In den Experimenten verwendetes Lasertriangulationssystem.

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

In Kapitel 3.1 Auslegung eines Lasertriangulationssystemssection.98 wurde bereits dargelegt, dass die Empfindlichkeit eines LTS durch den optomechanischen Aufbau festgelegt und limitiert ist. Weiterhin wurde in Kapitel 4.3 Laserpunkterfassungsection.237 gezeigt, dass das Laserpunktzentrum aufgrund von Rauschen nur mit begrenzter Genauigkeit bestimmt werden kann. Folglich ist auch die Messunsicherheit der Abstandsmessung begrenzt.

Außerdem hat auch die Messoberfläche einen großen Einfluss auf die Entfernungsmessung. So kann es aufgrund der Bildung von Speckles und ungleichmäßiger Absorption von Laserstrahlung zu signifikanten Messabweichungen kommen. Um dies zu vermeiden, werden in diversen Messverfahren Referenzoberflächen verwendet, siehe Kapitel 2.1.4 Referenzoberflächensubsection.61.

In diesem Kapitel wird untersucht, wie durch das Anbringen spezieller Referenzoberflächen die Empfindlichkeit eines LTS erhöht und dieses somit robuster gegenüber Störungen gemacht werden kann. Dazu wird zuerst die Idee und das grundlegende Funktionsprinzip vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Funktionalität durch Simulationen detailliert untersucht. Abschließend wird vorgestellt, wie der experimentelle Aufbau mit den strukturierten Referenzoberflächen aussieht und wie die Strukturen praktisch umgesetzt werden.

5.1 Grundlegendes Funktionsprinzip

Um die Empfindlichkeit eines Lasertriangulationssystems zu erhöhen, wird eine Referenzoberfläche mit einer optischen Struktur, die in einem dünnen Streifen oder Balken absorbiert, auf der Messoberfläche angebracht [171]. Der abgebildete Laserpunkt hat folglich einen Streifen in der Mitte, wie in einer Simulation in Abbildung 5.1(a)figure.caption.261 dargestellt ist. Wenn diese Referenzoberfläche für einen normalen Lasertriangulationsaufbau verwendet wird, würde sich der Laserpunkt innerhalb dieser Struktur nicht bewegen. Damit die empfindlichkeitssteigernden Strukturen bei den Messungen verwendet werden können, muss das Design des

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

Lasertriangulationssysteme angepasst und ergänzt werden, wie in Abbildung 5.1(b)figure.caption.261 gezeigt. Zu diesem Zweck muss zusätzlich zum vertikalen Laserstrahl (VL) ein geneigter Laserstrahl (GL) schräg auf die Oberfläche gerichtet werden. Der geneigte Laser sollte so montiert werden, dass die Verlängerung der Laserlinie durch die Mitte der Abbildungslinse in der x - z -Ebene verläuft. Um zu vermeiden, dass der Laser das Sichtfeld des abbildenden Systems blockiert, und um die beiden Strahlen auf der Messoberfläche zu trennen, kann er oberhalb oder unterhalb der Abbildungsoptik in y -Richtung angebracht werden. Um das Messgerät über größere Entfernungen nutzbar zu machen, muss der Winkel des geneigten Lasers einstellbar sein. Der feste vertikale Laserstrahl wird dann sowohl für die normale absolute Abstandsmessung als auch für die Ausrichtung der Referenzoberfläche relativ zum Messgerät verwendet. Der geneigte Laserstrahl kann optional für eine erhöhte Messgenauigkeit bei relativen Abstandsmessungen in Kombination mit den strukturierten Referenzoberflächen verwendet werden. Für rein absolute Messungen kann eine Referenzoberfläche ohne absorbierenden Balken verwendet werden. Sie gewährleistet, dass die Messungen unabhängig von der Messoberfläche sind und somit auf jedem Material durchgeführt werden können.

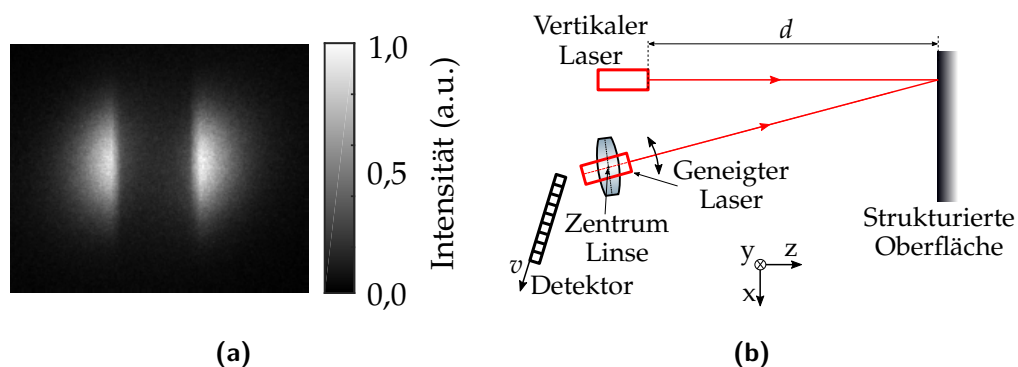


Abbildung 5.1: Schematische Beschreibung der Intensitätsmodulation mittels strukturierter Oberflächen nach [171]. (a) Simulierter Laserpunkt mit modulierter Intensität. (b) Beispielaufbau für eine kombinierte Messung von Absolutabständen mit dem vertikalen Laser und relativen Verschiebungen mit dem geneigten Laser und einer strukturierten Oberfläche.

Das Prinzip der erhöhten Empfindlichkeit wird in Abb. 5.2 Schematische Beschreibung der Intensitätsmodulation mittels strukturierter Oberflächen nach [171]. Unten: Vergleich der Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum Δv_L für drei Szenarien. Oben: Fünf beispielhafte Detektorbilder in verschiedenen Abständen d für die drei Szenarien.figure.caption.262 detailliert erläutert. Die Detektorbilder und Graphen werden durch Simulationen in Zemax

OpticStudio unter Verwendung des in Abb. 5.1(b)figure.caption.261 gezeigten Aufbaus generiert. Der obere Teil zeigt beispielhafte Detektorbilder für drei Szenarien (VL, GL ohne strukturierte Oberfläche und GL mit strukturierter Oberfläche) bei fünf verschiedenen Messabständen. Der untere Teil zeigt die Verschiebung der berechneten Laserpunktzentren für die drei unterschiedlichen Szenarien über einen Messabstand von $\Delta d = 50$ mm unter Verwendung der Schwerpunktsmethode mit einem Exponenten von $q = 4$ (siehe Abschnitt 2.3.2 Intensitätsbasierte Algorithmensection*.90).

Im Falle des vertikalen Lasers (obere Reihe in den Detektorbildern) bewegt sich der Laserpunkt auf dem Detektor mit einer Abstandsänderung, wie es bei einem normalen Triangulationsaufbau zu erwarten ist. Die berechneten und geometrischen Zentren des Laserspots, die mit einem blauen Plus bzw. roten Kreuz markiert sind, stimmen an allen Positionen überein, da der Laserspot eine gleichmäßige Intensitätsverteilung aufweist. Die Empfindlichkeit beträgt etwa $-3,2$ px/mm.

Wenn der geneigte Laser ohne strukturierte Oberfläche verwendet wird (mittlere Reihe der Detektorbilder), bewegt sich der Laserspot nicht auf dem Detektor. Dies liegt daran, dass der Strahl so ausgerichtet ist, dass er durch die Mitte der Abbildungslinse in der x - z -Ebene hindurchgeht, wie bereits erläutert wurde und wie es auch für den Referenzstrahl in Kapitel 4.1 Funktionsprinzip und optischer Aufbau section.152 der Fall ist. Folglich bleiben die berechneten und geometrischen Zentren des Laserspots über den gesamten Messbereich konstant. Die Empfindlichkeit dieses Aufbaus beträgt 0 px/mm, da wir einen Basisabstand von $b = 0$ mm zwischen der Linse und dem Laser haben, so dass keine Abstandsmessung möglich ist.

Das dritte Szenario zeigt den geneigten Laser unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche (untere Reihe der Detektorbilder). Die strukturierte Oberfläche, in den Detektorbildern als rotes Rechteck markiert, ist so ausgerichtet, dass der vertikale Laser sie genau in der Mitte trifft. Folglich bewegt sich die Struktur auf die gleiche Weise wie der vertikale Laserspot in den Detektorbildern. Der geneigte Laser wird so ausgerichtet, dass er die Struktur bei einem Abstand von $d_0 = 1000$ mm mittig trifft, da die vorherigen Simulationen um diese Entfernung herum durchgeführt wurden. Bei kürzeren Abständen $d < 980$ mm befindet sich die Struktur vollständig außerhalb des Laserspots, wie es im ersten Detektorbild zu sehen ist. Mit zunehmendem Abstand beginnt sich die Struktur innerhalb des Laserpunktes zu bewegen und moduliert so das Intensitätsprofil. Sobald die linke Seite des Laserpunktes absorbiert wird, bewegt sich das berechnete LPZ nach rechts. Das dritte Detektorbild zeigt das Maximum dieser Verschiebung. Danach, wenn die linke Seite des Laserspots wieder erscheint, bewegt sich das berechnete Laserpunktzentrum zurück zum geometrischen LPZ. Wenn sich bei $d = 1000$ mm die Struktur genau in der Mitte des Laserpunktes befindet, siehe viertes Detek-

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

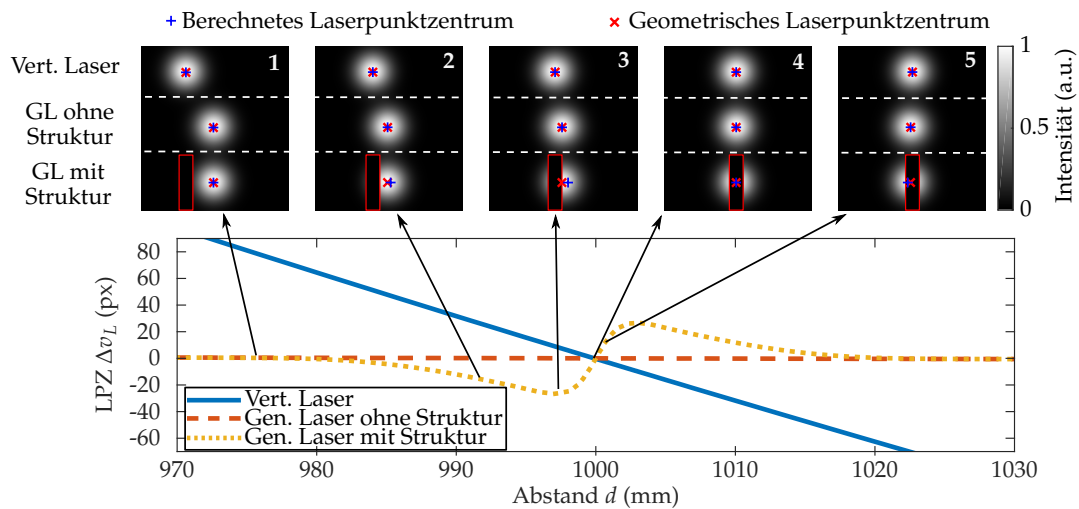


Abbildung 5.2: Schematische Beschreibung der Intensitätsmodulation mittels strukturierter Oberflächen nach [171]. Unten: Vergleich der Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum Δv_L für drei Szenarien. Oben: Fünf beispielhafte Detektorbilder in verschiedenen Abständen d für die drei Szenarien.

torbild, wird der steilste Punkt der Verschiebung erreicht. Von da an setzt sich diese symmetrisch fort. Aufgrund der künstlich induzierten Verschiebung des Laserpunktzentrums kann für einen begrenzten Messbereich ein Maximalwert der Empfindlichkeit von etwa 18 px/mm erreicht werden. Dies entspricht einem Anstieg um einen Faktor von etwa 5,7 verglichen zum Betrag der Empfindlichkeit ohne Struktur.

Der steile und damit wichtige Teil der Verschiebung sowie die daraus resultierende Empfindlichkeit sind in den Abbildungen 5.3(a)figure.caption.263 bzw. 5.3(b)figure.caption.263 zu sehen. Hier ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit innerhalb eines begrenzten Messbereichs stark erhöht werden kann.

5.2 Simulationen

In weiteren Simulationen werden die Auswirkungen der Breite der strukturierten Oberfläche und des Exponenten der Schwerpunktmethode untersucht. Die Verschiebung für verschiedene Verhältnisse $h = w_{\text{Balken}} / (2 \cdot r_{LP})$, wobei w_{Balken} die Breite des Balkens und r_{LP} der Radius des Laserpunktes auf der Mesoebene sind, ist in Abb. 5.4(a)figure.caption.271 dargestellt. Die Empfindlichkeit steigt mit zunehmender Balkenbreite, während gleichzeitig der nutzbare Messbereich abnimmt. Da ein größerer Teil des Laserpunktes mit einem breiteren Balken blockiert

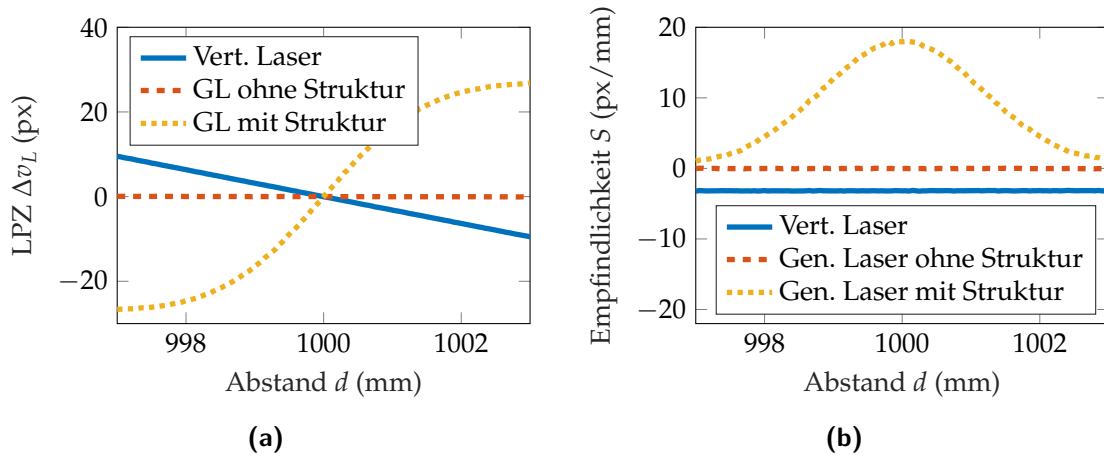


Abbildung 5.3: Simulationen mit einer strukturierten Oberfläche. (a) Verschiebung des Laserspotzentrums Δv_L . (b) Empfindlichkeit S .

wird, würde der Aufbau gleichzeitig anfälliger für Detektorrauschen werden. Wenn der Exponent q der Schwerpunktmethode erhöht wird, kann die Verschiebung des Laserpunktzentrums weiter erhöht werden, wie in Abb. 5.4(b)figure.caption.271 zu sehen ist. Da jedes einzelne Pixel stärker gewichtet wird, kann dies auch die Empfindlichkeit gegenüber Rauschen erhöhen und muss in den Messungen weiter untersucht werden.

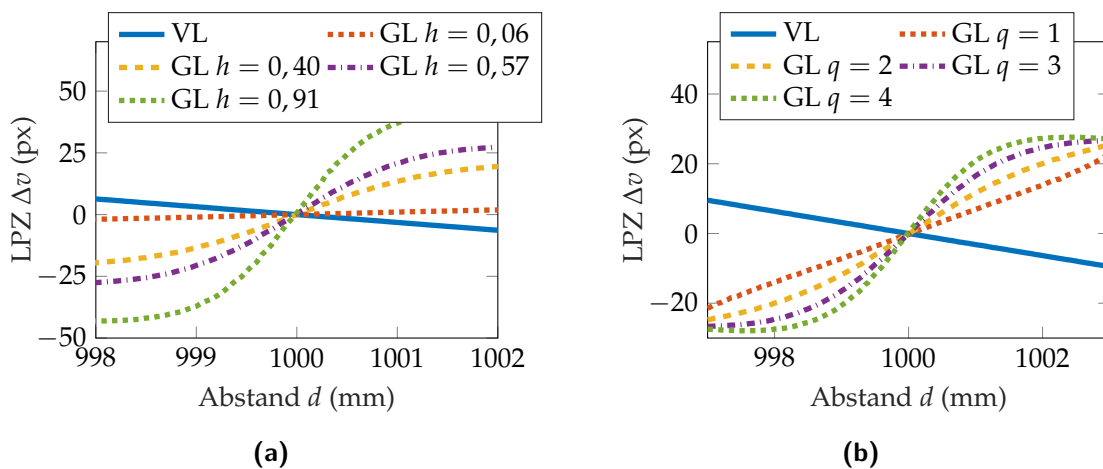


Abbildung 5.4: Simulationen der Laserpunktverschiebung unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche. (a) Für verschiedene Verhältnisse h von Balkenbreite zu Laserpunktdurchmesser auf der Mesoerfläche. (b) Für verschiedene Exponenten q der Schwerpunktmethode.

Weiterhin wird betrachtet, wie sich der Einfluss einer Struktur auf die Messunsicherheit der Abstandsmessung auswirkt. Dazu werden erneut Simulationen in

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

Zemax OpticStudio durchgeführt. Dabei werden die Detektorbilder mit und ohne Struktur unter idealen Bedingungen erstellt. Mit den rauschfreien Daten kann so jeweils ein Kalibrierpolynom für beide Fälle erstellt werden, die der Umrechnung von den Laserpunktzentren v_L in einen Abstand d dienen. Den Laserpunkt Bildern mit und ohne Struktur wird anschließend verschiedenes Detektorrauschen überlagert, wie es bereits in Kapitel 4.3.1 Modellierung des Laserpunktes und allgemeines Vorgehens subsection.238 durchgeführt wurde. Somit lässt sich dann die Messabweichung Δd_{Mess} für beide Fälle ermitteln, bzw. daraus erneut der RMSE berechnen. In diesen Simulationen wird der Messbereich 999,5 mm bis 1000,5 mm betrachtet. Für die Berechnung des Lasermittelpunktes ohne Strukturen wurde dabei der in Kapitel 4.3.3 Optimierter Algorithmus subsection.252 vorgestellte Algorithmus verwendet (Kreissegmentierung mit quadratischer Schwerpunktmethode), während mit Strukturen die normale quadratische Schwerpunktmethode verwendet wird.

Zuerst wird die Auswirkung von Rauschen ohne Speckles betrachtet. Folglich wird den Detektorbildern Gauß-, Poisson- und Quantisierungsrauschen überlagert. In Abbildung 5.5(a) figure.caption.282 ist der RMSE mit und ohne Struktur für verschiedene Mittelwerte des gaußschen Rauschens dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Strukturen ohne Speckles keine Verbesserung bringen. Stattdessen erhöht sich der RMSE um etwa $1 \mu\text{m}$, so dass es in einer leichten Verschlechterung resultiert. Die Standardabweichung des gaußschen Rauschens sowie das Poisson- und Quantisierungsrauschen haben nahezu keinen Einfluss auf den RMSE (Simulationen dazu werden hier nicht gezeigt).

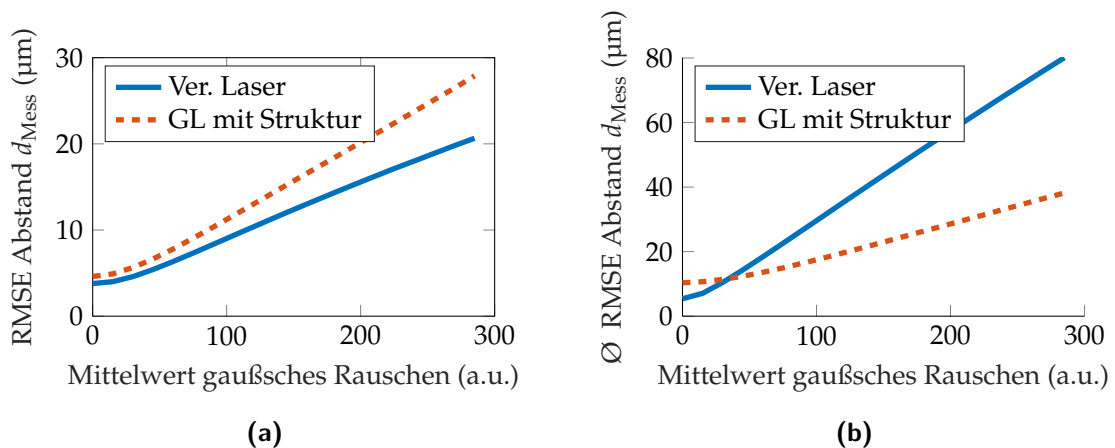


Abbildung 5.5: Vergleich des RMSE für den vertikalen Laser ohne Struktur und geneigtem Laser mit Struktur in Abhängigkeit vom gaußschen Rauschen (a) ohne Speckles, (b) mit Speckles gemittelt über sechs verschiedene Specklemuster.

Anschließend wird den Detektorbildern zusätzliches Speckle-Rauschen überlagert. Der Verlauf des RMSE in Abhängigkeit des Mittelwertes des gaußschen Rauschens ist in Abbildung 5.5(b)figure.caption.282 zu sehen. Dabei wurden beispielhaft sechs unterschiedliche zufällig generierte Specklemuster überlagert, damit erneut die RMSE-Werte berechnet und diese dargestellt. Wie hier deutlich wird, kommt es insgesamt zu einer größeren Abweichung aufgrund der Speckles. In den Fällen mit sehr geringem gaußschen Rauschen schneidet die Simulationen ohne Struktur besser ab als mit Struktur. Wird jedoch eine gewisse Rauschschwelle überschritten, zeigen die Simulationen mit Strukturen ein besseres Ergebnis. Diese Rauschschwelle liegt hier bei etwa 35. Wie in Kapitel 4.3.1Modellierung des Laserpunktes und allgemeines Vorgehenssubsection.238 gezeigt wurde, hat in unserem Messaufbau das gaußsche Rauschen einen Mittelwert von etwa 165. An diesem Punkt verbessert sich der RMSE von durchschnittlich $48\ \mu\text{m}$ auf $25\ \mu\text{m}$, bzw. um 48 %.

Weiterhin ist in Abbildung 5.6(a)figure.caption.287 der Einfluss der Balkenbreite auf den RMSE dargestellt. Wie hierbei deutlich wird, sinkt der RMSE mit steigendem w_{Balken} . Bei niedrigeren Werten würde die Empfindlichkeit abnehmen und somit der RMSE zunehmen. Da der Effekt bei Balkenbreiten größer als 1,5 mm relativ gering ist, sollte für die Messungen versucht werden, diesen Wert zu erreichen. Bei größeren Balkenbreiten kann das Rauschen einen steigenden Einfluss haben, so dass es dabei wiederum zu stärkeren Abweichungen kommen könnte. Dies wird auch in den Messungen in Kapitel 6.4Strukturierte Oberflächensection.366 deutlich.

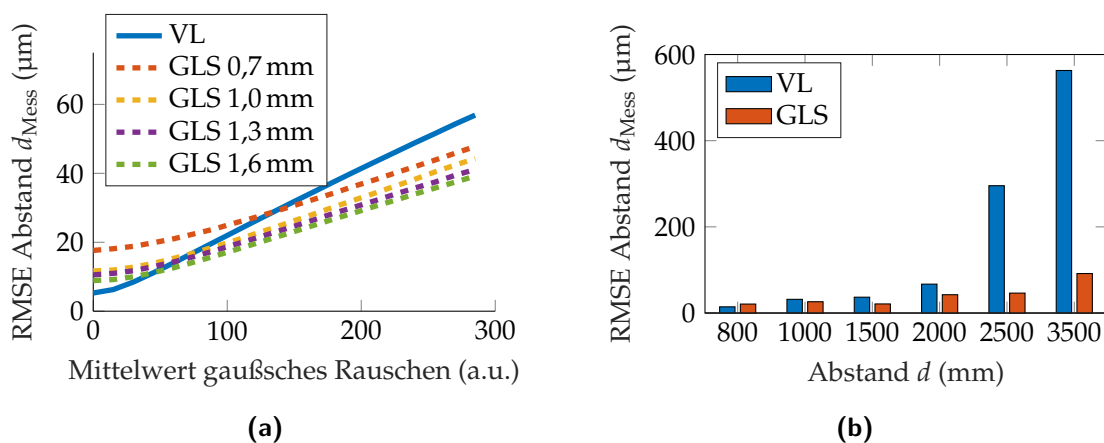


Abbildung 5.6: Vergleich des RMSE für den vertikalen Laser ohne Struktur und geneigten Laser mit Struktur in Abhängigkeit von (a) Einfluss der Balkenbreite, (b) Abstand d bei einem Mittelwert des gaußschen Rauschens von 165.

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

Abschließend wird der RMSE noch in verschiedenen Abständen betrachtet. Wie in Abbildung 5.6(b)figure.caption.287 deutlich wird, steigt der RMSE bei Simulationen ohne Struktur mit größeren Abständen stark an, während der RMSE mit Strukturen vergleichsweise konstant bleibt. Dabei ist der RMSE bei einem Wert des gaußschen Rauschens von 165 a.u. abgebildet. Beim minimalen Messbereich von 800 mm erzielt beispielsweise noch die Simulation ohne Struktur mit einem RMSE von 15,6 μm bessere Ergebnisse als mit Struktur (22,3 μm). Wird hingegen der Abstand $d = 2000$ mm betrachtet, verbessert sich der RMSE von 72,6 μm ohne Struktur auf 44,0 μm mit Struktur.

Insgesamt ist also anzumerken, dass die Strukturen in den Simulationen je nach Rauschen, Speckles und Abstand zu einer Verbesserung führen können, dies jedoch sehr von der jeweiligen Situation abhängt. Folglich muss in Messungen untersucht werden, ob der Einsatz von Strukturen im hier vorliegenden Messaufbau tatsächlich sinnvoll ist und einen positiven Nutzen zeigt.

5.3 Experimenteller Aufbau

Der verwendete Aufbau ist derselbe, wie er bereits in Kapitel 4.4Experimenteller Aufbau section.257 vorgestellt wurde. Einziger Unterschied ist, dass der geneigte Laser mit einem einstellbaren Winkel unterhalb der Abbildungslinse positioniert wird. Dadurch wird dieser Strahl, bezogen auf die x - z -Ebene, zwischen Referenz- und Messstrahl geführt.

Für den geneigten Laser im Falle ohne Fluoreszenz wird ebenso eine fasergekoppelte Laserdiode (LasersCom, LDI-660-FP-10) mit einer Mittenwellenlänge von 660 nm eingesetzt, die durch eine achromatische Linse mit einer Brennweite von 25 mm fokussiert wird (Throl optics GmbH). Der geneigte Laserstrahl wird um etwa 6° gegenüber der vertikalen Laser gekippt. Das auf die Abbildungslinse treffende Licht wird weiterhin mit einem Laserlinienfilter mit einer Mittenwellenlänge von 660 nm (Thorlabs, FB660-10) vom Umgebungslicht befreit.

Für die Untersuchungen mit fluoreszierenden Strukturen wird ein Laser im Wellenlängenbereich von 457,9 nm bis 514,5 nm verwendet (Modu-Laser LLC, STELLAR-PRO ML/150). Dieser wird zur Stabilisierung gegen die Vibrationen des Lüfters in eine Multimode-Faser eingekoppelt und beim Auskoppeln aus dieser kollimiert. Der Punktdurchmesser auf der Messoberfläche beträgt etwa 5 mm.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie eine strukturierte Oberfläche realisiert werden kann. Zum einen kann der Balken durch einen stark absorbierenden oder reflektierenden Balken realisiert werden, der auf eine gleichmäßig

streuende Oberfläche aufgebracht wird, siehe Abbildung 5.7(a)figure.caption.294. Zum anderen kann der diffus reflektierende Teil der strukturierten Messoberfläche mit fluoreszierenden Materialien umgesetzt werden (Abbildung 5.7(b)figure.caption.294). Dazu muss eine geeignete Wellenlänge des Lasers zur Anregung der Fluoreszenz gewählt werden. Der Balken wird dann durch einen normal streuenden Balken realisiert. Wenn das abgebildete Licht mit einem Langpassfilter gefiltert wird, erhält man einen Laserpunkt mit modulierter Intensitätsverteilung. Dies hat den Vorteil, dass keine Speckle-Bildung mehr auftritt, wodurch ein weiterer Fehlereinfluss eliminiert wird [46].

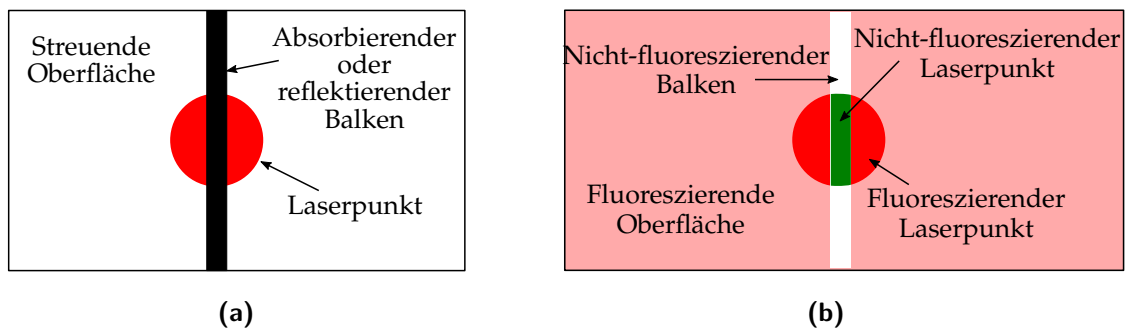


Abbildung 5.7: Mögliche Implementierungen einer strukturierten Oberfläche mit (a) Absorption oder Reflexion, (b) Fluoreszenz. [171]

Bei den Messungen wird für die strukturierte Oberfläche ein Spiegel auf dem Translationstisch angebracht. Um die Struktur zu erzeugen, werden beide Seiten des Spiegels mit weißem Papier bedeckt, wie in Abb. 5.8(a)figure.caption.295 zu sehen ist. Aufgrund der Simulationsergebnisse ist die Breite des Balkens auf etwa $w_{\text{Balken}} = 1,5 \text{ mm}$ eingestellt.

Für Analysen mit der fluoreszierenden Struktur wird als Material eine fluoreszierende Karte verwendet (Thorlabs, VRC2), die im Wellenlängenbereich 400 nm bis 640 nm absorbiert. Das Fluoreszenzlicht weist dabei eine Wellenlänge im Bereich von 580 nm bis 750 nm auf. Der Balken wird dann durch Aufbringen einer diffus streuenden Oberfläche erzeugt, siehe Abbildung 5.8(b)figure.caption.295. Das auf die Abbildungslinse treffende Licht wird dann mit einem Langpass mit einer Cut-Off-Wellenlänge von 630 nm gefiltert.

5 Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit

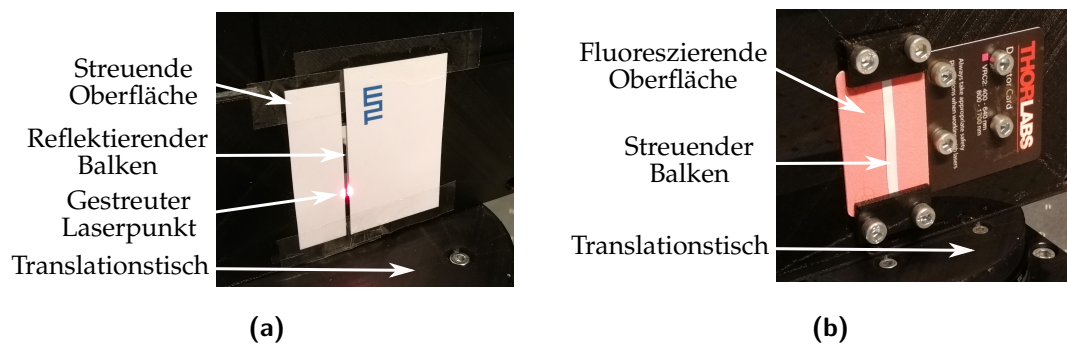


Abbildung 5.8: Praktische Umsetzung der strukturierten Oberfläche (a) mit reflektierendem Balken, (b) mit Fluoreszenz.

6 Messergebnisse und Diskussion

Die in den vorigen Kapiteln vorgestellten Änderungen und Erweiterungen eines klassischen LTS sollen nun messtechnisch untersucht, charakterisiert und diskutiert werden. Dazu wird zuerst der klassische Messaufbau ohne Erweiterungen in statischen und dynamischen Messungen betrachtet. Eine statische Messung bedeutet, dass sich der zu messende Abstand nicht ändert. Bei dynamischen Messungen wird der Abstand durch den Translationstisch um bekannte Werte variiert, so dass man für die Abstandsänderungen einen wahren Wert kennt.

Anschließend wird die Kompensationsfähigkeit des erweiterten optischen Aufbaus betrachtet. Dazu werden erneut statische und dynamische Messungen herangezogen. Außerdem wird auch die Kompensation mit Hilfe von thermischen Messungen untersucht und damit ein temperaturbasiertes Kompensationsmodell angepasst.

Als nächstes wird die Messunsicherheit der Laserpunkterfassung analysiert. Dazu werden in statischen Messungen geprüft, ob der zuvor gewählte optimierte Algorithmus tatsächlich die besten Ergebnisse erreicht.

Abschließend werden die strukturierten Oberflächen in praktischen Messungen untersucht. Dabei kommen insbesondere dynamische Messungen zum Einsatz, die die Steigerung der Empfindlichkeit und Reduzierung der Messunsicherheit belegen.

6.1 Charakterisierung des Lasertriangulationssystems

Zuerst wird das zuvor ausgelegte Lasertriangulationssystem charakterisiert. Dabei wird insbesondere darauf eingegangen, ob es die gesetzten Anforderungen erfüllt und wie sich das LTS generell in statischen und dynamischen Messungen verhält. In Abbildung 6.1 Detektorbilder des LTS in einem Abstand von (a) $d = 800$ mm, (b) $d = 6590$ mm. figure.caption.298 sind dazu die Detektorbilder in einem Abstand von $d = 800$ mm und $d = 6590$ mm dargestellt. Hier wird deutlich, dass sowohl der Messstrahl, als auch der Referenzstrahl über den gesamten Messbereich abgebildet werden können. Der Verlauf der beiden Punkte stimmt dabei, abgesehen von einer Spiegelung, mit den Simulationen aus Abbildung 4.2(b) figure.caption.158 überein. Der Messbereich wurde in Messungen zu 800 mm bis 6590 mm

bestimmt, wobei das Maximum durch die Größe des Labors begrenzt ist.

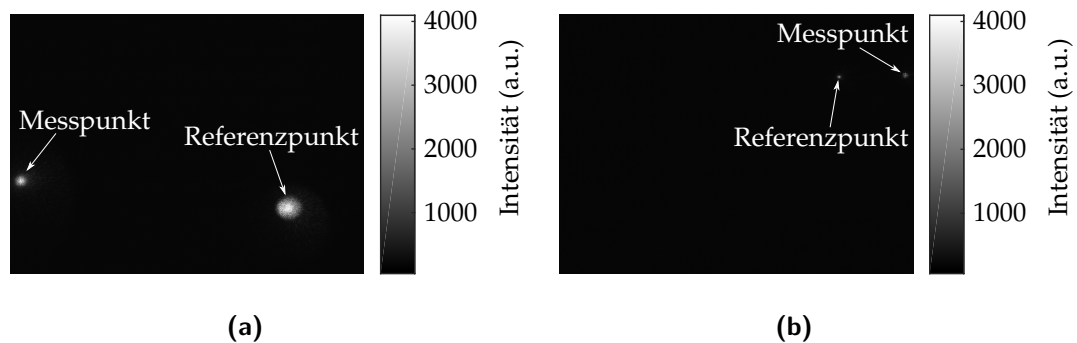


Abbildung 6.1: Detektorbilder des LTS in einem Abstand von (a) $d = 800$ mm, (b) $d = 6590$ mm.

In Abbildung 6.2(a)figure.caption.299 ist weiterhin die Kennlinie des Messgerätes über den gesamten Messbereich von 800 m bis 6590 m dargestellt. Da kein geeignetes Messgerät für eine Referenzmessung zur Verfügung stand, wurde die Messoberfläche mit Hilfe eines herkömmlichen Maßbandes positioniert. Folglich ist die Position mit einer relativ hohen Messunsicherheit behaftet. Trotzdem lässt sich daran erkennen, dass das Messgerät den gewünschten Messbereich erfüllt und sich das RFZ nicht verschiebt. Weiterhin stimmt die Verschiebung des MFZ gut mit den simulierten Werten überein.

Mit Hilfe des Translationstisches wird anschließend die Empfindlichkeit im Messbereich 1100 mm bis 1250 mm analysiert. Dabei wird die in Abbildung 6.2(b)figure.caption.299 gezeigte Verschiebung des Laserpunktes erreicht, die einer Empfindlichkeit von $S_{\text{Mess},1200 \text{ mm}} = -2,2 \text{ px mm}^{-1}$ entspricht. Dieser Wert stimmt dabei mit dem in den Berechnungen und Simulationen ermitteltem Wert von $S_{\text{Simu}} = -2,2 \text{ px mm}^{-1}$ überein. Außerdem wird hier deutlich, dass das RFZ wegen seiner korrekten Ausrichtung nicht vom Abstand abhängig ist.

Weiterhin wird hier noch kurz auf das zeitliche Verhalten ohne die Kompensation eingegangen. Dafür ist in Abbildung 6.3(a)figure.caption.305 eine statische Messung über einen Zeitraum von 36 h dargestellt. Da sich der Messabstand $d_0 = 1060$ mm mit der Zeit nicht ändert, sollte die Position des Laserpunktzenters theoretisch konstant bleiben. Wie durch die Messung deutlich wird, ändert sich das LPZ in einem Spitze-Spitze-Bereich von $\Delta v_{L,SS} = 1,1 \text{ px}$. Dies ist auf verschiedene Fehler wie zum Beispiel eine Ablenkung des Laserstrahls und optomechanische Verschiebungen zurückzuführen. Weiterhin wird deutlich, dass sich die Raumtemperatur in dieser Zeit nur minimal ändert. Diese Verschiebung entspricht folglich einer Messabweichung von $\Delta d_{\text{Mess,SS}} = \Delta v_L / S = 355 \text{ }\mu\text{m}$. Dabei

6.1 Charakterisierung des Lasertriangulationssystems

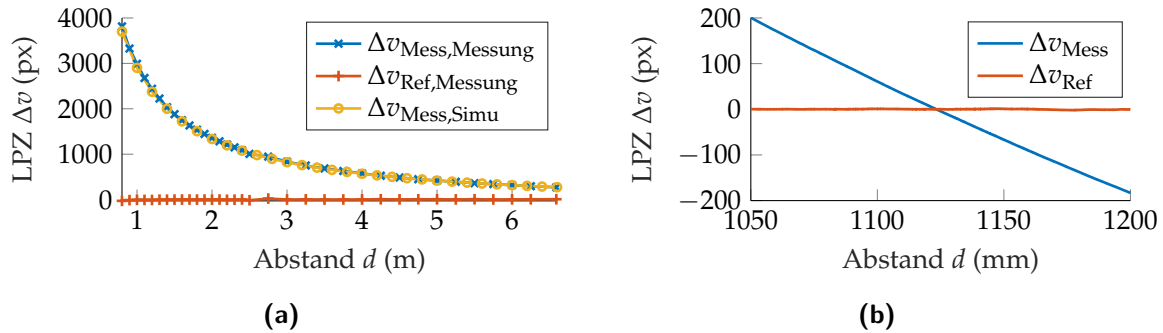


Abbildung 6.2: (a) Kennlinie des LTS über den gesamten Messbereich. (b) Verschiebung der Laserpunktzentren im Bereich $\Delta d = 150$ mm.

wird deutlich, dass eine Kompensation dieser unterschiedlichen Fehler notwendig ist.

Um den Einfluss des statistischen Rauschens zu analysieren, wurde von dem Laserpunktzentrum die zeitliche Drift (laufender Mittelwert über 100 s) subtrahiert. Dadurch wurde der Effekt von systematischen Messabweichungen, wie zum Beispiel der thermischen Ausdehnung des Systems, eliminiert, so dass im verbleibenden Signal nur noch der Einfluss von zum Beispiel Dunkelstromrauschen und Schrotrauschen enthalten sind. Ein Ausschnitt des resultierenden Signalverlaufes über 700 s ist in Abbildung 6.3(b) zu sehen. Die Standardabweichung des statistischen Rauschens ergibt sich hierbei zu 0,08 px.

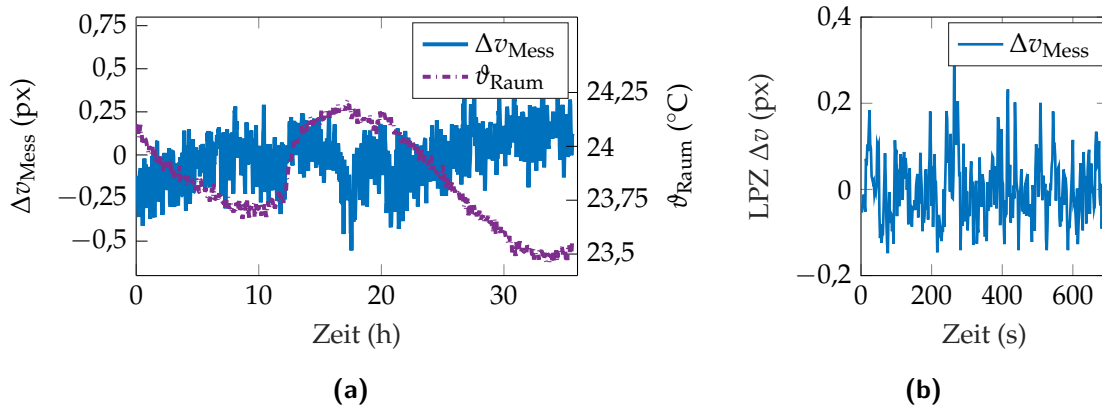


Abbildung 6.3: (a) Das Laserpunktzentrum v_L verschiebt sich aufgrund der unterschiedlichen unbekanntes Fehlerquellen mit der Zeit auch ohne Abstandsänderung. (b) Statistischer Einfluss des Rauschens auf das Laserpunktzentrum v_L .

6.2 Kompensation von Fehlereinflüssen

Die Leistungsfähigkeit der Kompensation wird nun durch verschiedene Messungen charakterisiert. Zunächst werden statische Messungen mit einem konstanten Messabstand $d_0 = 1060$ mm durchgeführt, um das zeitliche Verhalten des Aufbaus aufgrund von thermischen Driften und optomechanischen Verschiebungen zu untersuchen. Danach werden Fehler provoziert, um die Effizienz der Kompensation bei statischen Messungen zu erfassen. Schließlich wird die Messunsicherheit bei dynamischen Messungen über einen Messbereich von 1050 mm bis 1060 mm bestimmt.

6.2.1 Statische Messungen

In Abbildung 6.4 Messung, die die Kompensation von zeitlichen Abweichungen verdeutlicht. Der Messstrahl zeigt eine stärkere Abweichung als der kompensierte Strahl. [figure.caption.311](#) ist erneut die statische Messung aus dem vorigen Abschnitt dargestellt. Zur besseren Anschaulichkeit wird jetzt jedoch nicht mehr die Position Δv des LPZ dargestellt, sondern die resultierende Messabweichung Δd für den unkompensierten und kompensierten Fall. Durch die Kompensation lässt sich der Spitze-Spitze-Wert von $\Delta d_{\text{Mess,SS}} = 334 \mu\text{m}$ auf $\Delta d_{\text{Komp,SS}} = 81 \mu\text{m}$ bzw. um 76 % reduzieren. Der RMSE reduziert sich von $RMSE_{\text{Mess}} = 47 \mu\text{m}$ auf $RMSE_{\text{Komp}} = 16 \mu\text{m}$, bzw. um 66 %.

Der Korrelationskoeffizient der beiden Laserpunktzentren beträgt 0,96. Da die Korrelation zwischen dem Laserpunktzentrum des Messstrahles und der Temperatur ϑ einen Korrelationskoeffizienten von nur $-0,44$ ergibt, könnte der eingeführte Fehler nicht so gut allein mit der Temperaturinformation kompensiert werden. Dies ist ein erster ‚Proof of Concept‘, dass der hier vorgestellte Kompensationsaufbau eine signifikante Verbesserung des Messergebnisses bewirkt. In den Messungen wurde der Kompensationsfaktor experimentell zu $k = 0,9$ festgelegt, da sich damit die beste Kompensation ergibt.

Um die Kompensation sowohl kurzfristiger als auch langfristiger Driften hervorzuheben, zeigen die Abbildungen [6.5\(a\)figure.caption.315](#) und [6.5\(b\)figure.caption.315](#) einen Ausschnitt der hochpass- bzw. tiefpassgefilterten Signale. Bei Frequenzen unterhalb einer Periodendauer von 15 min ist deutlich zu erkennen, dass die Kurzzeitschwankungen des Signals eine hohe Korrelation von 0,96 aufweisen. Kurzzeitige Störungen, z.B. durch Laserstrahldrift, können daher leicht kompensiert werden. Langfristige Driften, die hauptsächlich aufgrund von Temperaturänderungen des Aufbaus auftreten, haben eine ähnliche Korrelation von

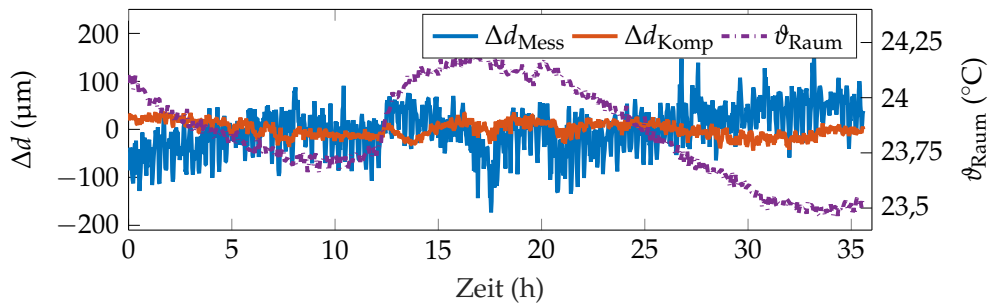


Abbildung 6.4: Messung, die die Kompensation von zeitlichen Abweichungen verdeutlicht. Der Messstrahl zeigt eine stärkere Abweichung als der kompensierte Strahl.

0,97, wie in Abbildung 6.5(b)figure.caption.315 zu sehen ist. Folglich können sie in ähnlichem Maße kompensiert werden.

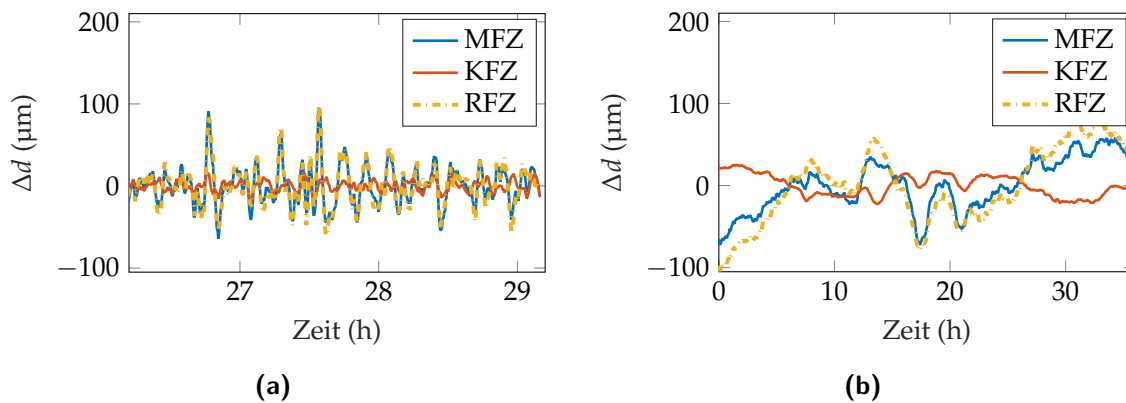


Abbildung 6.5: (a) Hochpassgefilterte Daten, die die Kompensation von kurzfristigen Drift-Effekten zeigen. Es wurde ein Filter minimaler Ordnung mit einer Durchlassfrequenz von 1,11 mHz, einer Steilheit von 0,85 und einer Sperrbanddämpfung von 60 dB verwendet. (b) Tiefpassgefilterte Daten, die die Kompensation von Langzeit-Drift-Effekten zeigen. Es wurde ein Filter mit gleitendem Mittelwert und einer Fensterlänge von 1 h verwendet.

Um den Einfluss von Temperaturänderungen zu untersuchen, wird eine weitere statische Messung über 5 h aufgenommen, siehe Abb. 6.6 Verschiebung der Laserpunktzentren von Messstrahl und Referenzstrahl bei einer statischen Messung über 5 h. Dabei stieg die Raumtemperatur um etwa $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ an, wodurch es zu einer thermischen Ausdehnung des Messaufbaus kommt.figure.caption.322. In dem Zeitraum hat sich die Raumtemperatur durch die Heizung von $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf etwa $22,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Um den Zusammenhang zwischen Punktverschiebung und Temperatur zu verdeutlichen, wurde die Verschiebung der Laserpunktzentren

über der Raumtemperatur ϑ aufgetragen.

In der Messung ergibt sich eine Verschiebung des MFZ von $2,7 \text{ px K}^{-1}$. Wird diese mit den Simulationen in Abschnitt 4.2.2 Thermische Simulationensubsection.187 verglichen, wird ersichtlich, dass die Verschiebung dort mit $1,4 \text{ px K}^{-1}$ in der selben Größenordnung lag. Dabei fällt auf, dass in den Messungen kein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Verschiebung besteht. Da die thermischen Simulationen relativ einfach gestaltet sind, kann es so zu den Unterschieden zwischen Simulationen und Messungen kommen. So sind in den Experimenten zum Beispiel weitere Fehlerquellen wie die begrenzte Strahlstabilität des Lasers oder eine ungleichmäßige Erwärmung des Raumes zu nennen.

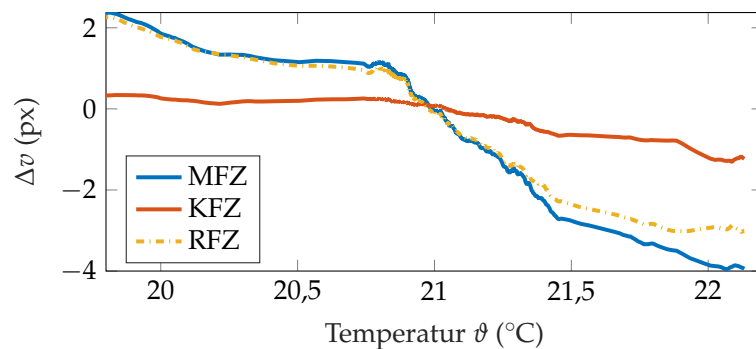


Abbildung 6.6: Verschiebung der Laserpunktzentren von Messstrahl und Referenzstrahl bei einer statischen Messung über 5 h. Dabei stieg die Raumtemperatur um etwa $2,4 \text{ °C}$ an, wodurch es zu einer thermischen Ausdehnung des Messaufbaus kommt.

Aufgrund der thermischen Ausdehnung des Aufbaus kommt es in dem Zeitraum von 5 h zu einer Verschiebung des MFZ um bis zu $6,3 \text{ px}$. Durch eine Kompensation mit dem Faktor $k = 0,9$ kommt es aber weiterhin zu einer Verbesserung der Ergebnisse. So wird die Spitze-Spitze-Verschiebung des KFZ auf $1,7 \text{ px}$ reduziert, was einer Verbesserung von 74% entspricht. Bezogen auf den RMSE der gemessenen Entfernung wird die Messunsicherheit von $416 \text{ }\mu\text{m}$ auf $97 \text{ }\mu\text{m}$ reduziert.

Darüber hinaus wurde die thermische Ausdehnung einzelner Komponenten untersucht. An der Halterung des Detektors wurde ein $330 \text{ }\Omega$ -Heizwiderstand angebracht. Um die Temperaturänderung zu überwachen, wurde daneben ein Temperatursensor befestigt. Der Einfluss der Erwärmung ist in Abbildung 6.7(a)figure.caption.326 zu sehen. Wenn bei $t = 6 \text{ min}$ für 30 s eine Leistung von $1,7 \text{ W}$ im Widerstand umgesetzt wird, wird das umgebende Material um etwa 1 °C aufgeheizt. Infolgedessen werden sowohl das MFZ, als auch das RFZ um etwa $17,7 \text{ px}$ abgelenkt, was zu einer Abstandsänderung Δd_{Mess} von etwa $5,5 \text{ mm}$ führt, während die Abweichung des KFZ auf $0,48 \text{ px}$ oder $0,15 \text{ mm}$ reduziert wird. Dadurch wird der eingeführte Fehler um 97% verringert. Da sich dies wesentlich nur auf

die Position des Detektors auswirkt, wurde der Kompensationsfaktor auf $k = 1$ gesetzt, was sich in den Simulationen als idealer Kompensationsfaktor für eine alleinige Bewegung des Detektors erwiesen hat. Bei Anwendung eines Kompensationsfaktors von $k = 0,9$, wie in den vorigen Experimenten, wird die Abweichung des kompensierten Strahls immer noch auf $\Delta d_{\text{Komp}} = 0,66 \text{ mm}$ reduziert, was zu einer Verbesserung von 84 % führt.

In zusätzlichen Experimenten wurden Vibrationen des Messaufbaus provoziert, um die Fähigkeit des Aufbaus, Fehler zu kompensieren, weiter zu testen. Der optische Tisch, auf dem der Messaufbau steht, wurde mechanisch bewegt. Die daraus resultierende Verschiebung des MFZ und des KFZ ist in Abbildung 6.7(b) dargestellt. Während der Messstrahl um bis zu $\Delta v_{\text{Mess}} = 5,1 \text{ px}$ bzw. $\Delta d_{\text{Mess}} = 1,59 \text{ mm}$ Spitze-Spitze abweicht, wird die kompensierte Abweichung auf 0,8 px bzw. 0,26 mm reduziert. Dies entspricht einer Verbesserung von 86 %.

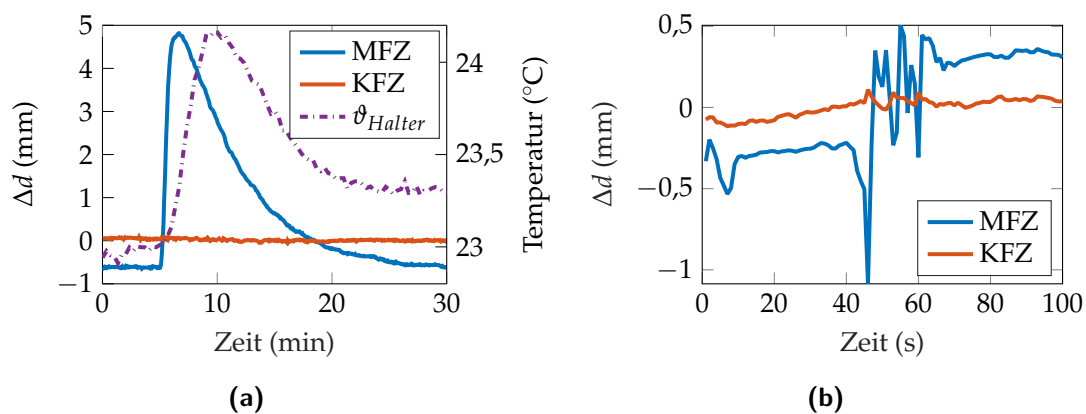


Abbildung 6.7: (a) Ein Heizwiderstand an der Kamerahalterung wurde nach 6 Minuten für eine Dauer von 30 Sekunden eingeschaltet. Dies führt zu einer Verschiebung des MFZ aufgrund der thermischen Ausdehnung, während das KFZ nicht beeinflusst wird. (b) Aufgrund mechanischer Vibrationen am optischen Tisch zeigt das MFZ eine Bewegung, während der Einfluss im KFZ stark reduziert wird.

6.2.2 Mathematische Auswertung zur Kompensation

In den bisherigen Betrachtungen wurde zur Kompensation die Differenz zwischen den beiden Punktpositionen genommen, wobei die Position des Referenzstrahles mit einem Faktor $k \leq 1$ gewichtet wurde. Wie in Abschnitt 4.2.2 Thermische Simulationensubsection.187 simulativ gezeigt wurde, kommt es durch Verschiebungen des Strahlteilers und des Spiegels zu Abweichungen, die mit dem genannten Aufbau nicht kompensiert werden können. Diese zeigen sich insbesondere über

einen längeren Zeitraum, wie bereits in Abb. 6.4 Messung, die die Kompensation von zeitlichen Abweichungen verdeutlicht. Der Messstrahl zeigt eine stärkere Abweichung als der kompensierte Strahl. figure.caption.311 deutlich wurde.

Deswegen wird hier eine weitere Methode vorgestellt, wie mit Hilfe von gemessenen Temperaturen eine zusätzliche Kompensation erreicht werden kann. Dabei können diese Messwerte in ein mathematisches Modell übergeben werden, welches die zu erwartenden Verschiebungen der Komponenten und den damit zusammenhängenden Fehler Δv_{Temp} schätzt, siehe Abb. 6.8(a) figure.caption.333. Wie im vorigen Abschnitt 6.2.1 Statische Messungen subsection.310 vorgestellt, werden durch die optische Kompensation mit dem Referenzstrahl bereits vielfältige Fehler beseitigt. Durch die Informationen aus dem Temperaturmodell kann zusätzlich ein langfristiger Drift des Strahlteilers und des Spiegels beseitigt werden, um so eine noch genauere Entfernungsmessung zu ermöglichen.

Als Modelle kommen beispielsweise ein Regressionsmodell oder neuronale Netze in Frage [40, 76, 100, 121]. Diese müssen durch experimentelle Daten so angepasst werden, dass sie die Verknüpfung zwischen Temperaturen und resultierenden Verschiebungen wiedergeben. Beispielhaft wurde hier ein Regressionsmodell mit der Raumtemperatur T_R , Lasertemperatur T_L , Messobjekttemperatur T_M und Kamertemperatur T_K verwendet. Mit Hilfe von fünf statischen Messungen über Zeiten im Bereich von 1 h bis 3 h wurde das Modell trainiert.

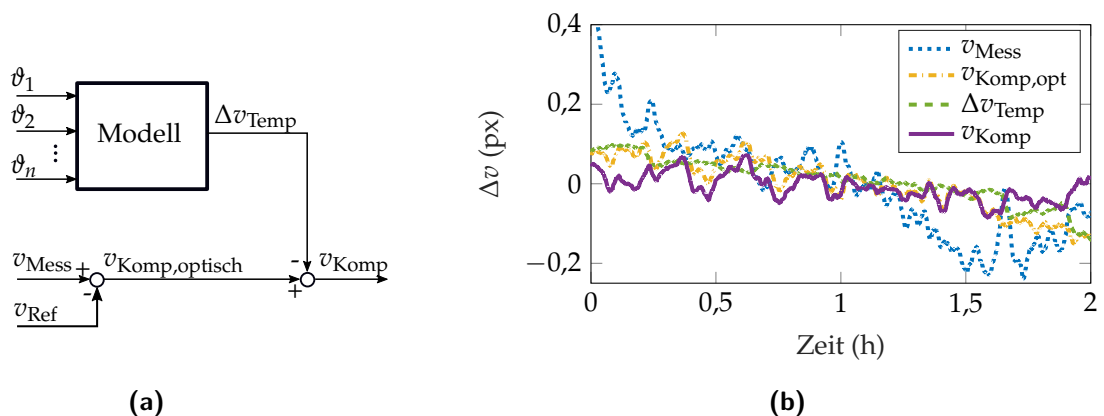


Abbildung 6.8: (a) Schematischer Ablauf der zusätzlichen Kompensation durch ein Temperaturmodell. (b) Vergleich einer statischen Messung ohne Kompensation, mit optischer Kompensation, mit reiner Temperatur-Kompensation sowie mit kombinierter Kompensation. [170]

In Abbildung 6.8(b) figure.caption.333 sind die Laserpunktzentren in einer statischen Messung über 2 h für vier unterschiedliche Fälle dargestellt. Das MFZ des unkompensierten Lasers beträgt dabei $RMSE_{v, \text{Mess}} = 0,13$ px. Durch Verwendung

des Referenzstrahles lässt sich der RMSE um 46 % auf $RMSE_{v,Komp,opt} = 0,07$ px reduzieren. Wird nun zusätzlich die Temperatur für die Kompensation nach Abbildung 6.8(a)figure.caption.333 verwendet, verringert sich der RMSE des LPZ auf $RMSE_{v,Komp} = 0,03$ px. Dies entspricht einer Verbesserung von 77 % verglichen zum unkompensierten Fall.

6.2.3 Dynamische Messungen

In nachfolgenden Messungen wird die resultierende Verbesserung des Kompensationsaufbaus bei einer Abstandsmessung untersucht. Die Messoberfläche wird dazu im Bereich von 1050 mm bis 1060 mm mit einer Schrittweite von 5 μ m durch den Translationstisch verschoben. Wie in Kapitel 4.1 Funktionsprinzip und optischer Aufbau section.152 beschrieben wurde und in Abbildung 6.9(a)figure.caption.339 zu sehen ist, ist die Position des Messstrahls von der Messentfernung d abhängig, während die Position des Referenzstrahls relativ konstant bleibt. Sowohl für den kompensierten als auch für den unkompensierten Strahl wird für die Kalibrierung eine rationale Funktion angepasst, mit dessen Hilfe die gemessenen und kompensierten Laserpunktzentren in Abstände übertragen werden können.

Es ist in Abbildung 6.9(b)figure.caption.339 deutlich erkennbar, dass der unkompensierte Strahl stärker von der Kalibrierfunktion abweicht. In einem Zeitraum von drei Tagen wurden 18 dynamische Messungen in diesem Messbereich aufgenommen. Die Abweichung der Distanzmessung Δd kann dann durch Subtraktion der wahren Distanz d_{wahr} von der gemessenen oder kompensierten Distanz d_{Mess} bzw. d_{Komp} berechnet werden. In Abbildung 6.9(c)figure.caption.339 ist ein Vergleich der Abweichung zwischen Messungen mit dem Messstrahl und dem kompensierten Strahl dargestellt. Wie hier zu erkennen ist, ist die Abweichung des Messstrahls im Vergleich zur Abweichung des kompensierten Strahls größer. Da eine einzelne Messung etwa 3 h dauert, lässt sich eine Drift des Fehlers mit einer Drift des Laserpunktzentrums aus den statischen Messungen erklären. Ein Fehler von 200 μ m entspricht ungefähr einer Verschiebung des Laserpunktzentrums um 0,6 px, was die typische Driftamplitude in den vorherigen Messungen war (siehe Abbildung 6.3(a)figure.caption.305). Diese Drift wird zu einem guten Grad kompensiert. Anhand dieser Messabweichung kann der RMSE berechnet werden, der die Leistung des Messaufbaus charakterisiert. Innerhalb der 18 Messungen wird der durchschnittliche RMSE von 77 μ m mit dem MFZ auf 61 μ m mit dem KFZ reduziert, was einer Verbesserung von 22 % entspricht. Diese Kompensation ist nicht so gut, wie sie in Simulationen und statischen Messungen nachgewiesen wurde, da Speckles eine weitere große Fehlerquelle in der Lasertriangulation dar-

6 Messergebnisse und Diskussion

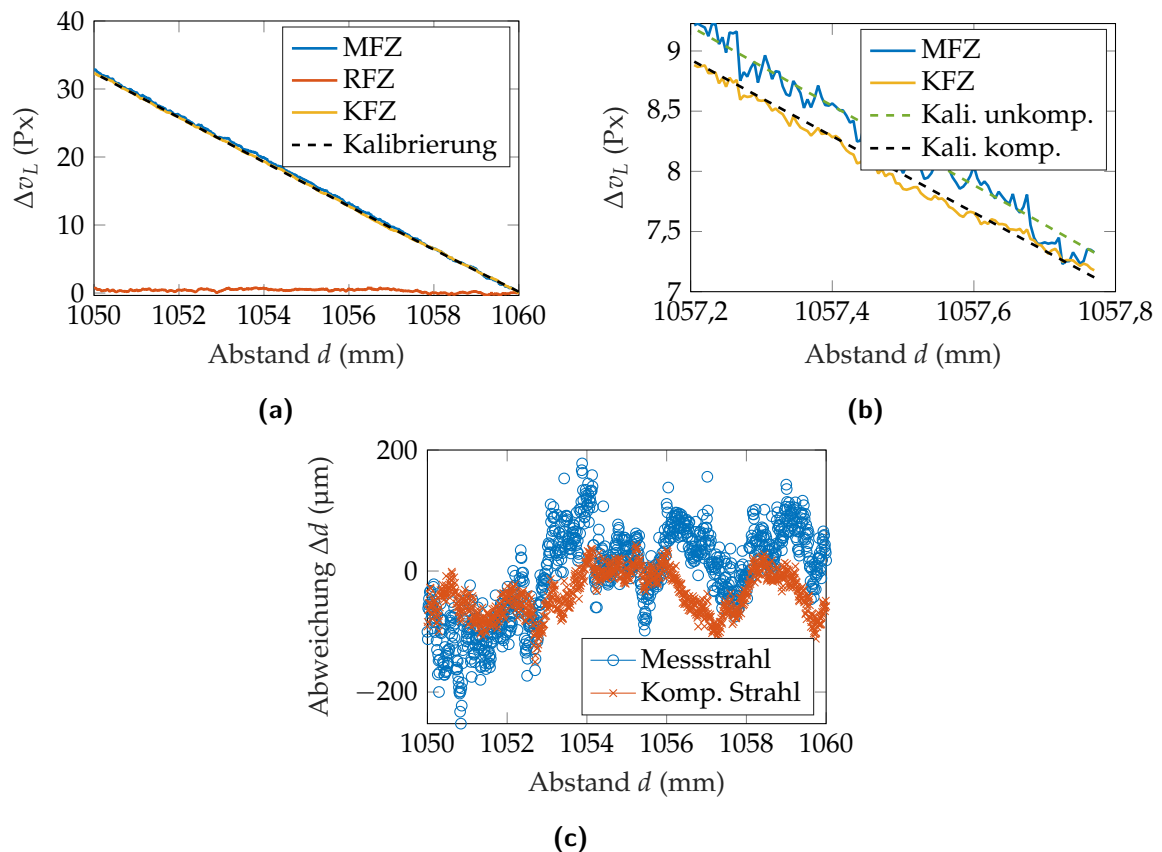


Abbildung 6.9: (a) Dynamische Messung über den Bereich von 10 mm. (b) Nahaufnahme eines Teils der Messung, wobei die Verbesserung durch den kompensierten Strahl hervorgehoben wird. (c) Messabweichung des kompensierten und nicht-kompensierten Strahls. [169]

stellen. Der Kompensationsaufbau führt jedoch immer noch zu einer signifikanten Verbesserung des RMSE der Abstandsmessung.

In einem weiteren Experiment wurden innerhalb von fünf Tagen 15 dynamische Messungen in einem Bereich von 910 mm bis 1060 mm mit einer Schrittweite von 50 μm durchgeführt. Dies entspricht der maximal möglichen Bewegung des verwendeten Translationstisches. Die resultierende Verschiebung der LPZs für eine Messung ist in Abbildung 6.10(a) zu sehen. Innerhalb der 15 durchgeführten Messungen wird der durchschnittliche RMSE von 109 μm mit dem Messstrahl auf 85 μm mit dem kompensierten Strahl reduziert, was einer Reduktion von 22 % entspricht. Die Verbesserung ist identisch zu der Bewegung von 10 mm zuvor. Auch hier hat die Abweichung des kompensierten Strahls deutlich abgenommen, wie in Abbildung 6.10(b) zu sehen ist.

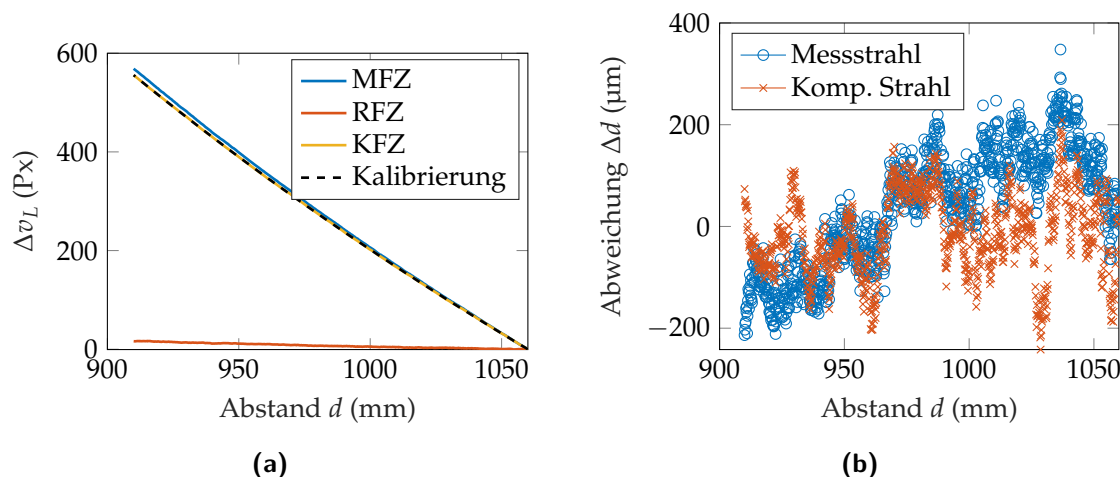


Abbildung 6.10: (a) Dynamische Messung über den Bereich von 150 mm. (b) Messabweichung des kompensierten und nicht-kompensierten Strahls. [169]

6.3 Laserpunkterfassung

Anschließend werden die Algorithmen zur Laserpunkterfassung in dem Messaufbau verglichen. Damit werden die Simulationen verifiziert und die Algorithmen können nochmals abschließend optimiert werden. Dazu werden zuerst statische Messungen ausgewertet, um den statistischen Fehlereinfluss quantifizieren zu können. Zur Betrachtung des Speckle-Einflusses werden Messungen mit einer seitlichen Verschiebung der Messoberfläche analysiert.

Für die statische Betrachtung beträgt der Abstand d_0 des Aufbaus 1160 mm. Während einer Messzeit von 10 min wurden 1200 Bilder im eingeschwungenen Aufbau aufgenommen. Der Ausschnitt eines Detektorbildes ist in Abb. 6.11(a) zu sehen. Theoretisch sollte sich das Laserpunktzentrum mit der Zeit nicht verändern. Wie aber bereits in Kapitel 6.2.1 festgestellt wurde, kommt es aufgrund von thermischen Verschiebungen zu Abweichungen. Folglich wird als wahres LPZ v_w der gleitende Mittelwert über 25 Messwerte verwendet. Die Abweichung um diesen Mittelwert wird dann als Messabweichung aufgrund der statistischen Rauscheinflüsse des Detektors angenommen. Durch den gleitenden Mittelwert wird berücksichtigt, dass es auch in einer statischen Messung zu Abweichungen aufgrund von Verschiebungen kommt, siehe voriges Kapitel.

Die Messabweichung Δv_{lpe} für die normale Schwerpunktmethode und den gewählten hybriden Algorithmus, bestehend aus modellbasierter Segmentierung und quadrierter Schwerpunktmethode, ist beispielhaft in Abb. 6.11(b) dargestellt. Hierbei wird bereits deutlich, dass die Abweichung durch die

verbesserte Laserpunkterfassung stark reduziert werden kann. In Tabelle 6.1 Vergleich vom $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich statistischer Fehlereinflüsse. Tabelle 6.1 ist der $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für die normalen und verbesserten Algorithmen gemäß Kapitel 4.3 Laserpunkterfassungsection.237 sowie die Verbesserung angegeben. Diese Werte weisen eine gute Übereinstimmung zu den simulierten Ergebnissen auf. Hier wird deutlich, dass die Laserpunkterfassung durch die Optimierung der Bildverarbeitung stark verbessert werden kann. Ebenso wie in den Simulationen führen die intensitätsbasierten Algorithmen in Kombination mit einer modellbasierten Bildsegmentierung zu den besten Ergebnissen.

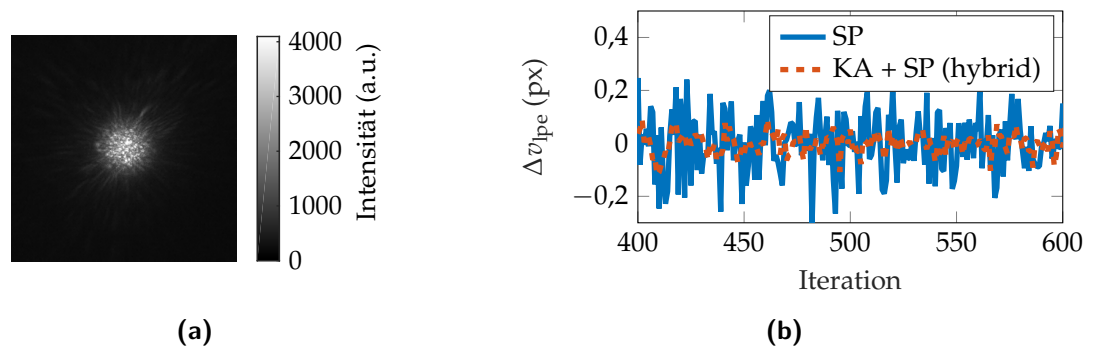


Abbildung 6.11: (a) Ausschnitt eines Detektorbildes in dem Lasertriangulationsaufbau. (b) Ausschnitt der Abweichung Δv_{lpe} der normalen und verbesserten quadrierten Schwerpunktmethode unter Verwendung einer modellbasierten Segmentierung.

Tabelle 6.1: Vergleich vom $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich statistischer Fehlereinflüsse.

Algorithmus	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,normal}})$	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,verbessert}})$	Verbesserung
SP	0,10 px	0,06 px	40 %
GA	0,09 px	0,06 px	33 %
KA	0,19 px	0,10 px	47 %
HT	0,58 px	0,42 px	28 %
KA + SP ²	- - -	0,04 px	33 %

Um den Einfluss der Speckles auf die Messergebnisse genauer zu charakterisieren, wurde die Messoberfläche lateral zum Messgerät verschoben. Dabei ändert sich also nicht der Abstand d_0 , der konstant bei 1160 mm bleibt. Folglich sollte sich das LPZ eigentlich nicht verschieben. Wie in Abbildung 6.12 Änderung des LPZ

aufgrund von Speckles bei einer lateralen Verschiebung der Messoberfläche. figure.caption.362 dargestellt ist, kommt es bei einer lateralen Verschiebung um 13 mm um eine Verschiebung des LPZ um bis zu $\Delta v_{\text{Lpe}} = 1,3 \text{ px}$. Das lässt sich durch den starken Einfluss der Speckles begründen. Da der Laser bei der lateralen Verschiebung auf eine andere Stelle der Messoberfläche trifft, bildet sich folglich ein anderes Specklemuster aus. Dies führt dazu, dass sich das berechnete Laserpunktzentrum verschiebt. Dabei wird erneut deutlich, dass sich die Abweichung aufgrund der Speckles durch die verbesserten Algorithmen reduzieren lässt.

In Tabelle 6.2 Vergleich vom RMSE(Δv_{Lpe}) für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich Speckle-Einfluss. table.caption.365 ist der Vergleich für die normalen Algorithmen gegenüber der verbesserten Laserpunkterfassung für die laterale Verschiebung der Messoberfläche zusammengefasst. So lässt sich der RMSE(Δv_{Lpe}) aufgrund von Speckles von 0,46 px bei der normalen Schwerpunktmethode auf 0,40 px mit dem hybriden Algorithmus reduzieren. Insgesamt lässt sich der Einfluss von Speckles in den Messungen durch die angepasste Bildverarbeitung nur leicht reduzieren. Dies lässt sich damit erklären, dass die Speckles in den Simulationen statistisch verteilt waren und somit eine gewisse Gleichmäßigkeit aufweisen. Aufgrund von Beschädigungen der Oberfläche kann es in den Messungen dann zu unregelmäßigeren Speckles kommen, die starke Intensitätsschwankungen im Detektorbild nach sich ziehen und somit alle Algorithmen ähnlich beeinflussen.

In dieser Messung fällt auf, dass der Einfluss der Speckles in der selben Größenordnung wie in den Simulationen in Abschnitt 4.3.2 Einfluss der Bildvorverarbeitung subsection.242 liegt. So ergab sich dort für die Schwerpunktmethode eine Messunsicherheit von 0,38 px, während der gemessene Wert 0,46 px beträgt. Insgesamt wird damit verifiziert, dass die Rauscheinflüsse passend modelliert sind.

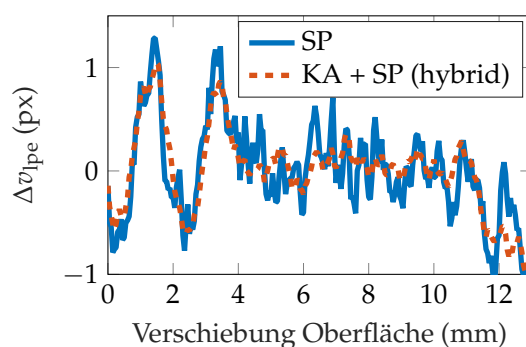


Abbildung 6.12: Änderung des LPZ aufgrund von Speckles bei einer lateralen Verschiebung der Messoberfläche.

Tabelle 6.2: Vergleich vom $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich Speckle-Einfluss.

Algorithmus	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,normal}})$	$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe,verbessert}})$	Verbesserung
SP	0,46 px	0,43 px	7 %
GA	0,52 px	0,50 px	4 %
KA	0,58 px	0,48 px	17 %
HT	0,69 px	0,62 px	10 %
KA + SP ²	---	0,40 px	13 %

6.4 Strukturierte Oberflächen

Abschließend werden die strukturierten Oberflächen in Messungen untersucht. Zuerst wird dabei betrachtet, ob sich die Empfindlichkeitssteigerung prinzipiell erreichen lässt und ob die Ergebnisse mit den Simulationen vergleichbar sind. Darauf aufbauend wird betrachtet, wie sich die Strukturen in der Abstandsmessung gewinnbringend einsetzen lassen. Weiterhin werden erste Untersuchungen mit fluoreszierenden Strukturen betrachtet.

6.4.1 Reflektierender Balken

Erste Messungen wurden als ‚Proof of Concept‘ durchgeführt. Ein Ausschnitt aus einem in den Messungen resultierendem Detektorbild ist in Abbildung 6.13(a)figure.caption.368 zu sehen. Dabei ist die Modulation der Intensitätsverteilung erkennbar. Der Messabstand d wurde in einem Bereich von 1090 mm bis 1140 mm mit einer Schrittweite von 100 μm unter Verwendung des Translationstisches geändert. Die Verschiebung des LPZ Δv für die drei in den Simulationen vorgestellten Szenarien ist in Abb. 6.13(b)figure.caption.368 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die berechnete Verschiebung in einem bestimmten Bereich stark zugenommen hat und die Messungen mit den in Abschnitt 5Strukturierte Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeitchapter.259 eingeführten Simulationen übereinstimmen. Der Maximalwert der Empfindlichkeit des Aufbaus wird von etwa 2,9 px/mm mit dem vertikalen Laser ohne Struktur auf etwa 13,7 px/mm mit dem geneigten Laser in Kombination mit der strukturierten Oberfläche erhöht (Abb. 6.13(c)figure.caption.368). Dies entspricht einer Verbesserung um einen Faktor von 4,7. Das Zentrum des Laserpunktes wurde mit der Schwerpunktmethode mit einem Exponenten von $q = 4$ berechnet.

Die Verschiebung und die Erhöhung der Empfindlichkeit aus der Messung wird

anschließend mit Simulationen verglichen. Dort ergibt sich mit $w_{\text{Balken}} = 1,5 \text{ mm}$ in einem Abstand von $d = 1116 \text{ mm}$ ein Maximalwert der Empfindlichkeit mit Struktur von etwa $14,1 \text{ px/mm}$. Dies ist mit den im Messverfahren erzielten Werten vergleichbar (siehe auch Abb. 6.13 Messungen unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche. (a) Ausschnitt eines Detektorbildes. (b) Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum ohne und mit Struktur. (c) Empfindlichkeit des Aufbaus in Abhängigkeit von der Entfernung d .figure.caption.368) und beweist das Prinzip der strukturierten Oberflächen zur Erhöhung der Empfindlichkeit eines LTS.

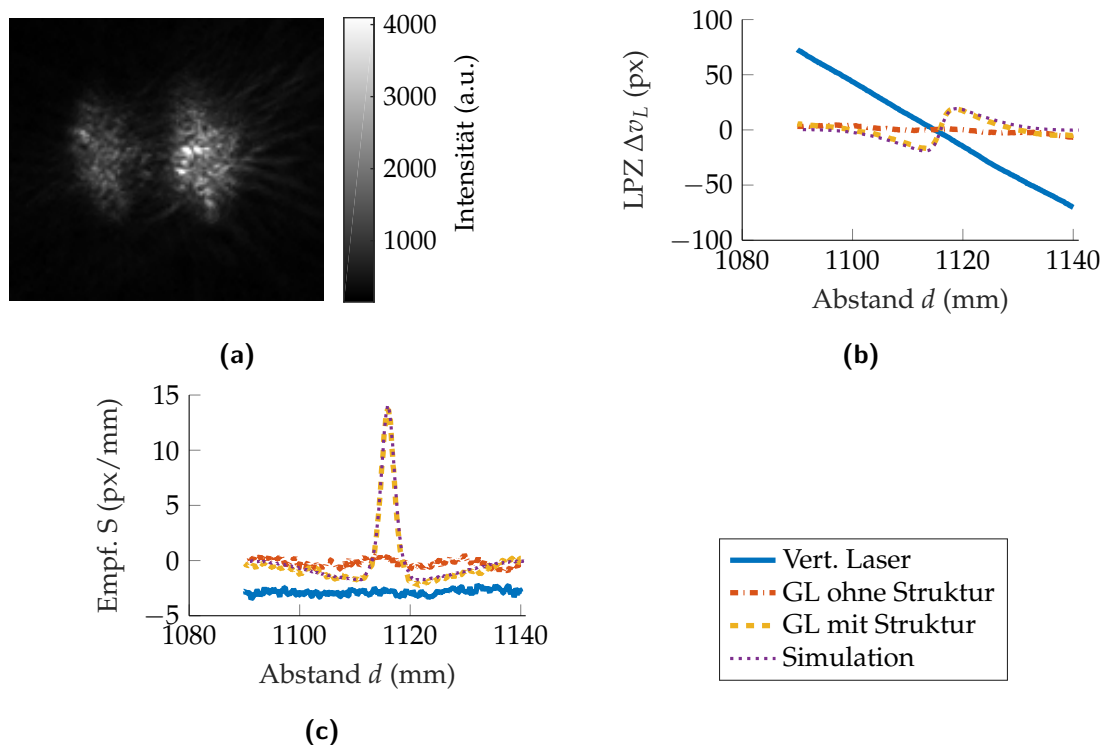


Abbildung 6.13: Messungen unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche. (a) Ausschnitt eines Detektorbildes. (b) Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum ohne und mit Struktur. (c) Empfindlichkeit des Aufbaus in Abhängigkeit von der Entfernung d .

Mit dem reflektierenden Balken muss bereits die Messoberfläche verändert werden. Da der Einsatz von fluoreszierenden Oberflächen zusätzliche den Einfluss von Speckles reduziert, wird für die weiteren Untersuchungen, wie zum Beispiel der Balkenbreite, die fluoreszierende Struktur verwendet.

6.4.2 Fluoreszierende Struktur

Aufbauend auf dem reflektierenden Balken werden Messungen mit den fluoreszierenden Strukturen durchgeführt. Da es sich hierbei um einen Laser handelt, der bisher noch nicht betrachtet wurde, wird dieser zuerst in verschiedenen kurzen Messungen charakterisiert. So kann unterschieden werden, welche Verbesserung sich aufgrund der reinen Fluoreszenz bzw. der Fluoreszenz mit strukturierter Oberfläche ergibt. Ausschnitte der resultierenden Detektorbilder auf Teflon bzw. mit fluoreszierender Meso­berfläche ohne und mit Struktur sind in Abbildung 6.14 Ausschnitt der Detektorbilder (a) auf Teflon, (b) auf fluoreszierender Oberfläche, (c) mit fluoreszierender Struktur dargestellt. Dabei wird deutlich, dass es aufgrund der Fluoreszenz keine Speckles mehr gibt. Dabei wird im Abstand von 1190 mm bis 1230 mm gemessen, und es wird eine Struktur mit einer Breite von $w = 1,0$ mm verwendet. Der Radius des Laserpunktes auf der Meso­berfläche beträgt etwa $r_{LP} = 2,5$ mm. Verwendet wird für die Betrachtungen die Schwerpunktmethode mit Exponenten $q = 3$.

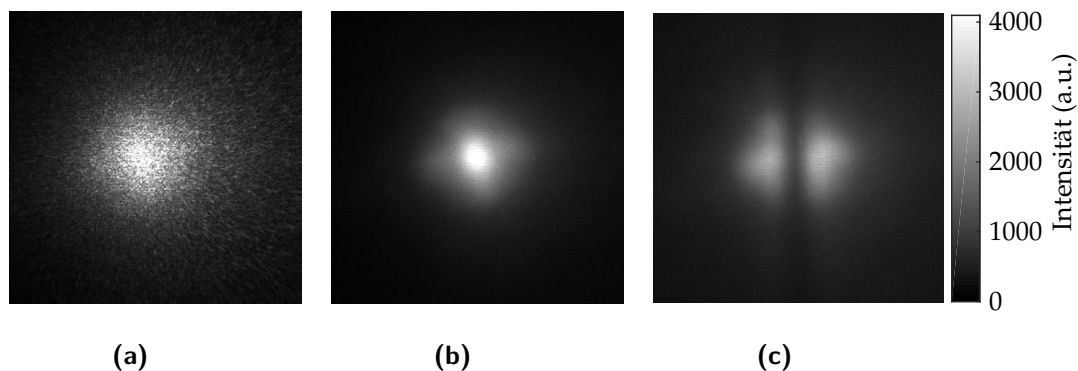


Abbildung 6.14: Ausschnitt der Detektorbilder (a) auf Teflon, (b) auf fluoreszierender Oberfläche, (c) mit fluoreszierender Struktur.

Zum einen wird die Messunsicherheit in einer statischen Messung auf der normalen Meso­berfläche und auf der fluoreszierenden Oberfläche ohne Struktur sowie mit Struktur betrachtet. Dies dient dazu, generell die Stabilität des neuen Lasers zu bewerten. Die Abweichung über 5 h des LPZ für die drei unterschiedlichen Fälle ist in Abb. 6.15(a) dargestellt. Hier fällt auf, dass die Spitze-Spitze-Verschiebung aufgrund des zeitlichen Drift, zum Beispiel aufgrund von thermischen Ausdehnungen, für alle drei Fälle im Bereich von etwa 2,5 px liegt. Gleichzeitig unterscheiden sich die Messungen aber stark in der statistischen Messunsicherheit. So beträgt die Standardabweichung der statischen Rauscheinflüsse auf Teflon 0,12 px, mit der Fluoreszenz 0,03 px und mit der fluoreszierenden

Struktur 0,05 px. Die Reduktion gegenüber Teflon lässt sich vor allem auf die eliminierten Speckles zurückführen. Mit Struktur trifft insgesamt weniger Licht auf den Detektor, so dass sich dadurch die Empfindlichkeit gegenüber von Rauscheinflüssen erhöht. Da der Laser bereits ein wesentlich schlechteres Ergebnis als der im Kompensationsaufbau verwendete Laser zeigt (Spitze-Spitze-Abweichung von 1,1 px, Standardabweichung von 0,08 px auf Teflon), wird im folgenden nur die relative Verbesserung durch die Fluoreszenz und die Strukturen untersucht und kein direkter Vergleich zu den Messungen im Kompensationsaufbau gezogen.

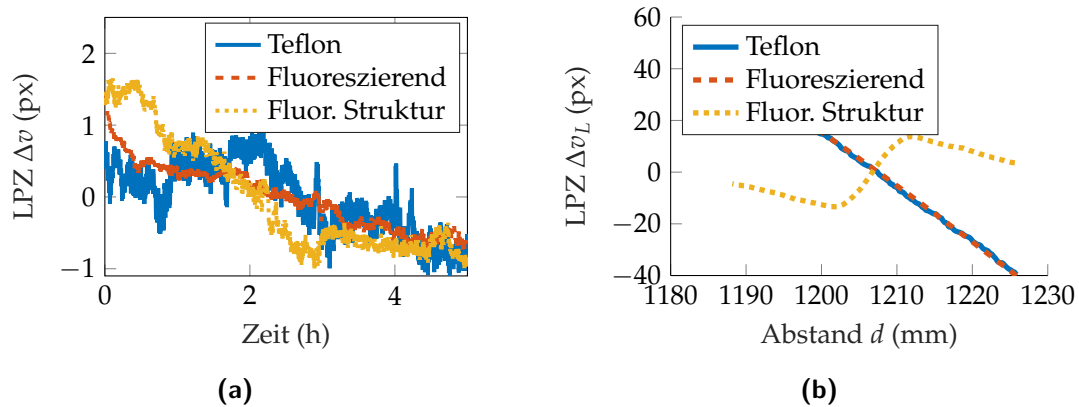


Abbildung 6.15: Messungen mit dem Laser für die fluoreszierenden Strukturen. (a) Vergleich statischer Messungen über 5 h. (b) Vergleich dynamischer Messungen über einen Bereich von 35 mm.

In Abbildung 6.15(b) ist die Verschiebung des LPZ für die drei Fälle bei einer dynamischen Messung dargestellt. Da das Verhältnis von Punktdurchmesser zu Balkenbreite anders gewählt wurde, und durch den neuen Laser der Aufbau verändert wurde, ergeben sich nun Empfindlichkeiten von $-2,1$ px/mm ohne bzw. $4,3$ px/mm mit der Struktur. Dies entspricht einer Steigerung des Betrages der Empfindlichkeit von 105 %.

In einem weiteren Schritt wird die Auswirkung der Balkenbreite auf die erreichbare Empfindlichkeit untersucht. Dazu wurden Strukturen mit 1,0 mm, 2,0 mm sowie 3,5 mm umgesetzt und die dynamische Messung damit vollzogen. Die resultierende Verschiebung ist Abb. 6.16(a) zu entnehmen. Wie bereits in den Simulationen gezeigt, steigt die Verschiebung mit zunehmender Balkenbreite.

Abbildung 6.16(b) zeigt außerdem den Einfluss des Exponenten q der Schwerpunktmethode auf die Verschiebung der Laserpunktzentren.

6 Messergebnisse und Diskussion

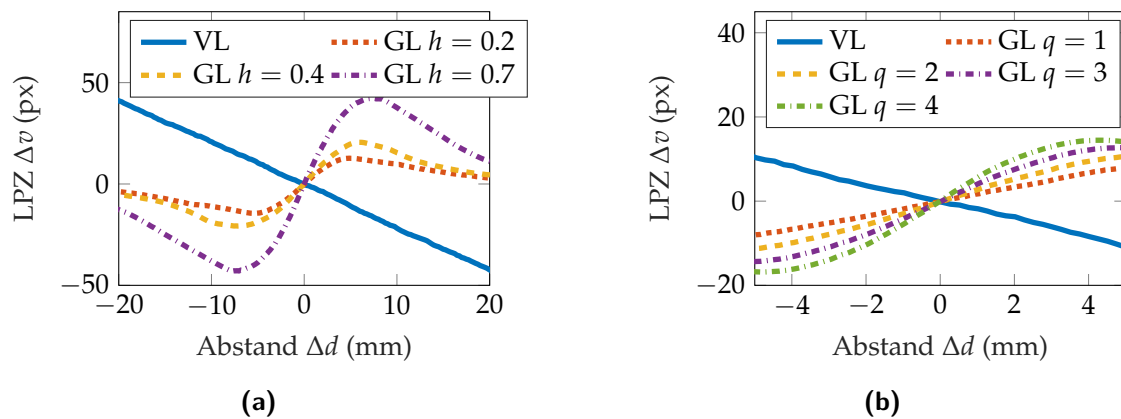


Abbildung 6.16: Resultierende Verschiebung der Laserpunktzentren in Abhängigkeit von (a) Balkenbreite für $q = 3$, (b) Exponent q der Schwerpunktmethode für $w_{\text{Balken}} = 1$ mm.

In Tabelle 6.3 Vergleich der maximalen Empfindlichkeiten S in px mm^{-1} für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q . Tabelle 6.3 sind die maximal erreichbaren Empfindlichkeiten für die unterschiedlichen Kombinationen aus Balkenbreite und Exponenten dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass der Wert um bis zu Faktor 6,4 gesteigert werden kann.

Tabelle 6.3: Vergleich der maximalen Empfindlichkeiten S in px mm^{-1} für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q .

S (px mm^{-1})	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$	$q = 4$
Ohne Struktur	-2,1	-2,1	-2,1	-2,1
$w_{\text{Balken}} = 1,0$ mm	1,8	2,9	4,3	5,7
$w_{\text{Balken}} = 2,0$ mm	3,2	4,0	5,2	6,6
$w_{\text{Balken}} = 3,5$ mm	7,1	8,8	10,9	13,4

Zu Beginn des Kapitels wurde bereits festgestellt, dass sich durch den Einsatz der fluoreszierenden Oberfläche bzw. der Struktur die Standardabweichungen σ_v der Laserpunktzentren aufgrund des statistischen Rauschens verändern. Da insbesondere dieser Wert eine entscheidende Rolle spielt, werden die statischen Messungen für die verschiedenen Balkenbreiten und Exponenten bezüglich der Standardabweichung des Laserpunktzentrum ausgewertet. Die resultierenden Werte sind in Tabelle 6.4 Vergleich der Standardabweichungen σ_v in px für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q . Tabelle 6.4 sind die resultierenden Werte für die verschiedenen Balkenbreiten und Exponenten zusammengestellt.

Hier fällt auf, dass die Fluoreszenz die Standardabweichung im Vergleich zur Messung auf Teflon signifikant reduziert, gleichzeitig aber mit größerer Balkenbreite zunimmt. Bei steigendem w_{Balken} trifft weniger Licht auf den Detektor, folglich wird das SNR geringer und der Einfluss des statistischen Rauschens vergrößert sich.

Ein höherer Exponent q reduziert die Standardabweichung σ_v tendenziell. Dies ist damit zu begründen, dass dadurch die hohen Intensitätswerte aufgrund des Laserpunktes im Vergleich zu den niedrigen Intensitätswerten durch das Rauschen stärker gewichtet werden und somit die Abweichung reduziert wird.

Tabelle 6.4: Vergleich der Standardabweichungen σ_v in px für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q .

σ_v (px)	$q = 1$	$q = 2$	$q = 3$	$q = 4$
Teflon	0,32	0,19	0,12	0,09
Fluoreszierend	0,05	0,04	0,03	0,03
$w_{\text{Balken}} = 1,0 \text{ mm}$	0,07	0,06	0,05	0,06
$w_{\text{Balken}} = 2,0 \text{ mm}$	0,11	0,08	0,07	0,09
$w_{\text{Balken}} = 3,5 \text{ mm}$	0,38	0,27	0,18	0,15

Insgesamt ist ersichtlich, dass die Empfindlichkeit durch die Strukturen zunimmt, gleichzeitig aber auch die Messabweichung bei der Laserpunkterfassung wächst. Um den Nutzen in der Abstandsmessung quantifizieren zu können, wurde abschließend der RMSE in dynamischen Messungen mit der fluoreszierenden Oberfläche bestimmt. Dazu wurden zehn Messungen über einen Abstand d von 1206 mm bis 1210 mm durchgeführt. Zur Kalibrierung wurde ein Polynom dritter Ordnung verwendet.

Beispielhaft sind die Messwerte über den verwendeten Messbereich für die drei verschiedenen Fälle in Abbildung 6.17(a) dargestellt. Hier wird erneut deutlich, dass die Messwerte mit einer fluoreszierenden Oberfläche weniger stark streuen als auf Teflon. Für den vertikalen Laser auf der normalen Messoberfläche aus Teflon ergab sich so ein durchschnittlicher RMSE von $349 \mu\text{m}$. Wird der vertikale Laser mit der fluoreszierenden Messoberfläche ohne Struktur verwendet, reduziert sich der RMSE bereits auf $82 \mu\text{m}$. Dies entspricht einer Verbesserung von 77% und lässt sich durch die reduzierten Speckles erklären.

Wird dann der geeignete Laser mit der fluoreszierenden Messoberfläche mit Struktur ($w_{\text{Balken}} = 1 \text{ mm}$) verwendet, ergibt sich ein RMSE von $39 \mu\text{m}$. Diese Verbesserung kommt durch die erhöhte Empfindlichkeit zustande und entspricht einer

6 Messergebnisse und Diskussion

Optimierung von weiteren 53 % gegenüber der fluoreszierenden Messoberfläche ohne Struktur. Dies ist auch in der Messabweichung in Abb. 6.17(b) ersichtlich.

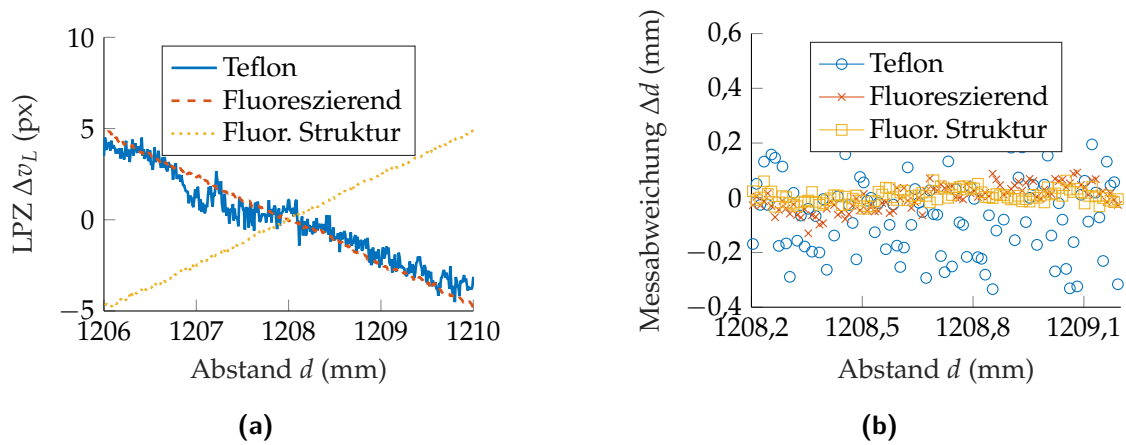


Abbildung 6.17: Abstandsmessung mit der fluoreszierenden Struktur. (a) Dynamische Messung über den Bereich von 4 mm, über den kalibriert wurde. (b) Messabweichungen für Teflon, fluoreszierende Oberfläche und fluoreszierende Struktur.

Werden die Messungen dagegen mit einer Balkenbreite von $w_{\text{Balken}} = 3$ mm durchgeführt, ergibt sich ein RMSE von $158 \mu\text{m}$. Dies ist zwar weiterhin eine Verbesserung gegenüber der Messung auf Teflon, gleichzeitig aber eine deutliche Verschlechterung im Vergleich zur fluoreszierenden Messoberfläche ohne Struktur. Folglich wird anhand dieser Untersuchungen ersichtlich, dass die verwendete Balkenbreite einen großen Einfluss auf die Einsatzfähigkeit der strukturierten Oberflächen hat.

Dabei ist anzumerken, dass durch die Strukturen auch die Empfindlichkeit gegenüber Störungen zunimmt. Verschiebt sich zum Beispiel das Laserpunktzentrum auf der Messoberfläche aufgrund einer Laserstrahldrift, ist durch die Struktur auch die berechnete Verschiebung des LPZ auf dem Detektor entsprechend größer.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel wird der Inhalt der Arbeit zusammengefasst und abschließend ein Ausblick auf mögliche zukünftige Themen und Arbeitspunkte für die Optimierung der Lasertriangulation gegeben.

7.1 Zusammenfassung

Im Zuge der Arbeit wurde ein neues Lasertriangulationssystem implementiert und die dazu nötige Auslegung und Dimensionierung nachvollziehbar dargelegt. Dadurch wurde ein Messgerät entworfen, das Abstände im Bereich von 800 mm bis 8000 mm messen kann. Dabei stellte sich heraus, dass es vielfältige Fehlerquellen gibt, die zu teilweise großen Messabweichungen führen. Beispielsweise ist hier die Verschiebung von optomechanischen Komponenten aufgrund von thermischen Ausdehnungen zu nennen.

Um diese Fehler zu eliminieren, wurde ein optischer Kompensationsaufbau erforscht und erprobt. Durch einen zusätzlichen Strahlteiler und Spiegel kann aus dem Messstrahl ein zusätzlicher Referenzstrahl erzeugt werden. Bei korrekter Ausrichtung dieser Komponenten ist die Position des Referenzfleckzentrums auf dem Detektor unabhängig vom Messabstand, jedoch reagieren das Messfleckzentrum und Referenzfleckzentrum ähnlich auf die verschiedenen Fehlerquellen. Folglich kann diese Information dazu verwendet werden, vielfältige Fehlereinflüsse wie Brechungsindexgradienten, Laserstrahldrift oder optomechanische Verschiebungen zu kompensieren.

In umfangreichen optischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass sich die Fehler durch den Kompensationsaufbau zu einem hohen Grad eliminieren lassen. Weiterhin wurde in thermischen Simulationen in einer CAD-Software nachgewiesen, dass der Aufbau unter realen thermischen Ausdehnungen funktioniert.

In Messungen wurde darauf aufbauend bewiesen, dass der Kompensationsaufbau auch in experimentellen Untersuchungen zielführende Ergebnisse bringt. So konnte in statischen Messungen, bei denen der Messabstand konstant gehalten wird, die Messunsicherheit um bis zu 66 % reduziert werden. Wurden Fehler im

7 Zusammenfassung und Ausblick

Messaufbau provoziert, zum Beispiel durch die punktuelle Erwärmung von Komponenten oder externe Vibrationen am Messaufbau, konnte die Messabweichung sogar um bis zu 86 % reduziert werden. Bei einer Abstandsmessung im Bereich von 1 m konnte die Messunsicherheit immerhin noch um 22 % verringert werden.

In der Lasertriangulation spielt die Laserpunkterfassung eine entscheidende Rolle bei der erreichbaren Messunsicherheit. Deshalb wurde auch dieser Punkt umfassend betrachtet und der Algorithmus dahingehend optimiert. Dazu wurde ein Modell erstellt, das die wichtigsten Fehlerquellen im Detektorbild des Laserpunktes, wie zum Beispiel Speckles und Dunkelrauschen, abbildet. In Simulationen wurde damit der Einfluss verschiedener Parameter der Laserpunkterfassung untersucht. Auf den Ergebnissen aufbauend wurde außerdem der beste Algorithmus für das hier vorliegende Szenario implementiert. Dabei stellte sich ein hybrider Algorithmus, bestehend aus einer modellbasierten Segmentierung mit einer anschließenden Berechnung des Laserpunktzentrum durch eine quadrierte Schwerpunktmethode, als am vielversprechendsten heraus.

In Messungen wurden die Simulationen anschließend verifiziert. Dabei stellte sich heraus, dass die Simulationen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen zeigen. So wird die Messunsicherheit bei der Laserpunkterfassung durch den angepassten Algorithmus um bis zu 33 % im Vergleich zu den Standardalgorithmen verringert, was eine höhere Genauigkeit bei der Abstandsmessung ermöglicht.

Weiterhin wurde die Intensitätsverteilung des Laserpunktes durch strukturierte Messoberflächen moduliert. Diese können beispielsweise durch einen reflektierenden Balken oder eine fluoreszierende Messoberfläche umgesetzt werden und führen zu einem Streifen im Detektorbild des Laserpunktes. Bei einem angepassten Messaufbau, bei dem der Laser schräg auf die Messoberfläche gerichtet wird, führt die Modulation dann zu einer Steigerung der Empfindlichkeit des Lasertriangulationssystems.

In umfangreichen Simulationen wurden zuerst die Funktionsweise und der Vorteil der strukturierten Oberflächen dargestellt. Darauf aufbauend wurden verschiedene Parameter, wie zum Beispiel die Balkenbreite, die Potenz der Schwerpunktmethode oder der Einfluss des Detektorrauschens analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich durch die strukturierte Messoberfläche die Messabweichung reduzieren lässt.

Abschließend wurde dieser Effekt noch in Messungen nachgewiesen. Zuerst wurde mit einer reflektierenden Struktur die Steigerung der Empfindlichkeit um bis zu einem Faktor von 4,7 nachgewiesen. Wurde dann mit einer fluoreszierenden Struktur gearbeitet, konnte eine ähnliche Steigerung der Empfindlichkeit ermittelt werden. Durch die Eliminierung der Speckles kam es dann bei der Abstandsmes-

sung zu einer Reduzierung der Messunsicherheit um bis zu 42 %.

7.2 Ausblick

Zur weiteren Optimierung des Lasertriangulationssystems und Überführung zu einem kommerziellen Messgerät gibt es verschiedene Ansatzmöglichkeiten. So müsste der Messaufbau generell kompakter umgesetzt werden. Beispielsweise könnte die Kamera durch einen Faltungsspiegel gedreht werden, so dass diese über dem Lasermodul angebracht ist. Weiterhin sollte eine Kamera mit einer Multi-ROI-Funktionalität verwendet werden, da sich so ein kleinerer Bildbereich auslesen und damit die Messrate deutlich erhöhen, bzw. die Messabweichung durch eine stärkere Mittelung reduzieren lässt. Weiterhin sollte das Messgerät mit einem geeigneten Referenzmessgerät über den gesamten Messbereich kalibriert werden, um so die Leistung des Messgerätes objektiv quantifizieren zu können.

Bezüglich der Kompensation lassen sich insbesondere weitere Fehlereinflüsse untersuchen. Erwähnenswert ist hier beispielsweise eine Verkippung der Messoberfläche oder unterschiedliche Materialien und Beschaffenheiten des Messobjektes. In den thermischen Simulationen hat sich herausgestellt, dass die Halterungen des Strahlteilers und Spiegels vergleichsweise hohe Verschiebungen aufweisen. Hier könnten die Erkenntnisse verwendet werden, um geeignetere Halterungen, zum Beispiel mit besserer Wärmeabfuhr, für die Komponenten zu fertigen.

Bei der thermischen Kompensation sollten noch andere Modelle getestet werden. Außerdem können zur Steigerung der Kompensationsfähigkeit noch mehr Temperaturinformationen in das Modell eingebunden werden.

Die ersten Analysen mit den strukturierten Messoberflächen haben bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Hier müssen noch weitere Untersuchungen bezüglich angepasster Bildverarbeitung und einem stabileren Messaufbau mit angepasstem Lasermodul folgen, das insgesamt bereits eine höhere Strahlstabilität zeigt.

Interessant ist hierbei auch die Umsetzung eines Messgerätes, das keinen vertikalen Laser mehr besitzt, sondern lediglich einen geneigten Laser in Kombination mit strukturierten Oberflächen. Damit lassen sich zwar keine absoluten Messergebnisse erzielen, es könnte jedoch ein sehr kompakter Messaufbau zur Erfassung von relativen Abstandsänderungen umgesetzt werden.

Symbolverzeichnis

(i, j)	Diskrete horizontale/vertikale Koordinate eines Pixels im Detektorbild
(v, y)	Kontinuierliche horizontale/vertikale Koordinate im Detektorbild
(v_b, y_b)	Berechnetes Laserpunktzentrum
(v_k, y_k)	Kantenpunkte im Detektorbild
(v_w, y_w)	Wahres Laserpunktzentrum
α	Winkel der Abbildungslinse
β	Winkel des Detektors
$\Delta\gamma$	Verkipfung des Lasers
ϵ	Relative Dielektrizitätszahl
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante
λ	Wellenlänge
μ	Relative magnetische Permeabilität
μ_0	Magnetische Feldkonstante
μ_d	Mittelwert der Normalverteilung wegen Dunkelrauschen
μ_p	Durchschnittliche Anzahl an Photonen pro Pixel für Berechnung vom Schrotrauschen
ν	Optische Frequenz
ω	Winkelgeschwindigkeit
ϕ_0	Ausgangsphase einer Welle
Φ_e, Φ_r, Φ_t	Winkel des einfallenden/reflektierten/transmittierten Lichts
σ_d	Standardabweichung der Normalverteilung wegen Dunkelrauschen
σ_p	Standardabweichung der Poisson-Verteilung wegen Schrotrauschen
σ_v, σ_y	Standardabweichung der Gauß-Verteilung in v/y -Richtung
ϑ	Temperatur in °C
\vec{E}	Elektrische Feldstärke

Symbolverzeichnis

\vec{H}	Magnetische Feldstärke
b	Basis, Abstand zwischen Laser und Abbildungslinse
B	Bildgröße
b	Bildweite
$B1, B2, B3$	Sellmeier-Koeffizienten
$C1, C2, C3$	Sellmeier-Koeffizienten
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d	Abstand
d_{\max}	Maximaler Messabstand
d_{\min}	Minimaler Messabstand
$E1, E2, E3$	Energieniveaus eines Atoms
F	Brennpunkt
f	Brennweite
G	Gegenstandsgröße
g	Gegenstandsweite
h	Planksches Wirkumsquantum
h	Verhältnis aus Balkenbreite zu Punktdurchmesser bei der strukturierten Oberfläche
$H(v_b, y_b, r)$	Akkumulatormatrix bei der Hough-Transformation
h_{Luft}	Luftfeuchte
I	Intensität auf dem Detektor
$I(i, j)$	Intensität des Pixels (i, j)
I_0	Gesamte Intensität einer Gauß-Verteilung
i_a, i_b, i_c, i_d	Ströme der vier Anschlüsse eines PSD
k	Kompensationsfaktor
k	Wellenzahl
k_B	Boltzmann-Konstante
l	Kantenlänge der aktiven Fläche eines PSD
l_z	Versatz der Linse in z-Richtung
M	Horizontale Anzahl Pixel eines Detektors
MB	Messbereich
N	Anzahl Nulldurchgänge bei der Interferometrie
N	Vertikale Anzahl Pixel eines Detektors
n	Brechungsindex
N_1^e, N_2^e	Anzahl Elektronen im Energieniveau $E1/E2$
n_0	Brechungsindex von Vakuum; $n_0 = 1$
n_{Photonen}	Anzahl auftreffender Photonen auf dem Detektor
n_1	Brechungsindex von Medium 1
n_2	Brechungsindex von Medium 2

p	Luftdruck
p_{Wasser}	Partialdruck von Wasser
q	Exponent der Schwerpunktmethode
r	Radius vom Bildpunkt auf dem Detektor
R	Rauheit
R_1, R_2	Krümmungsradien einer Linse
r_{disc}	Radius des Strukturelements bei der morphologischen Filterung
$R_{\text{Sp1}}, R_{\text{Sp2}}$	Reflexionsgrad von Spiegel 1 und Spiegel 2
r_{LP}	Radius der Laserpunktes auf der Messoberfläche
$\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$	Root Mean Square Error der Größe Δv_{lpe}
T	Temperatur in K
t	Zeit
t_{tof}	Laufzeit eines Lichtpulses beim Laufzeitverfahren
U_{PD}	Spannung an Photodiode
U_G	Gatespannung an einem MOS-Kondensator
v	Horizontale Position auf dem Detektor, z.B. des Zentrums eines Laserpunktes
V	Vergrößerungsmaßstab
$v_{\text{Mess}}, v_{\text{Ref}}, v_{\text{Kom}}$	Mittelpunkte von Messfleckzentrum, Referenzfleckzentrum und kompensiertem Fleckzentrum
v_L	Laserpunktzentrum
v_{offset}	Verschiebung der Detektorkante in v -Richtung
W	Energie eines Photons
w_{Balken}	Breite des Balkens der strukturierten Oberfläche
w_{det}	Länge des Detektors
x	Koordinatenachse
y	Koordinatenachse
z	Koordinatenachse

Abkürzungsverzeichnis

AD	Analog-Digital
AMCW	amplitude modulated continuous wave
ATF	Amplituden Transfer Funktion
CCD	charge-coupled detector
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor
DSNU	Dark Signal Non Uniformity
FMCW	frequency modulated continuous wave
FOV	Field of view
KFZ	Kompensiertes Fleckzentrum
LPZ	Laserpunktzentrum
LTS	Lasertriangulationssystem
MFZ	Messfleckzentrum
MOS	metal-oxide-semiconductor
PD	Photodiode
PRNU	Photo Response Non Uniformity
PSD	position sensitive detector
RFZ	Referenzfleckzentrum
RMSE	Root Mean Square Error
Si	Silizium
SNR	signal-to-noise ratio
ST	Strahlteiler
TOF	time-of-flight

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1.:	Schematische Darstellung eines optischen Messsystems in Anlehnung an [50, Bild 3.1-57].	6
Abb. 2.2.:	Übersicht der Einteilung des elektromagnetischen Spektrums nach [50, S.112] und [83]. Dabei stellt der Bereich von 380 nm bis 780 nm das sichtbare Licht dar.	7
Abb. 2.3.:	Interferenz zweier harmonischer Lichtwellen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 660$ nm in Anlehnung an [29] mit (a) konstruktiver Interferenz, (b) destruktiver Interferenz.	8
Abb. 2.4.:	Beispielhafte Darstellung von (a) Absorption, (b) spontaner Emission und (c) stimulierter Emission in Anlehnung an [34].	9
Abb. 2.5.:	Schematische Darstellung von (a) spiegelnder Reflexion an einer optisch glatten Oberfläche und (b) diffuser Reflexion an einer optisch rauen Oberfläche.	10
Abb. 2.6.:	(a) Schematische Darstellung von Reflexion und Brechung am Übergang vom Vakuum in ein optisch dichteres Medium. (b) Veränderung der Wellenlänge beim Übergang vom Vakuum in ein optisch dichteres Medium in Anlehnung an [83].	11
Abb. 2.7.:	Schematische Darstellung der optischen Abbildung mit einer bikonvexen Linse mit der Brennweite f	13
Abb. 2.8.:	Schematische Darstellung von Fluoreszenz.	15
Abb. 2.9.:	Schematische Darstellung eines Lasers bestehend aus aktivem Medium, Resonator sowie der zugeführten Pumpenergie in Anlehnung an [120].	16
Abb. 2.10.:	Schematische Darstellung von zeitlicher und räumlicher Kohärenz von Wellen. (a) Räumlich und zeitlich inkohärentes Licht, zum Beispiel einer Taschenlampe. (b) Räumlich und zeitlich kohärentes Licht, zum Beispiel eines Laser.	17
Abb. 2.11.:	(a) Simuliertes Gaußprofil eines idealen Laserpunktes. (b) Resultierendes Specklemuster bei der Beleuchtung einer optisch rauen Oberfläche mit einem Laserstrahl.	18

Abb. 2.12.: Schematische Darstellung des Photoeffektes in einer Photodiode. Durch das auftreffende Photon wird ein Elektronen/Loch-Paar generiert. Das Elektron wird dann durch die anliegende Spannung U_{PD} abtransportiert. Der resultierende Strom kann gemessen werden und ist proportional zur Anzahl der auftreffenden Photonen.	19
Abb. 2.13.: Analoge Detektoren zur Bestimmung der Auftreffposition eines Lichtpunktes in Anlehnung an [109]. (a) PSD und (b) 4-Quadranten-Detektor.	20
Abb. 2.14.: Photokondensator zur Speicherung von Ladungen in Anlehnung an [83].	21
Abb. 2.15.: Schematische Darstellung des Auslesevorgangs eines CCDs in Anlehnung an [29]. Durch das Umschalten der Potentiale der verschiedenen Photokondensatoren kann die Ladung schrittweise an den Rand der Matrix verschoben werden.	22
Abb. 2.16.: Unterschied beim Auslesen eines CCDs und CMOS-Sensors nach [34].	22
Abb. 2.17.: (a) Funktionsweise Retroreflektor. (b) Schwarze Referenzoberfläche mit bekanntem Muster in Form von vier weißen Punkten für Deformationsmessungen an Gebäuden nach [68]. (c) Mikrostruktur für interferometrische Messung [149, Fig. 2].	25
Abb. 2.18.: Übersicht der gängigsten Methoden zur 1D-Abstandsmessung in Anlehnung an [128].	26
Abb. 2.19.: Schematische Darstellung des Laufzeitverfahrens.	28
Abb. 2.20.: Schematische Darstellung der Laserinterferometrie anhand eines Michelson-Interferometers in Anlehnung an [50].	29
Abb. 2.21.: Grundlegender Aufbau eines Lasertriangulationssystems in Anlehnung an [13]. Bei einer Abstandsänderung verschiebt sich der Bildpunkt auf dem Detektor.	30
Abb. 2.22.: Schematisches Ablaufdiagramm der Laserpunkterfassung nach [172]. Das Detektorbild wurde auf einen Bereich von $110 \text{ px} \times 110 \text{ px}$ zugeschnitten, um den Einfluss der verschiedenen Bildverarbeitungsschritte deutlicher darzustellen.	32
Abb. 2.23.: Die Hough-Transformation wandelt die Kantenpunkte (v_k, y_k) im Bildraum (links) in den Parameterraum (rechts). Da um jeden transformierten Kantenpunkt Kreise mit verschiedenen Radien r gezogen werden, bilden sich im 3D-Parameterraum Kegel aus. Der Punkt in diesem Raum, der von den meisten Kreisen geschnitten wird, stellt die Parameter (v_b, y_b, r) des Kreises dar (Abbildung nach [84]).	35

Abb. 2.24.:	Erweitertes Ablaufdiagramm der Laserpunkterkennung nach [172]. In einem zweiten Schritt kann die Position des Laserpunkts durch eine genauere Segmentierung oder durch eine Interpolation der Position weiter verbessert werden.	37
Abb. 3.1.:	(a) Schematische Darstellung eines Lasertriangulationssystems mit nach der Scheimpflugbedingung angeordnetem Laser, Linse und Detektor nach [169]. (b) Zusammenhang zwischen dem Laserpunktzentrum v_L auf dem Detektor und dem Abstand d nach Gleichung (3.1) Auslegung eines Lasertriangulationssystemequation. sowie der Empfindlichkeit des Aufbaus, die durch die Verschiebung des Laserpunktzentrums in Abhängigkeit einer Abstandsänderung definiert ist.	40
Abb. 3.2.:	Empfindlichkeit und Messbereich eines LTS in Abhängigkeit von (a) seiner Basis b , (b) seiner Brennweite f	41
Abb. 3.3.:	Entstehung von Messabweichungen in der Lasertriangulation durch (a) Laserstrahldrift, (b) Ausbreitungsmedium (nach [29, Fig.10.17]).	45
Abb. 3.4.:	Entstehung von Messabweichungen in der Lasertriangulation durch (a) die Messoberfläche aufgrund einer Änderung der Intensität I des Detektors (nach [29, Fig.10.9]), (b) die mechanische Verschiebung des Detektors um Δx_{Det}	47
Abb. 3.5.:	(a) Auswirkung der Verkippung $\Delta\gamma$ des Laserstrahles. (b) Auswirkung der Verschiebung Δx_{Linse} der Linse durch thermische Ausdehnungen.	50
Abb. 4.1.:	Darstellung eines Aufbaus, der in der Lage ist, Fehler aufgrund von Laserstrahldrift, Brechungsindexgradienten und optomechanischen Verschiebungen zu kompensieren (nach [169]). (a) Schematische Draufsicht. (b) Isometrische CAD-Ansicht. (c) Frontale CAD-Ansicht. (d) Verlauf der Laserpunktzentren in Abhängigkeit des Messabstandes d	58
Abb. 4.2.:	(a) Aufgrund einer Bewegung Δx_{det} des Detektors kommt es zu einer ungewollten Abweichung von Δv_{Mess} und Δv_{Ref} , die durch die Kompensation auf $\Delta v_{\text{Komp}} = 0$ px reduziert wird. (b) Verlauf der beiden Laserpunkte auf dem Detektor in Abhängigkeit vom Messabstand d . Hier fällt außerdem auf, dass der Punktradius mit steigendem Abstand abnimmt.	59

Abb. 4.3.:	Simulierte Abstandsfehler Δd von Messstrahl, Referenzstrahl sowie kompensierten Strahl in Abhängigkeit einer Änderung von (a) Laserstrahlwinkel $\Delta\gamma$, (b) Basis Δb , (c) Linsenposition Δx_{Linse} , (d) Detektorposition Δx_{Det} , (e) Spiegelposition $\Delta x_{\text{Spiegel}}$ (nach [169]).	61
Abb. 4.4.:	Verlauf der Messabweichung Δd über dem Abstand d bei einer Verschiebung des Detektors um $\Delta x_{\text{Det}} = 15 \mu\text{m}$	63
Abb. 4.5.:	Simulation der thermischen Expansion des LTS bei einer Änderung der Umgebungstemperatur von 20°C auf 30°C . (a) Verschiebung der Komponenten in x -Richtung. (b) Verschiebung des Detektors und der Linse in x -Richtung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur.	64
Abb. 4.6.:	(a) Resultierende Verschiebung der beiden Laserpunktzentren in Abhängigkeit von der Temperatur. (b) Verschiebungen der Laserpunktzentren bei $\Delta\vartheta = 10^\circ\text{C}$ in Abhängigkeit vom Abstand d	65
Abb. 4.7.:	Messabweichung ohne und mit Kompensation bei thermischen Verschiebungen in Abhängigkeit vom Abstand d für $\vartheta = 20, 22, 24, 26, 28$ und 30°C	65
Abb. 4.8.:	Einfluss von zufälligen Parameteränderungen innerhalb der zuvor ermittelten Grenzen. (a) Verlauf von Messstrahl und kompensiertem Strahl über den Abstand d für zehn Iterationen. (b) Vergleich des RMSE mit und ohne Kompensation für 500 Iterationen.	66
Abb. 4.9.:	(a) Histogramm eines gemessenen Laserpunktes und zugehörige berechnete Gaußkurve. (b) Simuliertes Detektorbild eines idealen Laserspots mit gaußscher Intensitätsverteilung. (c) Gemessenes Detektorbild eines realen Laserspots. (d) Simuliertes Detektorbild eines Laserpunktes mit überlagerten Rauscheinflüssen.	69
Abb. 4.10.:	Einfluss der Bildvorverarbeitung auf die Messabweichung $\text{RMSE}(\Delta v_{\text{lpe}})$ der Laserpunkterfassung. (a) Filterung. (b) Schwellenwert der Segmentierung. (c) Größe des Strukturelements der morphologischen Filterung. (d) Unterscheidung zwischen Fehler aufgrund von Speckles und statistischem Rauschen.	71
Abb. 4.11.:	Abweichung Δv_{lpe} der Schwerpunktmethode SP und der verbesserten hybriden Schwerpunktmethode KA + SP ² unter Verwendung einer modellbasierten Segmentierung.	73
Abb. 4.12.:	In den Experimenten verwendetes Lasertriangulationssystem.	75

Abb. 5.1.:	Schematische Beschreibung der Intensitätsmodulation mittels strukturierter Oberflächen nach [171]. (a) Simulierter Laserpunkt mit modulierter Intensität. (b) Beispielaufbau für eine kombinierte Messung von Absolutabständen mit dem vertikalen Laser und relativen Verschiebungen mit dem geneigten Laser und einer strukturierten Oberfläche.	78
Abb. 5.2.:	Schematische Beschreibung der Intensitätsmodulation mittels strukturierter Oberflächen nach [171]. Unten: Vergleich der Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum Δv_L für drei Szenarien. Oben: Fünf beispielhafte Detektorbilder in verschiedenen Abständen d für die drei Szenarien.	79
Abb. 5.3.:	Simulationen mit einer strukturierten Oberfläche. (a) Verschiebung des Laserspotzentrums Δv_L . (b) Empfindlichkeit S	80
Abb. 5.4.:	Simulationen der Laserpunktverschiebung unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche. (a) Für verschiedene Verhältnisse h von Balkenbreite zu Laserpunktdurchmesser auf der Messoberfläche. (b) Für verschiedene Exponenten q der Schwerpunktmethode.	81
Abb. 5.5.:	Vergleich des RMSE für den vertikalen Laser ohne Struktur und geneigtem Laser mit Struktur in Abhängigkeit vom gaußschen Rauschen (a) ohne Speckles, (b) mit Speckles gemittelt über sechs verschiedene Specklemuster.	82
Abb. 5.6.:	Vergleich des RMSE für den vertikalen Laser ohne Struktur und geneigten Laser mit Struktur in Abhängigkeit von (a) Einfluss der Balkenbreite, (b) Abstand d bei einem Mittelwert des gaußschen Rauschens von 165.	83
Abb. 5.7.:	Mögliche Implementierungen einer strukturierten Oberfläche mit (a) Absorption oder Reflexion, (b) Fluoreszenz. [171] . . .	85
Abb. 5.8.:	Praktische Umsetzung der strukturierten Oberfläche (a) mit reflektierendem Balken, (b) mit Fluoreszenz.	85
Abb. 6.1.:	Detektorbilder des LTS in einem Abstand von (a) $d = 800$ mm, (b) $d = 6590$ mm.	88
Abb. 6.2.:	(a) Kennlinie des LTS über den gesamten Messbereich. (b) Verschiebung der Laserpunktzentren im Bereich $\Delta d = 150$ mm.	89

Abb. 6.3.:	(a) Das Laserpunktzentrum v_L verschiebt sich aufgrund der unterschiedlichen unbekanntem Fehlerquellen mit der Zeit auch ohne Abstandsänderung. (b) Statistischer Einfluss des Rauschens auf das Laserpunktzentrum v_L	89
Abb. 6.4.:	Messung, die die Kompensation von zeitlichen Abweichungen verdeutlicht. Der Messstrahl zeigt eine stärkere Abweichung als der kompensierte Strahl.	91
Abb. 6.5.:	(a) Hochpassgefilterte Daten, die die Kompensation von kurzfristigen Drift-Effekten zeigen. Es wurde ein Filter minimaler Ordnung mit einer Durchlassfrequenz von 1,11 mHz, einer Steilheit von 0,85 und einer Sperrbanddämpfung von 60 dB verwendet. (b) Tiefpassgefilterte Daten, die die Kompensation von Langzeit-Drift-Effekten zeigen. Es wurde ein Filter mit gleitendem Mittelwert und einer Fensterlänge von 1 h verwendet.	91
Abb. 6.6.:	Verschiebung der Laserpunktzentren von Messstrahl und Referenzstrahl bei einer statischen Messung über 5 h. Dabei stieg die Raumtemperatur um etwa 2,4 °C an, wodurch es zu einer thermischen Ausdehnung des Messaufbaus kommt. . .	92
Abb. 6.7.:	(a) Ein Heizwiderstand an der Kamerahalterung wurde nach 6 Minuten für eine Dauer von 30 Sekunden eingeschaltet. Dies führt zu einer Verschiebung des MFZ aufgrund der thermischen Ausdehnung, während das KFZ nicht beeinflusst wird. (b) Aufgrund mechanischer Vibrationen am optischen Tisch zeigt das MFZ eine Bewegung, während der Einfluss im KFZ stark reduziert wird.	93
Abb. 6.8.:	(a) Schematischer Ablauf der zusätzlichen Kompensation durch ein Temperaturmodell. (b) Vergleich einer statischen Messung ohne Kompensation, mit optischer Kompensation, mit reiner Temperatur-Kompensation sowie mit kombinierter Kompensation. [170]	94
Abb. 6.9.:	(a) Dynamische Messung über den Bereich von 10 mm. (b) Nahaufnahme eines Teils der Messung, wobei die Verbesserung durch den kompensierten Strahl hervorgehoben wird. (c) Messabweichung des kompensierten und nicht-kompensierten Strahls. [169]	95
Abb. 6.10.:	(a) Dynamische Messung über den Bereich von 150 mm. (b) Messabweichung des kompensierten und nicht-kompensierten Strahls. [169]	97

Abb. 6.11.:	(a) Ausschnitt eines Detektorbildes in dem Lasertriangulationsaufbau. (b) Ausschnitt der Abweichung Δv_{lpe} der normalen und verbesserten quadrierten Schwerpunktmethode unter Verwendung einer modellbasierten Segmentierung.	98
Abb. 6.12.:	Änderung des LPZ aufgrund von Speckles bei einer lateralen Verschiebung der Messoberfläche.	99
Abb. 6.13.:	Messungen unter Verwendung einer strukturierten Oberfläche. (a) Ausschnitt eines Detektorbildes. (b) Beziehung zwischen dem Abstand d und dem Laserpunktzentrum ohne und mit Struktur. (c) Empfindlichkeit des Aufbaus in Abhängigkeit von der Entfernung d	101
Abb. 6.14.:	Ausschnitt der Detektorbilder (a) auf Teflon, (b) auf fluoreszierender Oberfläche, (c) mit fluoreszierender Struktur.	102
Abb. 6.15.:	Messungen mit dem Laser für die fluoreszierenden Strukturen. (a) Vergleich statischer Messungen über 5 h. (b) Vergleich dynamischer Messungen über einen Bereich von 35 mm.	103
Abb. 6.16.:	Resultierende Verschiebung der Laserpunktzentren in Abhängigkeit von (a) Balkenbreite für $q = 3$, (b) Exponent q der Schwerpunktmethode für $w_{\text{Balken}} = 1 \text{ mm}$	103
Abb. 6.17.:	Abstandsmessung mit der fluoreszierenden Struktur. (a) Dynamische Messung über den Bereich von 4 mm, über den kalibriert wurde. (b) Messabweichungen für Teflon, fluoreszierende Oberfläche und fluoreszierende Struktur.	105

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1.:	Auswirkung der wichtigsten Designparameter eines Lasertriangulationssystems.	42
Tab. 3.2.:	Parameter des in dieser Arbeit untersuchten Lasertriangulationssystems.	44
Tab. 3.3.:	Zusammenhang zwischen der Abweichung des Abstandes Δd und einer Parameteränderung im Abstand $d_0 = 1$ m. So führt zum Beispiel eine Verkippung des Lasers um $\Delta\gamma = 1$ μ rad zu einer berechneten Abweichung von $\Delta d = 8,6$ μ m. .	52
Tab. 4.1.:	Beziehung zwischen Abstandsfehler Δd in Abhängigkeit von Parameteränderungen bei einem Messabstand von $d_0 = 1$ m ohne und mit Kompensation.	62
Tab. 4.2.:	Verschiebungen durch thermische Ausdehnungen im verwendeten LTS bei Änderung der Umgebungstemperatur um $\Delta\theta = 10$ $^{\circ}$ C.	64
Tab. 4.3.:	Vergleich vom RMSE(Δv_{lpe}) für verschiedene Algorithmen bei der normalen Implementierung nach der Literatur sowie bei einer optimierten Umsetzung.	72
Tab. 6.1.:	Vergleich vom RMSE(Δv_{lpe}) für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich statistischer Fehlereinflüsse.	98
Tab. 6.2.:	Vergleich vom RMSE(Δv_{lpe}) für verschiedene Algorithmen in der normalen sowie der verbesserten Ausführung bezüglich Speckle-Einfluss.	99
Tab. 6.3.:	Vergleich der maximalen Empfindlichkeiten S in $px\ mm^{-1}$ für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q	104
Tab. 6.4.:	Vergleich der Standardabweichungen σ_v in px für unterschiedliche Werte der Balkenbreite w_{Balken} und des Exponenten q . .	104

Literatur

- [1] Pat.
- [2] A. A. Adamov, M. S. Baranov, V. N. Khramov, V. L. Abdrakhmanov, A. V. Golubev und I. A. Chechetkin. „Modified method of laser triangulation“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1135 (2018), S. 012049. DOI: 10.1088/1742-6596/1135/1/012049.
- [3] Vyas Akondi und Alfredo Dubra. „Accounting for focal shift in the Shack–Hartmann wavefront sensor“. In: *Optics Letters* 44.17 (2019), S. 4151. DOI: 10.1364/OL.44.004151.
- [4] Brian F. Alexander. „Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation [also Letter 34(11)3347-3348(Nov1995)]“. In: *Optical Engineering* 30.9 (1991), S. 1320. DOI: 10.1117/12.55947.
- [5] Marcos Alonso, Alberto Izaguirre, Imanol Andonegui und Manuel Graña. „Optical Dual Laser Based Sensor Denoising for Online Metal Sheet Flatness Measurement Using Hermite Interpolation“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.18 (2020). DOI: 10.3390/s20185441.
- [6] Markus-Christian Amann und Thierry Bosch. „Laser ranging: A critical review of usual techniques for distance measurement“. In: *Optical Engineering* 40.1 (2001), S. 10. DOI: 10.1117/1.1330700.
- [7] Alessia Baleani, Paolo Castellini, Paolo Chiariotti, Nicola Paone und Luca Violini. „Analysis of reproducibility and repeatability of a hand-held laser scanner for gap&flush measurement in car-assembly line“. In: *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT*. IEEE, 6/3/2020 - 6/5/2020, S. 648–653. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138222.
- [8] Jianan Bao, Jicheng Li und Cong Zhang. „Study on short distance laser ranging system“. In: *The International Conference on Photonics and Optical Engineering (icPOE 2014)*. Hrsg. von Ailing Tian, Anand Asundi, Weiguo Liu und Chunmin Zhang. Bd. 9449. SPIE Proceedings. SPIE, 2015. DOI: 10.1117/12.2083154.
- [9] R. Baribeau und M. Rioux. „Influence of speckle on laser range finders“. In: *Applied optics* 30.20 (1991), S. 2873–2878. DOI: 10.1364/AO.30.002873.

- [10] John Barton, Breyanna Blackwell, Tina G. Butcher, Richard A. Harshman, G. Diane Lee und Douglas A. Olson. *Specifications, tolerances, and other technical requirements for weighing and measuring devices: as adopted by the 104th National Conference on Weights and Measures 2019*. Gaithersburg, MD, 2019. DOI: 10.6028/NIST.HB.44-2020.
- [11] Karl-Heinz Bechstein und Werner Fuchs. „Absolute interferometric distance measurements applying a variable synthetic wavelength“. In: *Journal of Optics* 29.3 (1998), S. 179.
- [12] Rüdiger Beermann, Lorenz Quentin, Gunnar Stein, Eduard Reithmeier und Markus Kästner. „Full simulation model for laser triangulation measurement in an inhomogeneous refractive index field“. In: *Optical Engineering* 57.11 (2018), S. 1. DOI: 10.1117/1.0E.57.11.114107.
- [13] Garry Berkovic und Ehud Shafir. „Optical methods for distance and displacement measurements“. In: *Advances in Optics and Photonics* 4.4 (2012), S. 441–471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
- [14] Herbert Bernstein. *Messelektronik und Sensoren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. DOI: 10.1007/978-3-658-00549-8.
- [15] François Blais. „Review of 20 years of range sensor development“. In: *Journal of Electronic Imaging* 13.1 (2004), S. 231. DOI: 10.1117/1.1631921.
- [16] Wolfgang Boehler und Andreas Marbs. „3D scanning instruments“. In: *Proceedings of the CIPA WG*. Bd. 6. 2002, S. 9–12.
- [17] Kristian Bredies und Dirk Lorenz. *Mathematical Image Processing. Applied and Numerical Harmonic Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2018. DOI: 10.1007/978-3-030-01458-2.
- [18] M. Buzinski, A. Levine und W. H. Stevenson. „Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation“. In: *IEEE National Aerospace and Electronics Conference, 1992*. Piscataway: IEEE, May 1992, S. 1230–1236. DOI: 10.1109/NAECON.1992.220581.
- [19] Yu-Hao Chang, Chien-Sheng Liu und Chih-Chun Cheng. „Design and Characterisation of a Fast Steering Mirror Compensation System Based on Double Porro Prisms by a Screw-Ray Tracing Method“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.11 (2018). DOI: 10.3390/s18114046.
- [20] R. Dändliker und Y. Salvadé. „Multiple-Wavelength Interferometry for Absolute Distance Measurement“. In: *International Trends in Optics and Photonics*. Hrsg. von Toshimitsu Asakura. Bd. 74. Springer Series in OPTICAL SCIENCES. Berlin und Heidelberg: Springer, 1999, S. 294–317. DOI: 10.1007/978-3-540-48886-6{\textunderscore}19.

- [21] Tjorven Delabie, Joris De Schutter und Bart Vandenbussche. „An Accurate and Efficient Gaussian Fit Centroiding Algorithm for Star Trackers“. In: *The Journal of the Astronautical Sciences* 61.1 (2014), S. 60–84. DOI: 10.1007/s40295-015-0034-4.
- [22] Alexander P. Demchenko. *Introduction to Fluorescence Sensing*. 2nd ed. Cham: Springer International Publishing, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-20780-3.
- [23] E. S. Denisov, A. Sh Salakhova, G. V. Timergalina, T. P. Nikishin und M. G. F. Azlyyyakhmatov. „Three-Beam Triangulating Sensor“. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 86 (2015), S. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/86/1/012007.
- [24] Deutsches Institut für Normung. *DIN 32877-1: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Längenmessenrichtungen: Optoelektronische Längenmessungen – Teil 1: Grundlagen und Begriffe*. 2018.
- [25] Dawei Ding, Zhengcai Zhao, Xinquan Zhang, Yucan Fu und Jiuhua Xu. „Evaluation and compensation of laser-based on-machine measurement for inclined and curved profiles“. In: *Measurement* 151 (2020), S. 107236. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107236.
- [26] Marek Dobosz und Marek Ściuba. „Ultrasonic measurement of air temperature along the axis of a laser beam during interferometric measurement of length“. In: *Measurement Science and Technology* 31.4 (2020), S. 045202. DOI: 10.1088/1361-6501/ab491b.
- [27] Hongjun Dong und Long Wang. „Non-iterative spot center location algorithm based on Gaussian for fish-eye imaging laser warning system“. In: *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 123.23 (2012), S. 2148–2153. DOI: 10.1016/j.ijleo.2011.10.012.
- [28] Zhixu Dong, Xingwei Sun, Weijun Liu und Heran Yang. „Measurement of Free-Form Curved Surfaces Using Laser Triangulation“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.10 (2018). DOI: 10.3390/s18103527.
- [29] Axel Donges und Reinhard Noll. *Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications*. Bd. 188. Springer Series in OPTICAL SCIENCES. Heidelberg: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-662-43634-9.
- [30] R. G. Dorsch, G. Häusler und J. M. Herrmann. „Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement“. In: *Applied optics* 33.7 (1994), S. 1306–1314. DOI: 10.1364/AO.33.001306.
- [31] John M. Dudley. „Light, Lasers, and the Nobel Prize“. In: *Advanced Photonics* 2.05 (2020). DOI: 10.1117/1.AP.2.5.050501.

- [32] K. P. Dühlmeier, H. Özcoban und C. S. Leopold. „Inline monitoring of the powder filling level within a rotary tablet press feed frame“. In: *Powder Technology* 351 (2019), S. 134–143. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.04.012.
- [33] Daniel Durini, Hrsg. *High performance silicon imaging: Fundamentals and applications of CMOS and CCD sensors*. Bd. number 60. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. Amsterdam, Boston und Cambridge: Elsevier/WP Woodhead Publishing, 2014.
- [34] Hans Joachim Eichler und Jürgen Eichler. *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 8., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg, 2015. DOI: 10.1007/978-3-642-41438-1.
- [35] European Machine Vision Association. *EMVA Standard 1288: Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras*. letzter Zugriff: 28.06.2021. <https://www.emva.org/wp-content/uploads/EMVA1288-3.0.pdf>, Release 3.0, 29.11.2010.
- [36] Andreas Faulhaber, Marc Gronle, Stefan Haberl, Thomas Buchholz, Tobias Haist und Wolfgang Osten. „Dynamically scanned spot projections with digital holograms for reduced measurement uncertainty in laser triangulation systems“. In: *AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology*. Hrsg. von John Greivenkamp. Proceedings of SPIE. 5200-. Bellingham, Washington: SPIE, 2019, S. 167. DOI: 10.1117/12.2548075.
- [37] Joao Antonio Santos Dias Fonseca, Antonio Baptista, Ma Joao Martins und Joao Paulo N. Torres. „Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications“. In: *Applied Physics Research* 9.4 (2017), S. 33. DOI: 10.5539/apr.v9n4p33.
- [38] Gustavo Gil, Giovanni Savino, Simone Piantini und Marco Pierini. „Motorcycle That See: Multifocal Stereo Vision Sensor for Advanced Safety Systems in Tilting Vehicles“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.1 (2018). DOI: 10.3390/s18010295.
- [39] Hans H. Gorris und Otto S. Wolfbeis. „Photon-upconverting nanoparticles for optical encoding and multiplexing of cells, biomolecules, and microspheres“. In: *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 52.13 (2013), S. 3584–3600. DOI: 10.1002/anie.201208196.
- [40] Andreas C. Gröschl, Janik Schaudé und Tino Hausotte. „Evaluation und Korrektur thermischer Driften eines hochfrequent fokusabstandsmodulierten, fasergekoppelten konfokalen Punktsensors / Evaluation and correction of thermal drifts using a high-speed focal-distance-modulated fibre-coupled confocal sensor“. In: *tm - Technisches Messen* 86.s1 (2019), S. 117–121. DOI: 10.1515/teme-2019-0060.

- [41] Joffray Guillory, Maylis La Teyssendier de Serve, Daniel Truong, Christophe Alexandre und Jean-Pierre Wallerand. „Uncertainty Assessment of Optical Distance Measurements at Micrometer Level Accuracy for Long-Range Applications“. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 68.6 (2019), S. 2260–2267. DOI: 10.1109/TIM.2019.2902804.
- [42] Tobias Haist, Shihao Dong, Thomas Arnold, Mark Gronle und Wolfgang Osten. „Multi-image position detection“. In: *Optics express* 22.12 (2014), S. 14450–14463. DOI: 10.1364/OE.22.014450.
- [43] Tobias Haist, Marc Gronle, Duc Anh Bui, Bofan Jiang, Christof Pruss, Frederik Schaal und Wolfgang Osten. „Towards one trillion positions“. In: *Automated Visual Inspection and Machine Vision*. Hrsg. von Jürgen Beyerer und Fernando Puente León. SPIE Proceedings. SPIE, 2015, S. 953004. DOI: 10.1117/12.2184636.
- [44] Holger Handel. „Analyzing the Influences of Camera Warm-Up Effects on Image Acquisition“. In: *Computer vision - ACCV 2007*. Hrsg. von Yasushi Yagi, Sing Bing Kang, In So Kweon und Hongbin Zha. Bd. 4844. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, 2007, S. 258–268. DOI: 10.1007/978-3-540-76390-1{\textunderscore}26.
- [45] Robert A. Hardin, Yun Liu, Cary Long, Alexander Aleksandrov und Willem Blokland. „Active beam position stabilization of pulsed lasers for long-distance ion profile diagnostics at the Spallation Neutron Source (SNS)“. In: *Optics express* 19.4 (2011), S. 2874–2885. DOI: 10.1364/OE.19.002874.
- [46] G. Häusler und G. Leuchs. „Physikalische Grenzen der optischen Formerfassung mit Licht“. In: *Physik Journal* 53.5 (1997), S. 417–422. DOI: 10.1002/phb1.19970530505.
- [47] Eugene Hecht. *Optik*. 3., vollst. überarb. Aufl. München: Oldenbourg, 2001.
- [48] Eugene Hecht und Karen Lippert. *Optics*. 7th ed. De Gruyter Studium Ser. Berlin/Boston: De Gruyter Inc, 2018. DOI: 10.1515/9783110526653.
- [49] Ekbert Hering und Rolf Martin. *Photonik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. DOI: 10.1007/3-540-29708-1.
- [50] Ekbert Hering und Gert Schönfelder. *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. DOI: 10.1007/978-3-658-12562-2.
- [51] Stefan Hesse und Gerhard Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*. 7., ergänzte und durchgesehene Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-658-21173-8.

- [52] Soichi Ibaraki, Yoshitomo Kitagawa, Yoshihiro Kimura und Shizuo Nishikawa. „On the limitation of dual-view triangulation in reducing the measurement error induced by the speckle noise in scanning operations“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88.1-4 (2017), S. 731–737. DOI: 10.1007/s00170-016-8787-x.
- [53] J. Illingworth und J. Kittler. „A survey of the hough transform“. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 44.1 (1988), S. 87–116. DOI: 10.1016/S0734-189X(88)80033-1.
- [54] Kenji Irie, Ian M. Woodhead, Alan E. McKinnon und Keith Unsworth. „Measured effects of temperature on illumination-independent camera noise“. In: *24th International Conference Image and Vision Computing New Zealand, 2009*. Hrsg. von Donald Bailey. Piscataway, NJ: IEEE, 2009, S. 249–253. DOI: 10.1109/IVCNZ.2009.5378403.
- [55] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung*. 7., neu bearbeitete Aufl. 2012. Berlin und Heidelberg: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-04952-1.
- [56] Thomas H. Jamieson. „Thermal Effects In Optical Systems“. In: *Optical Engineering* 20.2 (1981). DOI: 10.1117/12.7972683.
- [57] Yoon-Soo Jang und Seung-Woo Kim. „Distance Measurements Using Mode-Locked Lasers: A Review“. In: *Nanomanufacturing and Metrology* 1.3 (2018), S. 131–147. DOI: 10.1007/s41871-018-0017-8.
- [58] Robert Jones und Catherine Wykes. *Holographic and speckle interferometry: A discussion of the theory, practice and application of the techniques*. 2. ed. Bd. 6. Cambridge studies in modern optics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989. DOI: 10.1017/CB09780511622465.
- [59] Thibaut Julliard, Vincent Nozick und Hugues Talbot. „Image Noise and Digital Image Forensics“. In: *Digital-forensics and watermarking*. Hrsg. von Yun Qing Shi, Hyoung Joong Kim, Fernando Pérez-González und Isao Echizen. Bd. 9569. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2016, S. 3–17. DOI: 10.1007/978-3-319-31960-5{\textunderscore}1.
- [60] Alireza G. Kashani, Michael J. Olsen, Christopher E. Parrish und Nicholas Wilson. „A Review of LIDAR Radiometric Processing: From Ad Hoc Intensity Correction to Rigorous Radiometric Calibration“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15.11 (2015), S. 28099–28128. DOI: 10.3390/s151128099.

- [61] Yoshihiro Kimura, Atsushi MATSUBARA und Yusuke KOIKE. „Analysis of Measurement Errors of a Diffuse-Reflection Type Laser Displacement Sensor for Profile Measurement“. In: *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century : LEM21 2011.6.0* (2011), _3280–1_–_3280–4_. DOI: 10.1299/jsmelem.2011.6.3280–1.
- [62] Alexander Walter Koch. *Optische Meßtechnik an technischen Oberflächen: Praxisorientierte lasergestützte Verfahren zur Untersuchung technischer Objekte hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung*. Renningen-Malmsheim: expert-Verl., 1998.
- [63] Igor Konyakhin, Fedor Molev, Alexey Konyakhin und Renpu Li. „Multipurpose optic-electronic autocollimators for measuring deformations of the axle with a millimeter wave range radiotelescope“. In: SPIE, 2015. DOI: 10.1117/12.2087599.
- [64] F. R. Kroeger und C. A. Swenson. „Absolute linear thermal–expansion measurements on copper and aluminum from 5 to 320 K“. In: *Journal of Applied Physics* 48.3 (1977), S. 853–864. DOI: 10.1063/1.323746.
- [65] Takao Kuroda. *Essential principles of image sensors*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [66] LASERSCOM LLC. *LDS-660-FP-20*. Abgerufen von <https://laserscom.com/sites/default/files/pdf/lds-660-fp-20.pdf> am 08.02.2021.
- [67] Richard Leach. „Displacement Measurement“. In: *Fundamental Principles of Engineering Nanometrology*. Hrsg. von Richard Leach. Micro and Nano Technologies. Burlington: Elsevier Science, 2014, S. 95–132. DOI: 10.1016/B978-1-4557-7753-2.00005-0.
- [68] Junhwa Lee, Kyoung-Chan Lee, Soojin Cho und Sung-Han Sim. „Computer Vision-Based Structural Displacement Measurement Robust to Light-Induced Image Degradation for In-Service Bridges“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.10 (2017). DOI: 10.3390/s17102317.
- [69] Junhwa Lee, Kyoung-Chan Lee, Sahyeon Lee, Young-Joo Lee und Sung-Han Sim. „Long–term displacement measurement of bridges using a LiDAR system“. In: *Structural Control and Health Monitoring* 26.10 (2019), S. 171. DOI: 10.1002/stc.2428.

- [70] Bin Li, Feng LI, Hongqi Liu, Hui Cai, Xinyong Mao und Fangyu Peng. „A measurement strategy and an error-compensation model for the on-machine laser measurement of large-scale free-form surfaces“. In: *Measurement Science and Technology* 25.1 (2014), S. 015204. DOI: 10.1088/0957-0233/25/1/015204.
- [71] He Li, Douglas A. Bristow und Robert G. Landers. „A switched estimation strategy based on Kalman filtering for compensating laser tracker ADM shift“. In: *Precision Engineering* 56 (2019), S. 395–403. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.01.008.
- [72] Jiarui Li, Haoyun Wei und Yan Li. „Beam drift reduction by straightness measurement based on a digital optical phase conjugation“. In: *Applied Optics* 58.27 (2019), S. 7636. DOI: 10.1364/AO.58.007636.
- [73] Jiyang Li, Haisha Niu und Yanxiong Niu. „Laser feedback interferometry and applications: A review“. In: *Optical Engineering* 56.5 (2017), S. 050901. DOI: 10.1117/1.0E.56.5.050901.
- [74] Ruijun Li, Yongjun Wang, Pan Tao, Rongjun Cheng, Zhenying Cheng, Yongqing Wei und Xueming Dang. „Drift Reduction of a 4-DOF Measurement System Caused by Unstable Air Refractive Index“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.21 (2020). DOI: 10.3390/s20216329.
- [75] Sansi Li, Xinting Jia, Mengwei Chen und Yingping Yang. „Error analysis and correction for color in laser triangulation measurement“. In: *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 168 (2018), S. 165–173. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.057.
- [76] Zhi Li, Xiao Chen, Yuanzhi Liu, Wei Tao und Hui Zhao. „Temperature Compensation of Laser Triangular Displacement Sensor“. In: *2019 Chinese Automation Congress (CAC)*. Hrsg. von Chinese Automation Congress. IEEE, 11/22/2019 - 11/24/2019, S. 4661–4667. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997470.
- [77] C. C. Liebe. „Accuracy performance of star trackers - a tutorial“. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 38.2 (2002), S. 587–599. DOI: 10.1109/TAES.2002.1008988.
- [78] Carl Christian Liebe und Keith Coste. „Distance Measurement Utilizing Image-Based Triangulation“. In: *IEEE Sensors Journal* 13.1 (2013), S. 234–244. DOI: 10.1109/JSEN.2012.2212428.

- [79] Chien-Sheng Liu und Sheng-Hong Jiang. „A novel laser displacement sensor with improved robustness toward geometrical fluctuations of the laser beam“. In: *Measurement Science and Technology* 24.10 (2013), S. 105101. DOI: 10.1088/0957-0233/24/10/105101.
- [80] Lunan Liu, Yikun Yang und Bintang Yang. „Non-contact and high-precision displacement measurement based on tunnel magnetoresistance“. In: *Measurement Science and Technology* 31.6 (2020), S. 065102. DOI: 10.1088/1361-6501/ab662b.
- [81] Tong Liu, Yan Tian und Jingyao Wu. „Laser spot center location algorithm based on sub-pixel interpolation“. In: *AOPC 2017: Optical Sensing and Imaging Technology and Applications*. Hrsg. von Yadong Jiang, Haimei Gong, Weibiao Chen und Jin Li. Bd. 10462. SPIE, 2017. DOI: 10.1117/12.2285027.
- [82] Zhen Liu, Bang Kui Huang, Yan Na Shang und Guang Jun Zhang. „A High Precision Laser Spot Center Location Method Based on Multi-scale Image Analysis“. In: *Frontiers in Computer Education*. Hrsg. von Sabo Sambath und Egui Zhu. Bd. 133. Advances in Intelligent and Soft Computing, 133. s.l.: Springer-Verlag, 2012, S. 1019–1025. DOI: 10.1007/978-3-642-27552-4{\textunderscore}133.
- [83] Martin Löffler-Mang. *Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers*. 1. Aufl. Studium Fertigung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012.
- [84] Liyan Luo, De Xu, Zhengtao Zhang, Juan Zhang und Wentai Qu. „A fast and robust circle detection method using perpendicular bisector of chords“. In: *25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2013*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 2856–2860. DOI: 10.1109/CCDC.2013.6561432.
- [85] Zekui Lv, Xinghua Li, Zhikun Su, Dong Zhang, Xiaohuan Yang, Haopeng Li, Jue Li u. a. „A Novel 2D Micro-Displacement Measurement Method Based on the Elliptical Paraboloid“. In: *Applied Sciences* 9.12 (2019), S. 2517. DOI: 10.3390/app9122517.
- [86] Shaopeng Ma, Jiazhi Pang und Qinwei Ma. „The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera“. In: *Measurement Science and Technology* 23.2 (2012), S. 025403. DOI: 10.1088/0957-0233/23/2/025403.
- [87] Aziz Makandar, Daneshwari Mulimani und Mahantesh Jevoor. „Comparative Study of Different Noise Models and Effective Filtering Techniques“. In: *International Journal of Science and Research (IJSR)* 3.8 (2014), S. 458–464.
- [88] Anssi Mäkynen. *Position-sensitive devices and sensor systems for optical tracking and displacement sensing applications*. Oulu: Oulu University Library, 2000.

- [89] Markus A. Mayer, Anja Borsdorf, Martin Wagner, Joachim Hornegger, Christian Y. Mardin und Ralf P. Tornow. „Wavelet denoising of multiframe optical coherence tomography data“. In: *Biomedical optics express* 3.3 (2012), S. 572–589. DOI: 10.1364/B0E.3.000572.
- [90] Xuelian Meng, Nate Currit und Kaiguang Zhao. „Ground Filtering Algorithms for Airborne LiDAR Data: A Review of Critical Issues“. In: *Remote Sensing* 2.3 (2010), S. 833–860. DOI: 10.3390/rs2030833.
- [91] Dieter Meschede. *Optik, Licht und Laser*. 3., durchges. Aufl. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008.
- [92] Cao Miao, Wang Xiao und Yao Qinghua. „Influence Analysis of Laser Spot Noise on the Measurement Accuracy of Laser Triangulation Method“. In: *International Journal of u- and e- Service, Science and Technology* 9.6 (2016), S. 39–46. DOI: 10.14257/ijunesst.2016.9.6.04.
- [93] Mahsa Mohammadikaji, Stephan Bergmann, Jurgen Beyerer, Jan Burke und Carsten Dachsbacher. „Sensor-Realistic Simulations for Evaluation and Planning of Optical Measurement Systems With an Application to Laser Triangulation“. In: *IEEE Sensors Journal* 20.10 (2020), S. 5336–5349. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2971683.
- [94] Manesh V. Mohan, S. Anjana Devi, C. H. Teena und Anu Abraham. „A method for minimum range extension with improved accuracy in triangulation laser range finder“. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Technologies for Humanitarian Relief*. Hrsg. von Rajagopala Chidambaram. New York, NY: ACM, 2011, S. 115. DOI: 10.1145/2185216.2185256.
- [95] Midhun Mohan, Bruno Araujo Furtado de Mendonça, Carlos Alberto Silva, Carine Klauberg, Acauã Santos de Saboya Ribeiro, Emanuel José Gomes de Araújo, Marco Antonio Monte u. a. „Optimizing individual tree detection accuracy and measuring forest uniformity in coconut (*Cocos nucifera* L.) plantations using airborne laser scanning“. In: *Ecological Modelling* 409 (2019), S. 108736. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108736.
- [96] Vasył Molebny, Paul McManamon, Ove Steinvall, Takao Kobayashi und Weibiao Chen. „Laser radar: historical prospective—from the East to the West“. In: *Optical Engineering* 56.3 (2016), S. 031220. DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031220.
- [97] Partha Pratim Mondal und Alberto Diaspro. *Fundamentals of fluorescence microscopy: Exploring life with light*. Dordrecht: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-94-007-7545-9.

- [98] Víctor Iván Moreno-Oliva, Edwin Román-Hernández, Eduardo Torres-Moreno, José Rafael Dorrego-Portela, Maximino Avendaño-Alejo, Manuel Campos-García und Sergio Sánchez-Sánchez. „Measurement of quality test of aerodynamic profiles in wind turbine blades using laser triangulation technique“. In: *Energy Science & Engineering* 26.4 (2019), S. 789. DOI: 10.1002/ese3.423.
- [99] Zhuojiang Nan, Y. U. Feng, Hui Zhao und Wei Tao. „Research on laser source drift with temperature of laser triangular displacement sensor“. In: *Ninth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. Hrsg. von Liandong Yu. Proceedings of SPIE. 11343. Bellingham, Washington: SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2553013.
- [100] Zhuojiang Nan, Wei Tao und Hui Zhao. „Development of a small size laser triangulation displacement sensor and temperature drift compensation method“. In: *Measurement Science and Technology* (2021). DOI: 10.1088/1361-6501/abdef7.
- [101] Alfred Nischwitz, Max Fischer, Peter Haberäcker und Gudrun Socher. *Bildverarbeitung: Band II des Standardwerks Computergrafik und Bildverarbeitung*. 4., akt. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und Springer Vieweg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-28705-4.
- [102] SeBaek Oh, Kyung-Chan Kim, Soo Hyun Kim und Yoon Keun Kwak. „Resolution enhancement using a diffraction grating for optical triangulation displacement sensors“. In: *Testing, Reliability, and Applications of Optoelectronic Devices*. Hrsg. von Aland K. Chin, Niloy K. Dutta, Kurt J. Linden und S. C. Wang. SPIE Proceedings. SPIE, 2001, S. 102. DOI: 10.1117/12.426875.
- [103] Nobuyuki Otsu. „A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9.1 (1979), S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [104] Incheol Park, Jongho Park, Youngbaik Kim und Kilito Chong. „An Improved Algorithm for Laser Point Detection Based on Otsu Thresholding Method“. In: Bd. 140. *Advanced Science and Technology Letters*. Science & Engineering Research Support soCiety, 2016, S. 162–167. DOI: 10.14257/astl.2016.140.31.
- [105] Walt Pastorius. *TRIANGULATION SENSORS An Overview: By Dr. Walt Pastorius*. Hrsg. von Optical Gaging Products. 2013.
- [106] Pavel Pavliček und Gerd Häusler. „Methods for Optical Shape Measurement and their Measurement Uncertainty“. In: *International Journal of Optomechatronics* 8.4 (2014), S. 292–303. DOI: 10.1080/15599612.2014.942929.

- [107] David Arge Klevang Pedersen, Carl Christian Liebe und John Leif Jorgensen. „Structured Light System on Mars Rover Robotic Arm Instrument“. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 55.4 (2019), S. 1612–1623. DOI: 10.1109/TAES.2018.2874125.
- [108] Frank L. Pedrotti. *Optik für Ingenieure: Grundlagen ; mit 28 Tabellen*. 3., bearb. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, 2005.
- [109] Kai-Erik Peiponen, Risto Myllylä und Aleksandr V. Priezhev. *Optical measurement techniques: Innovations for industry and the life sciences*. Bd. 136. Springer Series in OPTICAL SCIENCES. Berlin: Springer, 2009.
- [110] D. S. Pierce, T. S. Ng und B. R. Morrison. „A novel laser triangulation technique for high precision distance measurement“. In: *Conference record of the IEEE Industry Applications Society annual meeting*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1992, S. 1762–1769. DOI: 10.1109/IAS.1992.244524.
- [111] Stephane Poujouly und Bernard A. Journet. „Laser range-finding by phase-shift measurement: moving toward smart systems“. In: *Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology*. Hrsg. von Kevin G. Harding, John W. V. Miller und Bruce G. Batchelor. SPIE Proceedings. SPIE, 2001, S. 152–160. DOI: 10.1117/12.417192.
- [112] Pablo Puerto, Beñat Estala und Alberto Mendikute. „A Study on the Uncertainty of a Laser Triangulator Considering System Covariances“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.6 (2020). DOI: 10.3390/s20061630.
- [113] Ilko Rahneberg. „Untersuchungen zu optischen Mehrkomponentenmesssystemen“. Diss. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, 2014.
- [114] J. C. Rodríguez-Quiñonez, O. Sergiyenko, W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, D. Hernandez-Balbuena, R. Rascón und P. Mercorelli. „Improve a 3D distance measurement accuracy in stereo vision systems using optimization methods' approach“. In: *Opto-Electronics Review* 25.1 (2017), S. 24–32. DOI: 10.1016/j.opelre.2017.03.001.
- [115] Johannes Schlarp, Ernst Csencsics und Georg Schitter. „Scanning laser triangulation sensor geometry maintaining imaging condition“. In: *IFAC-PapersOnLine* 52.15 (2019), S. 301–306. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.691.
- [116] Michael Schuth und Wassili Buerakov. *Handbuch optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*. München: Hanser, 2017.

- [117] Yassine Selami, Wei Tao, Qiang Gao, Hongwei Yang und Hui Zhao. „A Scheme for Enhancing Precision in 3-Dimensional Positioning for Non-Contact Measurement Systems Based on Laser Triangulation“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.2 (2018). DOI: 10.3390/s18020504.
- [118] Yin-tao Shi und Xiao-jun Cheng. „Laser Spot Center Detection Based on the Geometric Feature“. In: *International Symposium on Information Science and Engineering (ISISE), 2010*. Hrsg. von Jianping Chen. Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 322–325. DOI: 10.1109/ISISE.2010.15.
- [119] Mark R. Shortis, Timothy A. Clarke und Tim Short. „Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images“. In: *Video-metrics III*. Hrsg. von Sabry F. El-Hakim. Bd. 2350. SPIE Proceedings. SPIE, 1994, S. 239–250. DOI: 10.1117/12.189136.
- [120] Markus Werner Sigrist. *Laser: Theorie, Typen und Anwendungen*. 8. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. DOI: 10.1007/978-3-662-57515-4.
- [121] Lyndon N. Smith und Melvyn L. Smith. „Automatic machine vision calibration using statistical and neural network methods“. In: *Image and Vision Computing* 23.10 (2005), S. 887–899. DOI: 10.1016/j.imavis.2005.03.009.
- [122] Edmond Wai Yan So, Matteo Munaro, Stefano Michieletto, Mauro Antonello und Emanuele Menegatti. „Real-Time 3D Model Reconstruction with a Dual-Laser Triangulation System for Assembly Line Completeness Inspection“. In: *Intelligent Autonomous Systems 12*. Hrsg. von Sukhan Lee, Hyungsuck Cho, Kwang-Joon Yoon und Jangmyung Lee. Bd. 194. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Berlin und Heidelberg: Springer, 2013, S. 707–716. DOI: 10.1007/978-3-642-33932-5\underline{66}.
- [123] Liming Song, Wenfu Wu, Junrong Guo und Xiuhua Li. „Research on Sub-pixel Location of the Laser Spot Center“. In: *2013 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 378–381. DOI: 10.1109/IHMSC.2013.237.
- [124] S. Sreekuttan und S. Adarsh. „Distance Measurement for Self-driving Vehicles Using Data Fusion and Machine Learning“. In: *Intelligent Computing, Information and Control Systems*. Hrsg. von A. Pasumpon Pandian, Klimis Ntalianis und Ram Palanisamy. Bd. 1039. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 682–689. DOI: 10.1007/978-3-030-30465-2\underline{75}.
- [125] Douglas Scott Steele. „Apparatus and method for optical triangulation measurement: FR Patent“. Pat. FR2487507A1. 1982.

- [126] Andreas Süss, Veronique Rochus, Maarten Rosmeulen und Xavier Rottenberg. „Benchmarking time-of-flight based depth measurement techniques“. In: *Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits XVIII*. Hrsg. von Sailing He, El-Hang Lee und Louay A. Eldada. SPIE Proceedings. SPIE, 2016, S. 975118. DOI: 10.1117/12.2212478.
- [127] Herbert Süße und Erik Rodner. *Bildverarbeitung und Objekterkennung: Computer Vision in Industrie und Medizin*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-8348-2606-0.
- [128] Natalia Swojak, Michał Wieczorowski und Michał Jakubowicz. „Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors“. In: *Measurement* 176 (2021), S. 109190. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109190.
- [129] Shigeru Takushima, Hiroyuki Kawano, Hironori Nakahara und Toshia-ki Kurokawa. „On-machine multi-directional laser displacement sensor using scanning exposure method for high-precision measurement of metal-works“. In: *Precision Engineering* 51 (2018), S. 437–444. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2017.09.015.
- [130] Guoqing Tang, Xinghua Qu, Fumin Zhang, Xianyu Zhao und Bo Peng. „Absolute distance measurement based on spectral interferometry using femtosecond optical frequency comb“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 120 (2019), S. 71–78. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2019.02.013.
- [131] Sandrine Thomas. „Optimized centroid computing in a Shack-Hartmann sensor“. In: *Advancements in Adaptive Optics*. SPIE Proceedings. SPIE, 2004, S. 1238. DOI: 10.1117/12.550055.
- [132] Hao Tian, Fan Wu und Yongjun Gong. „Gear Tooth Profile Reconstruction via Geometrically Compensated Laser Triangulation Measurements“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.7 (2019). DOI: 10.3390/s19071589.
- [133] Frank Träger. *Springer handbook of lasers and optics: With 163 tables*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-19409-2.
- [134] Hans-Rolf Tränkler und Leo Reindl. *Sensortechnik*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-29942-1.
- [135] Nikola Vukašinović, Drago Bračun, Janez Možina und Jože Duhovnik. „The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50.1-4 (2010), S. 265–274. DOI: 10.1007/s00170-009-2493-x.

- [136] Hongjun Wang, Lei Hui und Jiaying Zhang. „Research on spot of CCD subdivided locating methods in laser triangulation displacement measurement“. In: *Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*. Hrsg. von Chunmin Zhang und Anand Asundi. SPIE Proceedings. SPIE, 2017, S. 10256. DOI: 10.1117/12.2257635.
- [137] Lei Wang, Jun Gao, Johannes Eckstein und Peter Ott. „Speckle and CCD noise in rotationally symmetric and anamorphic laser triangulation“. In: *Fourth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*. Hrsg. von Yetai Fei, Kuang-Chao Fan und Rongsheng Lu. SPIE Proceedings. SPIE, 2008, 71303P. DOI: 10.1117/12.819692.
- [138] Refael Whyte, Lee Streeter, Michael J. Cree und Adrian A. Dorrington. „Application of lidar techniques to time-of-flight range imaging“. In: *Applied optics* 54.33 (2015), S. 9654–9664. DOI: 10.1364/AO.54.009654.
- [139] Chengxing Wu, Baijin Chen, Chunsheng Ye und Xiaopeng Yan. „Modeling the Influence of Oil Film, Position and Orientation Parameters on the Accuracy of a Laser Triangulation Probe“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.8 (2019). DOI: 10.3390/s19081844.
- [140] Guanhao Wu, Lei Liao, Shilin Xiong, Guoyuan Li, Zhijian Cai und Zebin Zhu. „Synthetic wavelength interferometry of an optical frequency comb for absolute distance measurement“. In: *Scientific reports* 8.1 (2018), S. 4362. DOI: 10.1038/s41598-018-22838-0.
- [141] Sijin Wu, Qibo Feng, Zhan Gao PhD und Qiang Han. „A Novel Laser Triangulation Sensor with Wide Dynamic Range“. In: *SAE Technical Paper*. SAE Technical Paper Series. SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-0994.
- [142] Yicheng Wu, Qiurui He, Tianfan Xue, Rahul Garg, Jiawen Chen, Ashok Veeraraghavan und Jonathan T. Barron. *How to Train Neural Networks for Flare Removal*.
- [143] Dunzhu Xia, Shuling Chen, Shourong Wang und Hongsheng Li. „Temperature effects and compensation-control methods“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 9.10 (2009), S. 8349–8376. DOI: 10.3390/s91008349.
- [144] Tianyuan Xie, Ju Wang, Zixiong Wang, Chuang Ma, Yang Yu, Jigui Zhu und Jinlong Yu. „Long-range, high-precision, and high-speed absolute distance measurement based on alternately oscillating optoelectronic oscillators“. In: *Optics Express* 27.15 (2019), S. 21635. DOI: 10.1364/OE.27.021635.

- [145] Xiangyang Xu und Hao Yang. „Intelligent crack extraction and analysis for tunnel structures with terrestrial laser scanning measurement“. In: *Advances in Mechanical Engineering* 11.9 (2019), S. 168781401987265. DOI: 10.1177/1687814019872650.
- [146] Hongwei Yang, Wei Tao, Xiaoqia Yin und Hui Zhao. „Differential correction system of laser beam directional dithering based on symmetrical beamsplitter“. In: *Optical Review* 25.1 (2018), S. 10–17. DOI: 10.1007/s10043-017-0389-9.
- [147] Hongwei Yang, Wei Tao, Zhengqi Zhang, Siwei Zhao, Xiaoqia Yin und Hui Zhao. „Reduction of the Influence of Laser Beam Directional Dithering in a Laser Triangulation Displacement Probe“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 17.5 (2017). DOI: 10.3390/s17051126.
- [148] Song Yang, Jing-Yuan Zhang, Ying-Ying Yang, Jun-Yuan Huang, Yun-Rui Bai, Yong Zhang und Xue-Chun Lin. „Automatic compensation of thermal drift of laser beam through thermal balancing based on different linear expansions of metals“. In: *Results in Physics* 13 (2019), S. 102201. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102201.
- [149] Wenjun Yang, Xiaojun Liu, Xiaoting Guo, Wenlong Lu, Zhenjian Yao und Zili Lei. „A method for simultaneously measuring 6DOF geometric motion errors of a precision rotary stage based on absolute position-distance measurement“. In: *Optics and Lasers in Engineering* 138 (2021), S. 106420. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2020.106420.
- [150] Yang Yang, Yuchen Zhang, Yuehai Wang und Danian Liu. „Design of 3D Laser Radar Based on Laser Triangulation“. In: *KSII Transactions on Internet and Information Systems* 13.5 (2019). DOI: 10.3837/tiis.2019.05.010.
- [151] Wang Yanhua, Wang Cheng, Feng Yan, Dai Bowen und Wu Gang. „Application and Analyzation of the Vision-Based Structure Model Displacement Measuring Method in Cassette Structure Shaking Table Experiment“. In: *Advances in Civil Engineering* 2020 (2020), S. 1–12. DOI: 10.1155/2020/8869935.
- [152] Bin Yao, Zhiqin Cai, Jie Lu, Xiaofan Ma und Binqiang Chen. „Novel laser triangulation measurement method for screw rotor profile under multi-factor constraints“. In: *Measurement* 152 (2020), S. 107317. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107317.
- [153] Ruifang Ye, Chun Lin, Zhenheng Lin, Xizhao Lu, Xiaolan Chu und Yuanqing Huang. „A new algorithm to locate the laser spot center at a sub-pixel level“. In: *4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Hrsg.

- von Li Yang, John M. Schoen, Yoshiharu Namba und Shengyi Li. Bd. 7282. SPIE Proceedings. SPIE, 2008. DOI: 10.1117/12.830887.
- [154] Qu Ying-Dong, Cui Cheng-Song, Chen San-Ben und Li Jin-Quan. „A fast subpixel edge detection method using Sobel–Zernike moments operator“. In: *Image and Vision Computing* 23.1 (2005), S. 11–17. DOI: 10.1016/j.imavis.2004.07.003.
- [155] Jia-ju Ying, Yong-qiang He und Zhong-liang Zhou. „High speed gradient Hough transform algorithm for laser spot location“. In: *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications*. Hrsg. von Liwei Zhou. Bd. 6625. SPIE Proceedings. SPIE, 2007. DOI: 10.1117/12.790783.
- [156] Lv Yong, Feng Qibo, Liu Lishuang, Yi Qingrui und Li Yueqiang. „Application of optical switch in precision measurement system based on multi-collimated beams“. In: *Measurement* 61 (2015), S. 216–220. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.10.038.
- [157] Han Woong Yoo, Norbert Druml, David Brunner, Christian Schwarzl, Thomas Thurner, Marcus Hennecke und Georg Schitter. „MEMS-based lidar for autonomous driving“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 135.6 (2018), S. 408–415. DOI: 10.1007/s00502-018-0635-2.
- [158] Klemen Žbontar, Matjaž Mihelj, Boštjan Podobnik, Franc Povše und Marko Munih. „Dynamic symmetrical pattern projection based laser triangulation sensor for precise surface position measurement of various material types“. In: *Applied optics* 52.12 (2013), S. 2750–2760. DOI: 10.1364/AO.52.002750.
- [159] Dongdong Zhang, Shuji Zhao, Quanshui Zheng und Li Lin. „Absolute capacitive grating displacement measuring system with both high-precision and long-range“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 295 (2019), S. 11–22. DOI: 10.1016/j.sna.2019.05.027.
- [160] Jizhou Zhang, Tingfa Xu, Sining Chen und Xing Wang. „Efficient Colorful Fourier Ptychographic Microscopy Reconstruction With Wavelet Fusion“. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 31729–31739. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2841854.
- [161] Kun Zhang, Hai-qing Chen, Jun Li und Jia-kun Xu. „An improved sub-pixel algorithm for laser spot center determination based on Zernike moments“. In: *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Laser Sensing and Imaging*. Hrsg. von Farzin Amzajerjian, Chun-qing Gao und Tian-yu Xie. SPIE Proceedings. SPIE, 2009, S. 7382. DOI: 10.1117/12.836667.

- [162] Le Zhang, Qianqian Wang, Xutai Cui, Zhong Peng und Yu Zhao. „An improved algorithm of laser spot center detection in strong noise background“. In: *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Systems and Modern Optoelectronic Instruments*. Hrsg. von Yongtian Wang, Baohua Jia und Kimio Tatsuno. Bd. 10616. Proceedings of SPIE. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2018, S. 5. DOI: 10.1117/12.2286292.
- [163] Pengcheng Zhang, Jin Liu, Haima Yang und Luo Yu. „Position Measurement of Laser Center by Using 2-D PSD and Fixed-Axis Rotating Device“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 140319–140327. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943910.
- [164] Xiaobo Zhang, Fumin Fan, Mehdi Gheisari und Gautam Srivastava. „A Novel Auto-Focus Method for Image Processing Using Laser Triangulation“. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 64837–64843. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2914186.
- [165] Huijie Zhao, Shaoguang Shi, Xingfa Gu, Guorui Jia und Lunbao Xu. „Integrated System for Auto-Registered Hyperspectral and 3D Structure Measurement at the Point Scale“. In: *Remote Sensing* 9.6 (2017), S. 512. DOI: 10.3390/rs9060512.
- [166] Zhangrong Zhao und Xiaomei Sui. „Temperature compensation design and experiment for a giant magnetostrictive actuator“. In: *Scientific reports* 11.1 (2021), S. 251. DOI: 10.1038/s41598-020-80460-5.
- [167] Jun Zhu, Zhengjie Xu, Deli Fu und Cong Hu. „Laser Spot Center Detection and Comparison Test“. In: *Photonic Sensors* 9.1 (2018), S. 49–52. DOI: 10.1007/s13320-018-0432-x.

Eigene Veröffentlichungen und Patentanmeldungen

- [168] Xingchen Dong, Ali K. Yetisen, Jie Dong, Kun Wang, Patrick Kienle, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Hyperspectral Fingerprints for Atomic Layer Mapping of Two-Dimensional Materials with Single-Layer Accuracy“. In: *The Journal of Physical Chemistry C* 125.30 (2021), S. 16583–16590. DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c03802.
- [169] Patrick Kienle, Lorena Batarilo, Markus Akgül, Michael H. Köhler, Kun Wang, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Optical Setup for Error Compensation in a Laser Triangulation System“. In: *Sensors* 20.17 (2020), S. 4949. DOI: 10.3390/s20174949.

- [170] Patrick Kienle, Nicholas E. Fest, Agnia D. Larasati, Kun Wang, Michael H. Köhler, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Analyse eines fehlerkompensierten Lasertriangulationssystems“. In: *tm - Technisches Messen* 88.S1 (2021), S. 59–64. DOI: 10.1515/teme-2021-0060.
- [171] Patrick Kienle, Michael H. Köhler, Kun Wang, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Increasing the sensitivity of laser triangulation systems using structured optical surfaces“. In: *ODS 2020: Industrial Optical Devices and Systems*. Hrsg. von Ryuichi Katayama und Yuzuru Takashima. SPIE, 2020, 115000J. DOI: 10.1117/12.2566094.
- [172] Patrick Kienle, Elif Nallar, Michael H. Köhler, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Analysis of sub-pixel laser spot detection in laser triangulation systems“. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*. Hrsg. von Peter Lehmann, Wolfgang Osten und Armando Albertazzi Gonçalves JR. Bd. 11056. SPIE, 2019, S. 933–943. DOI: 10.1117/12.2525669.
- [173] Michael H. Köhler, Michael Müller, Michael Schardt, Patrick Kienle, Xingchen Dong und Walter Alexander Koch. „Statisches Fourier-Transformationspektrometer für den mittleren Infrarotbereich mit erhöhter spektraler Auflösung“. In: *DGaO-Proceedings*. 2019.
- [174] Michael H. Köhler, Stefan S. Naßl, Patrick Kienle, Xingchen Dong und Alexander W. Koch. „Broadband static Fourier transform mid-infrared spectrometer“. In: *Applied optics* 58.13 (2019), S. 3393–3400. DOI: 10.1364/AO.58.003393.
- [175] Michael H. Köhler, The-Thien Nguyen, Patrick Kienle, Xingchen Dong und Alexander W. Koch. „Setup and evaluation of a static imaging Fourier transform spectrometer for the mid-infrared spectral range“. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI*. Hrsg. von Peter Lehmann, Wolfgang Osten und Armando Albertazzi Gonçalves. SPIE, 6/24/2019 - 6/27/2019, S. 57. DOI: 10.1117/12.2525600.
- [176] Michael H. Köhler, The Thien Nguyen, Patrick Kienle, Xingchen Dong, Michael Schardt, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Hyperspectral imager for the mid-infrared spectral range using a single-mirror interferometer and a windowing method“. In: *OSA Continuum* 2.11 (2019), S. 3212. DOI: 10.1364/OSAC.2.003212.
- [177] Michael H. Köhler, Michael Schardt, Hamza B. Ghazala, Ennio Colicchia, Patrick Kienle, Xingchen Dong, Kun Wang u. a. „Static Fourier transform mid-infrared spectrometer with continuous background correction“. In: *Applied Optical Metrology III*. Hrsg. von Erik Novak und James D. Trolinger. SPIE, 8/11/2019 - 8/15/2019, S. 43. DOI: 10.1117/12.2528404.

- [178] Michael H. Köhler, Michael Schardt, Michael Müller, Patrick Kienle, Kun Wang, Xingchen Dong, Carsten Giebeler u. a. „Static Fourier transform mid-infrared spectrometer with increased spectral resolution using a stepped mirror“. In: *OSA Continuum* 3.8 (2020), S. 2134. DOI: 10.1364/OSAC.397095.
- [179] Michael H. Köhler, Bastian Vauth, Clara Kiesselbach, Xingchen Dong, Kun Wang, Patrick Kienle, Michael Schardt u. a. „Compact static Fourier transform spectrometer for time-resolved mid-infrared spectroscopy“. In: *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVII*. Hrsg. von Duncan L. Hickman und Helge Bürsing. SPIE, 9/21/2020 - 9/25/2020, S. 6. DOI: 10.1117/12.2571489.
- [180] Kun Wang, Xingchen Dong, Michael H. Köhler, Patrick Kienle, Qiang Bian, Maximilian Fink, Martin Jakobi u. a. „Optical fiber sensors based on multimode interference using square-core fiber for temperature measurement“. In: *Photonic Instrumentation Engineering VIII*. Hrsg. von Yakov Soskind und Lynda E. Busse. SPIE, 3/6/2021 - 3/12/2021, S. 25. DOI: 10.1117/12.2577571.
- [181] Kun Wang, Xingchen Dong, Michael H. Köhler, Patrick Kienle, Qiang Bian, Martin Jakobi und Alexander W. Koch. „Advances in Optical Fiber Sensors Based on Multimode Interference (MMI): A Review“. In: *IEEE Sensors Journal* (2020), S. 1. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3015086.

Betreute studentische Arbeiten

- [182] M. Akgül. „Entwicklung und Charakterisierung eines auf der Lasertriangulation basierenden Abstandssensors“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [183] Y. Akrami. „Anwendung von maschinellem Lernen zur Klassifizierung von Messoberflächen und Segmentierung eines Laserpunktes für eine präzise Laserpunkterfassung“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2018.
- [184] L. Balchidis. „Anwendung der digitalen Bildkorrelation in der Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [185] L. Batarilo. „Entwicklung eines Lasertriangulationsaufbau zur Kompensation thermischer und mechanischer Fehlereinflüsse“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.

- [186] M. Belokovskiy. „Analyse von digitalen Bildkorrelationsmethoden zur Laserpunkterfassung in der Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [187] I. Boussarsar. „Modelling and Simulation of Reflection and Scattering on Flat Surfaces“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [188] A. Buna. „Schadstoffe in Getränkeflaschen und ausgewählte Messmethoden zur Schadstoffanalyse“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2021.
- [189] R. Chávez. „End-of-Line-Tester for Production, Test and Firmware Deployment of LTE Narrowband - Internet-of-Things Modules“. Forschungspraxis. Technische Universität München, 2019.
- [190] M. Corletto. „Implementierung und Auswertung verschiedener Algorithmen zur präzisen Laserpunkterfassung“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2018.
- [191] L. Dellinger. „Analyse thermischer Ausdehnungen an einem Lasertriangulationssystem“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [192] M. Dissemond. „Overview of Methods for Sub-Pixel Detection of Circular Objects in Digital Images“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2019.
- [193] U. Egenhofer. „Analyse und Weiterentwicklung der Hardware eines Strommesssystems“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2018.
- [194] U. Egenhofer. „Praktischer Aufbau einer wissenschaftlichen Kamera mit einem Raspberry Pi“. Projektpraktikum. Technische Universität München, 2019.
- [195] J. Englhardt. „Erstellung eines Sensorarrays zur Messung der Luftqualität“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2021.
- [196] F. Farhat. „Aufbau eines vollautomatisierten Messversuchs zur optischen Entfernungsmessung“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2018.
- [197] N. Fest. „Evaluating Simulative and Experimental Measurements of a Laser Triangulation System Under Thermal Loading“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2021.
- [198] N. Fest. „Investigating the Impact of Thermal Loads on a Laser Triangulation Setup“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [199] R. Fichtner. „Überblick über ausgewählte Messprinzipien der nicht-optischen Abstandsmessung“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2020.

- [200] C. M. Foltyn. „Untersuchung ob der im Handmessgerät integrierte Freifallsensor zur Detektion von Sturzschäden eingesetzt werden kann“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2019.
- [201] D. Gamper. „Stability Research and Characterization of a Laser Triangulation Setup“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [202] T. Genzinger. „Entwicklung eines Verfahrens zur Kompensation von Fehlern bei der Abstandsmessung mit Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [203] P. Gerg. „Marktforschung im Bereich der Distanzmessung“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2020.
- [204] P. Grill. „Stand der Technik in der Entfernungsmessung mittels Lasertriangulation und optischer Laufzeitverfahren“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2020.
- [205] I. Hartono. „Application of a Triangulation-Based Laser Profile Sensor for Precise Guide Rail Alignment and Adjustment“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [206] V. P. Köber. „Optimierung von strukturierten Messoberflächen in der Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [207] A. Käs Dorf. „Conception of a Calibration Rig for a Line Laser Triangulation Device“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [208] A. Larasati. „Compensation of Temperature Variations on Laser Triangulation Setup Using Regression Analysis“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [209] M. Leitenberger. „Abstandsmessung mit interferometrischen Methoden“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2020.
- [210] R. Lempa. „Optische Entfernungsmessung im Messbereich 0,1 m bis 10 m“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2018.
- [211] N. Linhart. „Active Methods for Optical Distance Measurement without Laser“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2021.
- [212] Y. G. Loke. „Simulation of Image Sensor Noise in a Laser Triangulation Setup“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [213] F. Meyer. „Charakterisierung eines kaskadierten Hall-Chip-Sensors zur Wegmessung in Nutzfahrzeugen“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [214] F. Meyer. „Parallelität und Verkippung zweier Flächen“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2019.

- [215] A. Misik. „A Survey on Passive Optical Measurement Techniques for Distance Estimation“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2021.
- [216] N. Mujanovic. „Theoretische Betrachtung des Einflusses von Neigung und Oberflächeneigenschaften auf die Abstandsmessung mittels Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [217] R. Mura. „Erweiterung und Optimierung der Steuerungssoftware eines Lasertriangulationssystems auf einem Raspberry Pi 4B“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [218] E. Nallar. „Analyse erweiterter Methoden auf die Genauigkeit der Laserpunkterfassung“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [219] P. Netzer. „Historische Entwicklung, Kategorisierung und Diskussion unterschiedlicher Distanzmesssysteme“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2021.
- [220] T. Nouri. „Analyse des Einflusses von strukturierten Oberflächen auf die Laserpunkterfassung“. Masterarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [221] J. Pfohl. „Implementierung der Auswertesoftware eines Lasertriangulationssystems auf einem Einplatinencomputer“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [222] L. Reidiess. „Weiterentwicklung eines optischen Messsystems“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2018.
- [223] A. Rempel. „Fluoreszierende strukturierte Oberflächen im Mikro- bis Nanometerbereich“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2018.
- [224] H. Ren. „Evaluation of Radar Field of View from Measurement Data and Development of Sensor Performance Database“. Forschungspraxis. Technische Universität München, 2019.
- [225] E. Renda. „Optimierung des Aufbaus eines Lasertriangulationssystems“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2021.
- [226] E. Renda. „Optimierung des optomechanischen Kompensationsaufbaus eines Lasertriangulationssystems“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [227] F. Röhrer. „Analyse des Einflusses thermischer Schwankungen auf die Distanzmessung mittels Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [228] E. Sahin. „Analysis of Influencing Factors on Laser Point Detection“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.

- [229] A. Sarusic. „Anwendung der Reaction Diffusion, Power Spectrum Centroid-Methode und Steger-Methode zur Laserpunkterfassung“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [230] R. Sboui. „Inbetriebnahme und Evaluierung von 2D/3D Laser-Profilsensoren“. Forschungspraxis. Technische Universität München, 2018.
- [231] M. Schreiber. „Stabilitätsuntersuchung eines Aufbaus der Lasertriangulation“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2019.
- [232] P. Schreiner. „Weiterentwicklung und Anwendung einer Multi-Sensor-Einheit“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2021.
- [233] A. Singh. „Analyse erweiterter Methoden und unterschiedlicher Rauscheinflüsse auf die Laserpunkterfassung“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [234] F. Smajli. „Kamerakalibrierung in der Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2020.
- [235] M. Sperr. „Vergleich von Algorithmen und Verfahren zur präzisen Laserpunkterfassung mit Subpixel-Genauigkeit“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2018.
- [236] D. Straubinger. „Stand der Technik von berührenden und nahen berührungslosen Wegsensoren“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2021.
- [237] S. Vasilescu. „Einfluss unterschiedlicher Kalibriermethoden auf die Distanzmessung mittels Lasertriangulation“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2019.
- [238] T. M. Vo. „Modeling and Optimization of Laser Spot Detection in a Laser Triangulation Setup“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [239] R. Wenninger. „Erhöhung der Empfindlichkeit eines Lasertriangulationsaufbaus mit fluoreszierenden Strukturen“. Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2021.
- [240] W. Zhang. „Methoden der optischen Entfernungsmessung“. Hauptseminar. Technische Universität München, 2018.
- [241] M. Zouaghi. „Charakterisierung des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Laserpunkterfassung“. Ingenieurpraxis. Technische Universität München, 2018.